

# Flyktfilter i tunnlar och gruvor

---

Carl Ljungkvist | Avdelningen för Brandteknik | LTH |  
LUNDS UNIVERSITET





# **Flyktfilter i tunnlar och gruvor**

**Carl Ljungkvist**

**Lund 2021**

**Titel:** Flyktfilter i tunnlar och gruvor  
**Title:** Escape filters in tunnels and mines

**Författare/Author:** Carl Ljungkvist

**Report:** 5632

**ISRN:** LUTVDG/TVBB--5632--SE

**Antal sidor/Number of pages:** 63

**Illustrationer/Illustrations:** Alla bilder och figurer i rapporten tillhör författaren om ingen annan källa är angiven/ All pictures and figures belong to the author if no other reference is stated.

### **Sökord**

Flyktfilter, flykthuvor, brandsäkerhet tunnlar, gruvor

### **Keywords**

Escape filters, escape hoods, fire safety, tunnels, mines

### **Abstract**

The aim of this thesis is to investigate and evaluate the use of escape filters during the construction phase of tunnels and mines. To achieve this aim three main research methods were used. Firstly, a literature review was produced to evaluate the current research about escape filters and fire safety during the construction phase of tunnels and mines. Secondly, interviews were conducted to find real-world examples of evacuation strategies and escape filter usage. Thirdly, a method to calculate the walking distance while using an escape filter was created and combined with a pre-existing one-dimensional evacuation model. The literature review found that very little research on the use and function of escape filters has been published. The interviews concluded that the main evacuation strategy was to either use a vehicle to exit the tunnel or walk to the closest rescue chamber and wait for rescue. The results from the evacuation model showed an increase in possible evacuation distance while using the escape filter. A sensitivity analysis showed that the results were highly sensitive to the reaction time and start distance. Therefore, further studies with escape filters in real fires are needed to validate the results.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2021

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2021.

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering  
Faculty of Engineering  
Lund University  
P.O. Box 118  
SE-221 00 Lund  
Sweden

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telephone: +46 46 222 73 60

## FÖRORD

Denna rapport är framtagen som ett examensarbete på Brandingenjörsprogrammet vid Lunds Tekniska Högskola. Rapporten har genomförts med hjälp av ett antal personer som alla har bidragit på olika vis.

Ett stort tack till min handledare Nils Johansson, universitetslektor vid avdelningen för brandteknik på LTH, som har guidat och stöttat mig genom arbetets gång.

Jag vill också tacka Håkan Frantzich, universitetslektor vid avdelning för brandteknik på LTH, för tillåtelse att använda hans beräkningsmodell samt hjälp med intervjukontakter.

Jag vill också rikta ett stort tack till alla de personer som hjälpt till under arbetets gång genom att svara på mail och frågor.

Slutligen vill jag tacka alla respondenter som ställde upp på intervjuer, utan er hade arbetet inte varit möjligt!



## SAMMANFATTNING

I Sverige blir det allt vanligare med olika tunnelprojekt. Under byggfasen i tunnelprojekt är det ofta få tillgängliga utrymningsvägar och långa utrymningsavstånd. Liknande problematik finns också i gruvor. För att hantera de långa utrymningsavstånden ställs det krav på olika åtgärder i AFS berg- och gruvarbete. En av dessa åtgärder är att så kallade flyktfilter ska finnas tillgängliga i de fordon som används under jord. Flyktfilter är en typ av andningsmask som filtrerar ut giftiga gaser ur inandningsluften.

Syftet med detta arbete är att identifiera hur flyktfilter används i dagsläget och genom beräkningar bedöma dess effektivitet. För att uppnå syftet används tre olika metoder. Den första metoden är en litteraturstudie som kartlägger den rådande forskningen kring brandsäkerhet i tunnlar och gruvor samt forskning om flyktfilter. Den andra metoden är intervjuer där respondenterna utgörs av relevanta personer som arbetar med brandsäkerhet i tunnlar och gruvor. Den tredje metoden består av en beräkningsmodell som tar i beaktning effektutveckling, rökspridning, toxicitet, utrymning och flyktfilter.

Litteraturstudien finner att de huvudsakliga problemen vid brand i en tunnel eller i en gruva är att det ofta finns få utrymningsvägar, att det råder långa utrymningsavstånd och omfattande rökspridning. Däremot hittas inga studier om hur flyktfilter presterar i verkliga brandscenarier. Intervjuerna exemplifierar de vanligaste utrymningsstrategierna som används vid brand. De består av att antingen utrymma till fots till närmsta räddningskammare eller att ta sig till ett fordon och använda det för att utrymma. Då kraven på flyktfilter är att de ska finnas i fordon, och inte på personen, är slutsatsen att detta med fördel bör utredas närmare av vidare forskning. Vidare visar beräkningarna i denna rapport att flyktfilter förlänger de utrymda avstånden, dock inte tillräckligt för att klara av utrymning i alla de fall som beräknades. Beräkningsmodellen uppvisar en hög känslighet för parametrarna som används, mer specifikt reaktionstid och startdistans. Rapporten synliggör att relevant forskning om reaktionstid och startdistans saknas, vilket leder till att de beräknade resultaten måste tolkas med en viss mån av försiktighet.

Rapportens resultat säkerställer flyktfilters effektivitet i den mån att de ökar utrymningsavstånden men beräkningsmodellen uppvisar samtidigt hög känslighet för parametrar med stor osäkerhet. Därför krävs det vidare studier för att validera resultaten. Den sammantagna slutsatsen av denna rapport är att arbetet belyser en viktig lucka i forskningsfältet kring flyktfilter i brandscenarier. Denna rapport är därför ett första steg till att fylla denna lucka, men också en uppmaning till vidare forskning kring flyktfilter.

## SUMMARY

Underground tunnel projects are becoming more common in Sweden. During the construction phase of tunnel projects there are often few available emergency exits and the egress travel distance is often long. Similar problems are also found in mines. In the AFS rock and mining work (AFS berg- och gruvarbete) there is a requirement which stipulates that several measures must be put into place to compensate for the long egress travel distances. According to one of these measures, a so-called escape filter must be available in all vehicles that are used underground. An escape filter is a type of breathing apparatus that filters out toxic gases from the air.

The aim of this thesis is to identify how escape filters are currently being used and through calculations assess their efficacy. To achieve this aim three different research methods are used. Firstly, a literary review to evaluate the current research on escape filters and fire safety during the construction phase of tunnels and mines. Secondly, interviews with respondents that work with fire safety in tunnels and mines. Thirdly, a one-dimensional evacuation model that considers heat release rate, smoke spread, toxicity, evacuation and escape filters.

The literary review concludes that the main issues with a fire in a mine or tunnel are that there often is substantial smoke spread, few available exits and the egress travel distance is long. No research on escape filters in real fire scenarios is found. The interviews make it clear that the most common egress strategies are either to walk to the closest rescue chamber or to use a nearby vehicle to completely evacuate the tunnel. The requirement that escape filters shall be available in vehicles, and not carried on the person, therefore needs to be further evaluated in future research. The results from the evacuation model shows that the use of escape filters increases the possible travel distances, but not enough to complete the evacuation in all scenarios that is calculated. The evacuation model displays high sensitivity to the input parameters of starting distance and reaction time. This thesis shows that relevant research regarding starting distances and reaction times is missing and that the results from the evacuation model needs to be interpreted with caution.

This thesis shows that escape filters increase the possible travel distances, however the evacuation model displays high sensitivity to inputs with a high degree of uncertainty. Therefore, further studies are needed to validate the results. This thesis demonstrates an important gap in the research about escape filter usage in fire scenarios and it is therefore an attempt to bridge this gap.





# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Syfte och mål .....	2
1.3	Frågeställningar .....	2
1.4	Avgränsningar .....	2
2	Metod .....	3
2.1	Litteraturstudie.....	3
2.2	Intervjuer .....	4
2.3	Beräkningsmodell.....	5
3	Litteraturstudie .....	6
3.1	Brandsäkerhet i tunnlar och gruvor .....	6
3.1.1	Brand .....	6
3.1.2	Brandrök.....	9
3.1.3	Ventilation.....	12
3.1.4	Utrymning .....	12
3.2	Regelverk för tunnlar och gruvor .....	14
3.2.1	Lagen om skydd mot olyckor.....	15
3.2.2	Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om berg- och gruvarbete .....	15
3.2.3	Plan- och bygglagen .....	15
3.2.4	Brandskydd i gruv- och berganläggningar – samlade råd och anvisningar .....	16
3.3	Flyktfilter .....	16
3.3.1	SS-EN 403:2004 Filterskydd med huva vid brand.....	17
3.3.2	SS-EN 404:2005 Andningsskydd – Flyktfilter mot kolmonoxid.....	18
4	Intervjuer .....	19
5	Presentation av beräkningsmodell.....	22
5.1	Ursprunglig beräkningsmodell .....	22
5.2	Ändringar av beräkningsmodellen.....	23
5.2.1	Modellering av SS-EN 403:2004 .....	24
5.2.2	Ändring av effektutvecklingen.....	26
5.3	Presentation av scenario .....	30
6	Resultat.....	33
6.1	Scenario A – Borrigg .....	33
6.2	Scenario A – Hjullastare.....	35

6.3	Scenario B – Borrigger	39
6.4	Scenario B – Hjulastare	41
7	Känslighetsanalys	44
7.1	Känslighetsanalys av befintliga parametrar	44
7.2	Känslighetsanalys av införda parametrar	48
7.3	Jämförelse av känslighetsanalys	53
8	Diskussion	56
8.1	Resultatdiskussion	56
8.2	Metodikdiskussion	58
9	Slutsats	60
10	Framtida studier	61
10.1	Filtertest	61
10.2	Utreda krav på flyktfilter i fordon	61
10.3	Jämförelse av flyktfilter med andra tekniska lösningar	61
11	Referenser	62

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Tunnelbyggen blir allt vanligare både i Sverige och internationellt. Stora investeringar görs varje år av Trafikverket och tunnlar byggs allt oftare i komplexa storstadsmiljöer (Ingason, Frantzich, de Laval, & Daram, 2009). Under det tidiga 2000-talet skedde ett antal uppmärksammade bränder i tunnlar, bland annat år 2001 i St. Gotthard tunneln där elva personer miste livet (Beard & Carvel, 2005). Detta gjorde att frågan om tunnelsäkerhet fick ökad uppmärksamhet, då mer specifikt gällande säkerhet när tunneln är i bruk. Bränder i byggfasen av en tunnel har i jämförelse undersökts väldigt lite, trots att bränder i byggfasen kan riskera människors liv och orsaka stora förseningar av tunnelprojekt (Ingason, Lönnermark, Frantzich, & Kumm, 2010).

Byggfasen av en tunnel börjar med konstruktionen av flera arbetstunnlar. Arbetstunnlarna gör det möjligt att nå fram med maskiner och utrustning till den plats där den faktiska tunneln ska borras. Utifrån en arbetstunnel sker borring på flera olika platser och i flera olika riktningar. Detta påskyndar borrhningen av tunneln, men det gör samtidigt att en eventuell brand i arbetstunneln kan blockera den enda utrymningsvägen för flera olika arbetslag. Utöver arbetstunnlar byggs också ledningstunnlar, räddningstunnlar och andra typer av kulvertar. Gemensamt för dessa typer av tunnlar är att de ofta har långa avstånd till utrymningsvägar och vanligtvis används uteslutande under byggfasen (Ingason, Lönnermark, Frantzich, & Kumm, 2010). Liknande problematik med långa utrymningsavstånd finns också inom gruvindustrin (Hansen, 2009).

För att hantera de långa utrymningsavstånden finns det krav på räddningskammare och flyktfilter i Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om berg- och gruvarbete (Arbetsmiljöverket). I de allmänna råden ges en rekommendation på två olika standarder av flyktfilter. Ett flyktfilter är en andningsmask med eller utan huva som har ett filter som filtrerar bort olika skadliga gaser ur inandningsluften. Flyktfiltren är designade för engångsbruk och är endast funktionella en viss bestämd tid. Syftet med flyktfiltren är att de ska reducera mängden giftiga gaser som andas in under en utrymning och därmed utöka det möjliga utrymningsavståndet. Kraven som ställs i föreskrifterna för berg- och gruvarbete på flyktfilter utgår från det antal personer som kan transporteras i de fordon som används i tunneln och inget krav finns på att personerna ska bära med sig egna flyktfilter. Då flyktfilter är en av åtgärderna för att hantera de långa utrymningsavstånden bör de undersökas närmare.

I *Fire Incidents during construction work of tunnels – Evacuation aspects* tar Frantzich (2010) fram en endimensionell beräkningsmodell där avståndet som en person kan utrymma i en tunnel beräknas. Modellen beaktar tunnelstorlek, effektutveckling, rökspridning, doser av giftiga ämnen och gånghastighet kopplat till sikt (Frantzich, 2010). Modellen beaktar inte flyktfilter men den skulle efter vidareutveckling kunna göra det och på så sätt användas för att undersöka den effekt ett flyktfilter kan ha vid en utrymning.

## 1.2 Syfte och mål

Syftet med arbetet är att identifiera och utvärdera hur flyktfilter används i tunnlar och gruvor idag. Arbetet syftar även till att genom beräkningar som tar hänsyn till rökspridning, dos av kolmonoxid och utrymning att bedöma flyktfilters effektivitet. Resultaten av beräkningarna analyseras och används till grund för rekommendationer av hur flyktfilter ska användas i projektering och i praktiken.

Målet med arbetet är att identifiera hur flyktfilter skulle kunna användas för att öka säkerheten i tunnlar och gruvor.

## 1.3 Frågeställningar

För att uppnå arbetets syfte och mål har följande frågeställningar formulerats:

- Vad är ett flyktfilter och var används dem idag?
- Vilken problematik finns kopplat till utrymning i tunnlar och gruvor?
- Vilka krav, standarder och rekommendationer finns det för flyktfilter idag?
- Vad finns det för belägg för flyktfilters effektivitet?
- Vilka strategier finns för användandet av flyktfilter i ett utrymningsscenario?
- Uppfyller flyktfilter den tänkta funktionen vid utrymning med långa avstånd och rökfyllnad?

## 1.4 Avgränsningar

Då kravet på flyktfilter endast gäller då berg- och gruvarbete sker i tunnlar och gruvor kommer den här rapporten endast att beröra situationer då den här typ av arbete genomförs. För väg- och spårtunnlar kommer därför fokus vara på byggfasen. Det betyder att denna rapport enbart berör väg- och spårtunnlar innan de är i bruk. I gruvor gäller kravet så länge gruvtunnlarna inte är färdigställda, inredda berggrum och rapporten berör därför arbetet fram tills att detta sker. Kravet på flyktfilter är kopplat till svensk lagstiftning och därför kommer rapporten vara avgränsad till tunnlar och gruvor i Sverige. Beräkningsmodellen är begränsad till att endast hantera en person som utrymmer till fots.

## 2 Metod

Arbetet har genomförts i tre huvudsakliga delar. Först en litteraturstudie kring arbetsmiljön i tunnelsystem och flyktfilter. Sedan intervjuer med personer som har erfarenhet kring användandet av flyktfilter. Den tredje delen består av beräkningar med hjälp av en beräkningsmodell. De tre metoderna kommer sammantaget försöka svara på samtliga frågeställningar. Vissa av metoderna kommer överlappa i vilka frågeställningar de svarar på, se Tabell 1 för en översikt över vilka frågeställningar de olika metoderna berör. Metoden för de olika delarna presenteras i följande avsnitt.

Tabell 1. Översikt av vilka metoder som besvarar de olika frågeställningarna

Frågeställning	Litteraturstudie	Intervju	Beräkningsmodell
Vad är ett flyktfilter och vart används dem idag?	X	X	
Vilken problematik finns kopplat till utrymning i tunnlar och gruvor?	X	X	
Vilka krav, standarder och rekommendationer finns det för flyktfilter idag?	X		
Vad finns det för belägg för flyktfilters effektivitet?	X		X
Vilka strategier finns för användandet av flyktfilter i ett utrymningsscenario?	X	X	
Uppfyller flyktfilter den tänkta funktionen vid utrymning med långa avstånd och rökfylld?		X	X

### 2.1 Litteraturstudie

Som första delen av arbetet genomfördes en litteraturstudie. Litteraturstudien berör två huvudsakliga områden, arbetsmiljö i tunnlar och gruvor samt flyktfilter. Syftet med att undersöka arbetsmiljön i tunnlar var att ge en generell bakgrund till de olika problem med säkerhet som finns i tunnlar under byggfasen. En betydande del av arbetsmiljön beror på de lagar och föreskrifter som finns varvid dessa också undersöktes. Det andra området som undersöktes i litteraturstudien var flyktfilter. Syftet med det var att ge en förståelse för vad flyktfilter är och hur de fungerar.

Litteraturstudien har haft följande struktur:

1. Fastställande av vilka sökord och databaser som ska användas
2. Selektion av källor genom att läsa titel och sammanfattning/abstrakt
3. Urval av källor genom att läsa hela publikationen
4. Bearbetning av material från litteraturen

För att hitta relevant litteratur som berör säkerheten i tunnlar och gruvor har sökmotorn LUBsearch använts. Det är en sökmotor som ger tillgång till stora delar av Lunds Universitetsbibliotek i form av artiklar, e-böcker och böcker (LUB, 2020). Sökningen gjordes först på svenska och sen med motsvarande ord på engelska för att ge en så bred sökning som möjligt, se Tabell 2. Sökningen genomfördes hösten 2020. Selektionen av litteratur har gjorts utifrån dess relevans för uppsatsen men en bedömning kring dess vetenskaplighet med fokus på källhänvisningar och utgivare har också tagits med i selektionen.

Tabell 2. Sökord på svenska och engelska som användes

Sökord på svenska	Sökord på engelska
Tunnel + brand	Tunnel + fire
Tunnel + säkerhet	Tunnel + safety
Tunnel + utrymning	Tunnel + evacuation
Gruva	Mine
Gruva + brand	Mine + fire
Gruva + evakuering	Mine + evacuation
Flyktfilter	Escape filter
Flykthuva	Emergency hood
-	Emergency filter
-	Emergency filter + mask

När ett par källor hade identifierats som lämpliga användes även deras källhänvisningar för att hitta ytterligare relevant litteratur. Totalt användes cirka femton artiklar till litteraturstudien, som samtliga är refererade till i arbetet.

## 2.2 Intervjuer

För att ge en fördjupad förståelse kring arbetsmiljön i tunnlar och gruvor samt olika strategier för flyktfilter och dess praktiska användning genomfördes fem intervjuer med totalt sex respondenter. Den initiala kontakten med personer att intervjua etablerades via Håkan Frantzych (Universitetslektor vid avd. för brandteknik, LTH) och de kontakter han gjort genom sin forskning kring tunnlar. Lämpliga personer som är relevanta för frågeställningen bestämdes sedan med hjälp av en diskussion med handledaren. Under intervjuerna fick respondenterna också möjligheten att rekommendera andra personer som de ansåg skulle vara relevanta för området enligt snöbollsmetoden (Goodman, 1961). Syftet med intervjuerna är att ge en fördjupad kunskap kring flyktfilter och något praktiskt exempel på hur de används, därför har fokus varit på ett antal intervjuobjekt som alla har olika yrkesroller kopplat till flyktfilter. Då några av respondenterna kommer i kontakt med flyktfilter utifrån olika arbetsroller har också intervjufrågorna i vissa fall varit anpassade utifrån det.

Respondenterna kontaktades först på mejl där de fick en kort introduktion till examensarbetet och frågan om de ville delta samt om de kände någon annan som också skulle kunna vara relevant att intervjua. Själva intervjun genomfördes via telefon eller Microsoft Teams och inleddes med en kort bakgrund kring examensarbetet och en förklaring av hur intervjuprocessen går till. Efter det ställdes ett antal frågor, se Appendix A för fullständiga frågeformulär. Intervjun spelades in och utifrån inspelningen sammanfattades intervjun i en löpande text. Sammanfattningen skickades till respondenten för granskning. Eventuella

ändringar genomfördes tills sammanfattningen blev godkänd av respondenten. De godkända sammanfattningarna utgör det fullständiga materialet som används från intervjuerna.

Intervjumetoden är en blandning mellan öppen och halvstrukturerad. Detta då intervjuerna har följt ett frågeformulär som består av uteslutande öppna frågor. En öppen riktad intervju har endast frågeområden och en halvstrukturerad intervju blandar öppna frågor med frågor med fasta svarsalternativ, därför är intervjumetoden en blandning. Den blandade metoden valdes för att också få en blandning av utforskande, beskrivande och förklarande syfte (Höst, Regnell, & Runeson, 2006). Utforskande syfte i att tillföra ny information som inte hittades i litteraturstudien. Beskrivande och förklarande för att fördjupa delar av den information som hittades i litteraturstudien.

### 2.3 Beräkningsmodell

För att försöka besvara frågeställningen ”Vad finns det för belegg för flyktfilters effektivitet?” och ” Uppfyller flyktfilter den tänka funktionen vid utrymning med långa avstånd och rökfyllnad?” används en beräkningsmodell. Beräkningsmodellen utgår från en beräkningsmodell som Frantzich (2010) har utvecklat och är ett script i MATLAB, se avsnitt 5 för en mer detaljerad beskrivning. Den ursprungliga beräkningsmodellen omarbetades för att inkludera flyktfilter och användes sedan för att beräkna utrymningsavståndet vid en brand. Samtliga införda parametrar i den ändrade beräkningsmodellen undersöks med en känslighetsanalys.



### 3 Litteraturstudie

I följande avsnitt presenteras en sammanställning av den information som framkom i litteraturstudien. Informationen berör brandsäkerhet i tunnlar och gruvor, de lagar, regler och föreskrifter som gäller samt information om flyktfilter.

#### 3.1 Brandsäkerhet i tunnlar och gruvor

Tunnlar i byggfasen och gruvor generellt är komplexa miljöer då de är i ständig förändring. För en tunnel börjar arbetet med att en arbetstunnel byggs fram till där huvudtunneln ska borras. Detta görs på flera platser samtidigt så att olika sektioner av tunneln kan borras samtidigt och på så sätt påskynda arbetet (Ingason, Lönnemark, Frantzich, & Kumm, 2010). Om en brand sker innan eller efter de olika sektionerna har kopplats samman kommer det att ha stor påverkan på både brandförloppet, utrymning och räddningstjänstens insats. Om en brand sker innan eller efter genombrott är därför enligt Lönnemark et al. (2015) den enskilt viktigaste faktorn vid en brand i en tunnel. Ingason et al. (2010) identifierar ytterligare fyra faktorer som skiljer omständigheterna i tunnlar i byggfasen från bruksfasen. Dessa är 1) fysiska och geometriska förhållandena 2) brandbelastningen 3) möjligheten att evakuera och 4) genomföra en räddningsinsats. Brandsäkerhetsproblemen i en gruva är liknande de problem som tunnlar har (Hansen, 2009), men i gruvor sammankopplas inte tunnlar på samma sätt. Förhållandena i gruvor påminner därför mest om tunnlar innan genombrott sker. I de två följande avsnitten kommer det redogöras mer i detalj hur detta påverkar både brand och utrymning.

##### 3.1.1 Brand

Mellan 2005 och 2015 rapporterades det i genomsnitt cirka 70 brandtillbud per år i Sveriges gruvor. År 2015 var bränderna orsakade av fordon (32st), el (12st) och heta arbeten (12st). Objekten som oftast brinner är också fordon (Gramko Arbetsgrupp brand, 2015). Då fordon är de vanligaste orsakerna till brand men också det vanligaste som brinner i en gruva har det genomförts storskaliga brandtester på fordon som är vanliga i en gruva. Enligt Hansen & Ingason (2013) som genomförde brandtester på en hjullastare och en borrhugg i en övergiven gruva, kommer den huvudsakliga brandbelastningen i en gruva från däckerna samt hydraulolja och hydraulslangar som finns på de olika fordonen i en gruva. Hjullastaren innehöll en total energimängd på cirka 76 GJ och borrhuggen en total energimängd på 46 GJ. Den väldigt stora energimängden i fordonen och att fordonen flyttas gör att brandbelastningen på en given plats hela tiden förändras. I en annan artikel av Hansen (2009) konstaterades det att en brand oftast startar genom att en hydraulslang brister och de finfördelade dropparna av hydraulolja träffar en het yta och antänds. Branden sprider sig sedan vidare till fast material i närheten och utvecklas ytterligare. Slutligen når branden däckerna som efter antändning producerar stora mängder tät rök och bidrar till en hög effektutveckling. Hansen & Ingason mätte i sina tester bland annat effektutvecklingen som för hjullastaren uppnådde en topp efter elva minuter på 15,9 MW och för borrhuggen efter 21 minuter på 29,4 MW. Trots den höga effektutvecklingen så antändes aldrig framdäcken på hjullastaren och delar av borrhuggen. Detta beror bland annat på att de omgivande ytorna i tunneln kyls ner av brandgaserna vilket gör att en fullständig övertändning inte är troligt (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001).

För väg- och spårtunnlar har det genomförts flertalet experiment i bruksfasen. Bland annat METRO-projektet (Ingason, o.a., 2012) där man eldade ett tunnelbanetåg i en spårtunnel och även ett antal försök med bilar (Hadjisophocleous, Lee, & Park, 2012) och lastbilar (Ingason

& Lönnermark, 2005) i vägtunnlar. Då det saknas fullskaliga försök i byggstadiet av en tunnel kan istället de försök som har gjorts för gruvor användas. Detta då miljön är snarlik och liknande typer av maskiner används (Ingason, Lönnermark, Frantzych, & Kumm, 2010).

Ett annat alternativ är att använda sig av de ekvationer Ingason (2009) har tagit fram. Ekvationerna bygger på att en effektutvecklingskurva uttrycks med hjälp utav endast en exponentiell funktion. Ekvationen antar enhetliga förhållanden vilket gör att den enda indata som krävs är den maximala effektutvecklingen, totala energiinnehållet och en fördröjningskoefficient. Resten av parametrarna som behövs går att beräkna utifrån de samband Ingason har tagit fram. Ekvationen beräknar effektutvecklingen för ett antal olika objekt där indata är känd och summerar dem sedan, se (1). Med denna metod går det därför att ta fram en sammansatt effektutvecklingskurva för ett objekt där man endast känner effektutvecklingen av dess olika delar.

$$\dot{Q} = \sum_{s=1}^p \dot{Q}_{max,s} * n_s * r_s * (1 - e^{-k_s*t})^{n_s-1} * e^{-k_s*t} \quad (1)$$

Där

$p$  är det totala antalet föremål som ska summeras

$s$  är numret på föremålet

$\dot{Q}_{max,s}$  är den maximala effektutvecklingen mätt i kW

$t$  är tiden i sekunder

$n_s$  är fördröjningskoefficienten

$r_s$  är amplitudkoefficient

$k_s$  är tidsbredd konstant

För att kunna beräkna de parametrar som saknas i (1) används (2)-(4).

$$r_s = \left(1 - \frac{1}{n_s}\right)^{1-n_s} \quad (2)$$

$$k_s = \frac{\dot{Q}_{max,s}}{E_{tot,s}} * r_s \quad (3)$$

$$t_{max,s} = \frac{\ln(n_s)}{k_s} \quad (4)$$

Där  $E_{tot,s}$  är det totala energiinnehållet för föremål  $s$ .

Ekvation (1) går också att använda för att beskriva en effektutveckling som har uppmätts med hjälp av experiment. Då kan ekvation (5) användas för att approximera fördröjningskonstanten  $n$  så att den beräknade effektutvecklingskurvan stämmer med den uppmätta.

$$n \approx 0,74294e^{(2,9Q_{max}t_{max}/E_{tot})} \quad (5)$$

Ingason (2005) har också tagit fram en ekvation för temperaturen på de brandgaser som sprids nedströms i tunnlar. Han gör det genom att först ställa upp en generell energiekvation för endimensionellt flöde i en tunnel. Den ekvationen går endast att lösa numeriskt. Dock kan följande ekvation erhållas genom att anta en lumped heat capacity för både värmestrålnings- och konvektionsförlusterna samt att anta att en tredjedel av effektutveckling strålar bort från branden:

$$T_{avg,x=0}(\tau) = T_a + \frac{2}{3} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a c_p} \quad (6)$$

Ekvationen beräknar den genomsnittliga temperaturen i grader Celsius för tunneltvärsnittet vid avståndet  $x$  meter från branden vid den skenbara tiden  $\tau$ .  $Q(\tau)$  är effekten i kW vid den skenbara tiden  $\tau$ . Massflödet av luft mäts i kg/s, betecknas  $\dot{m}_a$  och beräknas utifrån tunnels volym samt ventilationens hastighet. Värmekapaciteten mäts i kJ/kg och betecknas  $c_p$ . För att få fram den skenbara tiden  $\tau$  vid platsen där den genomsnittliga temperaturen beräknas används följande ekvation:

$$\tau = t - \left(\frac{x}{u}\right) \quad (7)$$

Där  $t$  är den globala tiden i sekunder,  $x$  är avståndet till branden i meter och  $u$  är hastighet i m/s som röken färdas.

En ekvation som motsvarar (6) fast beräknar genomsnittlig gaskoncentration har också tagits fram av Ingason. Den ser ut på följande vis:

$$X_{avg,i} = Y_i \frac{M_a}{M_i} \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a \chi H_T} \quad (8)$$

Där  $Y_i$  är massan av gasen  $i$  som bildas vid en välventilerad brand och mäts i kg/kg. Molekylmassan av luft,  $M_a$ , och molekylmassan av gasen  $i$ ,  $M_i$ , mäts båda i gram/mol.  $Q(\tau)$  är som tidigare effekten i kW vid den skenbara tiden  $\tau$ , där  $\tau$  beräknas med hjälp av (7). Tillsammans bildar  $\chi H_T$  den effektiva förbränningsvärmens som mäts i MJ/kg. Med hjälp av data om hur mycket av en gas som bildas vid förbränning, effektutvecklingen samt ekvation (7) går det att beräkna olika gaskoncentrationer vid en brand i en tunnel.

Ekvationerna för rökspridning och temperatur har delvis validerats i modellförsök av Ingason (2005).

### 3.1.2 Brandrök

Vid alla bränder så bildas det brandrök. Brandröken består av en blandning av gaser, vätskedroppar och fasta sotpartiklar. Brandröken är relevant vid en brand då den förutom att försämra sikten och på så sätt försvåra utrymning också är mycket skadlig för människor. De huvudsakliga gaserna som bildas är vattenånga, koldioxid och kolmonoxid (Karlsson & Quintiere, 2000). Beroende av vilket typ av material det är som brinner bildas också en mängd olika skadliga ämnen så som väteklorid, vätecyanid, vätefluorid och så vidare. Kolmonoxid och vätecyanid är så kallade kvävande gaser vilket betyder att de ersätter syret i blodet och på så sätt kväver en person. Höga nivåer av kolmonoxid bundet till hemoglobin, kallat kolmonoxidhemoglobin eller COHb, i blodet är vanligt i personer som har omkommit i en brand och kolmonoxid antas därför ofta vara den huvudsakliga anledning till ett dödsfall i en brand där personen inte har allvarliga brännskador (Purser D. A., Combustion Toxicity, 2016). Väteklorid och vätefluorid agerar istället irriterande på lungorna då de är frätande. Vid tillräckligt höga koncentrationer kan detta vara dödligt. Skillnaden i de fysiologiska konsekvenserna som kvävande respektive irriterande gaser har ger också skillnader i hur koncentrationer av en gas påverkar. En hög koncentration av en irriterande gas märks direkt genom att det svider i ögon och lungor medan effekten av kvävande gas kommer vara beroenden av den dos som har andats in. De kvävande gasernas effekt är därför beroende av både koncentrationen och tiden som personen vistats i den givna koncentrationen. Koldioxid är inte i sig giftigt men höga koncentrationer leder till en ökad andningsfrekvens vilket i sin tur leder till en större inandning av giftiga gaser. Då syre förbränns vid bränder kan en syrefattig också miljö uppstå. I brandtester har det dock visat sig att generellt så uppnås en skadlig miljö på grund av kolmonoxid och vätecyanid långt innan syrenivån blir så låg att den är skadlig.

För att kunna avgöra efter hur lång tid en person som exponeras för brandrök antingen svimmar eller avlider har Purser (1987) tagit fram en beräkningsmodell kallad fractional effective dose eller FED. Nedan följer en förklaring av hur beräkningsmodellen fungerar utifrån Purser & McAllister (2016) kapitel i SFPEs Handbook of Fire Protection Engineering.

Beräkningsmodellen bygger på att de olika giftiga gaserna är additiva, alltså att det går addera ihop för att ge en total effekt. Modellen börjar med att en total dos av en giftig gas som krävs för till exempel avsvimning fastställs. För varje tidssteg beräknas koncentration av den giftiga gasen som personen exponeras för och multipliceras med tidssteget. Den produkten divideras sedan med den totala dosen vilket ger den fraktion av den totala dosen som det tidssteget bidrar med, se (9).

$$F_i = \frac{\textit{konc. gas} * \textit{tid}}{\textit{konc.* tid till avsvimning}} \quad (9)$$

Alla tidssteg summeras sedan vilket ger den totala dos som personen har utsatts för. Är summan lika med 1 har avsvimning skett då den dos vid vilken avsvimning sker vid har uppnåtts. Samma princip fast med dos för att en person avlider går också använda. Den generella ekvationen för FED visas i (10).

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(Ct)_i} \Delta t \quad (10)$$

Där  $C$  är den genomsnittliga koncentrationen för gasen  $i$  över det valda tidsintervallet,  $\Delta t$  i minuter. Slutligen är  $(Ct)_i$  den specifika dosen av exponering som krävs för till exempel avsvimning på grund av specifik gas  $i$ . Den mäts i koncentration multiplicerat med minuter. Det fall av FED där avsvimning mäts kallas fractional incapacitating dose eller FID och det fall då död uppstår kallas fractional lethal dose eller FLD.

I de fall där branden, och därför också kolmonoxidkoncentrationen, varierar mycket kan det vara användbart att integrera kolmonoxidkoncentration kurvan över tiden istället för att använda en genomsnittlig koncentration. Resultatet av integrationen är direkt korrelerat till koncentrationen av kolmonoxid i blodet, COHb, och det går därför att uttrycka FED som en fraktion av kolmonoxidkoncentration i blodet dividerat med den COHb som krävs för till exempel avsvimning. Uttrycket för det presenteras i (11).

$$F_{co} = \frac{3,317 * 10^{-5} [CO]^{1,036} * V * t}{D} \quad (11)$$

Där [CO] är kolmonoxidkoncentrationen i luften mätt i ppm.  $V$  är volymen luft i liter som andas in varje minut.  $t$  är tiden exponerad i minuter.  $D$  är den dos som krävs för avsvimning eller död uttryckt i procent COHb. Både  $V$  och  $D$  varierar med aktivitetsnivån för den exponerade personen.

Som tidigare nämnt kan en syrefattigmiljö uppstå vid en brand. Även fast det är vanligare att en farlig miljö uppstår på grund av kolmonoxid och vätecyanid så kan avsaknaden av syre fortfarande vara en bidragande faktor vid förgiftning. Purser & McAllister (2016) anpassade data från tester med människor som utsattes för låga koncentration av syre. Det gav upphov till (12) som ger tid till avsvimning  $t_{I_0}$  i minuter och där  $\%O_2$  är procent syre i luften.

$$t_{I_0} = e^{(8,13-0,54(20,9-\%O_2))} \quad (12)$$

Omvandlat till fraktion av dos ger det (13), där som tidigare  $t$  är tid i minuter.

$$F_{O_2} = \frac{1}{e^{(8,13-0,54(20,9-\%O_2))}} t \quad (13)$$

För kvävande gaser så som kolmonoxid ökar upptaget på grund av ökningen i andningsfrekvens och leder till kortare tid till avsvimning och död. Den ökade andningsfrekvensen på grund av koldioxid beräknas enligt (14) där  $\%CO_2$  är procent koldioxid i inandningsluften.

$$VCO_2 = \frac{e^{(0,1903*\%CO_2+2,0004)}}{7,1} \quad (14)$$

En förenklad summering av hur koldioxid, kolmonoxid och en avsaknad av syre skulle samverka vid avsvimning eller död presenteras i (15).

$$F = F_{CO} * VCO_2 + F_{O_2} \quad (15)$$

Där  $F_{CO}$  är fraktionen kolmonoxid,  $VCO_2$  är den ökade andningsfrekvensen på grund utav koldioxid i liter per minut och  $F_{O_2}$  är bidraget till fraktionen på grund av låg syrehalt. Blir  $F$  lika med 1 har personen uppnått en tillräckligt stor dos för att svimma eller avlida, beroende på vilken det är som beräknas.

Purser har genomfört försök på råttor som visar att de skadliga effekterna från olika material som brinner kan förutses med hjälp av den additiva metoden som används i FED-metoden och därmed validerat modellen (2012).

Det är inte bara giftiga gaser i brandröken som kan vara skadligt. Brandröken kan också ge upphov till skador på grund av dess höga temperatur. Skadorna uppstår genom värmestrålning och konvektion till en persons hud. Purser (1989) tog fram följande ekvation för tiden en person tolererar att exponeras för konvektiv värme:

$$t_{lh} = e^{5,1849-0,0273T} \quad (16)$$

Där  $t_{lh}$  är tiden i minuter och  $T$  är temperaturen i grader Celsius. Precis som för giftiga gaser går det att beräkna en dos av konvektiv värme som krävs för avsvimning eller död, se (17).

$$F_{lh} = \frac{1}{e^{5,1849-0,0273T}} \quad (17)$$

Värmestrålning går att beräkna enligt följande ekvation (Purser & McAllister, 2016):

$$q = \varepsilon\sigma(T_i^4 - T_m^4) \quad (18)$$

Där  $\varepsilon$  är emissiviteten,  $\sigma$  är Stefan Boltzmanns konstant,  $T_i$  är värmekällans temperatur i Kelvin och  $T_m$  temperaturen i Kelvin på materialets som mottar strålningen.

Beräkningarna för värmestrålning och konvektion är svåra att kombinera med FED-beräkningarna som berör giftiga gaser och modelleras därför ofta separat (Purser & McAllister, 2016).

### 3.1.3 Ventilation

Ventilationen är en stor faktor vid alla bränder som sker under jord. En tunnel med god ventilation kan ge en ökad effektutveckling och ett snabbare brandförlopp medan i slutet av en tunnel, där ventilationen är sämre, kan det motsatta ske. Ventilationen kommer också spela stor roll för hur rökspridningen kommer ske i en tunnel. Under arbetet i en tunnel skapas stora mängder damm vid borringen. För att leda bort dammet och förse arbetarna med frisk luft används mekanisk ventilation. Frisk luft förs in via ventilationskanaler som går från tunnelns öppning ända fram till fronterna som borringen sker vid (Gehandler & Ingason, 2018). Luftflödet varierar mellan 5 - 50 m<sup>3</sup>/min beroende på arbetsplatsen (Ingason, Lönnemark, Frantzich, & Kumm, 2010). I en gruva ser det annorlunda ut då antalet från- och tilluftskanaler kan variera och luftflödet kan vara upp till 3 - 4 m/s (GRAMKO, 2016).

Vid en brand kommer varma brandgaser bildas. De varma brandgaserna kommer vara lättare än omgivande luft och därför stiga uppåt och breda ut sig utmed taket på en tunnel. Om brandgaserna har tillräcklig stor temperaturskillnad mot omgivande luft och rökplymen har tillräcklig rörelsemängd kommer ett distinkt brandgaslager bildas. Detta kallas för stratifiering och motverkas till viss del av att rökplymen drar in luft då den färdas uppåt. Allteftersom branden utvecklas kommer stratifieringen att minska då mer luft dras in i plymen. Vid god ventilation sker ibland ett fenomen som kallas återströmning. Då störs stratifieringen nedströms från branden av luftens rörelsemängd medan den bibehålls uppströms av branden. Ett annat fenomen som påverkar rökspridningen i tunnlar är skorstenseffekten. I en tunnel med stor lutning och en stor mängd varma brandgaser kommer brandgaserna få ett större flöde och stigningskraft. Om en tunnel endast är öppen i en ände kommer flödet av brandgaser skapa ett undertryck som gör att frisk luft sugas in utmed golvet (Gehandler & Ingason, 2018).

Om en brand sker i en tunnel innan genombrottet har skett kommer den mekaniska ventilationen som förser arbetarna med frisk luft ha störst påverkan på rökspridningen. Ett kontinuerligt flöde av luft fram till änden på tunneln kommer skapa ett motsatt flöde ut av luft. Vid en brand kommer den mekaniska ventilationen förse branden med syre och göra att brandgaserna rör sig mot tunnels öppning. Beroende på brandens placering och storlek kan branden potentiellt förstöra den ventilationstrumma som den friska luften färdas genom och på så sätt ändra riktning på flödet av brandgaser (Frantzich, 2010).

### 3.1.4 Utrymning

Som tidigare konstaterat är den enskilt viktigaste faktorn vid brand i en tunnel om genombrott har skett och tunneln har sammanlänkats (Lönnemark, o.a., 2015). Det gäller även för utrymning där det innan genombrott endast finns en utrymningsväg och efter genombrott finns möjligheten till två utrymningsvägar. Innan genombrottet sker kommer dessutom tunneln hela tiden bli längre vilket ökar avstånden vid utrymning (Frantzich, 2010). I gruvor sker inte genombrott på samma sätt och gruvor är i regel mycket mer komplexa med många olika tunnlar och olika nivåer som man arbetar på (Johnsson & Kaj, 2016).

Den fysiska miljön i både tunnlar och gruvor karaktäriseras av ojämnt underlag, dålig sikt, högljutt arbete samt blöta och hala ytor, vilket bidrar till försvårad utrymning. Miljön beror på

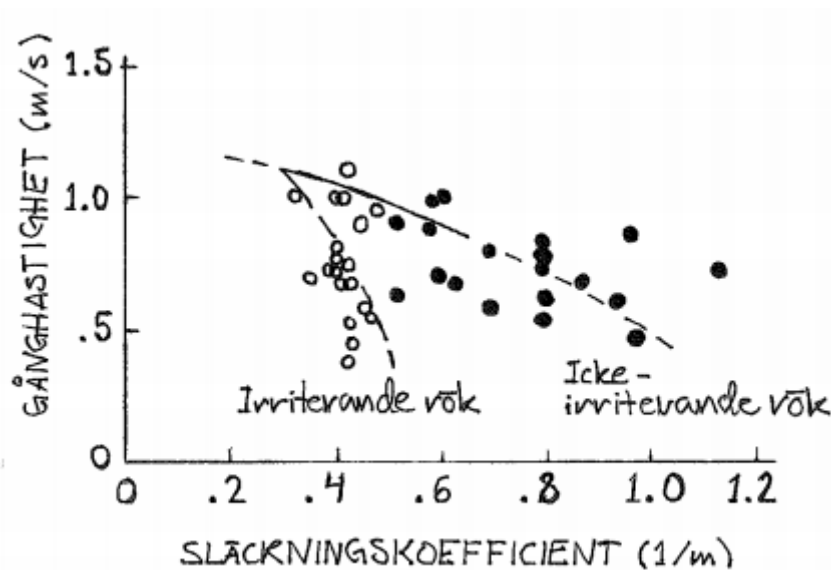
om tunneln byggs med hjälp av en fullortsborrmaskin eller med sprängning, där en tunnel som det sprängs i ofta anses ha en sämre fysisk miljö. I en tunnel kommer miljön förbättras allteftersom arbetet fortskrider och efter genombrottet påminna mer om en normal byggarbetsplats. Vid detta stadie kommer också en annan typ av personal börja arbeta på tunneln. Denna personal är också mer van vid en vanlig byggarbetsplats och kan därför förväntas vara sämre medveten om de speciella risker som finns i en tunnel. En generell problematik är också att de olika entreprenaderna som samarbetar vid tunnelbygget kan ha olika nationaliteter och därför tala olika språk men också olika synsätt på säkerhet. Den här typen av problematik hanteras bäst genom organisatoriska lösningar. Viktigt är att ett gemensamt språk talas av åtminstone förmännen och att samma typ av radiokommunikationssystem används så det går att få kontakt med de olika bygglagen. En annan viktig åtgärd är att ha regelbundna utrymningsövningar, både för att öva utrymning och för att öka medvetenheten om brandsäkerhet. (Frantzich, 2010).

De långa utrymningsavstånden hanteras både i gruvor och tunnlar med hjälp av bland annat räddningskammare. I tunnlar är de ofta mobila och flyttas allt eftersom arbetet fortskrider (Frantzich, 2010) medan i gruvor finns det både mobila och stationära räddningskammare. En räddningskammare är en containerliknande konstruktion som ska stå emot brand, skydda och tillhandahålla andningsluft i åtta timmar för de antal personer som räddningskammaren är designad för (GRAMKO, 2016). I gruvor rekommenderas det att om avståndet mellan två oberoende utrymningsvägar är större än 750 meter så ska en räddningskammare finnas (GRAMKO, 2016). I AFS 2010:1 anges avståndet 200 - 300 meter vara lämpligt mellan räddningskammare och brytfronten beroende på lutning, avstånd till andra utrymningsvägar och så vidare. Det är här krav på flyktfilter kommer in för att kompensera för de långa utrymningsvägarna. Utöver räddningskammaren ska det också finnas skyltning, nödbelysning, kommunikationsutrustning, brandlarm och utrymningslarm för att underlätta vid utrymning (Frantzich, 2010). Krav på dessa finns i AFS 2010:1.

En annan viktig utrymningsaspekt är användandet av fordon, ofta tåg i spårgruvor eller annars bilar. Både i tunnlar och gruvor används det både fordon under arbetet och för att ta sig till arbetsplatsen om avstånden är långa. Detta möjliggör att utrymningen i vissa fall kan ske med hjälp av fordon och på så sätt underlätta utrymningen (Frantzich, 2010).

En av de mest grundläggande parametrarna för att kunna beräkna den tid det tar för att utrymma är gånghastighet. Gånghastighet varierar med ett antal personliga faktorer så som ålder, kön och så vidare. Gånghastigheten vid en brand varierar också med yttre faktorer så som sikten genom brandrök och huruvida brandrök är irriterande eller inte (Yamada & Akizuki, 2016). I experiment av Jin & Yamada (1985) fick personer gå längs med en korridor i både icke-irriterande och irriterande rök vilket gav upphov till resultaten i Figur 1. Figuren visar tydligt att gånghastigheterna sjunker vid irriterande rök.





Figur 1. Schematiskt samband mellan släckningskoefficient och gånghastighet för irriterande och icke-irriterande rök. Figur inspirerad av Jin & Yamada (1985)

### 3.2 Regelverk för tunnlar och gruvor

Det finns i Sverige idag ett par allmänna lagar som berör den övergripande säkerheten i tunnlar och mer specifika lagar som skiljer sig åt om det är en vägtunnel, spårtunnel eller järnvägstunnel. De övergripande lagarna som gäller är Lagen om skydd mot olyckor (2003:778), hädanefter LSO, Plan- och bygglagen (2010:900), hädanefter PBL och Arbetsmiljölagen (1977:1160), hädanefter AML. LSO ställer krav på ägare av en anläggning att utföra riskanalyser, förse anläggningen med utrustning för brandsläckning och livräddning (Transportstyrelsen, 2016). PBL reglerar via plan- och byggförordningen, hädanefter PBF, byggnadsverkets säkerhet i händelse av brand och säkerhet vid användning. AML reglerar bland annat säkerheten på olika arbetsplatser och innefattar därför både de som arbetar i tunneln samt räddningstjänsten när de genomför en insats i en tunnel (Gehandler, Ingason, Lönnemark, Frantzich, & Strömgren, 2013).

Vägtunnlar styrs av lagen om säkerhet i vägtunnlar (2006:418) och förordningen om säkerhet i vägtunnlar (2006:421). De båda anger inga specifika krav på utformning eller säkerhetsnivå utan detta görs istället i Transportstyrelsens föreskrifter (TSFS 2015:27). Trafikverket har också ett internt regelverk som gäller för tunnlar och kallas TRVK tunnel 11 och TRVR tunnel 11. Detta regelverk gäller för tunnlar som byggs i statlig regi men i praktiken används det ofta av andra byggherrar också. Järnvägstunnlar i Sverige regleras av järnvägslagen som införlivar EU reglerna gällande järnvägar i svensk lag. Lagen (1990:1157) och förordningen (1990:1165) om säkerhet vid tunnelbana och spårvägen är de regler som styr säkerheten i tunnelbanan (Transportstyrelsen, 2016). Alla dessa lagar och föreskrifter fokuserar på säkerheten när en tunnel är färdigställd och i bruksfasen. För att reglera säkerheten i byggfasen av tunnlar är det istället de mer övergripande lagarna som LSO, PBL och Arbetsmiljölagen som gäller. Dessa lagar är också de som gäller för gruvor (GRAMKO, 2016). Se följande avsnitt om de krav som ställs på gruvor och tunnlar i de olika lagarna.

### 3.2.1 Lagen om skydd mot olyckor

LSO ställer ett generellt krav på ägare av en byggnad eller anläggning att tillhandhålla utrustning för släckning av brand och att vidta åtgärder för att förebygga brand och förhindra samt begränsa de skador som kan uppstå vid brand. Detta uppfylls genom att bedriva ett systematiskt brandskyddsarbete i enlighet med SRVFS 2004:3.

### 3.2.2 Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om berg- och gruvarbete

Arbetsmiljöverket ger ut föreskrifter där man i detalj reglerar arbetsmiljön inom olika områden. En av dessa är Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om berg- och gruvarbete (AFS 2010:1) vilket är den föreskrift som gäller i gruvor och vid byggnation av tunnlar. Föreskriften syftar att förebygga ohälsa och olycksfall vid berg- och gruvarbetet genom ett antal åtgärder med tillhörande rekommendationer. Föreskrifterna är bindande medan allmänna råd är en generell rekommendation på hur en föreskrift ska uppfyllas. Under rubriken fordon finns föreskrift § 16 som säger följande:

*”I fordon och maskiner som nyttjas under jord ska finnas tillräckligt många flyktfilter för det antal personer som kan transporteras i fordonet eller maskinen. Flyktfilter ska förvaras på ett sådant sätt att de inte skadas, är lättåtkomliga samt hålls rena och funktionsdugliga.  
Flyktfilter kan även vara personliga”*

Under de allmänna råden ges följande kommentar till § 16:

*”Antalet flyktfilter bör vara minst lika stort som antalet personer som maximalt kan transporteras i eller på fordonet. Det är viktigt att flyktfiltrens funktion regelbundet kontrolleras och att personer lär sig hantera dem. Exempel på flyktfilter finns i standarderna SS EN 403 ”Andningsskydd – Flyktfilterskydd med huva vid brand – Fodring, provning, märkning” och SS EN 404 ”Andningsskydd – Flyktfilter – Fodring, provning, märkning”.*”

Standarderna SS EN 403 och SS EN 404 är idag upphävda och har ersatts med SS-EN 403:2004 *Andningsskydd – Flyktfilterskydd med huva vid brand – Fodringar, provning, märkning* respektive SS-EN 404:2005 *Andningsskydd – Flyktfilter mot kolmonoxid – Fodringar, provning, märkning*. Föreskriften anger inte specifikt att flyktfiltren är till för att skydda mot brand men de standarder som rekommenderas är för flyktfilter som skyddar mot brandgaser. Standarderna är gemensamma för hela Europa enligt Svenska Institutet för Standarder (2020), (2020a).

Utöver kravet på flyktfilter är det också ett antal krav för brand och utrymning.

- Utrymningslarm vid brand, seismisk händelse eller gasutsläpp måste finnas.
- De olika arbetsställena ska ha två av varandra oberoende utrymningsvägar, går det ej att ordna ska åtgärder vidtas som gör undsättning eller utrymning möjlig.
- Utrymningsövningar ska genomföras årligen och uppgifter om hur många personer och var de befinner sig ska finnas tillgängliga.
- Brandbelastningen ska vara så låg som möjligt och förhindring av spridning av brandgaser ska ske
- Brandbekämpningsutrustning ska finnas tillgänglig.

### 3.2.3 Plan- och bygglagen

Tunnlar som är avsedda för väg, järnväg eller tunnelbana och gruvor innefattas inte av kravet på bygglov som finns i PBL (GRAMKO, 2016) (Boverket, 2017). Men då tunnlar räknas som

byggnadsverk så ska anläggningarna i en gruva uppfylla de tekniska egenskapskrav som finns i händelse av brand (GRAMKO, 2016). Dessa krav är samma som för en vanlig byggnad och finns i PBF och är följande:

1. Byggnadsverkets bärförmåga vid brand kan antas bestå under en bestämd tid
2. Utveckling och spridning av brand och rök inom byggnadsverk begränsas
3. Spridning av brand till närliggande byggnadsverk begränsas
4. Personer som befinner sig i byggnadsverket vid brand kan lämna det eller räddas på annat sätt
5. Hänsyn har tagits till räddningsmanskapets säkerhet

För att uppfylla kraven finns kapitel 5 i BFS 1993:57 Boverkets byggregler – föreskrifter och allmänna råd (BBR) som ger råd för hur brandskyddet ska utformas. BBR gäller för färdiga anläggningar men innefattar inte specifik information om undermarksanläggningar och endast korta delar berör själva byggfasen. Till hjälp finns också BFS 2011:27 Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd som berör verifiering av brandskyddet (GRAMKO, 2016).

### 3.2.4 Brandskydd i gruv- och berganläggningar – samlade råd och anvisningar

Gruvindustrin har via sin intresseorganisation SveMin skapat en arbetsgrupp för arbetsmiljösäkerhet kallad GRAMKO (SveMin, 2020). Arbetsgruppen arbetar bland annat med brandsäkerhet och ger ut ett dokument kallat Brandskydd i gruv- och berganläggningar – samlade råd och anvisningar (GRAMKO, 2016) som är en samling av information och råd kring brandsäkerhet i olika typer av undermarksanläggningar. Dokumentet går igenom de krav som ställs i AFS, LSO och PBL och hur de kan uppfyllas på olika sätt.

## 3.3 Flyktfilter

Flyktfilter är en typ av andningsmask som används för att filtrera ut partiklar och giftiga gaser ur inandningsluft. Vilka gaser som filtreras ut beror på vilken av de två standarderna som filtret är designat för att klara. Gemensamt för båda standarderna är att partiklar och kolmonoxid filtreras bort (Svenska Institutet för Standarder, 2020). Kemikalier som filtrerar kolmonoxid från luft uppfanns redan 1918 och går under samlingsnamnet Hopcalite. Hopcalite består av koppar- och manganoxider som verkar som katalysatorer för omvandlingen av kolmonoxid till koldioxid vid rumstemperatur (Lamb, Bray, & Frazer, 1920). Liknande katalysatorer används idag bland annat i Sundström Safety's filter, som är en svensk tillverkare av flyktfilter. Allt eftersom flyktfiltret används kommer katalysatorernas förmåga att omvandla kolmonoxid till koldioxid försämrats och slutligen verkar filtret inte längre. Katalysatorn som används i filtren är väldigt känsliga för fukt och de vacuumpackas därför i lufttäta påsar. Om filtren exponeras för fukt under tillverkning eller förvaring kan funktionen mot kolmonoxid vara helt borta (Sundström Safety, personlig kommunikation 5 november, 2020).

Utöver den generella informationen som har presenterats och standarderna som rekommenderas i AFS 2010:1 har totalt fyra olika rapporter om flyktfilter hittats. Ett examensarbete vid Umeå Universitet (Aaro, 2012) och två rapporter från FOI (Thorpsten & Thunéll, 2017) (Jönsson, 1993) som alla enbart undersöker användarvänlighet. Ytterligare en rapport från FOI hittades där koldioxidhalten i inandningsluften undersöktes (Loncar, 1996). Inga rapporter där praktiska försök i rök har genomförts eller där halter av kolmonoxid i flyktfiltret har mätts har hittats. Därför utgår analysen i arbetet utifrån att funktionen som

beskrivs i de två standarder som rekommenderas i AFS 2010:1 upprätthålls i verkliga situationer. De två standarderna presenteras i följande avsnitt.

### 3.3.1 SS-EN 403:2004 Filterskydd med huva vid brand

Den här standarden är för ett flyktfilter i kombination med huva som ska användas vid brand. Flyktfiltret består av ett munstycke kopplat till ett filter samt en huva.



Figur 2. Exempel på flyktfilter som uppfyller SS-EN 403:2004. Bild använd med tillåtelse från Sundström Safety

Huvan ska vara tät mot rök och ha ett visir så den går att se ut genom. Flyktfiltret testas för att motstå följande skadliga gaser som kan uppstå vid brand: propenal, väteklorid, vätecyanid och kolmonoxid. Flyktfiltret fästs på en maskin som reglerar luftflöde, luftfuktighet och gaskoncentration. Testerna gör med en gas i taget och genomförs vid en specifik gaskoncentration i inandningsluften medan mätning av gaskoncentrationen sker i masken. Masken ska klara femton minuter utan att en förbestämmd koncentration, kallad genombrottskoncentration, uppmätts i masken. Se Tabell 3 för fullständiga värden.

Tabell 3. Koncentrationer av gaser vid testning

Gas	Koncentration gas i inandningsluft [ppm]	Genombrottskoncentration [ppm]
Propenal	100	0,5
Väteklorid (HCl)	1000	5
Vätecyanid (HCN)	400	10
Kolmonoxid (CO)	2500 5000 7500 10 000	200

Genombrottsvärdet för kolmonoxid gäller för genomsnittlig koncentration över fem minuter. Koncentrationen kan alltså vara högre än 200 ppm en kort stund utan att masken underkänns. Testerna för kolmonoxid sker med ett luftflöde av 100 liter per minut. Det är i kontexten ett högt värde då Purser & McAllister (2016) anger ett värde på 25 liter per minut för en person som går i normal takt för att utrymma. Standarden tillåter också utöver genombrottsvärdet för filtret ett generellt läckage i andningszonen på grund av att masken är otät som inte får överstiga 5 %. I den okulära zonen tillåts läckage upp till 20 %. Testningen av läckage i masken görs enligt standarden SS-EN-13274-1. Testningen görs med svavelhexafluorid och

koncentrationen av den i luften,  $C_1$ , samt medelkoncentrationen i masken,  $C_2$ , mäts kontinuerligt under testet. Läckaget i masken beräknas sedan på följande sätt:

$$P (\%) = \frac{C_2}{C_1} * 100 \quad (19)$$

Standarden säger också att masken ska vara brandtålig och det testas genom att utsätta den för en 800 grader varm låga och observera om den antänds. Ytterligare egenskaper som testas är hållbarhet vid mekanisk påverkan samt tryckförändringar, sikt genom visir, kommunikation och så vidare.

### 3.3.2 SS-EN 404:2005 Andningsskydd – Flyktfilter mot kolmonoxid

SS-EN 404:2005 är standarden för ett flyktfilter utan huva som skyddar mot partiklar och kolmonoxid vid brand. Flyktfiltret består enbart av ett munstycke med ett filter kopplat till det. Testningen för denna standard ser något annorlunda ut då testningen endast görs vid 2500 ppm kolmonoxid. Filter delas istället in i olika klasser och typer beroende på vid vilket luftflöde de testas för och hur lång tid de klarar innan genombrottskoncentrationen uppnås. För typ A ska den totala mängden kolmonoxid som uppmäts inne i masken under hela testet inte överstiga 400 ml. För typ B så ska den totala mängden kolmonoxid inte överstiga 200 ml och den genomsnittliga koncentrationen över fem minuter ska inte heller överstiga 200 ppm. Se Tabell 4 för de olika klasserna.

Tabell 4. Luftflöde och minimum testningstid

Klass	Volymflöde [l/min]		Minimum testningstid [min]
	Typ A	Typ B	
FSR 1	30	40	60
FSR 2	30	40	75
FSR 3	30	40	90
FSR 4	30	40	120

Då gränsen för den här standarden är en total mängd kolmonoxid mäts inte läckaget in i masken separat utan genombrott genom filtret och läckage måste båda tillsammans vara under tillåtna mängden kolmonoxid.

## 4 Intervjuer

I det här avsnittet presenteras en sammanställning av den information som förmedlades i intervjuerna. Se appendix A för fullständiga sammanfattningar av intervjuerna.

Totalt genomfördes fem intervjuer med sex respondenter. Respondenternas bakgrund varierade men alla arbetade med tunnlar eller gruvor på något sätt. Respondenternas arbetstitlar var bland annat senior specialist för tunnelsäkerhet, yttre befäl vid en räddningstjänst, arbetsmiljöspecialist och så vidare.

Samtliga respondenter menade att tunnlar utgör en väldigt krävande arbetsmiljö. Den fysiska miljön karakteriseras av buller, damm, dålig belysning, ojämna ytor och en fuktig miljö. I ett tunnelprojekt är det den tidiga fasen, när man driver tunnel, som har den hårdaste miljön och miljön förbättras allt eftersom arbetet fortskrider. Den fysiska miljö i gruvor liknar den i tunnlar men då majoriteten av arbetet sker från ett fordon är ändå den miljö som arbetarna huvudsakligen vistas i god. I både tunnlar och gruvor är antalet personer som arbetar vid varje front relativt litet, vanligtvis 5 - 10 personer. När större servicearbeten eller installationer sker ökar antalet personer. Allt eftersom flera olika fronter börjar grävas så ökar också personantalet.

Beskrivningar av den övergripande geometrin för tunnlar och gruvor skiljer sig åt. Gruvorna beskrivs som större och mer komplexa med ett stort nätverk av olika tunnlar och gruvorter. De har i regel också fler permanenta rum och verkstäder. Tunnlar som byggs för vägar eller spårbanor har mindre komplexa geometrier med färre permanenta delar.

Samtliga respondenter ansåg att de maskiner och fordon som används i tunnlar och gruvor utgör den största brandrisken. På grund av den hårda och dammiga miljön är slitaget högt på de maskiner som används i arbetet och risken för att problem med maskinerna uppstår ökar. En av respondenterna menade att brand i en personbil inte utgör så stor risk då volymen i tunneln är så pass stor i förhållande till branden. Flera av respondenterna som arbetar med väg- och spår-tunnlar nämnde också det plastmembran som används för att dränera och tätatunneln. Då membranet är brännbart utgör det en stor brandbelastning och installeras dessutom helt exponerat i taket på tunneln. Utöver det anläggs det också serviceverkstäder under jord för att minska avstånden när maskiner ska servas. I serviceverkstäderna används det till exempel gasflaskor som kan utgöra en brandrisk. För att minska riskerna med brand i maskiner och fordon finns det regler kring hur och var fordonen får parkeras, hur ofta de ska servas och att de ska ha släcksystem.

De största problemen vid en brand i en tunnel är tillgången till olika utrymningsvägar, de långa utrymningsavstånden och svårigheter i att larma personal. Beroende på vilket skede tunnelbygget är finns det bara tillgång till en utrymningsväg och då är också ofta utrymningsavstånden väldigt långa. Då det är bullrigt och dålig sikt i en tunnel i byggskedet är det svårt att ha utrymningslarm som personalen uppfattar. I närheten av fronten sker dessutom sprängningar vilket gör att det inte går att ha några fast tekniska installationer. Ofta används därför mobiltelefoner för att larma om en brand uppstår. I gruvor uppstår liknande problem som i tunnlar men på grund av de mer komplexa tunnelsystemen är också en omfattande rökspridning ett problem. Röken från brand i ett fordon kan färdas långa avstånd och försvåra utrymningen från flera platser. Ur räddningstjänstens perspektiv är det största problemet vid en brand i en tunnel att inträngningsvägarna blir väldigt långa och ofta är de

rökfyllda. Ett ytterligare problem är att räddningstjänstens radiokommunikation inte alltid fungerar under jord vilket kan omöjliggöra insatser.

Utrymningsstrategi är snarlik för både tunnlar och gruvor. Vid brand ska personalen evakuera till närmaste säkra plats. I en tunnel är närmsta säkra plats utanför tunnel medan det i en gruva är räddningsrum på de övre nivåerna. Ofta sker utrymningen med fordon då det kan röra sig om stora avstånd. Kan personalen inte ta sig till en säker plats ska de istället ta sig till närmaste räddningskammare och invänta instruktioner. Fordonen som används för att utrymma ska vara parkerade så att de står i rätt färdriktning för att utrymma. För tunnelprojekt kan strategin ändras beroende på vilket skede projektet är i. Om projektet har kommit så långt att de båda parallella tunnlar är brandtekniskt avskilda finns möjligheten att evakuera till en parallell tunnel. Då räddningskammare utgör en viktig del i utrymningsstrategin är placeringen av dessa kritisk. Optimalt vore räddningskammaren placerad så när fronten som möjligt men på grund av de sprängningar som görs vid fronten måste den placeras längre bort. Ett vanligt avstånd är 200 – 300 meter från fronten.

Räddningstjänstens mål vid en brand i en tunnel är att genomföra livräddning om det behövs, de går inte in och släcker bränder som inte utgör någon fara för människor. Deras huvudsakliga strategi utgår från att en rekognoseringsgrupp går in för att hitta de kortaste angreppsvägarna vid vilka man sedan kan utrymma folk med hjälp av medtagna luftpaket.

Både i tunnlar och gruvor genomförs utrymningsövningar för hela arbetsplatsen minst en gång om året. Utrymningsövningar för mindre arbetslag sker också årligen. Ett problem som uppstår vid byggen av väg- och spårtunnlar är att man väntar med utrymningsövningarna tills sent i projektet då stora delar av det tekniska installationsarbetet är genomfört. Detta görs för att utrymningsövningarna ska kunna testa de tekniska delarna av brandskyddet, men riskerar att man har sämre koll på utrymningen i det tidiga byggskedet. De större utrymningsövningarna genomförs ofta med räddningstjänsten på plats för att överse hur organisationen hanterar en olycka. Räddningstjänsten har också regelbundna möten med ägarna av projektet där säkerhetsfrågor diskuteras.

Samtliga respondenter kände till flyktfilter och att de fanns på de gruv- och tunnelprojekt de arbetar med. Majoriteten angav att flyktfiltren var av typen med huva. I regel var kunskapen lägre för de fem respondenter som arbetar med tunnelprojekt då majoriteten av arbetsmiljöansvaret ligger hos de entreprenören som bygger tunnlar. Flyktfiltren som används i de olika projekten var av typen med huva och filter. I väg- och spårtunnelprojekten var flyktfiltren kopplade till de fordon man transporteras i och fanns i samma antal som platser i fordonet. Detsamma gäller för gruvor men tar man sig till fots någonstans görs en bedömning om flyktfiltret ska bäras med eller inte. Personalen i gruvor är instruerade att använda flyktfiltren först när de kan se röken. De intervjuobjekt som arbetade med väg- och spårtunnelprojekt såg inte flyktfiltren som en oumbärlig del i deras utrymningsstrategier utan såg det främst som ett komplement. I gruvprojekt hade avsaknaden av flyktfilter gjort att riskerna hade varit större och i vissa fall hade riskerna kanske bedömts vara för stora för att genomföra arbetet. Flera av respondenterna vid väg- och spårtunnelprojekt uttryckte också att de tycker att det saknas tydlig information om flyktfiltren samt verkliga exempel och försök där det går att se att flyktfiltren gör en skillnad. En av respondenterna menar att om det fanns tydligare forskning kring flyktfiltrens effektivitet så hade de kunnat användas i bruksskedet som alternativ till de trycksatta korridorer som endast används vid kontroll av tekniska

installationer ett fåtal gånger på år. Respondenten som arbetar med gruvor menar att tiden som flyktfiltren klarar av som är angiven av tillverkaren är när de testas i väldigt extrema fall. I verkligheten är den rök som personer exponeras för mycket mer utblandad och flyktfiltren håller därför längre än vad tillverkaren anger. Respondenten anser snarare att problemet är det obehag som uppstår av att bära flyktfiltret under en längre tid.

Endast respondenten som arbetar med gruvor har varit med om bränder under jord på sin arbetsplats. Respondenten menar att insatserna och utrymningen i regel går bra då de har mycket rutiner och organisation kring just bränder. Hade det inte gått bra vid bränderna hade inte gruvorna kunnat bedriva den verksamhet de gör. Respondenten uppskattar att det sker ett par händelser per år och gruva där flyktfilter används vid utrymningen.

Respondenten från räddningstjänsten anser att de krav på flyktfilter som finns idag är rimliga. Ett krav på att flyktfilter alltid ska bäras med av personalen tycker respondenten är orimligt och riskerar snarare att flyktfiltren skadas under arbetet och sedan inte fungerar korrekt när de ska användas.



## 5 Presentation av beräkningsmodell

I följande avsnitt presenteras först hur den ursprungliga beräkningsmodellen av Frantzich (2010) är uppbyggd och vilka antagande som används. Efter det presenteras de ändringar och tillhörande antaganden som har införts i modellen.

### 5.1 Ursprunglig beräkningsmodell

Den ursprungliga beräkningsmodellen är framtagen av Frantzich (2010) i en rapport som syftar att identifiera olika viktiga aspekter vid utrymning av en tunnel i byggfasen. Rapporten är en del i ett större forskningsprojekt som Myndigheten för samhällsskydd och beredskap finansierade för att undersöka brandsäkerhet i tunnelbyggnationer.

Beräkningsmodellen bygger inte på några nya ekvationer som är framtagna av Frantzich utan är en kombination av flera befintliga ekvationer i ett och samma script. Ekvationer för effektutveckling (2009), rökspridning och brandgastemperatur (2005) är från Ingason. FED-modellen och tillhörande ekvationer är från Purser (1987). Sambanden mellan gånghastighet och brandgaser är från Jin & Yamada (1985). Nedan presenteras en ingående beskrivning av den beräkningsmodell som Frantzich har gjort med hjälp av dessa ekvationer.

Beräkningsmodellen är endimensionell vilket medför att parametrar så som temperatur eller vindhastighet är desamma över hela tvärsnittet och varierar endast beroende på avståndet till branden. Beräkningsmodellen utgår från en tunnel innan genombrott har skett och att en brand uppstår längst in närmast fronten. Branden är definierad utifrån dess totala energi och effektutveckling. För att beräkna effektutvecklingen används ekvation (1) – (5) från Ingason (2009) som presenteras i avsnitt 3.1.1 Brand. Förflyttningen av den brandrök som bildas förutsätts ske helt beroende på den hastighet vid vilken den mekaniska ventilationen tillför frisk luft till fronten. Beräkningsmodellen antar alltså att den mekaniska ventilationen inte går sönder under hela brandförloppet. Temperaturen på brandröken beräknas med ekvation (6) – (7) från Ingason (2005) som presenteras i avsnitt 3.1.1.

Bildandet av de sotpartiklar och giftiga gaser som utgör brandröken beräknas utifrån hur mycket bränsle som förbränns. Frantzich har använt följande värden:

Tabell 5. Massa gas eller partiklar som bildas per gram förbränt bränsle

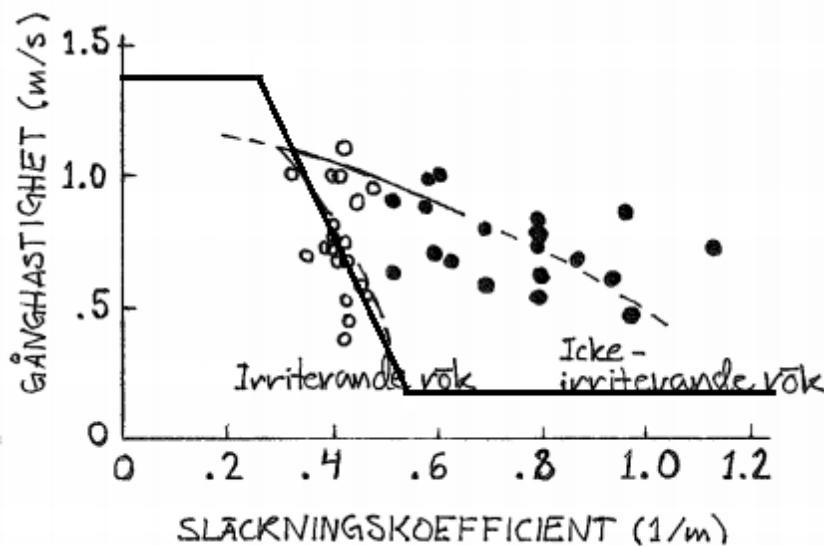
Ämne	Produktion [g/g]
Sotpartiklar	0,15
CO <sub>2</sub>	2,5
CO	0,05

Koncentrationen av partiklar eller gas på ett givet avstånd och en given tid från branden beräknas med hjälp av ekvation (7) – (8) från Ingason (2005) som presenteras i avsnitt 3.1.1.

I beräkningsmodellen antas personen som utrymmer befinna sig ett visst avstånd från branden innan utrymningen startar, som kallas startdistans. En viss fördröjning förväntas också ske innan personen börjar själva utrymningen. Detta är för att ta med den tid då personen först ska upptäcka branden men också om personen väljer att försöka bekämpa branden innan

utrymningen påbörjas. Denna tid kallar Frantzich för reaktionstid. När reaktionstiden har uppnåtts kommer personen befinna sig på det angivna avståndet startdistans. Det antas i modellen att den utrymmande personen inte exponeras för brandgaser eller värme under reaktionstiden. Detta antagande bygger på att det i det initiala skedet av en brand bildas ett distinkt brandgaslager och att personen därför inte exponeras för brandgaserna. Det är först senare i brandförloppet som brandgaserna är väl blandade med övrig luft och när personen som utrymmer.

Beräkningsmodellen är begränsad till att endast beräkna utrymningen för en person. Gånghastigheten vid utrymningen bestäms utifrån sikten som i sin tur är beroende av rökspridningen. Sikten beräknas om till släckningskoefficient och används tillsammans med sambandet för irriterande rök från Jin & Yamada (1985) för att ge gånghastigheten. Frantzich har här gjort en linjär förenkling med en högsta gånghastighet på 1,4 m/s, en lägst gånghastighet på 0,2 m/s och ett linjärt samband där i mellan enligt Figur 3.



Figur 3. Samband mellan gånghastighet och släckningskoefficient enligt heldragen linje. Ursprunglig figur inspirerad från Jin & Yamada (1985) med heldragen linje från Frantzich (2010)

För att beräkna när både avsvimning och död sker används ekvation (10) – (15) från Pursers FED-modell (2016). Ekvationerna innefattar både avsvimning och död på grund utav kolmonoxid, syrebrist och värme samt ökad andningsfrekvens på grund utav koldioxid. Kolmonoxid är alltså den enda direkt giftiga gasen som modelleras och Frantzich bortser därför från bland annat vätecyanid och väteklorid. Frantzich har valt att mäta tid och avstånd till då  $FED = 0,3$  och  $FED = 1,0$  uppnås samt tid till  $FLD=1$ .  $FED = 0,3$  valdes då detta är ett vanligt designvärde för maximal exponering under utrymning och  $FED= 1,0$  då det är då en person förväntas svimma.  $FLD = 1$  valdes då det är då en person förväntas avlida.

Beräkningarna i modellen sker med ett fast tidssteg på 0,5 minuter i totalt 240 tidssteg för ett förlopp som varar 120 minuter.

## 5.2 Ändringar av beräkningsmodellen

För att kunna beräkna vilken effekt flyktfiltren har på utrymningsavståndet så har Frantzich beräkningsmodell använts som grund. Flyktfiltrens primära funktion är att de begränsar mängden kolmonoxid som kan andas in. Det som kommer vara annorlunda mot Frantzich

beräkningsmodell är därför mängden kolmonoxid som personen exponeras för. Då majoriteten av respondenterna angav att de använde sig av den typ av flyktfilter som har en huva på deras arbetsplatser kommer endast modellering av SS-EN 403:2004 göras.

### 5.2.1 Modellering av SS-EN 403:2004

SS-EN 403:2004 kommer modelleras genom att begränsa kolmonoxidkoncentrationen till 200 ppm, som är den högsta tillåtna genombrottskoncentrationen, och utöver det addera ett läckage på 5 % enligt standarden. Vid en koncentration kolmonoxid i luften som är lägre än genombrottskoncentrationen 200 ppm så adderas inte läckaget då detta skulle ge en högre kolmonoxidkoncentration i masken än i den omgivande luften, vilket hade varit felaktigt.

Så vid en koncentration av kolmonoxid i luften på  $X$  ppm skulle koncentrationen i masken bli följande:

$$Konc_{CO\ i\ mask} = X\ ppm\ (då\ X < 200) \quad (20a)$$

$$Konc_{CO\ i\ mask} = 200\ ppm + X\ ppm * 0,05\ (då\ X > 200) \quad (20b)$$

Att beräkningarna antar att flyktfiltret släpper igenom hela koncentrationen av kolmonoxid under 200 ppm överensstämmer troligtvis inte helt med verkligheten men används ändå för att vara konservativ i de beräkningar som utförs.

Då kolmonoxid filtreras bort från inandningsluften omvandlas den av filtret till koldioxid. Mängden koldioxid som bildas av filtreringen är försumbar i jämförelse med den som bildas i branden, se Tabell 5, och kommer därför bortses från.

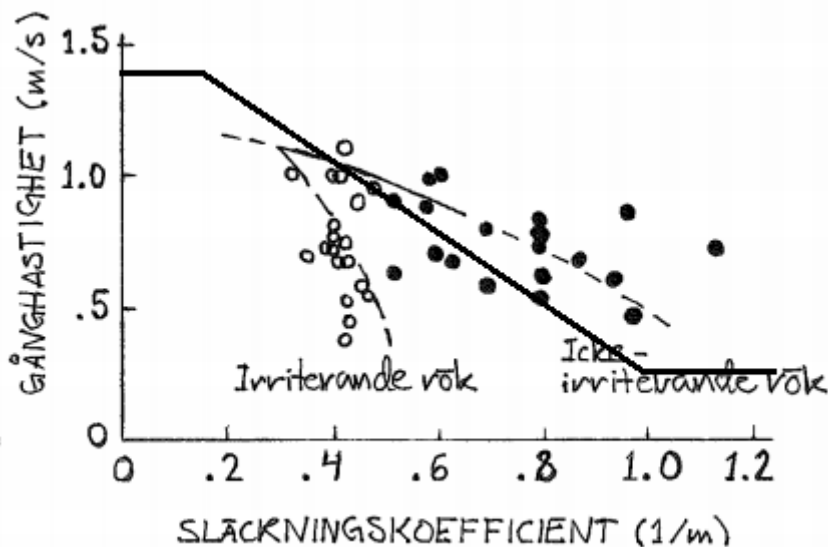
Enligt standarden så ska flyktfiltret klara de krav på läckage och genombrottskoncentrationer som ställs i minst femton minuter. Detta sker med ett volymflöde av 100 liter/min. Som tidigare nämnt är detta en hög siffra i jämförelse med vad man kan förvänta sig under en utrymning. Purser & McAllister (2016) menar att 25 liter/min är representativt för att utrymma, vilket Frantzich också använder sig av. Då utrymning i en gruva eller tunnel sker i en tuff fysisk miljö med halt och ojämnt underlag och ofta i lutning antas därför volymflödet vara 50 liter/min vilket motsvarar långsamt springande eller att gå uppför trappor. Halten av COHb i blodet då avsvimning sker justeras då till 20 % enligt Purser & McAllister beräkningsmodell. Då volymflödet filtret testas för är dubbelt så stort som volymflödet i beräkningsmodellen görs antagandet att filtret kommer bibehålla sin filtrerande förmåga dubbelt så länge, alltså 30 minuter, än vad som anges i standarden. Filtret tappar sin filtrerande förmåga på grund utav att katalysatorn förbrukas då den utsätts för fukt samt när den omvandlar kolmonoxid till koldioxid. Då volymflödet är lägre i verkligheten än i standarden utsätts också filtret för mindre mängd fukt och kolmonoxid och det är därför rimligt att anta att filtret kommer hålla längre än de femton minuter som det har testats för. Antagandet om ett volymflöde på 50 liter/min anses vara konservativt medan antagandet om filtrets hållbarhet är svårare att bedöma. Filtrets hållbarhet modelleras så att efter 30 minuter så upphör den filtrerande förmågan helt vilket om man bortser från den antagna tiden är konservativt då den filtrerande förmågan hade i verkligheten avtagit under en tid istället för att helt upphöra. De 30 minuterna räknas från då branden startar, inte när personen som

utrymmer kommer i kontakt med brandröken. Detta är för att förenkla beräkningarna och anses vara konservativt antagande.

Då SS-EN 403:2004 har en tillhörande huva kommer den delvis skydda mot den irriterande rök som bildas vid bränder. Experimenten som genomfördes av Jin & Yamada (1985) gav två olika samband mellan gånghastighet och släckningskoefficienten beroende på om röken var irriterande eller inte. För SS-EN 403:2004 antas därför huvan och visiret helt skydda mot irriterande rök, trots ett tillåtet läckage på maximalt 20 %, vilket ger gånghastighet enligt sambandet för icke-irriterande rök. Då detta antagande får anses vara icke-konservativt kommer antagandets påverkan på resultatet undersökas noggrannare i känslighetsanalysen. För att få fram gånghastigheten för icke-irriterande rök har samma metod som Frantzich använder sig av för irriterande rök använts. Metoden approximerar mätdata från Jin & Yamada (1985) till tre olika samband. Ett konstant värde för den maximala gånghastigheten, ett konstant värde för den minimala gånghastigheten och en linjär ekvation där i mellan. Ekvationen i spannet där gånghastigheten ändras blir då följande:

$$\text{Gånghastighet} = 1,675 - 1,375 * \text{släckningskoefficient} \quad (21)$$

Figur 4 illustrerar anpassningen av mätvärden från Jin & Yamada.



Figur 4. Samband mellan släckningskoefficient och gånghastighet för icke-irriterande rök enligt heldragen linje.

Heldragen linje av författaren, ursprunglig figur inspirerad från Jin & Yamada (1985)

Tabell 6 visar det matematiska sambandet för gånghastigheten.

Tabell 6. Samband mellan släckningskoefficient och gånghastighet för icke-irriterande rök

Släckningskoefficient [1/m]	Gånghastighet [m/s]
0 - 0,2	1,4
0,2 – 1,0	$1,675 - 1,375 * \text{släckningskoefficient}$
1,0 <	0,3

Sammantaget ger det följande antaganden som införs då beräkningsmodellen ändras för att räkna med flyktfilter:

- Flyktfiltret släpper igenom all kolmonoxid under genombrottskoncentrationen
- Andningsfrekvensen är 50 liter per minut vid utrymningen av en tunnel, Frantzich använde 25 liter per minut
- Filtertiden är 30 minuter vid en andningsfrekvens på 50 liter per minut
- Gånghastigheten då flyktfilter används följer gånghastigheten för icke-irriterande rök trots tillåtet läckage i huvan
- Koldioxiden som bildas vid filtreringen bortses från

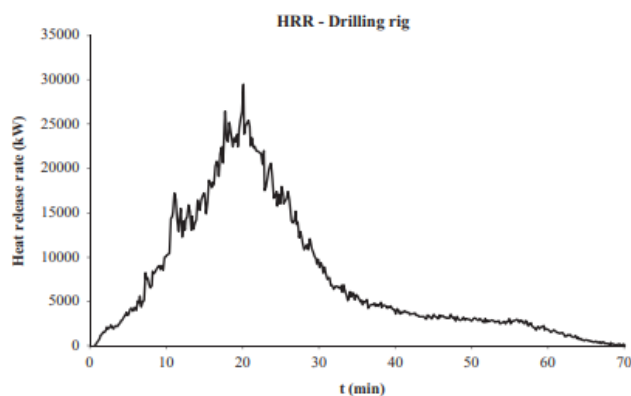
### 5.2.2 Ändring av effektutvecklingen

År 2010 då den ursprungliga beräkningsmodellen togs fram fanns det begränsad information kring effektutvecklingen hos den typ av byggfordon som används i tunnlar och gruvor (Ingason, Lönnermark, Frantzich, & Kumm, 2010). Därför användes Ingasons (2009) ekvationer samt resultaten från ett mindre försök. Då Hansen & Ingason genomförde fullskaliga försök på en borrhigg och en hjullastare år 2013 kommer istället effektutvecklingen från dem användas vid beräkningen av flyktfilter.

Effektutvecklingskurvorna från Hansen & Ingason (2013) approximerades med hjälp av främst en linjär ökning av effektutvecklingen då detta stämde bäst överens med hur effektutvecklingen ökade.

#### 5.2.2.1 Effektutvecklingskurva - Borrhigg

Borrhiggen uppnår en maximal effektutveckling på 29,4 MW efter 21 minuter och hela brandförloppet pågår i cirka 70 minuter, se Figur 5.



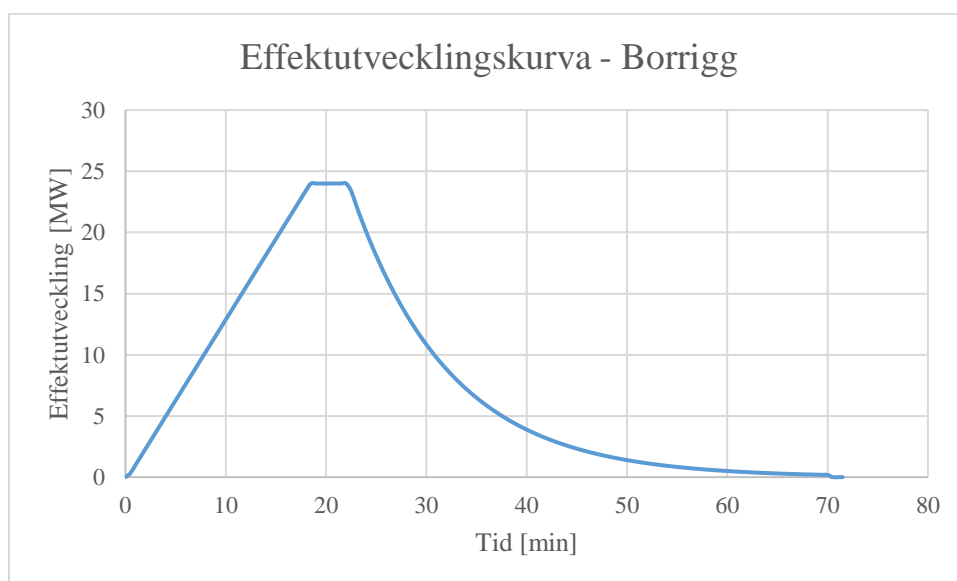
Figur 5. Effektutveckling för borrhigg. Figur från Hansen & Ingason (2013)

Den approximerade effektutvecklingskurvan delades in i tre delar. En linjär tillväxtfas, en konstant maximal effekt och en avsvälningsfas. Avsvälningsfasen approximerades med en minskning av effekt med 0,95 för varje tidssteg som är 30 sekunder långt. Se Tabell 7 för fullständig beskrivning.

Tabell 7. Approximerad effektutveckling för borrhigg.

Fas	Tidsintervall, t [min]	Effektutveckling [MW]
Tillväxt	0 - 18	$1,32 \cdot t$
Konstant maximal	18 - 22	24
Avsvälning	$22 <$	$0,95^{\text{tidssteg}}$

Utifrån Tabell 7 skapades sedan den approximerade effektutvecklingen för borrhiggen, se Figur 6.

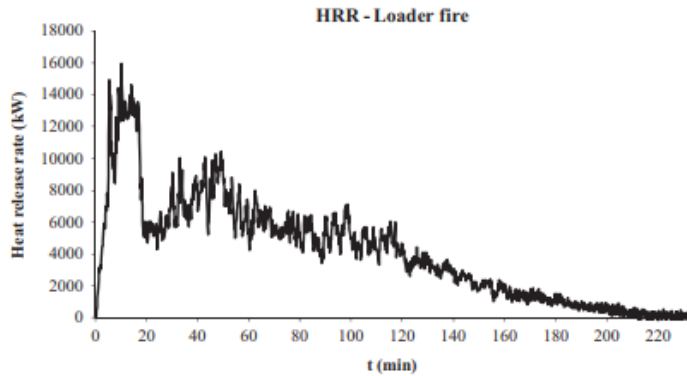


Figur 6. Approximerad effektutvecklingskurva för borrhigg

Den totala energiutvecklingen för den approximerade kurvan blir 32,5 GJ vilket stämmer väl överens med den totala förbränd energin från försöket som var 30,9 GJ.

### 5.2.2.2 Effektutvecklingskurva – Hjullastare

Hjullastaren uppnår en maximal effekt på 15,9 MW efter cirka 11 minuter. Brandförloppet är mer utdraget än för borrhiggen och är cirka 200 minuter, se Figur 7.



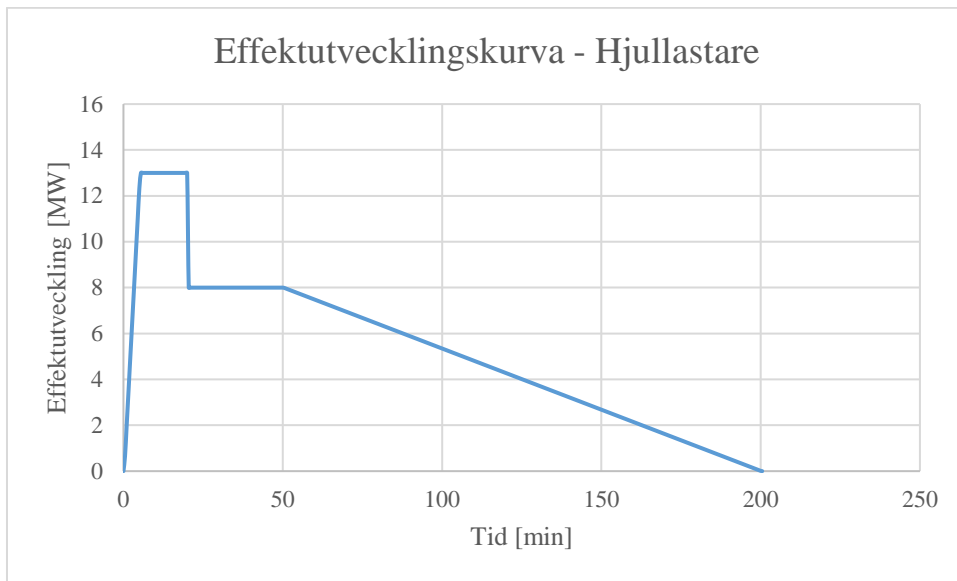
Figur 7. Effektutveckling för hjullastare. Figur från Hansen & Ingason (2013)

Effektutvecklingen delades in i fyra faser. En linjärt ökande tillväxtfas, en konstant maximal effekt på 13 MW, ett omedelbart fall till en konstant effekt på 8 MW och sedan en linjärt avtagande avsvälningsfas. Se Tabell 8.

Tabell 8. Approximerad effektutveckling för hjullastare

Fas	Tidsintervall, t [min]	Effektutveckling [MW]
Tillväxt	0 - 5	$2,59 \cdot t$
Konstant maximal	5 - 20	13
Konstant	20 - 50	8
Avsvälning	$50 <$	$8 - 0,053 \cdot (t-50)$

Utifrån Tabell 8 skapades sedan den approximerade effektutvecklingen för hjullastaren, se Figur 8.



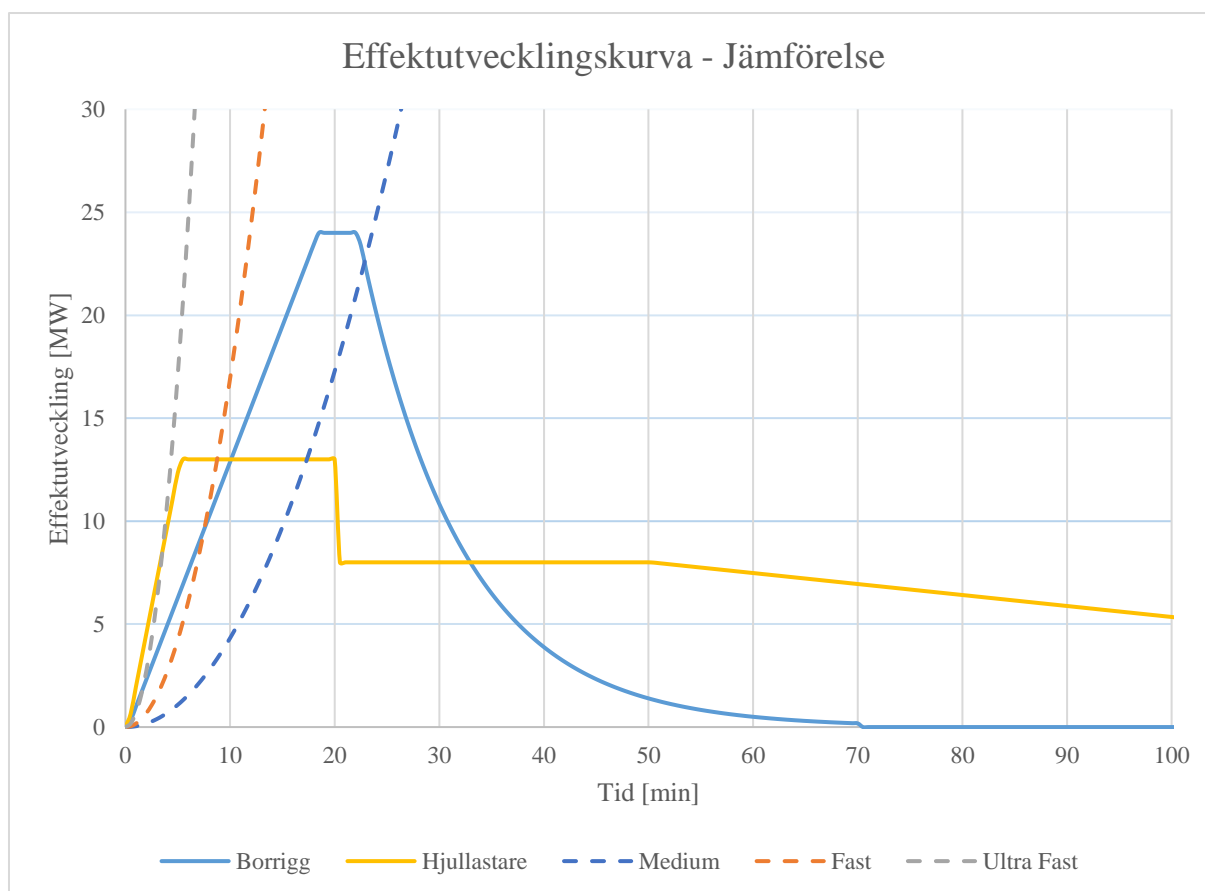
Figur 8. Approximerad effektutvecklingskurva för Hjullastare

Den totala energiutvecklingen för den approximerade effektutvecklingen för hjullastaren blev 54 GJ vilket stämmer bra överens med de 57 GJ som uppmättes i försöket. Modelleringen sker i 120 minuter precis som för borrhjulen, för att ge jämförbara FLD-värden om FLD=1 inte uppnås.

#### 5.2.2.3 Jämförelse av effektutvecklingskurvor

I Figur 9 visas en jämförelse av de båda effektutvecklingskurvorna med exponentiella kurvor med tillväxthastigheten medium, fast och ultra fast. Denna jämförelse görs för att skapa en uppfattning om hur snabbt effektutvecklingen sker i jämförelse med vanligt använda designvärden. Hjullastarens effektutveckling ökar de första minuterna i ungefär samma takt som tillväxten för en kurva med hastigheten ultra fast. Borrhjulen ligger någonstans i mellan fast och ultra fast i sin tillväxthastighet under de första minuterna.





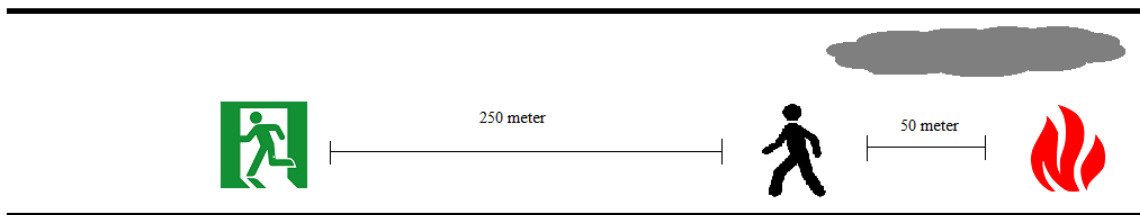
Figur 9. Jämförelse av effektutveckling

### 5.3 Presentation av scenario

För att kunna svara på frågeställningen om flyktfilter uppfyller den tänkta funktionen att öka utrymningsavstånden, har två olika utrymningsscenarier tagits fram, som kombineras med de två olika bränderna som presenterades i 5.2.2 för att bilda fyra grundscenarier.

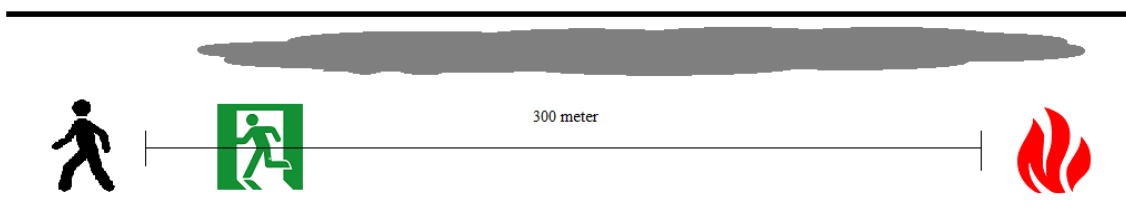
Utrymningsscenarierna baseras på den information som har erhållits av litteraturstudien och intervjuerna. De fyra grundscenarierna varierar med tunneltvärsnitt, placering av utrymmande person samt typ av brand. Dessa parametrar är de enda som varierar för de fyra grundscenarierna. Övriga relevanta parametrar varierar istället i en känslighetsanalys som genomförs för att utvärdera osäkerheter.

Utrymningsscenarierna utgår från samma grundförutsättningar, vilket är att genombrott inte har skett och att det brinner framme vid fronten. Skillnaden mellan de två utrymningsscenarierna blir placeringen av den utrymmande personen i förhållande till branden. I det ena utrymningsscenariot befinner sig personen framme vid fronten där branden sker och försöker bekämpa branden, kallat scenario A. För scenario A antas ett startavstånd på 50 meter till branden, se Figur 10.



Figur 10. Schematisk beskrivning av scenario A

I det andra utrymningsscenarioet, kallat scenario B, antas personen befinnas sig så att räddningskammare är mellan personen och branden. Enligt intervjumaterialet är räddningskammaren vanligtvis placerad mellan 200 – 300 meter från fronten och därför antas det i scenario B att personen befinna sig 300 meter ifrån branden, se Figur 11. Scenario B ska simulera det fall då rökfronten redan har passerat räddningskammaren och utrymningen därför blir en längre sträcka. Utrymningen påbörjas när synlig rök når den utrymmande personen.



Figur 11. Schematisk beskrivning av scenario B

För scenario A bör närmsta säkra plats i form av en räddningskammare ligga inom 300 meter om AFS berg- och gruvarbete efterföljs. I scenario B kommer avståndet till närmsta säkra plats variera från fall till fall då endast avståndet mellan räddningskammare och fronten regleras i AFS berg- och gruvarbete. I vissa fall kommer fordon finnas relativt nära som går att använda vid utrymning och andra fall inte. Det är därför svårt att ange ett specifikt avstånd till närmsta säkra plats för scenario B. I båda scenarierna sker beräkningarna fram till 1700 meter för att kunna jämföra dem.

I båda scenarierna antas ventilationen ge upphov till ett flöde av luft som ger en vindhastighet på 0,5 m/s. En högre vindhastighet hade spridit ut brandgaserna mer och på så sätt minskat koncentrationerna av giftiga gaser. En allt för låg vindhastighet hade istället gjort att den utrymmande personen direkt hade hamnat framför rökfronten.

I scenario A med en person nära branden antas personen försöka bekämpa branden till dess att den är för stor. Branden antas vara för stor för att släcka, i enlighet med Frantzich (2010), vid 3 MW. Då beräkningarna i modellen sker var 30 sekund är det omöjligt att ange reaktionstiden till den exakta tidpunkten då 3 MW uppnås och för att vara konservativ avrundas reaktionstiden istället uppåt till närmsta 30 sekunders intervall. Borrhjulet når en effektutveckling på 3 MW efter 136 sekunder vilket avrundas till en reaktionstid på 150 sekunder. Hjulastaren når en effektutveckling på 3 MW efter 69 sekunder vilket avrundas till en reaktionstid på 90 sekunder.

I scenario B då personen befinner sig längre bort från branden antas personen inte uppfatta de utrymningssignaler som kan ha aktiveras på grund utav den både högljudda och smutsiga miljön. Utrymningen startar därför först när personen blir medveten om brandröken. Om personen befinner sig 300 meter från där branden startar når rökfronten personen efter 600 sekunder med den antagna vindhastigheten på 0,5 m/s. Båda bränderna i de olika brandscenarierna är vid det här laget kring 14 MW stora och den svåra miljön med dålig sikt i en tunnel antas vara tillräckligt för att anta att andra indikationer på brand så som ljus och ljud inte når personen innan rökfronten gör det.

Tabell 9. Startavstånd och reaktionstid för de olika scenarierna

Scenario	Brandscenario	Startavstånd [m]	Reaktionstid [s]
A	Borrigg	50	150
	Hjullastare	50	90
B	Borrigg	300	600
	Hjullastare	300	600

Samma tvärsnitt som Frantzich använder sig av kommer användas i samtliga av de fyra grundscenarierna. Ett spann av olika tvärsnitt används för att inkludera så många olika typer av tunnlar som möjligt. Se Tabell 10 för tvärsnitt.

Tabell 10. Olika tunneltvärsnitt som undersöks

Tvärsnitt	Omkrets [m]	Area[m <sup>2</sup> ]
3x4	14	12
4x5	18	20
5x5	20	25
6x7	26	42
7x11	36	77

Slutligen kommer alla försök genomföras först utan och sedan med de funktioner som motsvarar att bära ett flyktfilter under utrymningen.

## 6 Resultat

I följande avsnitt presenteras resultatet för samtliga scenarion från beräkningsmodellen. Resultaten presenteras i tabeller med tid och avstånd till att FED = 0,3, tid och avstånd till FED = 1 och slutligen tid till FLD = 1.

### 6.1 Scenario A – Borrigger

Beräkningarna för scenario A med brandscenariot för borrigger, se Tabell 11 och Tabell 12, visar att utrymningen generellt är problematisk, både med och utan mask.

Tabell 11. Resultat för scenario A - Borrigger utan flyktfilter

<b>Tvårsnitt</b>	<b>Tid till FED=0,3 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=0,3 [m]</b>	<b>Tid till FED=1 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>	<b>Tid till FLD=1 [min]</b>
3x4	5,5	92	8	116	10
4x5	7	104	11	152	15,5
5x5	8	116	12,5	170	18,5
6x7	10	140	16,5	218	27,5
7x11	14	188	23	296	0,63*

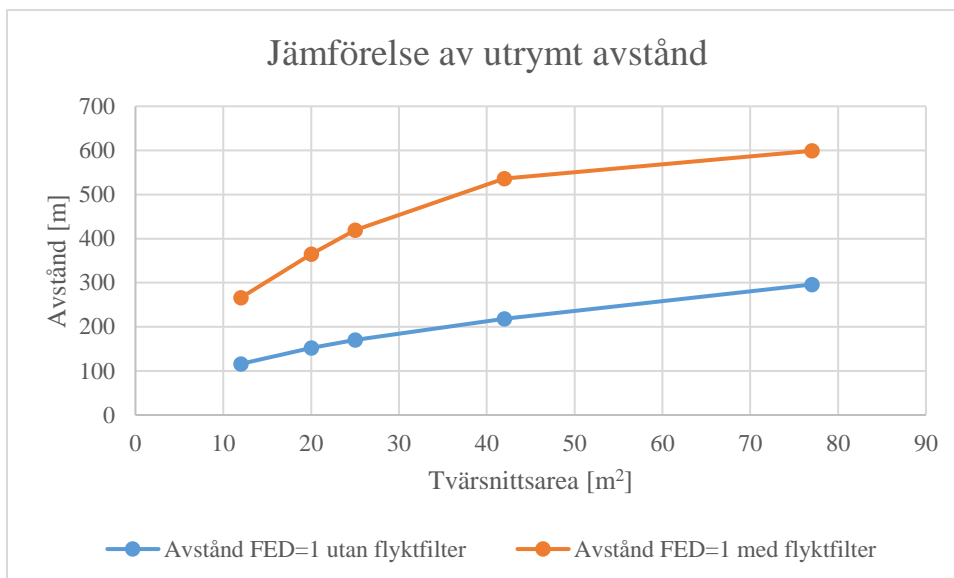
\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

Tabell 12. Resultat för scenario A - Borrigger med flyktfilter

<b>Tvårsnitt</b>	<b>Tid till FED=0,3 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=0,3 [m]</b>	<b>Tid till FED=1 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>	<b>Tid till FLD=1 [min]</b>
3x4	9	167	14,5	266	15
4x5	11	203	20	365	22,5
5x5	12	221	23	419	27
6x7	14	257	29,5	536	38,5
7x11	17	311	33	599	0,64*

\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

En jämförelse av avstånden till avsvimning, FED=1, med och utan flyktfilter presenteras i Figur 12. Figuren visar tydligt att beräkningar med flyktfilter ger ett längre möjligt avstånd enligt beräkningsmodellen.



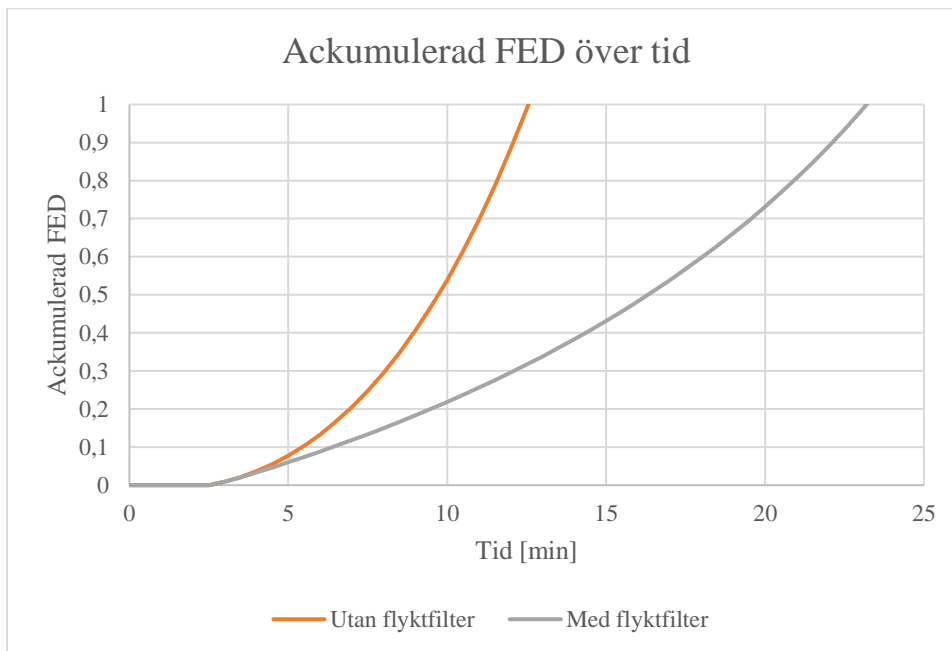
Figur 12. Scenario A – Borrigg, jämförelse av avstånd med och utan flyktfilter

I Figur 13 presenteras den avverkade sträckan för rökfronten, utrymmande personen utan flyktfilter och utrymmande person med flyktfilter för tunneltvärsnittet 5x5 m<sup>2</sup>. Den utrymmande personen både med och utan flyktfilter befinner sig bakom rökfronten under hela förloppet och det är därför avsvimning sker relativt snabbt. Den utrymmande personen med flyktfilter klarar av att utrymma en något längre sträcka än personen utan flyktfilter. Den korta konstanta tiden som både med och utan flyktfilter delar är reaktionstiden innan förflyttningen sker. När förflyttningen väl startar har personen med flyktfilter en något brantare linje, alltså en högre gånghastighet, då personen med flyktfilter antas utsättas för ingen irriterande rök. När avståndet blir konstant har personen avsvimmat och förflyttar sig därför inte längre. Detta sker senare för personen med flyktfilter då flyktfiltret reducerar koncentrationen kolmonoxid som personen utsätts för.



Figur 13. Avverkad sträcka för rökfront, utrymmande person utan flyktfilter och utrymmande person med flyktfilter för scenario A – borrigg med tunneltvärsnitt 5x5 m<sup>2</sup>

Figur 14 beskriver den ackumulerade FED med och utan flyktfilter för tunneltvärsnittet 5x5 m<sup>2</sup>. Figuren visar att ingen FED ackumuleras innan 2,5 minuter har passerat i enlighet med antagandet att personen inte utsätts för någon brandrök innan reaktionstiden har passerat. Efter reaktionstiden har passerat börjar ackumuleringen av FED och är för en kort stund, så länge kolmonoxidkoncentrationen är under 200 ppm, densamma för både med och utan flyktfilter. Allt eftersom kolmonoxidkoncentrationen blir högre blir också skillnaden i ackumulerad FED större. När 12,5 minuter respektive 23 minuter har passerat sker avsvimning för personen utan respektive med flyktfilter.



Figur 14. Ackumulerad FED över tid för scenario A - berrigg för tunneltvärsnitt 5x5 m<sup>2</sup>

## 6.2 Scenario A – Hjullastare

Resultaten för scenario A – Hjullastare utan flyktfilter som presenteras i Tabell 13 visar att utrymningen inte är något problem för de två största tvärsnitten medan avståndet för de tre minst tvärsnitten är väldigt korta. Det stora hoppet mellan att utrymma 140 meter och över 1700 meter beror på att om den utrymmande personen hinner ta sig framför rökfronten innan FED = 1 uppnås så är dess gånghastighet större än rökfrontens. Det gör att personen kan röra sig framför rökfronten och på så sätt vara opåverkad av röken. Om personen kan ta sig framför rökfronten innan FED = 1 beror i stor utsträckning på reaktionstiden då en längre reaktionstid leder till att rökfronten har fått ett stort nog försprång att den utrymmande personen aldrig kan ta sig framför rökfronten. En kort reaktionstid gör dock att personen snabbt kan komma ifatt rökfronten och utrymma därifrån utan att påverkas av röken.

Tabell 13. Resultat för scenario A - Hjullastare utan flyktfilter

<b>Tvårsnitt</b>	<b>Tid till FED=0,3 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=0,3 [m]</b>	<b>Tid till FED=1 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>	<b>Tid till FLD=1 [min]</b>
3x4	4,5	86	6	104	6,5
4x5	5,5	98	8	128	11
5x5	6	104	9	140	17,5
6x7	-	>1700	-	>1700	0,0081*
7x11	-	>1700	-	>1700	0,0070*

\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

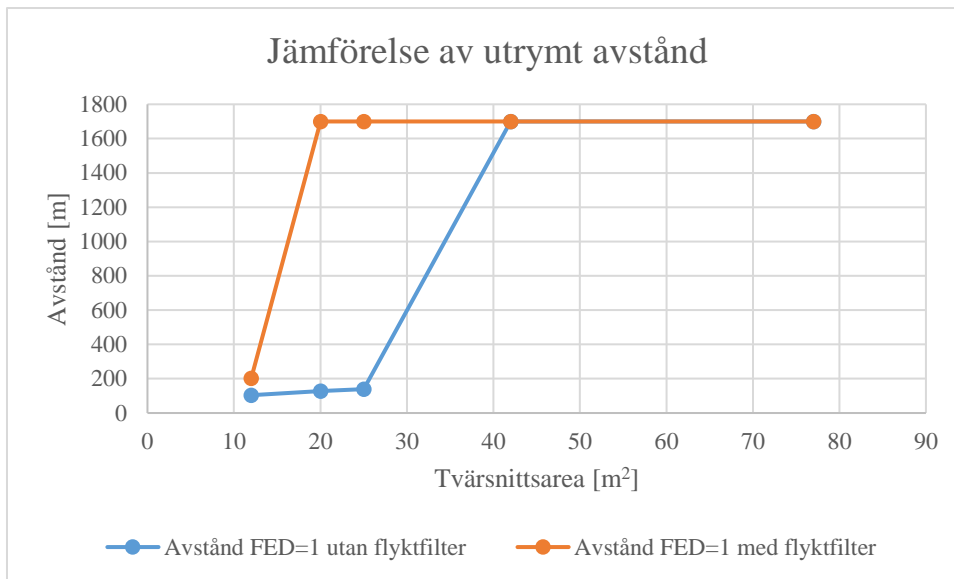
I resultaten som presenteras i Tabell 14 uppstår samma fenomen som i Tabell 13. Den märkbara skillnaden är att det stora hoppet i avstånd som uppstår på grund utav att personen befinner sig framför rökfronten sker vid ett mindre tvårsnitt. Att det sker redan vid ett mindre tvårsnitt beror på flyktfilters förmåga att skydda personen när den går igenom röken för att nå rökfronten.

Tabell 14. Resultat för scenario A - Hjullastare med flyktfilter

<b>Tvårsnitt</b>	<b>Tid till FED=0,3 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=0,3 [m]</b>	<b>Tid till FED=1 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>	<b>Tid till FLD=1 [min]</b>
3x4	7,5	158	10	203	10
4x5	-	>1700	-	>1700	0,0113*
5x5	-	>1700	-	>1700	0,0097*
6x7	-	>1700	-	>1700	0,0081*
7x11	-	>1700	-	>1700	0,0070*

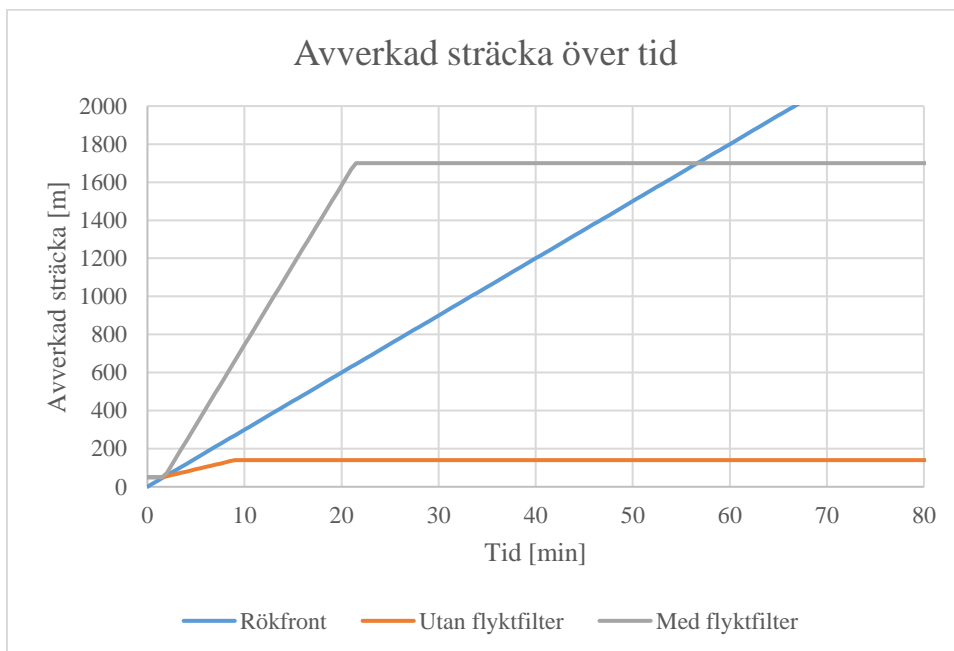
\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

En jämförelse av avstånden med och utan flyktfilter presenteras i Figur 15. Även här finns en tydlig skillnad när flyktfilter bärs. Det möjliga utrymningsavståndet blir väldigt mycket längre för flyktfilter vid de små tvärsnitten. Detta då den utrymmande personen kan ta sig igenom röken och fram till rökfronten utan att avsvimning nås om flyktfilter bärs. Då flyktfilter inte bärs sker avsvimningen innan personen har nått rökfront och utrymningen omöjliggörs.



Figur 15. Scenario A – Hjullastare, jämförelse av avstånd med och utan flyktfilter

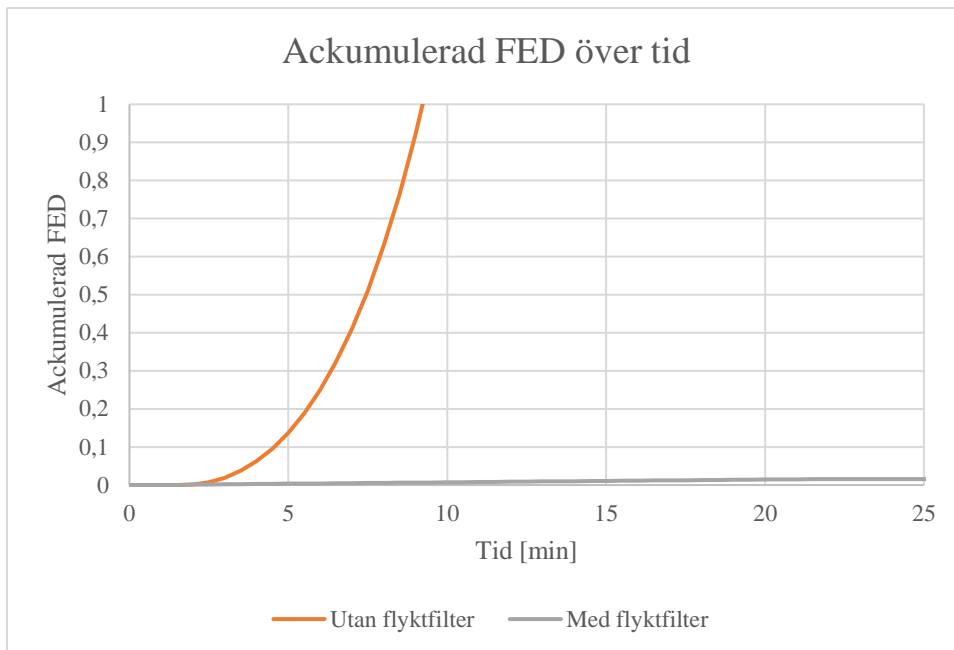
Den stora skillnaden på avstånd i Figur 15 kan förklaras med hjälp av Figur 16. I Figur 16 så bidrar den högre gånghastigheten och minskade koncentrationen kolmonoxid till att personen med flyktfilter tidigt passerar rökfronten och därför klarar av att utrymma hela sträckan. Personen utan flyktfilter tar sig aldrig framför rökfronten och exponeras därför för de giftiga brandgaserna fram tills avsvimning sker.



Figur 16. Avverkad sträcka för rökfront, utrymmande person utan flyktfilter och utrymmande person med flyktfilter för scenario A – hjullastare med tunneltvärsnitt 5x5 m<sup>2</sup>

Figur 17 visar ackumulerad FED över tid för en person med och utan flyktfilter. Personen utan flyktfilter når FED = 1 och avsvimning relativt fort då som Figur 16 visar befinner sig personen bakom rökfronten under hela utrymningen. Personen med flyktfilter passerar rökfronten tidigt och har därför en väldigt låg ackumulerad FED. Den lilla ökningen som sker i slutet beror av att syrenivån är precis under 21 % vilket adderas till FED.





Figur 17. Ackumulerad FED över tid för scenario A - hjullastare för tunneltvärsnitt 5x5 m<sup>2</sup>

Den stora skillnaden i avstånd som sker när det är hjullastaren som brinner beror på reaktionstiden. Därför beräknas scenario A med hjullastaren som brinner, men med en reaktionstid ändrad från 90 sekunder till 110 sekunder.

Tabell 15. Resultat för scenario A - Hjullastare utan flyktfilter, reaktionstiden ändrad till 110 sekunder.

Tvärsnitt	Tid till FED=0,3 [min]	Avstånd till FED=0,3 [m]	Tid till FED=1 [min]	Avstånd till FED=1 [m]	Tid till FLD=1 [min]
3x4	4	74	6	98	6,5
4x5	5	86	7,5	116	11
5x5	6	98	8,5	128	17,5
6x7	7,5	116	12	170	108
7x11	10	146	20,5	272	0,6588*

\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

Tabell 16. Resultat för scenario A - Hjullastare med flyktfilter, reaktionstiden ändrad till 110 sekunder.

Tvärsnitt	Tid till FED=0,3 [min]	Avstånd till FED=0,3 [m]	Tid till FED=1 [min]	Avstånd till FED=1 [m]	Tid till FLD=1 [min]
3x4	7	140	9,5	185	9
4x5	8,5	167	13,5	257	15,5
5x5	9,5	185	16,5	311	26
6x7	11,5	221	26	482	0,9687*
7x11	14	266	32	599	0,6395*

\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

Resultaten från ökning av reaktionstiden med 20 sekunder ger en väldigt märkbar skillnad i avstånden vilket kan ses i Tabell 15 och Tabell 16. Med de här resultaten i åtanke är det uppenbart att reaktionstiden är en viktig parameter för avstånden och den kommer därför undersökas mer noggrant i känslighetsanalysen i avsnitt 7.

### 6.3 Scenario B – Borrigger

Tabell 17 redovisar resultatet för scenario B med brand i borrigger, utan flyktfilter, med ett startavstånd på 300 meter och med en reaktionstid på 600 sekunder. Notera att avståndet som anges är avståndet mellan personen som utrymmer och branden. I fallet med ett tunneltvårsnitt 3x4 har personen alltså endast rört sig 84 meter vid FED = 1 från den plats där utrymningen startade.

Tabell 17. Scenario B - Borrigger utan flyktfilter

<b>Tvårsnitt</b>	<b>Tid till FED=0,3 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=0,3 [m]</b>	<b>Tid till FED=1 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>	<b>Tid till FLD=1 [min]</b>
3x4	14	348	17	384	19
4x5	15,5	366	19,5	414	24
5x5	16,5	378	21	432	27,5
6x7	19	408	25,5	486	36,5
7x11	-	>1700	-	>1700	0,0056*

\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

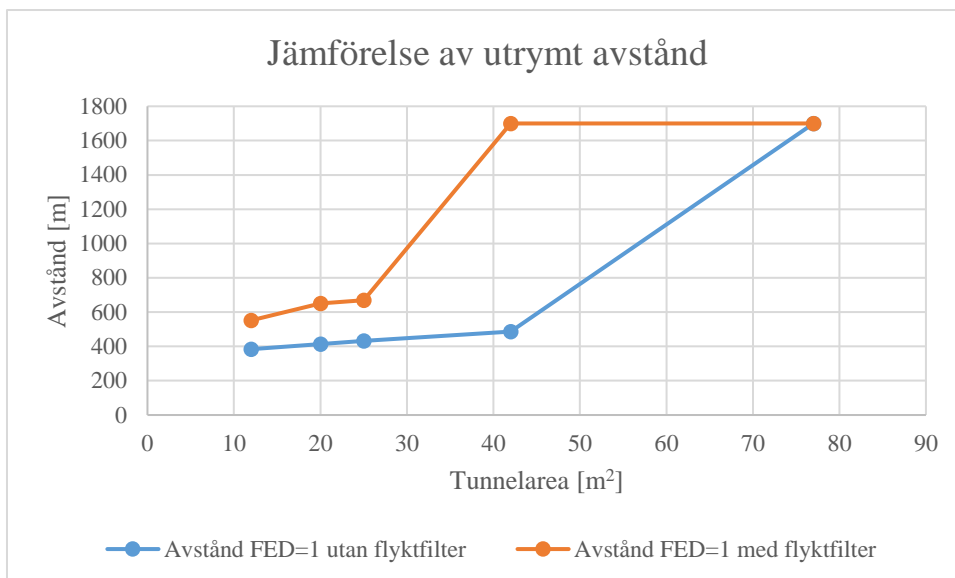
Tabell 18 presenterar resultaten för scenario B – borrigger med flyktfilter.

Tabell 18. Scenario B - Borrigger med flyktfilter

<b>Tvårsnitt</b>	<b>Tid till FED=0,3 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=0,3 [m]</b>	<b>Tid till FED=1 [min]</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>	<b>Tid till FLD=1 [min]</b>
3x4	18	444	24	552	25
4x5	26	588	29,5	651	32
5x5	21	498	30,5	669	35
6x7	-	>1700	-	>1700	0,0062*
7x11	-	>1700	-	>1700	0,0056*

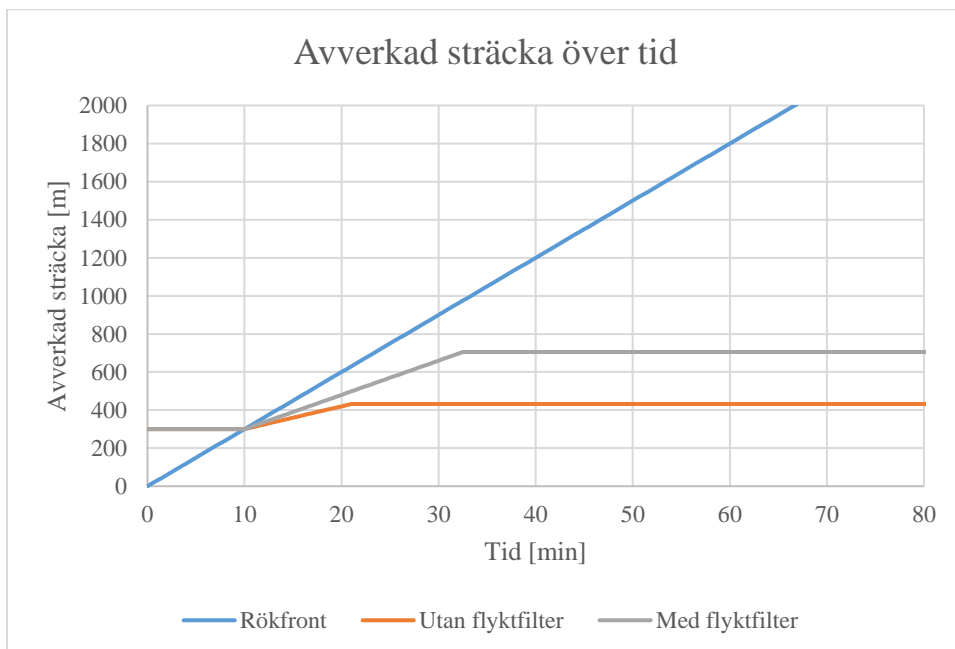
\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

I Figur 18 presenteras jämförelsen av scenario B – borrigger med och utan flyktfilter. Figuren visar tydligt att utrymning med flyktfilter ger längre avstånd i beräkningsmodellen. Störst skillnad i utrymning mellan med och utan flyktfiltret är för tunneltvårsnittet 6x7 m<sup>2</sup>. Den stora skillnaden förklaras återigen av att med flyktfiltret så kan den som utrymmer ta sig fram framför rökfronten innan avsvimning sker.



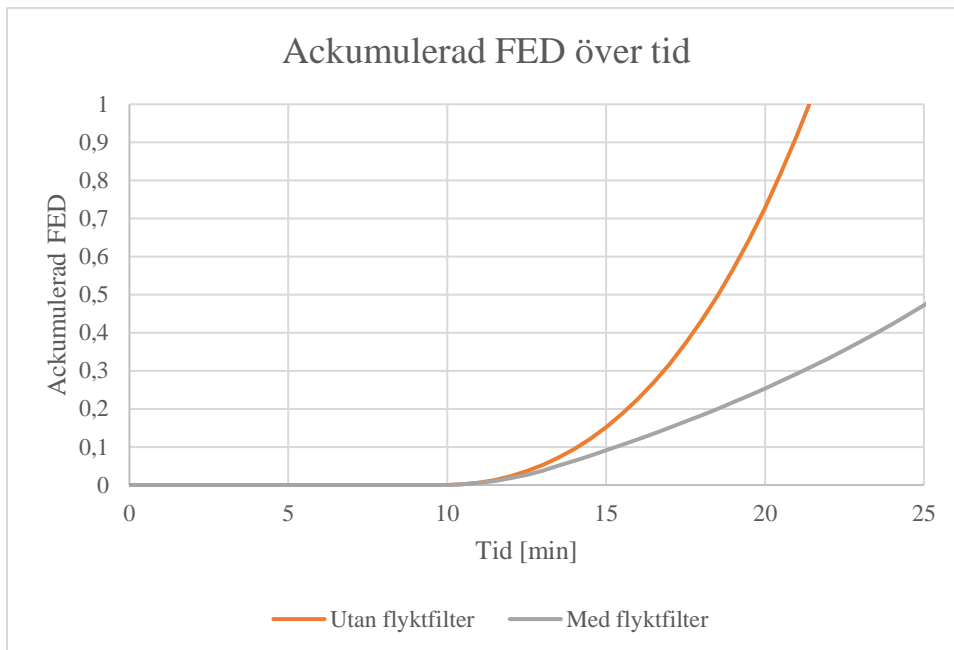
Figur 18. Scenario B – Borrigg, jämförelse av avstånd med och utan flyktfilter

Figur 19 presenterar den avverkade sträckan för rökfronten, utrymmande person utan flyktfilter och utrymmande person med flyktfilter för tunneltvärsnittet  $5 \times 5 \text{ m}^2$ . Startavståndet är 300 meter för scenario B och är konstant fram tills att rökfronten når den utrymmande personen och utrymningen påbörjas. Detta sker efter 10 minuter vilket motsvarar reaktionstiden för scenario B. Återigen visar figuren att gånghastigheten om flyktfilter används är snabbare. Både med och utan flyktfilter så passeras inte rökfronten under utrymningsförloppet.



Figur 19. Avverkad sträcka för rökfront, utrymmande person utan flyktfilter och utrymmande person med flyktfilter för scenario B – borrigg med tunneltvärsnitt  $5 \times 5 \text{ m}^2$

Figur 20 visar ackumulerad FED över tid för tunneltvärsnitt  $5 \times 5 \text{ m}^2$ . Ingen exponering för brandgaser sker förrän efter 10 minuter då rökfronten har nått fram till den utrymmande personen. Som tidigare är ackumulationen densamma initialt med skillnaden ökar med ökade koncentrationer kolmonoxid.



Figur 20. Ackumulerad FED med och utan flyktfilter för scenario B - borrhög med tunneltvärsnitt 5x5 m<sup>2</sup>

#### 6.4 Scenario B – Hjullastare

I Tabell 19 och Tabell 20 presenteras resultaten från scenario B – Hjullastare utan respektive med flyktfilter. I inga av fallen utan flyktfilter sker utrymning hela vägen. Endast för det största tvärsnittet uppnås inte FLD = 1 och därför finns möjligheten för räddningstjänsten att rädda den avsvimmade personen. För utrymningen med flyktfilter är avstånden generellt längre och för största tvärsnittet sker utrymning hela vägen.

Tabell 19. Scenario B - Hjullastare utan flyktfilter

Tvärsnitt	Tid till FED=0,3 [min]	Avstånd till FED=0,3 [m]	Tid till FED=1 [min]	Avstånd till FED=1 [m]	Tid till FLD=1 [min]
3x4	12,5	330	14,5	354	15
4x5	13,5	342	16	372	19,5
5x5	14,5	354	17	384	26
6x7	16	372	20,5	426	117
7x11	18,5	402	29	528	0,6450*

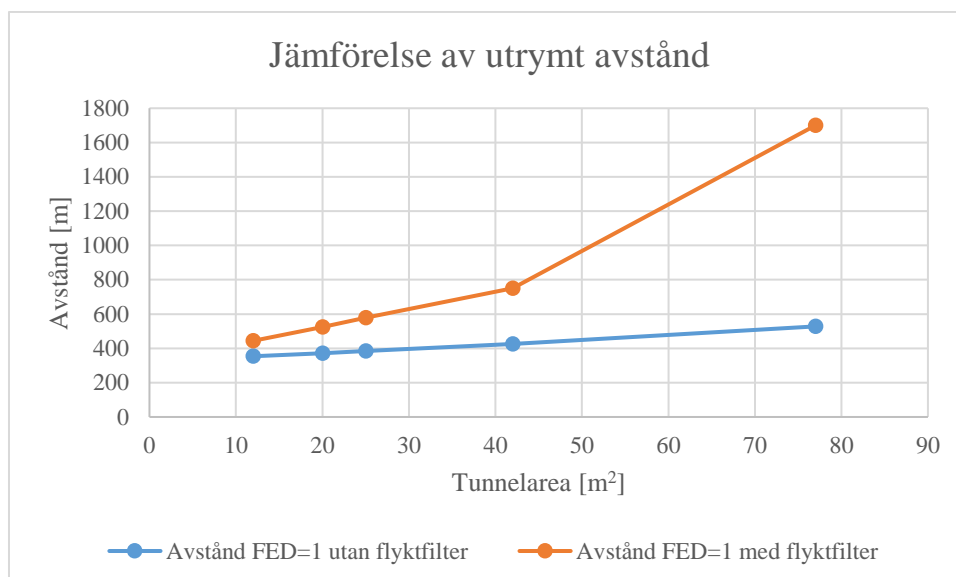
\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

Tabell 20. Scenario B - Hjullastare med flyktfilter

Tvårsnitt	Tid till FED=0,3 [min]	Avstånd till FED=0,3 [m]	Tid till FED=1 [min]	Avstånd till FED=1 [m]	Tid till FLD=1 [min]
3x4	15,5	399	18	444	18
4x5	17,5	435	22,5	525	24,5
5x5	18,5	453	25,5	579	33
6x7	20,5	489	35	750	0,9707*
7x11	-	>1700	-	>1700	0,0063*

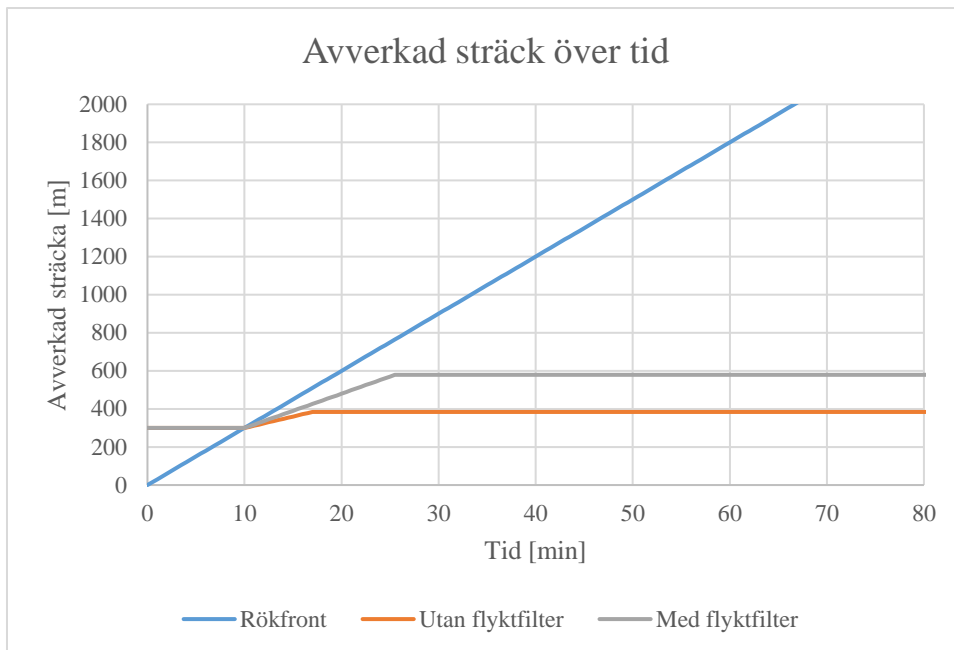
\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

Figur 21 presenterar en jämförelse mellan avståndet för scenario B – hjullastare med och utan flyktfilter. Figuren visar att skillnaden i avstånd mellan utan flyktfilter och med flyktfilter ökar gradvis med ökat tunneltvärsnitt.



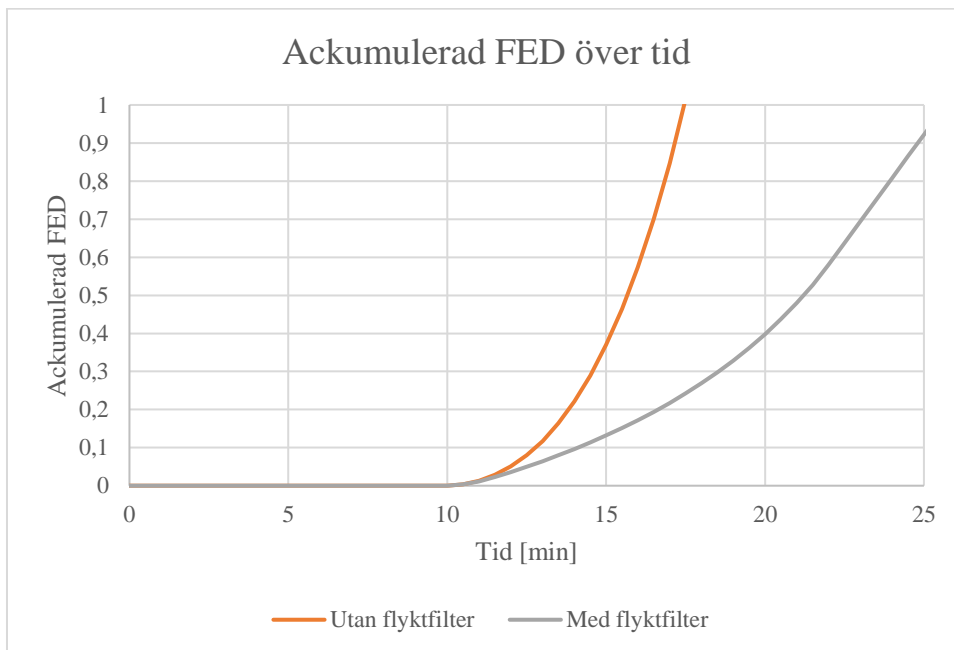
Figur 21. Scenario B – Hjullastare, jämförelse av avstånd med och utan flyktfilter

Figur 22 visar avverkad sträcka för rökfronten och den utrymmande personen med respektive utan flyktfilter. Personen som utrymmer hamnar både med och utan flyktfilter bakom rökfronten och lyckas inte passera den.



Figur 22. Avverkad sträcka för rökfront, utrymmande person utan flyktfilter och utrymmande person med flyktfilter för scenario B – hjullastare med tunneltvärsnitt  $5 \times 5 \text{ m}^2$

Figur 23 visar ackumulerad FED över tid med och utan flyktfilter för tunneltvärsnitt  $5 \times 5 \text{ m}^2$ . Både med och utan flyktfilter så sker hela utrymningsförloppet bakom rökfronten vilket gör att den ackumulerad FED ökar snabbt så fort exponeringen sker efter 10 minuter. Då flyktfiltret används sker ackumuleringen långsammare.



Figur 23. Ackumulerad FED med och utan flyktfilter för scenario B – hjullastare med tunneltvärsnitt  $5 \times 5 \text{ m}^2$

## 7 Känslighetsanalys

Då det finns osäkerheter både i den data som har införts i beräkningsmodellen och hur olika delar har modellerats genomförs en känslighetsanalys. Känslighetsanalysen genomförs med det primära syftet att avgöra vilka parametrar som störst påverkan på resultateten från beräkningsmodellen. Med vetskap om vilka parametrar som påverkar resultatet mest går det därefter att ge rekommendationer om vilken data och samband som ska undersökas i framtida studier för att ge noggrannare resultat.

Det huvudsakliga fokus för känslighetsanalysen kommer vara de parametrar som är kopplade till flyktfiltren men även andra parametrar kommer inkluderas i analysen.

Känslighetsanalysen utgår från scenario A – borrhög och scenario B - hjullastare som de två grundfall som förändras. Dessa två fall valdes för att se om känsligheten för olika parametrar också ändras med olika scenarion och olika effektutveckling. Resultatet av ändringarna presenteras som avstånd till  $FED = 1$ . Känslighetsanalysen utförs genom en så kallad one-way sensitivity analysis där en parameter i taget varieras. Parametrarna varieras genom att först minska värdet med 50 % från ursprungsvärdet och beräkna avståndet till  $FED = 1$  och sedan öka värdet med 50 % från ursprungsvärdet och beräkna avståndet till  $FED = 1$ . Detta utförs för hand i beräkningsmodellen. Gånghastigheten kommer inte analyseras med en one-way sensitivity analysis utan istället ändras till motsvarande gånghastighet för irriterande rök.

Delar av det som presenteras i resultatavsnittet till exempel de olika tunneltvärsnitten går att betrakta som en känslighetsanalys.

I följande avsnitt presenteras känslighetsanalysen för några av de befintliga parametrarna som Frantzich införde i beräkningsmodellen. I efterföljande avsnitt presenteras känslighetsanalysen av de parametrar som infördes i samband med anpassning av beräkningsmodellen till flyktfilter. I det tredje avsnittet görs sedan en jämförelse av känslighetsanalys av befintliga parametrar och införda parametrar med hjälp utav tornadodiagram.

### 7.1 Känslighetsanalys av befintliga parametrar

I de tidigare presenterade resultaten har reaktionstiden visat sig vara en viktig parameter för avstånden och den kommer därför analyseras i känslighetsanalysen. Utöver reaktionstiden kommer också startdistansen analyseras för att se hur den påverkar utrymningsavståndet innan avsvimning sker.

I Tabell 21 presenteras resultatet av känslighetsanalysen av reaktionstiden för scenario A – borrhög utan flyktfilter. Utifrån känslighetsanalysen är det tydligt att reaktionstiden har en stor påverkan på avståndet när reaktionstiden sänks men inte alls lika stor påverkan när den höjs. Detta beror på att den sänkta reaktionstiden gör att personen tidigt kan passera rökfronten och därifrån utrymma utan några större problem. Ökningen av reaktionstiden ger en skillnad i resultatet men med en mindre signifikant skillnad. Det kortare avståndet uppstår då en längre reaktionstid gör att brandförloppet har utvecklats mer och rökfronten har förflyttats längre än vid en kortare reaktionstid. Att skillnaden i resultat är mindre då reaktionstiden höjs är på grund utav att den utrymmande personen inte tar sig förbi rökfronten varken för medelvärdet av reaktionstiden eller när den höjs.

Tabell 21. Känslighetsanalys av reaktionstiden för Scenario A – Borrigg utan flyktfilter

Reaktionstid [s] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	75	150	225
3x4	>1700	116	98
4x5	>1700	152	134
5x5	>1700	170	152
6x7	>1700	218	200
7x11	>1700	296	278

Motsvarande tabell för scenario B – hjullastare utan flyktfilter presenteras i Tabell 22. För detta scenario är det ännu tydligare vilken stor påverkan reaktionstiden har. Sänkningen med 50 % gör att utrymningen blir oproblematiske för samtliga tvärsnitt. En ökning av reaktionstiden gör däremot att avstånden blir väldigt korta. För minsta tvärsnittet sker ingen förflyttning alls då FED = 1 uppnås direkt efter att reaktionstiden är slut.

Tabell 22. Känslighetsanalys av reaktionstiden för Scenario B – Hjullastare utan flyktfilter

Reaktionstid [s] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	300	600	900
3x4	>1700	354	300
4x5	>1700	372	312
5x5	>1700	384	324
6x7	>1700	426	372
7x11	>1700	528	474

I Tabell 23 presenteras känslighetsanalysen av startdistansen scenario A – borrigg utan flyktfilter. Känslighetsanalysen visar att en kortare startdistans ger ett kortare utrymt avstånd och en längre startdistans ger ett längre utrymt avstånd. Skillnaden i utrymt avstånd är ungefär lika stort oavsett om startdistansen höjs eller sänks. Det är först vid det största tunneltvärsnittet som en signifikant skillnad kan ses då den höjda startdistansen möjliggör för den utrymmande personen att passera rökfronten och utrymma hela sträckan.



Tabell 23. Känslighetsanalys av startdistansen för Scenario A – Borrugg utan flyktfilter

Startdistans [m] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	25	50	75
3x4	79	116	159
4x5	109	152	189
5x5	127	170	207
6x7	175	218	261
7x11	253	296	>1700

Tabell 24 visar känslighetsanalysen av startdistansen för scenario B – hjullastare utan flyktfilter. När startdistansen sänks så sker en drastisk sänkning av utrymt avstånd innan FED = 1 uppnås. Notera att vid sänkningen av startdistansen till 150 meter så är det därifrån förflyttning börjar. För minsta tvärsnittet har alltså ingen förflyttning alls skett från startdistansen. Vid en ökning av startdistansen blir utrymningen oproblematiser för samtliga tvärsnitt. Detta sker då ökningen av startdistansen gör att när förflyttningen startar så är personen redan 150 meter framför rökfronten.

Tabell 24. Känslighetsanalys av startdistansen för Scenario B – Hjullastare utan flyktfilter

Startdistans [m] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	150	300	450
3x4	150	354	>1700
4x5	162	372	>1700
5x5	174	384	>1700
6x7	222	426	>1700
7x11	324	528	>1700

Motsvarande känslighetsanalyser gjordes också på samma scenario fast med flyktfilter. Resultaten presenteras i Tabell 25 och Tabell 26. Tendenserna är densamma som för analysen utan flyktfilter där den största skillnaden är att när startdistansen höjs så sker förändringen mellan att passera rökfronten eller inte vid ett mindre tvärsnitt än när flyktfilter inte användes.

Tabell 25. Känslighetsanalys av reaktionstiden för Scenario A – Borrigger med flyktfilter

<b>Reaktionstid [s]</b> <b>50/100/150 %</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>		
	<b>75</b>	<b>150</b>	<b>225</b>
3x4	>1700	266	230
4x5	>1700	365	329
5x5	>1700	419	387
6x7	>1700	536	500
7x11	>1700	599	572

Tabell 26. Känslighetsanalys av startdistans för Scenario A - Borrigger med flyktfilter

<b>Startdistans [m]</b> <b>50/100/150 %</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>		
	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>
3x4	205	266	327
4x5	313	365	426
5x5	367	419	480
6x7	484	536	>1700
7x11	556	599	>1700

Tabell 27 och Tabell 28 visar motsvarande värden för scenario B – hjullastare. Resultaten är snarlika för både reaktionstiden och startdistansen men med något längre avstånd då flyktfilter används.

Tabell 27. Känslighetsanalys av reaktionstiden för Scenario B – Hjullastare med flyktfilter

<b>Reaktionstid [s]</b> <b>50/100/150 %</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>		
	<b>300</b>	<b>600</b>	<b>900</b>
3x4	>1700	444	300
4x5	>1700	525	363
5x5	>1700	579	453
6x7	>1700	750	669
7x11	>1700	>1700	840

Tabell 28. Känslighetsanalys av startdistans för Scenario B - Hjullastare med flyktfilter

Startdistans [m] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	150	300	450
3x4	150	444	>1700
4x5	213	525	>1700
5x5	303	579	>1700
6x7	519	750	>1700
7x11	699	>1700	>1700

## 7.2 Känslighetsanalys av införda parametrar

Nedan presenteras de känslighetsanalyser som genomfördes med fokus på de parametrar som infördes då flyktfiltren skulle beräknas i modellen.

Då fokus i rapporten är på flyktfilter och deras förmåga att hjälpa vid utrymning är parametrarna kopplade till flyktfiltren relevanta för känslighetsanalysen. Beräkningarna av flyktfiltrens effekt bygger också på ett antal antaganden vilket gör det ännu mer relevant att avgöra hur känslig beräkningsmodellen är för dessa antaganden. Därför kommer känslighetsanalysen innefatta analys av gånghastighet, tid tills filtret inte längre fungerar, genombrottskoncentrationen och andningsvolym kopplat till COHb.

För att avgöra hur den antagna tiden till att filtret slutar att fungera påverkar resultatet har filtertiden varierats. Utifrån resultaten som presenteras i Tabell 29 går det att avgöra att filtertiden inte påverkar fallet med det minsta tvärsnittet. Att öka filtertiden ger ingen skillnad alls förutom för det största tvärsnittet. Det antyder att nivåerna av kolmonoxid som filtret släpper igenom innan det har slutat fungera är tillräckliga för att avsvimning ska ske. Det är endast för det största tunneltvärsnittet som en ökning av tiden ger en skillnad i utrymt avstånd. Detta är troligtvis för att det större tvärsnittet gör att kolmonoxidkoncentrationerna är genomgående lägre och förloppet innan avsvimning blir då längre. Undersöker man Tabell 12 där resultaten för scenario A – borrhög med flyktfilter presenteras så är det endast för det största tvärsnittet som tiden innan avsvimning överstiger 30 minuter vilket då förklarar varför det endast är där som ökningen av filtertiden ger en skillnad. I samtliga beräkningar som har genomförts överstiger tiden till avsvimning 30 minuter endast ett fåtal gånger. Där den längre filtertiden kan ha en större påverkan är vid vilken tid som personen avlider av röken. Därför genomförs samma känslighetsanalys en gång till fast med tid till FLD=1 som resultat, se Tabell 30. Den nya känslighetsanalysen med tid till FLD=1 som resultat visar snarlika resultat med när avstånd till FED = 1 användes som resultat. Den enda relevanta skillnaden är att en ökning av filtertiden ger utslag vid de två största tvärsnitten istället för bara det största.

Tabell 29. Känslighetsanalys av filtertid för Scenario A - Borrugg med flyktfilter

<b>Filtertid [min] 50/100/150 %</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>		
	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>
3x4	266	266	266
4x5	302	365	365
5x5	320	419	419
6x7	383	536	536
7x11	509	599	680

Tabell 30. Känslighetsanalys av filtertid för Scenario A - Borrugg med flyktfilter med tid till FLD=1 som resultat

<b>Filtertid [min] 50/100/150 %</b>	<b>Tid till FLD=1 [min] eller maximal FLD vid 120 min</b>		
	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>
3x4	15	15	15
4x5	20,5	22,5	22,5
5x5	23,5	27	27
6x7	33	38,5	40
7x11	0,64*	0,64*	0,58*

\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

Motsvarande känslighetsanalys av filtertid för scenario B – hjullastare med avstånd till FED = 1 respektive tid till FLD = 1 som resultat visas i Tabell 31 respektive Tabell 32. När avstånd till FED = 1 mäts så sker ingen skillnad alls när filtertiden höjs. När den sänks sker dock en märkbar skillnad i avstånd. Då tid till FLD = 1 mäts är det skillnader i resultatet men väldigt små.

Tabell 31. Känslighetsanalys av filtertid för Scenario B - Hjullastare med flyktfilter

<b>Filtertid [min] 50/100/150 %</b>	<b>Avstånd till FED=1 [m]</b>		
	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>45</b>
3x4	417	444	444
4x5	453	525	525
5x5	471	579	579
6x7	534	750	750
7x11	>1700	>1700	>1700

Tabell 32. Känslighetsanalys av filtertid för Scenario B - Hjullastare med flyktfilter med tid till FLD=1 som resultat

Filtertid [min] 50/100/150 %	Tid till FLD=1 [min] eller maximal FLD vid 120 min		
	15	30	45
3x4	17,5	18	18
4x5	22,5	24,5	24,5
5x5	29	33	35
6x7	113,5	0,9707*	0,9124*
7x11	0,0063*	0,0063*	0,0063*

\*FLD som uppnåddes vid simuleringstidens slut (t = 120 min)

En annan parameter som kommer påverka resultatet är den andningsvolym på 50 liter per minut som antogs. Purser & McAllister (2016) anger att 25 liter per minut är en vanlig andningsfrekvens vid utrymning men på grund av den svåra miljö som en tunnel och gruva innebär antogs istället 50 liter per minut. Andningsfrekvensen har ett tillhörande COHb-värde för när avsvimning sker och detta måste därför också varieras med andningsfrekvensen. Andningsfrekvensen 75 liter per minut finns inte med i Purser & McAllister tabell och har därför inget motsvarande COHb-värde. Därför sänks den med 50 % i förhållande till COHb-värdet för andningsfrekvensen 50 liter per minut vilket ger ett COHb-värde på 10 % då andningsfrekvensen är 75 liter per minut. Resultaten presenteras i Tabell 33.

Tabell 33. Känslighetsanalys av andningsfrekvens med tillhörande COHb för Scenario A - Borrugg med flyktfilter

Andningsfrekvens [liter/min] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	25	50	75
COHb [%]	30	20	10
3x4	293	266	185
4x5	446	365	221
5x5	527	419	239
6x7	644	536	275
7x11	842	599	338

Utifrån Tabell 33 går det att utläsa att när andningsfrekvensen sänks så ökar de utrymda avstånden och när den höjs så minskar avstånden. Skillnaderna är i regel större då andningsfrekvensen har höjts än när den sänks i ett icke-linjärt förhållande.

Motsvarande känslighetsanalys för scenario B – hjullastare presenteras i Tabell 34. Skillnaderna i utrymt avstånd är relativt små där den största skillnaden sker när andningsfrekvensen ökas.

Tabell 34. Känslighetsanalys av andningsfrekvens med tillhörande COHb för Scenario B - Hjullastare med flyktfilter

Andningsfrekvens [liter/min] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	25	50	75
COHb [%]	30	20	10
3x4	453	444	417
4x5	561	525	453
5x5	678	579	462
6x7	876	750	507
7x11	>1700	>1700	>1700

Genombrottskoncentrationen för kolmonoxid i flyktfiltren är angiven i standarden, trots det bör den analyseras för att se hur mycket den påverkar resultatet. Tabell 35 visar att en ökning av genombrottskoncentrationen ger kortare utrymt avstånd och att en sänkning av genombrottskoncentrationen ger längre utrymt avstånd. Skillnaden är dock relativt liten i jämförelse med till exempel reaktionstiden.

Tabell 35. Känslighetsanalys av genombrottskoncentration för Scenario A - Borrugg med flyktfilter

Genombrottskoncentration [ppm] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	100	200	300
3x4	284	266	248
4x5	419	365	329
5x5	482	419	365
6x7	572	536	446
7x11	644	599	554

I Tabell 36 redovisas känslighetsanalysen av genombrottskoncentrationen för scenario B – hjullastare. En minskning av genombrottskoncentrationen ger en ökning av avstånden vilket är att vänta. På samma sätt ger en ökning av genombrottskoncentrationen en reduktion av avstånden förutom för minsta tunneltvärsnittet.

Tabell 36. Känslighetsanalys av genombrottskoncentration för Scenario B - Hjullastare med flyktfilter

Genombrottskoncentration [ppm] 50/100/150 %	Avstånd till FED=1 [m]		
	100	200	300
3x4	453	444	444
4x5	543	525	507
5x5	642	579	543
6x7	714	750	642
7x11	>1700	>1700	>1700

Gånghastigheten då flyktfilter används antogs följa resultaten från Jin & Yamada (1985) för icke-irriterande rök. För att kontrollera detta antagande så görs en känslighetsanalys med flyktfilter där gånghastigheten istället följer resultaten för irriterande rök. Se Tabell 6 i avsnitt 5.2.1 om beräkningsmodellen för exakta gånghastigheter.

Tabell 37. Känslighetsanalys av gånghastighet för irriterande och icke-irriterande rök för Scenario A - Borrigg med flyktfilter

Gånghastighet	Avstånd till FED=1 [m]	
	Icke – irriterande rök	Irriterande rök
3x4	266	158
4x5	365	218
5x5	419	248
6x7	536	320
7x11	599	386

Resultaten från Tabell 37 visar tydligt att antagandet att gånghastigheterna vid användandet av ett flyktfilter överensstämmer med de för icke-irriterande rök ger en stor påverkan av det utrymda avståndet.

Tabell 38 redovisar motsvarande känslighetsanalys fast för scenario B – hjullastare. Tabellen visar tydligt att antagandet om icke-irriterande rök för flyktfilter påverkar resultaten, speciellt för största tvärsnittet där gånghastigheten gör skillnaden mellan att klara hela sträckan eller inte.

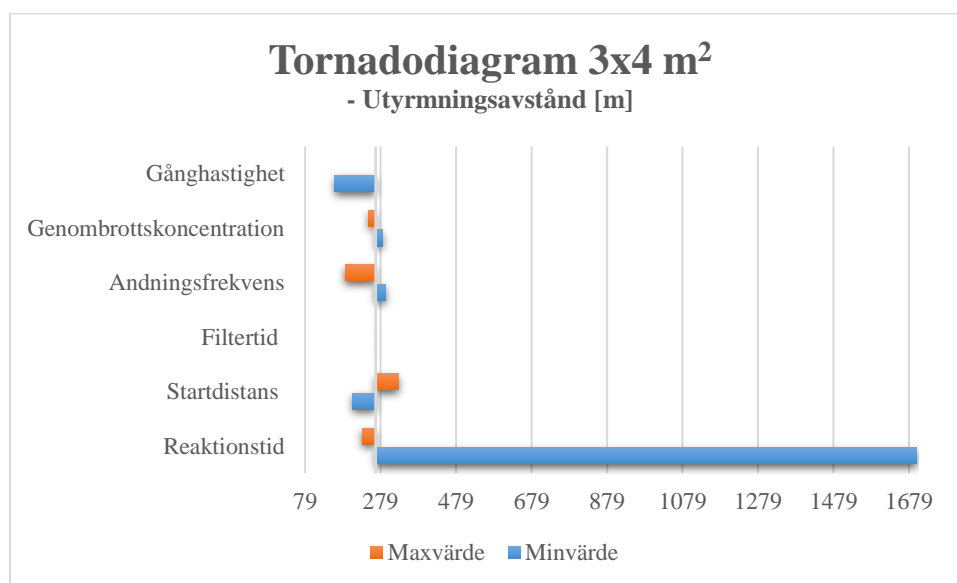
Tabell 38. Känslighetsanalys av gånghastighet för irriterande och icke-irriterande rök för Scenario A - Borrigg med flyktfilter

Gånghastighet	Avstånd till FED=1 [m]	
	Icke – irriterande rök	Irriterande rök
3x4	444	372
4x5	525	414
5x5	579	456
6x7	750	552
7x11	>1700	612

### 7.3 Jämförelse av känslighetsanalys

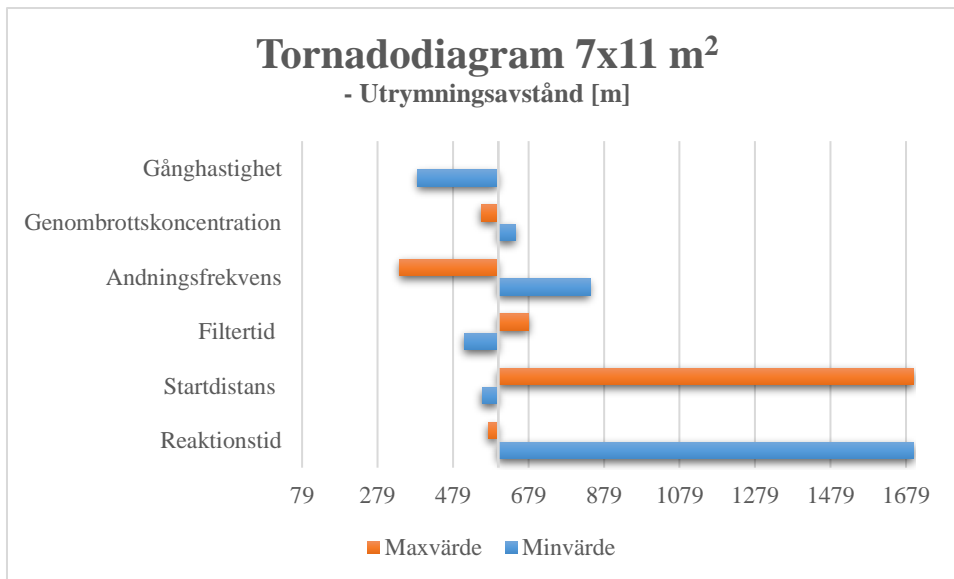
För att kunna genomföra en jämförelse av resultaten från de olika känslighetsanalyserna skapades tornadodiagram med de olika parametrarna som har analyserats.

Tornadodiagrammen gjordes för tunneltvärsnitten 3x4 m<sup>2</sup> och 7x11 m<sup>2</sup> och presenteras i Figur 24 respektive Figur 25. Notera att gånghastighet inte är varierad på samma sätt som övriga parametrar i figurerna utan normalfallet är för gånghastigheterna kopplade till icke-irriterande rök och minvärdet är gånghastigheterna kopplat till irriterande rök.



Figur 24. Tornadodiagram över Scenario A - Borrigg med flyktfilter, tvärsnitt 3x4 m<sup>2</sup>

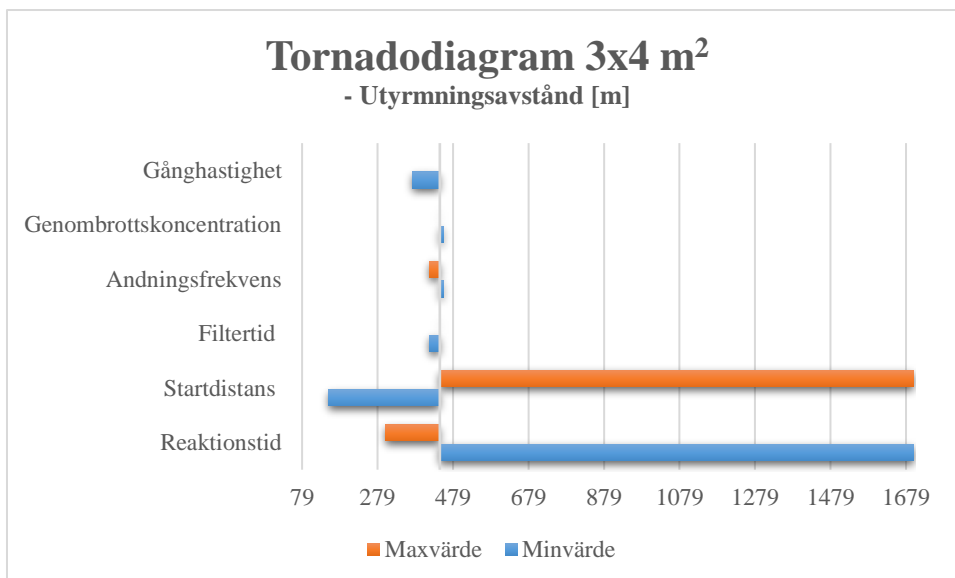




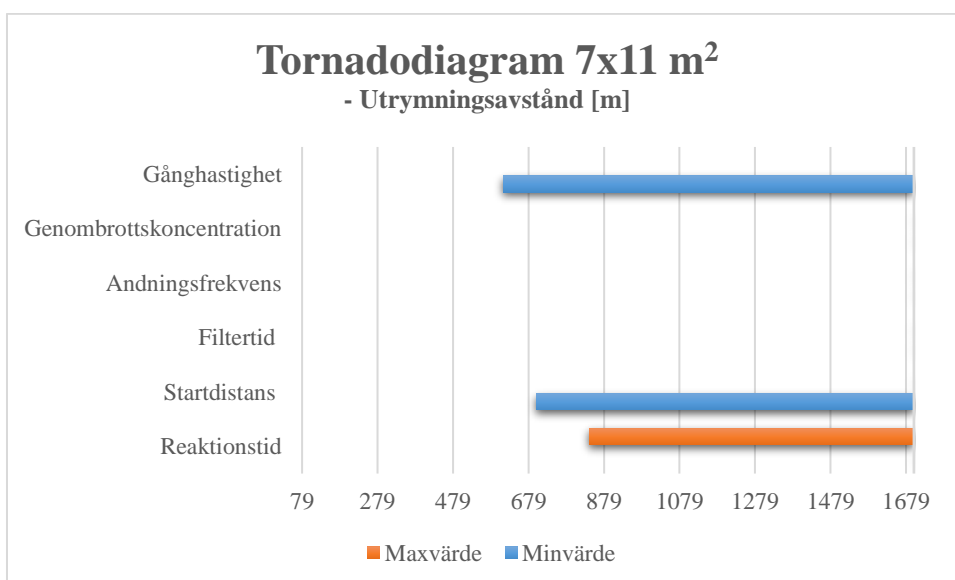
Figur 25. Tornadodiagram över Scenario A - Borrige med flyktfilter, tvärsnitt 7x11 m<sup>2</sup>

Utifrån tornadodiagrammen går det att utläsa att när reaktionstiden sänks så är det den parameter som påverkar mest vid båda tvärsnitten. Startdistansens påverkan är relativt liten för det mindre tvärsnittet medan den har en stor påverkan då den höjs för det stora tvärsnittet. En tydlig skillnad mellan de båda tvärsnitten är också hur mycket andningsfrekvensen påverkar. Då den utrymmande personen kommer vara avsvimrad en längre del av förloppet för det mindre tvärsnittet påverkar andningsfrekvensen utrymningsavståndet mindre. För det stora tvärsnittet där avsvimning sker senare i utrymningsförloppet har andningsfrekvensen större påverkan på resultatet. Filtertiden ger heller ingen påverkan alls på grund utav det korta utrymningsförloppet för det mindre tvärsnittet. Överlag går det att dra slutsatsen att reaktionstiden är en känslig parameter oavsett tvärsnitt. Det är också tydligt att gånghastigheten har en stor påverkan oavsett tvärsnitt. Startdistansens känslighet är väldigt beroende av tvärsnittets storlek och de andra parametrarnas känslighet förändras med tvärsnittet men inte lika drastiskt.

Motsvarande jämförelse för scenario B – hjullastare gjorde också och presenteras i Figur 26 och Figur 27. För det minsta tvärsnittet ger en sänkning av reaktionstiden och en höjning av startdistansen störst påverkan på resultatet. En sänkning av startdistansen ger också en stor påverkan på resultatet. Utseendet på Figur 27 som visar tvärsnittet 7x11 m<sup>2</sup> skiljer sig mycket från Figur 26. Detta är för att det maximala avståndet är 1700 meter för normalfallet. Då 1700 meter är den maximala sträckan i beräkningsmodellen kommer Figur 27 endast visa när avståndet minskar. En sänkning av startdistansen och en höjning av reaktionstiden ger båda, precis som i Figur 26, en sänkning av de utrymda avstånden. Den stora skillnaden är att gånghastigheten för irriterande rök har en större påverkan än både reaktionstiden och startdistansen. Detta är enda gången i känslighetsanalysen en av parametrarna kopplade till flyktfiltren har en större påverkan på resultatet än de ursprungliga parametrarna som infördes av Frantzych (2010).



Figur 26. Tornadodiagram över Scenario B - Hjullastare med flyktfilter, tvärsnitt 3x4 m<sup>2</sup>



Figur 27. Tornadodiagram över Scenario B - Hjullastare med flyktfilter, tvärsnitt 7x11 m<sup>2</sup>

## 8 Diskussion

Detta avsnitt delas upp i två delar där den första delen behandlar resultaten från litteraturstudien, intervjuerna och beräkningsmodellen. Här diskuteras eventuella brister i dessa resultat. Den andra delen tar upp de metodval som gjorts i rapporten och diskuterar huruvida resultaten beror av dessa val.

### 8.1 Resultatdiskussion

Litteraturstudien visade att kravet på flyktfilter från AFS berg- och gruvarbete är att de ska finnas i fordon. Intervjuerna visade att det endast var i specialfall, som när personer skulle ta sig ett längre avstånd till fots i gruvtunnlar, som flyktfilter bars med på personen istället för att vara i fordonen. De vanligaste utrymningsstrategierna enligt intervjuerna bygger på att antingen ta sig till en räddningskammare eller ta sig till sitt fordon och försöka ta sig ut ur tunneln.

Utrymningen är inte helt okomplicerad bara för att personen är framme vid fordonet men det finns en större möjlighet att ta sig förbi rökfronten och kunna utrymma med hjälp av fordonet. Flyktfiltret kan underlätta utrymningen med fordonet precis som vid gående utrymning. Problemet med att ha flyktfiltren i fordonen är flera. Intervjuerna och statistik i litteraturstudien har visat på att bränder i en gruva är mest sannolika att uppstå i fordon vilket medför att det finns en risk att personen inte kommer åt flyktfiltren och kan använda dem vid utrymningen. Det är också i detta scenario när ett fordon antänds som flyktfiltren hade kunnat utgöra störst skillnad då utrymningen hade skett till fots en längre sträcka om inte andra fordon finns tillgängliga för utrymning. I de fall då utrymning sker till närmsta räddningskammare är personalen beroende av att vara i närheten av något fordon för att få tillgång till ett flyktfilter. Eftersom de nuvarande reglerna ställer krav på att flyktfiltren ska finnas i fordon och inte på personen så är det inte säkert att flyktfiltren finns tillgängliga då de hade gjort störst skillnad. Därför bör det utredas vidare om hur kraven är ställda.

Resultaten från beräkningsmodellen visar tydligt att användandet av flyktfilter ökar avståndet som personer klarar av att utrymma i en tunnel eller gruva. Generellt blir skillnaden större med flyktfilter då tvärsnittet ökar. Den största skillnaden i avstånd sker då flyktfiltret utgör skillnaden mellan att personen tar sig förbi rökfronten eller inte. Då är skillnaden mellan att utrymma ett par hundra meter till att utrymma hela sträckan. Denna drastiska skillnad i avstånd går även att se i känslighetsanalysen där reaktionstiden varierar. Anledningen till den tydliga skillnaden har att göra med hur rökspridningen är modellerad. I beräkningsmodellen är det en uniform rökfront som rör sig med en konstant hastighet utifrån luften som ventileras in vid fronten. I verkligheten hade röken först bildat ett distinkt rökgaslager och det är först senare när röken har kylts ner något som den skulle vara jämnt fördelad över hela höjden i tunneln. I en gruvtunnel hade rökspridningen troligtvis skiljt sig ännu mer från beräkningsmodellen då gruvor i regel har mer komplicerade geometrier.

Resultaten från beräkningsmodellen visar att användandet av flyktfilter ökar de utrymda avstånden. Trots det är avståndet tills att  $FED = 0,3$  under 300 meter för alla tvärsnitt utom det största i scenario A – borrhög med flyktfilter. Ett avstånd på 300 meter från fronten är det maximala avståndet för en räddningskammare enligt AFS Berg- och gruvarbetet. I scenario B är de utrymda avstånden väldigt korta för båda bränderna. Flyktfiltren förlänger avstånden något men det är samtidigt svårt att veta om det tillräckligt för att nå en säker plats. För scenario B är det svårare att veta hur nära fordon eller en annan räddningskammare finns då

det inte regleras. Beräkningsmodellen visar alltså att flyktfiltren hjälper men i de mer extrema scenarierna med väldigt hög effektutveckling kombinerat med mindre tvärsnitt räcker det inte. Därför är placeringen av räddningskammare nära fronten av största vikt. Tillförlitligheten i de här resultaten är samtidigt svårbedömda då känslighetsanalysen visar att resultaten är väldigt känsliga för bland annat reaktionstiden och startdistansen.

Känslighetsanalysen visar att resultaten från beräkningsmodellen i regel inte är mer känsliga för de parametrar som infördes och antogs i samband med införandet av flyktfilter än de parametrar som är en del av den ursprungliga beräkningsmodellen. Det betyder inte i sig att de gjorda antagandena är korrekta men är ändå en jämförelse med den ursprungliga beräkningsmodellen.

Antagandena om att all kolmonoxid under genombrottskoncentrationen släpps igenom och att andningsfrekvensen är 50 liter per minut vid utrymningen av en tunnel är två konservativa antaganden. Känslighetsanalysen visar att en ändrad genombrottskoncentration gör relativt liten skillnad för avståndet som kan utrymmas. Andningsfrekvensen gör desto större skillnad, speciellt vid de större tunneltvärsnitten. Känslighetsanalysen visar att antagandet om filtertidens längd inte påverkar resultatet alls vid de mindre tvärsnitten och påverkar endast marginellt för de större tvärsnitten. Det antagande om att gånghastigheten när flyktfilter bärs följer gånghastigheten för icke-irriterande rök är inte nödvändigtvis konservativt. Enligt standarden så tillåts ett läckage på 20 % i den okulära zonen och det är därför rimligt att anta att irriterande rök från branden ändå hade påverkat gånghastigheten till viss del. Känslighetsanalysen av gånghastigheten visar att om gånghastigheten vara helt enligt sambandet för irriterande rök så gör det en relativt stor skillnad i utrymt avstånd.

Känslighetsanalysen visar att reaktionstiden är den mest avgörande parametern för resultatet. Det är problematiskt då det inte finns studier gjorda på reaktionstiden vid bränder i tunnlar och gruvor och därmed inte något tydligt underlag för vad reaktionstiden bör vara. Att utgå från storleken på branden har därför varit rimligt men framtida försök kring reaktionstiden hade varit önskvärt för att ge en mer korrekt bild. Bortsett från reaktionshastigheten så beror känsligheten för en enskild parameter på vid vilket tvärsnitt analysen sker. Till exempel så gör filtertiden ingen skillnad alls vid de små tvärsnitten då utrymningsförloppen redan är över då filtret skulle sluta verka. Medan en skillnad i filtertiden har en påverkan på de stora tvärsnitten då utrymningsförloppen är längre. Både beräkningsresultaten och känslighetsanalysen visar också en tydlig skillnad då tunneltvärsnittet varierar. De mindre tvärsnitten ger konsekvent kortare utrymt avstånd då koncentrationen av kolmonoxid blir högre i de mindre volymerna av luft.

Vid en generell jämförelse av de beräknade avstånden för den anpassade modellen i denna rapport med den ursprungliga modellen från Frantzich (2010) så är det tydligt att Frantzich överlag får mycket längre avstånd. Anledningen till den stora skillnaden i avstånd har att göra med de olika effektutvecklingskurvorna som används. Då Frantzich utvecklade den ursprungliga beräkningsmodellen fanns inte effektutvecklingskurvor från praktiska försök för en hjullastare och borrhög. Den effektutveckling från Ingason et al (2010) som Frantzich har använt sig av istället har både en avsevärt lägre tillväxthastighet och maximal effektutveckling för borrhögen än vad de praktiska experiment som senare utfördes av Hansen & Ingason (2013) visar. Det finns därför en risk att de avstånd då borrhögen brinner som presenteras av Frantzich överskattar avstånden som är möjliga att utrymma. Den

effektutvecklingskurva som är mest jämförbar med de praktiska försöken är den kurva Frantzich använder för en buss. Här liknar resultaten från Frantzich resultaten från den förändrade beräkningsmodellen med väldigt korta avstånd innan avsvimning uppstår. Detta tydliggör vikten av effektutvecklingen för resultaten i den här typen av beräkningsmodell.

## 8.2 Metodikdiskussion

Den här rapporten har utgått från tre olika metoder, litteraturstudie, intervju och modellering. Litteraturstudien hade ett väldigt brett syfte med generella frågeställningar. Intervjuerna har utgått från den generella kunskapen från litteraturstudien för att sedan bli mer specifik. Slutligen har modelleringen gjorts som har ett mycket snävt syfte och specifik frågeställning.

Metoden för att hitta respondenter utgick initialt via Håkan Frantzich och hans kontakter. Dessa kontakter var främst lokaliserade i Stockholm och inblandade i de olika spår- och tunnelprojekt som pågår där. På grund av detta var även de personer som de rekommenderade främst aktiva i Stockholm. Den generella problematiken med snöbollseffekten som uppstod åskådliggörs här då resultatet kommer påverkas väldigt mycket av den första personen som kontaktas och sedan leder en vidare (Goodman, 1961). Detta märktes också i resultaten där de flesta personer som intervjuades främst var från projekteringssidan och inte hade så bra kontakt med entreprenörerna som genomför själva bygget av tunnlar. Flertalet försök gjordes för att få kontakt med dessa personer men det misslyckades. Hade intervjuer med personer från entreprenörssidan genomförts hade mer information om deras utbildningar och rutiner kring flyktfiltren troligtvis erhållits. För att bredda intervjumaterialet togs även kontakt med personer som arbetar vid gruvor i Sverige.

Totalt så genomfördes fem intervjuer med sex respondenter. För att få en fördjupad inblick inom området och komplimentera litteraturstudien genomfördes intervjuerna med ett begränsat urval. Det ansågs mer givande för rapportens syfte att ha en mer kvalitativ intervjumetod med färre respondenter än en kvantitativ intervjumetod med ett större antal respondenter. Det var också därför en blandning mellan en öppen och halvstrukturerad intervjumetod användes under själva intervjuerna. Detta gav möjligheten att ställa öppna frågor kring de områden som var av intresse. En helt öppen intervjumetod hade troligtvis inte gett svar på de specifika frågor om till exempel flyktfilter som var syftet med intervjuerna. En semistrukturerad metod hade innefattat en blandning av öppna och stängda frågor. Då syftet var mer kvalitativt än kvantitativt användes endast öppna frågor.

För att avgöra flyktfiltrens bidrag vid utrymning valdes en metod med en beräkningsmodell i Matlab. Den största fördelen med den här typen av beräkningsmodell är att den bygger på olika ekvationer sammansatta i ett script. Beräkningsmodellen kan därför koppla samman fler olika separata beräkningar så som rökspridning och toxicitet i en och samma modell. Den är därför också relativt enkel att anpassa till en sådan sak som flyktfilter. Nackdelen blir att modellen är väldigt förenklad och inte kan hantera mer komplicerade fenomen som till exempel brandgaslager. Just antagandet om endimensionell rökspridning nämner Frantzich (2010) som det största problemet med den ursprungliga beräkningsmodellen. Beräkningsmodellen är i sig inte validerad då det är väldigt svårt att göra menar Frantzich men de olika delarna av modellen så som toxicitetsberäkningarna och relationen mellan gånghastighet och sikt är validerade var för sig. Med additionen av effektutvecklingskurvor från fullskaliga experiment gjorda i tunnlar bör modellen ha förbättrats ytterligare. Införandet av flyktfiltren i beräkningsmodellen har dock medfört fler antaganden och även fler

parametrar som behöver underbyggas med vidare forskning. Delmodellen som berör flyktfiltren bör därför i framtiden försöka valideras med hjälp av experiment där flyktfiltren utsätts för brandrök och de olika gaskoncentrationerna mäts i flyktfiltren.

Ett alternativ till beräkningsmodellen hade varit att använda mer avancerade program så som Pathfinder och FDS. Problemet med det är att det hade behövts flera program som samarbetade för att kunna hantera tidsberoende effektutveckling, rökspridning, förflyttning och toxicitetsberäkningar. Om det hade funnits så hade fortfarande programvaran behövts anpassas för att hantera flyktfilter vilket med ett mer komplicerat program också hade varit svårare att implementera. En eventuell beräkningstid hade också varit mycket lång.

## 9 Slutsats

Syftet med denna rapport har varit att identifiera och utvärdera hur flyktfilter används samt att med hjälp av beräkningar bedöma dess effektivitet. Målet har varit att fastställa hur flyktfilter ska användas för att öka säkerheten i en tunnel eller gruva.

Rapporten kom fram till följande slutsatser:

- Ett flyktfilter är en andningsmask med ett tillhörande filter som filtrerar ur skadliga gaser ur inandningsluften. Flyktfilter används under byggfasen i tunnlar och gruvor.
- Den huvudsakliga problematiken vid utrymning i tunnlar och gruvor är omfattande rökspridning, långa utrymningsavstånd och få utrymningsvägar.
- Kraven på flyktfilter finns i AFS berg- och gruvarbete och är att flyktfilter ska finnas i de fordon som används vid transport och då i samma antal som personer som transporteras i fordonet. Rekommendationerna i AFS berg- och gruvarbete anger två standarder för flyktfilter.
- Flyktfilters effektivitet gick inte att fastställa med hjälp av litteraturstudien då inga relevanta rapporter hittades.
- De primära utrymningsstrategierna vid arbete i tunnlar och gruvor består av att använda fordon för att utrymma alternativt att använda en räddningskammare tills branden är över.
- Beräkningsmodellen visar att flyktfilter uppfyller den tänka funktionen med att öka avstånden som går att utrymma. Beräkningsmodellen uppvisar samtidigt hög känslighet för startdistansen och reaktionstiden som är två parametrar med hög osäkerhet.

Sammantaget är rapportens slutsats att flyktfilter ökar avstånden som går att utrymma i tunnlar och gruvor. På grund av beräkningsmodellens höga känslighet och avsaknaden av andra studier om flyktfilter kommer denna rapport fram till att det krävs vidare studier för att validera resultaten.

## 10 Framtida studier

Då det under arbetets gång har identifierats flera kunskapsluckor rörande flyktfilter presenteras här ett antal förslag på studier för att åtgärda detta.

### 10.1 Filtertest

I litteraturstudien upptäcktes en avsaknad av studier med tillhörande data kring hur väl flyktfilter fungerar. De tester som genomförs idag är för att bekräfta att en viss tillverkares flyktfilter klarar av de standarder som finns. Då det är privata företag som genomför dessa är det inte något som publiceras utöver att man uppfyller standarden. Utöver det så genomförs testerna för standarderna med en giftig gas som blandas ut i ren luft med en given fukthalt till en förutbestämd koncentration. Under en brand kommer flyktfiltren utsättas för luft som inte enbart innehåller en giftig gas utan ett flertal giftiga gaser och sotpartiklar samtidigt. Därför bör tester genomföras i verkliga brandscenarier. Detta hade kunnat validera och förbättra den framtagna modellen.

### 10.2 Utredda krav på flyktfilter i fordon

Rapporten visar på brister med att kraven på flyktfilter är kopplade till fordon. Därför bör det undersökas vidare hur kraven skulle kunna ändras för att flyktfilter ska vara med tillgängliga i de situationer då de behövs.

### 10.3 Jämförelse av flyktfilter med andra tekniska lösningar

Då det idag läggs stora pengar på att brandklassa och trycksätta underhållstunnlar som sällan används bör det genomföras jämförande studier och se om flyktfilter går att använda istället. Förslagsvis genomförs en kostnad-nytta analys samt en jämförelse av säkerhetsnivån.



## 11 Referenser

- Aaro, F. (2012). *En intuitiv och lättillgänglig flyktmask för gruvmiljö*. Umeå: Designskolan vid Umeå Universitet.
- Arbetsmiljöverket. (u.d.). *AFS 2001:1 Berg- och gruvarbete*.
- Beard, A., & Carvel, R. (2005). *The Handbook of tunnel fire safety*. London: Thomas Telford Publishing.
- Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K., & Ingason, H. (2001). *Räddningsinsatser vid tunnelbränder*. Räddningsverket.
- Boverket. (den 12 2017). *Tunnlar och bergrum*. Hämtat från Boverket: <https://www.boverket.se/sv/PBL-kunskapsbanken/lov--byggande/anmalningsplikt/bygglov-for-anlaggningar/tunnlar-och-bergrum/>
- Frantzich, H. (2010). *Fire incidents during construction work of tunnels - evacuation aspects*. Lund: Department of Fire safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Gehandler, J., & Ingason, H. (2018). *Principer och strategier för ventilation vid brand i undermarksanläggningar*. Borås: RISE Research Institutes of Sweden.
- Gehandler, J., Ingason, H., Lönnermark, A., Frantzich, H., & Strömberg, M. (2013). *Funktionsbaserade krav och rekommendationer för brandsäkerhet i vägtunnlar (FKR-BV12)*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut .
- Goodman, L. A. (1961). Snowball Sampling. *Annals of Mathematical Statistics*, 148-170.
- GRAMKO. (2016). *Brandskydd i gruv- och berganläggningar - samlade råd och anvisningar*. Stockholm: SveMin AB.
- Gramko Arbetsgrupp brand. (2015). *Årsrapport 2015 Brandtillbud*. Svemin.
- Hadjisophocleous, G., Lee, D. H., & Park, W. H. (2012). Full scale experiments for heat release rate measurements of railcar fire. *Proceedings from the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, (ss. 457-466). New York, USA.
- Hansen, R. (2009). *Literature Survey - fire and smoke spread in underground mines*. Västerås: Mälardalen University.
- Hansen, R., & Ingason, H. (2013). Heat release rate measurements of burning mining vehicles in an underground mine. *Fire Safety Journal*, 12-25.
- Höst, M., Regnell, B., & Runeson, P. (2006). *Att genomföra examensarbete*. Lund: Studentlitteratur.
- Ingason, H. (2005). Tunnel Fire Dynamics. i A. Beard, & R. Carvel, *The Handbook of Tunnel Fire Safety* (ss. 231-266). London: Thomas Telford Publishing.
- Ingason, H. (2009). Design fire curves in tunnels. *Fire Safety Journal*, 259-265.
- Ingason, H., & Lönnermark, A. (2005). Heat Release Rates from Heavy Goods Vehicle Trailers in Tunnels. *Fire Safety Journal*, 646-668.

- Ingason, H., Frantzich, H., de Laval, S., & Daram, L. (2009). *Funktionsbaserad design för tunnlar med avseende på säkerhet - Förstudie*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Ingason, H., Kumm, M., Nilsson, D., Lönnemark, A., Claesson, A., Li, Y. Z., . . . Palm, A. (2012). *The Metro Project - Final Report*. Västerås: Mälardalen University.
- Ingason, H., Lönnemark, A., Frantzich, H., & Kumm, M. (2010). *Fire incidents during construction work of tunnels*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Jin, T., & Yamada, T. (1985). Irritating effects of fire smoke on visibility. *Fire science & technology*, 79-89.
- Johnsson, L., & Kaj, L. (2016). *Räddningsinsatser och brandskydd i underjordsgruva*. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.
- Jönsson, P. G. (1993). *Andningsskydd för hälso- och sjukvårdspersonal*. Umeå: Totalförsvarets Forskningsinstitut.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press.
- Lamb, A., Bray, W. C., & Frazer, J. C. (1920). The removal of carbon monoxide from air. *The journal of industrial and engineering chemistry*, p213.
- Loncar, M. (1996). *Simple test of four escape hoods*. Hårsfjärden: Totalförsvarets Forskningsinstitut.
- LUB. (den 14 09 2020). Hämtat från What is LUBsearch?: <https://libguides.lub.lu.se/lubsearchandelectronicresources/lubsearch>
- Lönnemark, A., Vylund, L., Ingason, H., Palm, A., Palmkvist, K., Kumm, M., . . . Fridolf, K. (2015). *Rekommendationer för räddningsinsatser i undermarksanläggningar*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Purser, D. A. (1987). Modelling toxic hazard in fire. *Proceedings of the fire retardant chemicals association meeting*. New Orleans, USA.
- Purser, D. A. (1989). Modelling Toxic and Physical Hazard in Fire. *Fire Safety Science - Proceedings of the second international symposium* (ss. 391 - 400). Hemisphere Publishing Corporation.
- Purser, D. A. (2012). Validation of additive models for lethal toxicity of fire effluent mixtures. *Polymer Degradation and Stability*, 2552-2561.
- Purser, D. A. (2016). Combustion Toxicity. i M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (ss. 2207-2307). New York: Springer.
- Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. i M. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (ss. 2308-2428). New York: Springer.
- SveMin. (den 22 09 2020). *SveMins arbetsmiljökommitté, GRAMKO*. Hämtat från SveMin: <https://www.sveamin.se/om-oss/svemins-kommitteer/gramko-och-sam-kommitten/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 22 09 2020). *Andningsskydd - Flyktfilterskydd med huva vid brand - Fodring, provning, märkning*. Hämtat från Sis-webbplats: <https://www.sis.se/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skyddsutrustning/andningsskydd/ssen403/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 22 09 2020a). *Andningsskydd - Flyktfilter - Fodringar, provning, märkning*. Hämtat från Sis-webbplats: <https://www.sis.se/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skyddsutrustning/andningsskydd/ssen404/>

Thorpsten, J., & Thunéll, M. (2017). *Flykthuvor*. Totalförsvarets Forskningsinstitut.

Transportstyrelsen. (2016). *Säkerhetsmål för trafikanter i vägtunnlar, järnvägstunnlar och tunnelbana*. Transportstyrelsen .

Yamada, T., & Akizuki, Y. (2016). Visibility and human behavior in fire smoke. i M. Hurley, *SFPE Handbook of fire protection engineering* (ss. 2181-2207). New York: Springer.

# Bilaga A – Intervjuunderlag

## Bilaga A1 – Intervjumall Räddningstjänst

Nedan presenteras intervjumallen som användes vid intervjun av räddningstjänsten.

### **Innan samtal**

Förklara att intervjun är anonym och ska användas i ett arbete om arbetsmiljö i tunnlar och gruvor kopplat till flyktfilter.

Är det okej att jag spelar in samtalet? Jag kommer efter vårt samtal att sammanfatta dina svar och sedan skicka dem till dig för påsyn, du har då möjlighet att justera eller lägga till information.

1. Vad arbetar du med?
  - a. Har du några speciella ansvarsområden? I så fall vad?
  
2. Kan du berätta lite generellt om att göra en insats i en tunnel/gruva?
  - a. Antal personer som är arbetar samtidigt?
  - b. Hur ser arbetsmiljön ut? Fysiska miljön?
  - c. Vad är det för speciella svårigheter en tunnel vid brand och liknande olyckor?
  - d. Vad utgör den största brandrisken i tunneln/gruvan?
  
3. Hur samarbetar ni med de tunnelprojekt som finns?
  - a. Vilka råd ges för utrymning?
  - b. Sker det gemensamma övningar på något sätt?
  
4. Har du varit med om någon brand i en tunnel?
  - a. Om ja, hur upplevde du att det gick?
  - b. Användes flyktfilter, hur gick det?
  
5. Har du kommit i kontakt med flyktfilter?
  - a. Vilken typ i så fall? Med huva eller utan? Vilken standard?
  - b. Hur ser du på reglerna kring dem? (Alltid bära med sig/kopplat till fordon)
  - c. Tror du att utrymningsstrategierna hade varit annorlunda om flyktfiltren inte fanns? I så fall, hur?
  - d. Upplever du att det saknas information kring deras effektivitet? Vet du något om effektiviteten av dem, några genomförda studier? Känner du till någon annan verksamhet som använder dem?
  
6. Har du tips på någon annan person som kan vara intressant för mig att intervjua i denna fråga?

### **Efter samtalet**

Tacka så mycket för att de tog sig tid för intervjun och säg att intervjun är anonym. Be om att få skicka en sammanfattning av samtalet så de kan godkänna och se till att missuppfattningar inte har skett.

## Bilaga A2 – Sammanfattning av intervju med räddningstjänsten

Nedan presenteras den sammanfattade och godkända intervjun som genomfördes med räddningstjänsten.

Intervjun genomfördes 2020-10-14

Respondenten arbetar som yttre befäl med operativ yttre ledning vid Storstockholms Brandförsvaret. I praktiken innebär det att respondenten samordnar ledning mellan yttre aktörer, till exempel polis och ambulans, vid större olyckor. Respondenten har varit delaktig i de flesta större vägtunnelprojekt som har genomförts i Stockholm de senaste åren.

Vid en insats i en tunnel i byggfasen sker allt arbete tillsammans med entreprenören som finns på plats. Entreprenören ska se till att det finns utrymningsplatser till sin personal nere i tunnel, i praktiken utgörs dessa av flyktkammare. Räddningstjänstens uppgift är att rädda personal som inte kan ta sig från flyktkammaren. Räddningstjänsten kommer inte att hantera en brand i byggskedet, den får brinna färdigt, utan utför endast livräddning. Skulle en olycka ske är det en besättning från en borrhög, cirka 3 - 5 personer, som skulle vara i en räddningskammare. Resterande personal arbetar på andra platser i tunneln där de kan ta sig ut själva.

De primära svårigheterna vid en insats i en tunnel är att räddningstjänsten kommer möter röken samtidigt som det är en lång inträngningsväg. Övertändning är inte en risk då berget kyler ner de omgivande brandgaserna. Däremot är miljön farlig under en lång sträcka i tunneln. Huvudsakligen arbetar räddningstjänsten med en rekognoseringsgrupp som först undersöker om det finns alternativa angreppsvägar som är bättre och kortare.

Rekognoseringsgruppen gör också en bedömning av riskerna med en större insats. För att flytta sig i tunneln använder räddningstjänsten främst de fordon som redan finns i gruvan. Räddningstjänsten tar med sig luft in till de som skall räddas. I värsta fall kan räddningskammaren vara cirka 600 meter från där räddningstjänsten kan göra sin insats. En av de större svårigheterna vid en insats är att radiokommunikationen kan vara svår att upprätthålla. Vid en insats måste räddningstjänsten kunna upprätthålla kontakt med de utanför tunneln. Mobiltelefonäckning finns alltid i tunnlar, samt ett för tunnlar internt radiosystem. Räddningstjänsten kan dock inte alltid använda sig av det interna systemet. Brandvatten är inget problem att få fram då räddningstjänsten kan använda sig av processvattnet som används vid borrhög för att minska dammet. Räddningstjänsten kopplar in sina släckbilar till borrhögens vattenledningar för att säkerställa att vattentrycket är rätt.

Respondenten anser att arbetsmaskinerna utgör den största brandrisken i tunnlar.

Samarbete mellan räddningstjänsten och de som är ägare av projektet sker kontinuerligt under hela projektets livstid. Ägaren, Trafikverket vid bygge av vägtunnlar, har arbetsmiljöansvar för hela anläggningen. Regelbundna möten sker mellan räddningstjänsten, ägaren av projektet och entreprenörerna. Räddningstjänsten ställer krav på att räddningskammare ska finnas och att personalen är övad och instruerad på den skyddsutrustning de har. Ytterligare krav finns också på ritningsmaterial, styrning av ventilation och information om hur långt man har hunnit i byggprocessen.

Minst en gång per år måste en stor utrymningsövning genomföras inom projektet, då medverkar räddningstjänsten och överser hur organisationen fungerar vid en olycka.

Vid arbete på en tunnel har de som arbetar i tunneln inte flyktmasker med sig. Flyktmaskerna är kopplade till de fordon som används vid transporter. Respondenten tycker att det är rimligt att kravet på flyktmasker är att de ska finnas i fordonen och inte med personen hela tiden. Detta för att arbetarna inte kan ha för mycket utrustning med sig som inte används vid det dagliga arbetet. Den extra utrustningen kommer att sinka det dagliga arbete och utrustningen riskerar att bli skadad om den hela tiden ska bäras med.

Respondenten tror inte att utrymningsstrategin hade sett annorlunda ut utan flyktmaskerna då arbetarna antingen tar sig till en räddningskammare eller till sina fordon och utrymmer tunneln.

## Bilaga A3 – Intervjumall Övriga

Nedan presenteras den intervjumall som användes vid intervju av projektör, brandkonsult och sektionschef vid en gruva.

### Innan samtal

Förklara att intervjun är anonymt och ska användas i ett arbete om arbetsmiljö i tunnlar och gruvor kopplat till flyktmasker.

Är det okej att jag spelar in samtalet? Jag kommer efter vårt samtal att sammanfatta dina svar och sedan skicka dem till dig för påsyn, du har då möjlighet att justera eller lägga till information.

1. Vad arbetar du med?
  - a. Har du några speciella ansvarsområden? I så fall vad?
  
2. Kan du berätta lite generellt om en tunnel/gruva som arbetsplats?
  - a. Antal personer som är arbetar samtidigt?
  - b. Hur ser arbetsmiljön ut? Fysiska miljön?
  - c. Är det några speciella svårigheter med just er arbetsplats vid brand och liknande olyckor?
  - d. Vad utgör den största brandrisken i en tunnel/gruva?
  
3. Har ni några befintliga rutiner vid en brand eller olycka?
  - a. Hur ser de ut?
  - b. Vilka råd ges för utrymning?
  - c. Sker det utrymningsövningar?
  
4. Har du varit med om någon brand?
  - a. Om ja, hur upplevde du att det gick?
  - b. Användes flyktfilter, hur gick det?
  
5. Har du kommit i kontakt med flyktfilter/flyktmasker?
  - a. Vilken typ i så fall? Med huva eller utan? Vilken standard?
  - b. Vad har ni för regler kring användandet? (Alltid bära med sig/kopplat till fordon)
  - c. Vem använder dem (hur många totalt vid arbetsplatsen)?
  - d. Hur använder ni flyktfilter vid brand?
  - e. Används det till något annat än vid brandsituationer, i så fall vad?
  - f. Om ni inte hade haft flyktfilter, hur hade utrymningsstrategin sett ut?
  - g. Upplever du att det saknas information kring deras effektivitet? Vet du något om effektiviteten av dem, några genomförda studier? Känner ni till någon annan verksamhet som använder dem?



6. Har du tips på någon annan person som kan vara intressant för mig att intervjua i denna fråga?

### **Efter samtalet**

Tacka så mycket för att de tog sig tid för intervjun och säg att intervjun är anonym. Be om att få skicka en sammanfattning av samtalet så de kan godkänna och se till att missuppfattningar inte har skett.

## Bilaga A4

Nedan presenteras den sammanfattade och godkända intervjun som genomfördes med en person vid en gruva i Sverige.

Intervjun genomfördes 2020-10-07

Respondentens titel är sektionschef i driftservice och i det arbetet ingår brand och säkerhet. Driftservice är för hela området som personen arbetar i och personen sitter också med i de samordningsgrupper för säkerhet som är övergripande för hela företaget. Arbetet innefattar både ovan och under jord.

En gruva är en undermarksanläggning. Gruvan har en huvudinfart och en eller flera alternativa vägar in. Transport sker med hjälp av fordon på snedbanor som går mellan de olika nivåerna. Nere i gruvan slussas man sedan vidare till sitt område med lokala fordon beroende på vad man arbetar med. Det finns fordonsverkstäder och underhållsverkstäder i gruvan. Antalet personer i ett brytområde är högst varierande. I normalfall runt 5 - 10 personer men sker projektarbete eller större servicearbete kan det finnas upp till ett femtiotal personer i området. I de fallen med större servicearbeten och flera personer så krävs det att man tänker kring de förändrade säkerhetsaspekterna i händelse av utrymning.

Arbetsmiljön vid brytning är överlag bra. Ofta sitter man i maskiner som har en bra miljö och det finns frisk luft framdragen till brytområdet.

Utmaningen under jord är röken då den ofta tar samma väg där man evakuerar luften. Vid evakuering transporteras personalen i gruvgångarna och i vissa fall är transportsträckan flera kilometer lång. Då evakueringsvägen är lång finns en risk att exponeras för röken. Den generellt största risken i en gruva är att många personer kan exponeras för brandröken. Det räcker med att ett fordon brinner för att skapa mycket rök. Därför finns rutiner för att hantera evakuering. I grova drag består rutinerna av att alla ska vara utbildade så de har koll på personskyddsutrustning, räddningsrum, räddningskammare, utrymningsplaner etc. Vid händelse av brand är det utrymning till närmsta säker plats, på de övre nivåerna är det räddningsrum. Kan man inte ta sig så långt är det räddningskammare. Där avvaktar man på information och order av räddningsledare eller anläggningsansvarig från gruvan. Det gäller att vara lugn och i vanliga fall går det snabbt att få händelserna under kontroll. Vid mindre händelser återgår man direkt till arbete. Vid större händelser samlas man och får information. Vid brand informeras personalen i viss mån genom utrymningslarm men i många fall är det via kommunikationsradio eller telefon.

Utrymningsövningar för hela gruvan sker en gång per år, men det sker även övningar för det lokala arbetsområdet minst en gång per år.

Det har skett bränder i gruvan. I regel går insatserna bra. Respondenten har också varit med om större händelser men i och med att de har systematik och metodik i hur de arbetar har det också gått bra. Om insatserna inte hade gått bra hade de inte kunnat bedriva verksamhet. Vid flera av bränderna har flyktfilter använts för att ta sig till säker plats. Det händer inte ofta men då och då händer det att folk hamnar i rök då evakuering kan vara lång och då används flyktfiltren. Respondenten uppskattar att det sker ett par händelser per år per gruva då det blir rökutveckling och då används flyktfiltrena. Ungefär vart tionde år sker en större brand.

I gruvan använder de Sundströms flykthuvor med filter som standard. Finns även masker med syrgas men det är i undantagsfall. I det dagliga arbetet så ska flyktfiltren finnas i fordonen och det ska finnas samma antal som personer det finns plats för i fordonet. Tar man sig till fots till ett arbete som är i periferin görs en bedömning om att du ska ha med dig ett flyktfilter. I verkstäderna så har man inte flyktfilter på sig utan ofta finns en säker plats. Ska man ge sig av därifrån är det med ett fordon och då finns flyktfiltren i fordonet. Går det ett larm tar man inte på sig flyktfiltret direkt utan först när man ser eller på annat sätt exponeras för rök. Flyktfiltren används endast vid utrymning under brand. Det utförs kontroller av fordonen var tionde vecka och då sker även kontroll av flyktfiltren.

Utrymningsstrategierna hade varit desamma om flyktfiltren inte hade funnits, men risken för att utsättas för rök och fara illa hade varit större. Utan flyktfiltren hade bedömningen av riskerna sett annorlunda ut och i vissa fall hade kanske riskerna bedömts vara för stora för att kunna genomföra arbetet.

Flyktfiltren är ”specsade” efter de mest extrema fallen och då ska de klara av att filtrera i 40 - 50 minuter. I verkligheten är det sällan så extrema fall. Oftast är röken uppblandad med luft när den väl når personal och då håller flyktfiltret i flera timmar och det huvudsakliga problemet är då obehaget som uppstår av att ha den på sig.

## Bilaga A5

Nedan presenteras den sammanfattade och godkända intervjun som genomfördes med två personer vid ett tunnelprojekt i Sverige.

Genomförd 2020-10-07

Intervjun genomfördes med två personer som arbetar med en nybyggnation av en tunnel i Sverige. Det ena respondenten är ansvarig för brandsäkerheten inom tunnelprojektet och det andra respondenten är bygglédare inom arbetsmiljö och ger stöd till de andra bygglédarna i arbetsmiljöfrågor.

Tunnlarna har till början bara en front, först efter ett par månader går det att starta sidotunnlar. I den tidiga fasen med endast en front är man i regel 6 - 10 personer som arbetar samtidigt. I den senare fasen med flera sidotunnlar är man cirka 30 personer. Framme vid själva fronten finns i nuläget en räddningskammare som har en kapacitet på 8 personer och fler personer än så är det inte framme vid fronten samtidigt. Potentiellt blir det fler fronter i framtiden och också fler räddningskammare. Vid större projekt som till exempel förbifarten i Stockholm är man istället 30 - 40 personer samtidigt. Arbetet börjar med att man gräver en arbetstunnel som i regel är 300 - 500 meter lång och först efter att den är färdig kan man starta upp med flera fronter. Allt, så som utrymning, utforsling av material, fordon och så vidare går endast via arbetstunneln.

Tunnelmiljön är väldigt speciell. Den är dammig, blöt och det är dålig belysning. Finns väldigt många olika typer av risker. Innan tunneln har tätats är det konstant väldigt blött i tunneln. Problemet är att det finns inte så mycket att göra åt att det är skitigt då damm hela tiden rörs upp vid sprängningar. På grund av detta måste maskiner och utrustning kontinuerligt tas ut och rengöras och servas.

Det största problemet vid brand och utrymning är att man inledningsvis bara har en utgång, arbetstunneln. Det blir dessutom ganska långa avstånd tidigt i projektet. Ett annat stort problem är vid själva sprängfronten. Sprängningarna skadar allt i närheten så därför går det inte att ha en räddningskammare så nära själva fronten. Detsamma gäller med all typ av belysning och liknande utrustning nära fronten. Efter att man har sprängt och innan man har forslat bort materialet som bildas vid sprängningen, finns det ofta stora block och liknande material kvar i tunneln. Innan fronten är säkrad kan den vara ostabil. Tunneln går att dela upp i två delar. Den första delen av tunneln är mer permanent medan den andra delen som är 50–100 meter ifrån fronten har mer tillfälliga lösningar där man gör det bästa man kan.

Utrymningsstrategier och planer finns. Det finns larmknappar med jämna mellanrum i tunneln och vid aktivering går ett larm i form av ljud- och ljussignal i tunneln. Vid larmsignal ska personen om möjligt ta sig ut genom arbetstunneln och om det inte går uppsöka närmsta räddningskammare. Larmet är direktkopplat till den så kallade etableringen som finns utanför tunneln som tar larmet vidare. Olika entreprenader har lite olika rutiner. Tidigt i projektet tar respondenterna kontakt med räddningstjänsten för att få deras åsikter om hur man kan förbättra utrymning och säkerhet. Respondenterna menar att räddningstjänsten har svårt att göra insatser i tunnlar på grund av den svåra miljön och det finns en avsaknad av rutin kring hur man ska agera i den här miljön. Därför bygger man sin utrymningsstrategi på att man ska rädda sig själva.

Det är först när en tunnel är 200 – 300 meter som en räddningskammare placeras ut. Man vill placera räddningskammaren så nära fronten som möjligt utan att den går sönder när man spränger. Respondenterna gav ett exempel på en räddningskammaren som enligt tillverkaren har ett rekommenderat avstånd på 150 – 200 meter till fronten för annars kommer den gå sönder. Allt eftersom tunneln blir längre ställer man in fler räddningskammare. När tunnelsprängningarna är färdiga ändras utrymningsstrategin, då utrymning kan ske mellan tunnlar istället.

I tunnelbygget genomförs en stor utrymningsövning per år där beställare och alla olika arbetslag deltar. I de mindre bygglagen som finns sker mindre övningar oftare än en gång om året. Respondenternas nuvarande tunnelprojekt är speciellt i den bemärkelsen att arbetstunnel byggs av en entreprenad och att själva spår-tunneln kommer byggas av en annan entreprenad. Arbetstunneln tar oftast 6 – 12 månader att bygga och därför är det gränsfall om den årliga gemensamma utrymningsövningen hinner genomföras. Det generella problemet med att genomföra en utrymningsövning tidigt i bygget är att många av de tekniska installationerna så som brandlarm och ventilation i drift saknas. Syftet med utrymningsövningarna är att få värdefull information om hur de tekniska systemen fungerar och det får man först när de är installerade vilket sker väldigt sent i projektet.

Ingen av respondenterna har varit med om att en brand har skett underjord i deras tunnelprojekt.

Respondenterna anser båda att den största brandrisken är i de fordon som används under arbetet. Då det sker mycket servicearbeten på fordonen anläggs också verkstadsplatser under jord som innebär en del brandrisker, till exempel gasflaskor som används vid servicearbete. För att minska riskerna för brand i fordon finns det mycket regler och rutiner kring var fordon får parkeras, avstånd mellan verkstadsplatser och brännbart material, hur många fordon som får stå bredvid varandra. En stor brandbelastning kommer också från dräneringsmattor som är brännbara plastmattor som sätts upp i taken och sedan sprutas in med sprutbetong. Problem kan uppstå då de ska transporteras in i tunneln och förvaras men också då de är uppsatta och helt exponerade i taket av tunneln.

I en av arbetstunnlarna i projektet är tunneln inte längre än 30 – 50 meter och flyktfilter används därför inte ännu. I tidigare projekt som respondenterna har deltagit i användes flyktfilter. Då fanns det minst ett flyktfilter i alla bilar, ofta några extra. Det skulle finnas ett flyktfilter för varje person under jord. Lastbilar, grävmaskiner och alla större fordon hade också flyktfilter. Respondenterna kontrollerar att flyktflitren finns på plats och i rätt antal men det är upptill entreprenaden vilken av de två standarderna som används. Innan arbete påbörjas i en tunnel görs en arbetsplatsintroduktion där flyktmaskerna ingår. De faktiska reglerna kring användandet av maskerna ligger på entreprenaden och var därför inget respondenterna kände till i detalj.

Respondenterna anser inte att om flyktflitren inte skulle finnas så skulle utrymningsstrategin förändras. Man ser snarare flyktflitren som ett komplement eller extra säkerhetsåtgärd än något man bygger sin utrymningsstrategi kring. Respondenterna upplevde generellt att det saknas information kring hur väl flyktfilter fungerar och om de har använts i verkliga utrymningar och varit till någon nytta då. Med mer information om hur väl flyktflitrem fungerar hade respondenterna inte ökat avstånden till räddningskammaren men däremot hade det varit användbart för att kunna trycka på vikten av att flyktflitren måste finnas samt att

genomföra övningar då de används. Mer information om flyktflitren hade till exempel kunnat vara ett skäl till att man kunde genomföra att flyktflitren ska vara personliga och alltid bäras med sig istället för att vara kopplade till fordonen.

## Bilaga A6

Nedan presenteras den sammanfattade och godkända intervjun som genomfördes med en brandkonsult som jobbar mot ett tunnelprojekt i Sverige.

Genomfördes 2020-10-13

Respondenten arbetar med ett tunnelprojekt i Sverige och är teknikansvarig på avdelningen kallad brand och utrymning på den projekterande enheten.

I de tunnlar som respondenten arbetar med är det endast bergtunnlar som man spränger sig fram i. Ansvar för brand i byggstadiet överlämnas i respondentens projekt helt till entreprenören, vilket är standard för spårtunnlar. Då det i byggstadiet oftast bara finns en utrymningsväg så består grundprincipen i brandskyddet av att räddningskammare används. På borrhjulen finns också brandvatten tillgängligt via vattenledningar. En problematik i att ordna brandskyddet är att tunnlar i regel är så smala som möjligt i sitt tvärsnitt för att minska kostnader. Samtidigt måste räddningsfordon och arbetsfordon kunna passera förbi de räddningskammare som finns utplacerade. När tunneln är färdigbyggd ska det finnas vändplatser var 300:e meter och planen är att räddningskammarna ska placeras vid de platser som senare blir vändplatser.

Respondenten anser att fordonen är den största brandrisken i tunneln. När sprängmassorna ska forslas bort är det väldigt stor trafik i tunneln och fordonen utgör den största brandbelastningen. Andra brännbara material i gruvan är dräneringsmattorna som man klär insidan av gruvan med. Sprängningen som sker är givetvis också en stor risk men är ett eget moment med väldigt mycket regler och rutiner kring.

Som projektör i projektet arbetar inte respondenten med den organisatoriska delen av brandskyddet i form av utrymningsstrategier och utrymningsövningar och kan därför inte svara på frågor rörande detta. Respondentens del i brandskyddsarbetet under byggstadiet går ut på att man ser till att det finns en plan och utrymme för att ställa upp räddningskammare.

Respondenten känner till att flyktfilter finns och används i projektet men ansvaret för dessa ligger på entreprenören.

Respondentens arbete med tunnlar består delvis av att genomföra FDS simuleringar av spårtunnlar för att avgöra temperatur och sikt för utrymning. Dessa simuleringar görs för när tunneln är färdigbyggd och inte i byggskedet. Respondenten menar att då tunnlar redan är uppritade för det färdiga fallet borde det gå att ändra tågbranden till en fordonsbrand, som representerar de fordon som används i byggskedet, för att kunna simulera vad som skulle hända vid en brand i byggskedet.

## Bilaga A7

Nedan presenteras den sammanfattade och godkända intervjun som genomfördes med en arbetsmiljöspecialist som arbetar med tunnelprojekt i Sverige.

Intervjun genomfördes 2020-10-27

Respondenten arbetar som arbetsmiljöspecialist vid större infrastrukturprojekt i form av vägar och tunnelbyggen. Respondenten har varit med i både projekteringsfasen och byggfasen i olika projekt.

Den fysiska arbetsmiljön är bullrig med mycket höga ljud. Det är ofta blött och lerigt vilket ger en smutsig miljö. Till exempel skyltar och annan installation stänks ner av fordon som kör i tunnlarna.

Entreprenörerna utses till BAS-U, byggarbetsamordnare för utförandet. BAS-U bestämmer över arbetsstället och reglerna för arbetsplatsen sammanfattas i en arbetsmiljöplan. BAS-S sätter upp regler om till exempel tillträde till tunnlarna. För inträde i tunnlarna måste man ha genomgått en säkerhetsutbildning samt ha en personlig tagg på sig som registrera ens position.

Transport till de olika arbetsplatserna i tunnlarna sker med bilar. Det är olämpligt att gå till fots i tunnlarna. Innan man ska åka in i tunneln måste man stämma av med arbetsledarna på plats om i vilka tunnlar det sker arbete, som till exempel sprängningar, som gör det olämpligt att besöka den tunneln.

Det pågår många olika typer av arbetsmoment parallellt i tunneln. Så som borrhning för injektering och laddning, utlastning, mark – och betongarbeten. För de som utför till exempel betongarbeten kan tunnlar vara en helt ny typ av arbetsmiljö som de inte är vana vid. Betongarbetarna tar sina fordon ner i tunneln till sina arbetsplatser där de utför arbete. Flera olika arbetsplatser finns därför också samtidigt. En normal arbetsdag kan det vara cirka 30 – 40 personer totalt i tunneln.

En av de viktigaste aspekterna vid en brand i tunnelprojekt är att radiokommunikationen fungerar som den ska. Upptäcks en brand måste kommunikationen fungera för att kunna larma övriga personer i tunneln. I ett av projekten fanns också ett separat upphandlat utrymnings- och positioneringssystem som har larmskåp som sitter med viss regelbundenhet som börjar lysa och låta om någon har tryckt på larmet. Det är dock en generellt hög ljudnivå och skitigt i tunneln vilket kan försvåra att larmet uppfattas. Därför är radiokommunikationen viktig vid brand.

Om det sker en brand i tunneln utgår man från entreprenadens arbetsmiljöplan. Den säger att om man kan så ska man försöka släcka branden med den handbrandsläckare som ska i finnas i sitt fordon. Man ska också larma och varna de andra i tunneln och försöka ta sig ut om släckningen misslyckas. Vattenposter finns med jämna mellanrum så det finns tillgång till vatten för att släcka en brand.

Arbetsmiljöplanen bygger på att personalen som åker in i tunneln har en medvetenhet kring brand och de övriga riskerna som finns i en tunnel. Personalen ska också ha kunskap om hur deras utrustning som till exempel en handbrandsläckare fungerar.



Räddningskammare finns också i tunneln. De placeras utifrån en arbetsplatsdisposition under jord i vilken räddningskammare är utplacerade utifrån vilka arbeten som pågår på vilka platser. Antalet platser i räddningskammare dimensioneras då utifrån antalet personer som arbetar på en plats. Vid utrymning kan personalen antingen ta sig ut eller till en räddningskammare.

Det sker utrymningsövningar och testningar av larm. När detta sker är upp till varje enskild entreprenör att bestämma.

Ingen brand har skett i de projekt som respondenten har arbetat med. Det som har hänt är att ett släcksystem på en hjullastare har aktiverats och förhindrat en brand. För alla fordon på över tre ton är släcksystem ett krav.

I tunneln använder man sig av flyktfilter som har en huva. Flyktfiltren är kopplade till fordonen och det ska finnas lika många som antalet platser i fordonet. Personalen får information om flyktfilter på den säkerhetsutbildning som de genomför innan de får åka ner i tunneln. Dock sker inga praktiska moment i utbildning där man får testa att ta på sig ett flyktfilter. Respondenten menar att en del av arbetarna som till exempel genomför betongarbeten troligtvis aldrig har sett ett flyktfilter tidigare och att det därför vore bra om de fick testa att ta på sig dem under säkerhetsutbildningen.

Respondenten menar att specifikationerna för flyktfiltren skiljer sig åt beroende på tillverkare och att det därför är upp till varje arbetsgivare att de har bra koll på de filter som de har valt att köpa in.

Respondenten menar att flyktfiltren ersätter ingen annan av säkerhetsutrustningen utan är mer av ett komplement. Därför skulle utrymningsstrategin inte se annorlunda ut om filtren inte fanns.

## Bilaga A8

Nedan presenteras den sammanfattade och godkända intervjun som genomfördes med en senior specialist som arbetar med tunnelprojekt i Sverige.

Intervjun genomfördes 2020-11-05

Respondenten arbetar med tunnelsäkerhet på Trafikverket som senior specialist. Huvudsakligt fokus ligger på vägtunnlar i driftskedet men hen svarar också på säkerhetsfrågor gällande byggskedet.

Byggskedet av en tunnel går att dela upp i flera stadier. I de tidiga stadierna då man driver berg, påminner arbetet mycket om det som utförs i en gruva och är en grov miljö. I Sverige har vi mycket hårda bergarter vilket gör att man främst använder sig av en metod där man borrar och spränger istället för TBM (Tunnel Boring Machine) som borrar upp hela tvärsnittet och sen installerar väggar i bakkanten av riggen. Efter sprängningen skrotar man genom att knacka bort allt löst berg från tunneltaket och väggar. Berget förstärks sedan genom att man sätter bergbultar och applicerar sprutbetong. Först efter att förstärkningen har skett börjar arbetsmiljön bli bättre. Ledningar sätts sedan ner i marken och vägkroppen, väggar och tak börjar byggas. När alla berg- och betongarbetena är genomförda påbörjas installationsentreprenaden. Vid detta skede har normalt alla genomslag skett vilket ger helt andra utrymningsmöjligheter, bland annat till det parallella tunnelröret via inredda utrymningsvägar. Arbetsmiljön går från den tidiga bergdrivningen då belysningen är begränsad, det är blött och kladdigt, många hinder och ojämna bergytter till en mer eller mindre färdig tunnel. Den färdiga tunneln har flertalet utrymningsvägar och mycket kortare utrymningsavstånd.

Framme vid fronten när man driver berg är det cirka en handfull personer som arbetar. Då man spränger och ventilerar spränggaser finns det en del risker och därför kan inte så mycket annat arbete ske samtidigt. När betongarbetet väl har börjat är det i regel flera olika arbetslag som arbetar med olika uppgifter på olika platser i tunneln.

Ett generellt problem med säkerhetsarbetet i de tunnelprojekt respondenten har arbetat med är att förmedla en ökad förståelse kring säkerhet och de risker som finns. Respondenten menar att flera tunnelarbetare har jobbat många år i tunnlar utan att en brand någonsin har skett och att det finns en risk för att tunnelarbetarna därför tycker att riskerna ibland överdrivs. Arbetsmiljöansvar och säkerhetsarbete gäller heller inte bara de entreprenörer som arbetar på tunneln utan Trafikverket har också egen personal som regelbundet är på plats i tunneln. Ett annat problem är att arbetsmiljölagstiftningen är omfattande men inte alltid så tydlig. Till exempel finns det råd om att man ska ta fram en brandskyddshantering men exakt till vilken detaljgrad är inte specificerat. Istället blir det upp till vad entreprenören och vad arbetsmiljöverkets inspektörer i just det projektet tycker är en lämplig nivå. Respondenten hade velat att det fanns en rimlig miniminivå som man kunde känna igen från ett projekt till ett annat.

Respondenten anser att ett personfordon som brinner inte utgör så stor risk då det är väldigt stora volymer i tunnelprojekten. Däremot borrhjull och dumprar innehåller mycket hydraulik, däck etcetera vilket gör att de kan ha väldigt långa brandförlopp. I fasen då man driver berg utsätts maskinerna för stort slitage och därför utgör dessa en större brandrisk. Beroende på hur produktionen ser ut har man också ibland bergkrossar under jord. Bergkrossarna är en

brandkälla då de ofta kopplas ihop med transportband gjorda av gummi och stora hydrauliksystem. Tunneln tätas normalt med olika varianter av plastmembran och dessa kan i vissa fall vara brännbara. Under betongarbetet har man sågverk för gjutställningar i trä som också utgör en brandrisk. Generellt så finns det hela tiden en konflikt mellan att lagra brännbart material nära till hands i tunneln för ökad effektivitet i arbetet och att lagra det utanför tunnel för att minska brandrisken. Om materialet lagras utanför tunneln kan det ligga upp till fem kilometer bort i de stora tunnelprojekten vilket kräver mer eller mindre skytteltrafik av transportfordon. Under installationsfasen handlar brandskyddsarbetet mycket om en effektiv sophantering då det blir väldigt mycket emballage från alla de skyltar, kablar och liknande som ska installeras i tunneln. I den här fasen är det också väldigt många personer som arbetar samtidigt i tunneln vilket gör brandskyddet extra viktigt.

I det tidiga byggskedet sker utrymning antingen via fordon eller till en räddningskammare. När man har kommit längre i arbetet, sektioneras olika delar av tunneln av och utrymning kan ske till dessa. När tunneln mer eller mindre är färdig går det också att utrymma till den parallella tunneln. Miljön under jorden förändras hela tiden vilket kräver att utrymningsplaner hela tiden uppdateras. Det kan också vara svårt att uppfatta utrymningssignaler eller liknande på grund av den högljudda miljön, vilket gör att entreprenören har ett stort ansvar att ta med sig alternativa signalsystem som till exempel blyxtljus.

Utrymningsövningar genomförs ofta med stöd av räddningstjänsten. Kontinuerlig kontakt hålls också med räddningstjänsten genom arbetets gång.

Respondenten har inte varit med om en brand inne i en tunnel. Det har dock skett en brand i en bergkross som var belägen utanför tunneln.

Respondenten har kommit i kontakt med flyktfilter med en tillhörande huva. De finns i samma antal som antalet platser i de fordon som körs med i tunneln. Respondenten vet inte hur entreprenörernas utbildning kring flyktfiltren ser ut och hur de instrueras att använda dem.

Den generella utrymningsstrategin är att man utrymmer ut ur tunneln med hjälp av fordon. Är inte detta möjligt tar man sig till fots till en räddningskammare eller det intilliggande tunnelröret. Då det intilliggande tunnelröret inte är helt brandtekniskt avskilt under stora delar av byggtiden har kraven på fler räddningskammare ökat i de senare tunnelprojekten.

Räddningskammaren ska finnas cirka 300 meter från fronten. Efter det finns inte ett bestämt avstånd och räddningskammare placeras därefter där det kan uppstå återvändsgränder. Till exempel i en arbetstunnel med en bergkross finns det en risk för att en brand i bergkrossen hade skapat en återvändsgränd och man behöver därför ha en eller flera räddningskammare.

Respondenten tycker att det kan finnas en användning av flyktfilter i bruksfasen också. I dagsläget ställs krav på välkonstruerade utrymningsvägar även på platser med till exempel teknisk utrustning som endast kontrolleras varje halvår. Här tycker respondenten att ett flyktfilter eller en andningsmask skulle kunna vara ett fullgott alternativ utifrån att man är på platserna väldigt sällan och det finns rutiner för att meddela övervakningscentralen om vilken plats man befinner sig på. Idag bygger man istället en trycksatt eller brandavskild korridor. För att kunna genomföra det här tycker respondenten att det krävs mer information om hur tillförlitliga flyktfilter och andningsmasker är.