

# KRITERIER OCH GRÄNSVÄRDEN VID UTRYMNING AV VÄGTUNNLAR

## DELUTREDNING 2



2023-09-29

# KRITERIER OCH GRÄNSVÄRDEN VID UTRYMNING AV VÄGTUNNLAR

## Delutredning 2

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| Uppdragsnamn   |                                |
| Uppdragsnummer | 10357291                       |
| Författare     | Sofia Lundegårdh, Göran Nygren |
| Datum          | 2023-09-29                     |
| Ändringsdatum  |                                |
| Granskad av    | Erik Lundström                 |
| Godkänd av     | Göran Nygren                   |

## KUND

Transportstyrelsen

## KONSULT

### WSP

121 88 Stockholm-Globen  
Besök: Arenavägen 7  
Tel: +46 10-722 50 00  
WSP Sverige AB  
Org nr: 556057-4880  
**wsp.com**

## KONTAKTPERSONER

GÖRAN NYGREN  
goran.nygren@wsp.com  
Telefon 070-234 80 82

# INNEHÅLL

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Inledning                                     | 4  |
| 1.1   | Bakgrund                                      | 4  |
| 1.2   | Syfte och mål                                 | 4  |
| 1.3   | Omfattning och avgränsningar                  | 5  |
| 1.4   | Internkontroll                                | 5  |
| 1.5   | NomEklatur                                    | 6  |
| 2     | Värdering av Kriterier för utrymningssäkerhet | 7  |
| 3     | Kritiska förhållanden vid brand               | 8  |
| 3.1   | Värmestrålning                                | 8  |
| 3.2   | Lufttemperatur                                | 8  |
| 3.3   | Sikt  | 9  |
| 3.4   | Toxiska gaser                                 | 9  |
| 3.4.1 | FED (Fractional Effective Dose)               | 10 |
| 3.4.2 | FID (Fractional Incapacitation Dose)          | 11 |
| 4     | Omvärldsanalys                                | 11 |
| 5     | Analys av kriterier                           | 13 |
| 5.1   | Temperatur                                    | 13 |
| 5.2   | Sikt  | 13 |
| 5.3   | Strålning                                     | 14 |
| 5.4   | Toxiska Gaser                                 | 14 |
| 5.5   | Möjliga Felkällor – osäkerheter               | 15 |
| 6     | Resultat av analys                            | 17 |
| 7     | Diskussion                                    | 18 |
| 7.1   | Osäkerheter                                   | 18 |
| 7.2   | Vidare studier                                | 18 |
| 8     | Slutsats                                      | 19 |
| 9     | Referenser                                    | 20 |

# 1 INLEDNING

I detta inledande kapitel ges en bakgrund till uppdraget, vidare beskrivs syfte och mål, omfattning och avgränsningar, nomenklatur samt beskrivning av handlingens kvalitetssäkring.

## 1.1 BAKGRUND

WSP har av Transportstyrelsen fått i uppdrag ta fram ett underlag för hur gränsvärden för kritiska nivåer vid brand och utrymning i vägtunnlar kan utformas. Kriterierna och gränsvärden är avsedda att användas vid beräkning av säkerhetsnivå, i enlighet med kap 3 § 3 i TSFS 2019:93, riskbedömning inom ramen för den samlade bedömningen av de säkerhetsåtgärder som ska vidtas vid projektering av en vägtunnel.

Det som är avgörande för hur länge en människa överlever vid händelse av brand och exponering av konsekvenserna av en brand är hur lång tid som exponering av värme, giftiga gaser och strålning pågår innan utrymningen är fullbordad. För att kunna beräkna de förväntade konsekvenserna för liv och hälsa för personer som befinner sig i tunneln är det därför nödvändigt att precisera gränsvärden för vilka förhållanden som personer kan exponeras för utan att de förlorar förmågan att självutrymma.

I den nu gällande föreskriften, Transportstyrelsen föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i vägtunnlar m.m., TSFS 2019:93 med ändring tom 2022:13, anges följande gränsvärden för kritiska förhållanden:

*"Följande gränsvärden för kritiska förhållanden kan tillämpas:*

- 1. Värmestrålning: en maximal strålningsintensitet på 2,5 kW/m<sup>2</sup>.*
- 2. Lufttemperatur: högst 80 °C.*
- 3. Toxiska gaser, 2,0 m ovan gångbana: mer än 15 volymprocent syre, mindre än 5 volymprocent koldioxid och mindre än 0,2 volymprocent kolmonoxid.*
- 4. Sikt: En siktsträcka på minst 10 meter."*

Gränsvärdena ska fastslås och kan nyttjas för att värdera om utrymning är möjlig när avståndet mellan utrymningsvägar överstiger 200 m.

För att kunna få mer enhetlighet vid dimensionering av vägtunnlar föreslogs i rapporten Riskanalysmetoder & Basstandard, underlag till revidering av föreskrift 2019:93 att; *"Nya gränsvärden för exponering vid utrymning föreslås tas fram där dessa är mer baserade på dödlig påverkan"*. De nuvarande kriterierna återspeglar när utrymningsförhållandena i en tunnel blir kritiska, dvs gör att personer får det svårare att utrymma men i många fall inte leder till dödsfall. Detta medför troligen en överskattning av risknivån i många fall om de även nyttjas som kriterier i riskbedömningen.

Denna rapport undersöker möjligheten att som alternativ nyttja gränsvärden kopplade till den dos av skadliga brandgaser som personer riskerar att andas in vid brand under utrymningsfasen för att på ett mer nyanserat sätt beräkna konsekvenserna för utrymmande.

## 1.2 SYFTE OCH MÅL

Denna rapport syftar till att utvärdera vilka gränsvärden som kan användas som kriterier för omkomna i händelse av brand i vägtunnel.

Vidare syftar rapporten till att utgöra underlag för kravställning av kriterier vid riskbedömning i enlighet med TSFS 2019:93 kap 3 § 3, för att få en likvärdig bedömning av antal omkomna vid brand i tunnel.

Målsättningen med uppdraget är att kunna vägleda Transportstyrelsen om hur kriterier och gränsvärden kan formuleras för att kunna användas vid riskbedömning av en vägtunnel.

### 1.3 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR

Uppdraget har utförts genom en litteraturstudie där en genomgång är gjord av handböcker och andra regelverk, standarder, akademiska artiklar och annan referenslitteratur i syfte att hitta underlag för att kunna föreslå kriterier/gränsvärden, en mindre omvärldsanalys för att identifiera vilka kriterier för säker utrymning som nyttjas internationellt och utifrån detta ge förslag på gränsvärden för när personer omkommer vid brand i vägtunnlar.

Det finns många olika förutsättningar som är styrande för att kunna avgöra när personer bedöms omkomma vid brand i en tunnel, vilket medför en stor komplexitet. Detta leder till att det är svårt att avgöra exakt när olika individer i en population omkommer. Osäkerheterna är stora t ex vilket bränsle som brinner, vilka toxiskt produkter som bildas vid en brand av ett specifikt bränsle, var branden är lokaliserad i en tunnel, brandens placering i förhållande till ventilationen och det luftflöde som bildas där, den turbulens som skapas av både fläktar och fordon som finns i en tunnel m.m. Detta resulterar i att det är svårt att simulera alla olika tänkbara brandförlopp i en tunnel och därmed få ett rättvisande resultat med avseende på t ex var brandgaser hamnar i ett tunneltvårsnitt. Det är också en grannlaga uppgift för den som utför en simulering att bedöma vilka som omkommer samt avgöra begränsningar i mjukvaran som används. Denna rapport avser utifrån omfattningen av uppdraget att inte vara heltäckande med avseende på den komplexa problembild som föreligger utan snarare vägleda till en enhetlig nivå i förhållande till det forskningsläget som råder avseende aktuellt område.

Nuvarande kravställning i TSFS 2019:93 kap 3 § 24 utvärderas inte i denna handling.

Rapporten omfattar inte FIC/FEC (Fractional Incapacitating Concentration/ Fractional Effective Concentration). FIC/FEC representerar en situation där en person kan bli omedelbart medvetlös på grund av en hög koncentration av ett giftigt ämne. Om denna situation uppstår är det rimligt att anta att personen inte kan fortsätta med utrymningen. De kan fortfarande andas och ackumulera en dos av kvävande gaser som i slutändan kan leda till deras död.

### 1.4 INTERNKONTROLL

Denna handling är upprättad av Sofia Lundegårdh (Civilingenjör brandteknik) och Göran Nygren (Brandingenjör/ Civilingenjör riskhantering). Handlingen omfattas av internkontroll i enlighet med WSP:s kvalitetssystem, certifierat enligt ISO 9001 och ISO 14001. Detta innebär bland annat att annan brandingenjör granskar förutsättningar och redovisade lösningar av brandskyddet. Denna handling har internkontrollerats av Erik Lundström (Brandingenjör).

## 1.5 NOMEKLATUR

### **FED (Fractional Effective Dose):**

Används för att beräkna den toxiska påverkan under en utrymning av t ex en tunnel används en så kallad fraktionsdosmodell FED utgör en beräknad dos av luftburna föroreningar en person andas in givet den miljö som den vistas i. Vid t ex CFD simuleringar av brand kan ämnen som t ex koldioxid och kolmonoxid beräknas som en funktion av tiden för olika platser i ett byggnadsverk.

### **FID (Fractional Incapacitation Dose):**

Används för att beräkna den toxiska påverkan under en utrymning av t ex en tunnel används en så kallad fraktionsdosmodell. Modellen beskriver t ex den sammanlagda effekten av de giftiga gaserna kolmonoxid (CO) och koldioxid (CO<sub>2</sub>) samt effekten av en minskad syrekoncentration (O<sub>2</sub>). Beräkningsmodellen är den samma som för FED men gränsvärdet utgörs av när vissa personer i en population blir medvetslösa. Modellen anger hur stor dos som en människa kan tåla för respektive gas vid en given koncentration och exponeringstid. När t ex summan av doserna överskrider 1, inträffar medvetslöshet eller död för en viss andel av en population. FID = 0,3 utgör gränsen för när ca 10 % av en population blir medvetslös.

### **FLD (Fractional Lethal Dose):**

FLD bygger på LC50, det vill säga den koncentration av giftiga gaser som dödar 50 procent av en grupp av testdjur under en viss tid (vanligen 4 timmar). Det innebär att när ett gränsvärde för LC50 t ex ger medvetslöshet, gäller detta endast för halva populationen.

## 2 VÄRDERING AV KRITERIER FÖR UTRYMNINGSSÄKERHET

De nu gällande kriterierna för säker utrymning för vägtunnlar finns i Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i vägtunnlar m.m. (TSFS 2019:93). I kap 3 § 24 anges följande:

*"Om avståndet mellan två utrymningsvägar är större än 200 meter i tunnlar längre än 500 meter ska gränsvärden för vad som är kritiska förhållanden fastställas och får inte överskridas under den tid som krävs för utrymningen.*

*Allmänna råd*

*Vid värdering av kritiska förhållanden vid utrymning bör sikt, värmestrålning, temperatur och toxiska gaser beaktas. Följande gränsvärden för kritiska förhållanden kan tillämpas:*

- 1. Värmestrålning: en maximal stålningssintensitet på 2,5 kW/m<sup>2</sup>.*
- 2. Lufttemperatur: högst 80 °C.*
- 3. Toxiska gaser, 2,0 m ovan gångbana: mer än 15 volymprocent syre, mindre än 5 volymprocent koldioxid och mindre än 0,2 volymprocent kolmonoxid.*
- 4. Sikt: En siktsträcka på minst 10 meter.*

*Tiden till dess att förflyttning till fots påbörjas bör beräknas vara minst 2 minuter."*

Vid dimensionering av tunnelbana och spårväg gäller Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om personsäkerhet i tunnlar och plattformsrum för tunnelbana och spårväg (TSFS 2017:119). I § 15 anges följande:

*"Om avståndet mellan två utrymningsvägar är större än 300 meter i en tunnel ska byggherren fastställa gränsvärden för kritisk påverkan för utrymmande. Dessa gränsvärden får inte överskridas under den tid som krävs för utrymningen.*

*Allmänna råd*

*Följande gränsvärden för kritisk påverkan bör inte överskridas under den tid som krävs för utrymningen:*

- 1. Värmestrålningen bör inte överskrida en maximal strålningssintensitet på 2,5 kW/m<sup>2</sup>.*
- 2. Lufttemperaturen bör vara högst 80 °C.*
- 3. Toxiska gaser 2,0 meter ovanför gångbanor bör innehålla minst 15 volymprocent syre, högst 5 volymprocent koldioxid och högst 0,2 volymprocent kolmonoxid.*

*Den som är sist vid en utrymning bör kunna ta sig till en säker plats eller en tillfällig säker plats innan han eller hon blir medvetlös av toxiska gaser. Detta innebär att värdet på FID (Fractional Incapacitation Dose) bör vara mindre än 0,3 när FID beräknas utan ämnet vätecyanid."*

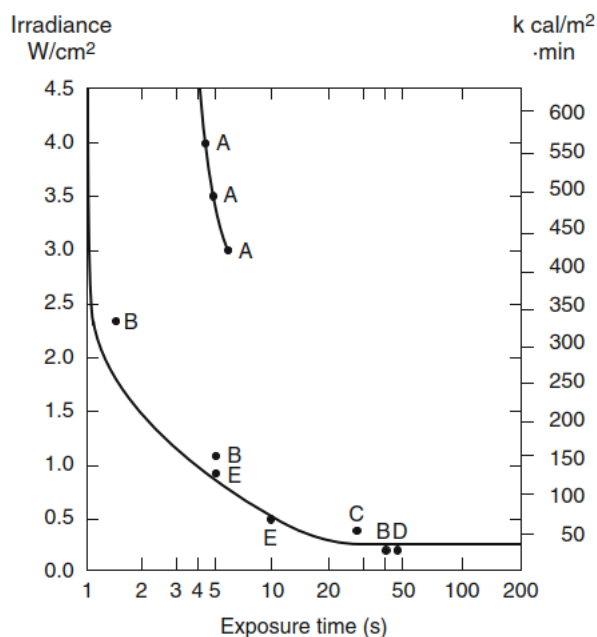
Transportstyrelsens kriterier för vägtunnlar och tunnelbana skiljer sig åt till vissa delar men är relativt likvärdiga. Båda föreskrifternas kriterier är tänkta att användas för att med stöd av simuleringar av brand- och utrymningsförlopp utvärdera om utökade gångavstånd till närmaste utrymningsväg kan accepteras. Kriterierna är gränsvärden för då det bedöms uppstå förhållanden som försvårar utrymning för vissa grupper av människor. Detta gör dessa svåra att använda t ex för att genomföra en riskbedömning över antal omkomna vid brand i tunneln och därmed val av olika säkerhetsåtgärder för att reducera risknivån.

I följande kapitel beskrivs respektive kriterium för att se om gränsvärdena även är relevanta ur perspektivet avseende när personer omkommer vid brand.

## 3 KRITISKA FÖRHÅLLANDEN VID BRAND

### 3.1 VÄRMESTRÅLNING

En brand skapar strålningsvärme som beroende på strålningsnivå och exponeringstid kan leda till smärta, brännskador eller dödsfall. Mellan 1950-talet och början av 1980-talet genomfördes olika tester för att fastställa toleransnivåer för exponering av värmestrålning. Testerna genomfördes i intervallet 2,4 kW/m<sup>2</sup> till 23,5 kW/m<sup>2</sup>. Resultatet från dessa tester har sedan sammanställts och analyserats, i Figur 1 redovisas gränsvärden för smärta [1].



Figur 1: Strålning nivåer som funktion av tiden. [1].

Strålningen från flammor ger beroende på exponeringstid olika svåra brännskador. Bokstäverna i Figur 1 representerar olika testpersoner och indikerar när testpersonen upplevd hög smärta. En strålningsnivå om 2,5 kW/m<sup>2</sup> klarar människor under kortare tid men leder till svår smärta vid längre exponering. Utrymningen bör vara avklarad när strålningsnivåer är i storleken 2,5 kW/m<sup>2</sup>.

### 3.2 LUFTEMPERATUR

I samband med brand kan höga temperaturer leda till brännskador, värmeslag eller dödsfall på tre olika sätt [3]:

1. Hypotermi (värmeslag)
2. Brännskador på kroppen
3. Brännskador på luftvägarna

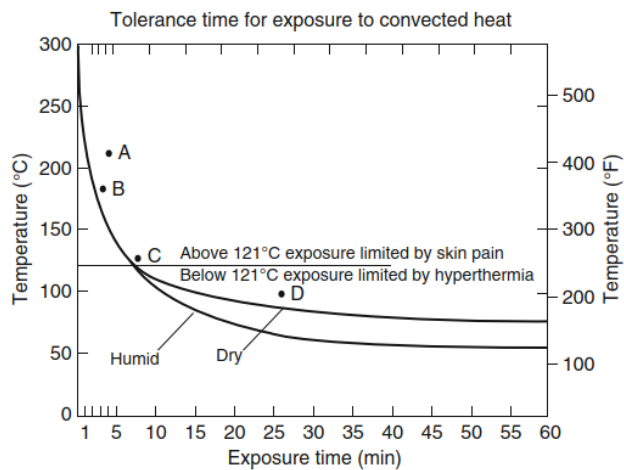
Hypotermi inträffar efter en mer långvarig exponering (vanligen mer än 15 minuter) för uppvärmd luft/brandgaser. Effekten är starkt beroende av luftfuktigheten och i torr luft kan man klara upp till ca 120 °C men enbart ca 80 °C för mättad luft mer än 10 volymprocent vattenånga.

Vid en lufttemperatur som är högre än 121°C kan brännskador på kroppen uppkomma inom ett par minuter under vissa förutsättningar.

Är luften vattenmättad kan brännskador på luftvägarna inträffa redan vid 60 °C men då under en längre exponering.

Under 1960 - 80-talet genomfördes tester där personer exponerades för torr varm miljö med temperaturer från 110°C -180°C för att ta reda på hur länge en person kan utstå dessa temperaturer, se Figur 2 [1].





Figur 2: Lufttemperatur som funktion av tiden med avseende på gränsvärden för hypotermi och brännskador [1].

Temperaturen i brandgaser under en kortare tid, upp till 10 min kan vara uppemot 200°C utan att det leder till brännskador eller hypotermi. Det finns vissa länder som används lägre nivåer för temperatur men där är det troligt att en längre exponering av dessa temperaturnivåer vägs in.

### 3.3 SIKT

En begränsad siktsträcka är indirekt en stor bidragande faktor till att människor omkommer i bränder. Täta brandgaser kan orsaka kraftigt nedsatt sikt utan att koncentrationen av giftiga ämnen i sig är dödlig. Den nedsatta sikten gör dock att människor får större svårigheter att hitta utgångar från det brandpåverkade området och därmed kan komma att exponeras för effekterna av branden under längre tid. För att ta reda på vilka tröskelvärden för brandgasers täthet och sikt som ska gälla har flera olika studier genomförts där det efter försöken genomförts intervjuer av personer.

Nedsatt sikt påverkar också gånghastigheten varpå exponeringen av de andra effekterna påverkar personer än mer. Gånghastigheten minskar med ökad täthet i brandgaserna, forskning visar att den minskar med 0,34 m/s per meter sikt när siktsträckan understiger 3 m. Gånghastigheten vid 3 m sikt är ca 1 m/s vilket innebär att hastigheten går mot en lägsta hastighet om 0,2 m [3]. Vid täta brandgaser är även koncentrationen av toxiska gaser hög vilket snabbt kan leda till medvetlöshet. Brandgaser är irriterande för andningsvägar och ögon vilket leder till att ögonen börjar rinna och sikten begränsas än mera. Det är mycket vanligt att 10 m siktbarhet utgör gränsvärdet för när det anses föreligga oacceptabla förhållanden vid utrymning. Detta relaterad dels till att den reducerade siktsträckan gör det svårare att orientera sig i utrymnet (t.ex. för att utrymningsskyltar blir svårare att upptäcka), dels till att det utgör en ungefärlig nivå där koncentrationen av toxiska och irriterande ämnen börjar bli högre och skadligare [4] [5].

### 3.4 TOXISKA GASER

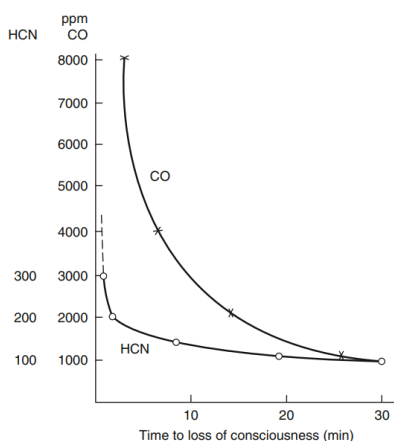
Det är välkänt att många som omkommer i en brand omkommer på grund av inhalering av toxiska gaser. Effekten av de toxiska gaserna blir också värre med en ökad koncentration som även leder till mer nedsatt sikt. Produktionen av brandgaser ökar med en ökad brandstorlek varpå effekterna av en brand eskalerar tills branden når maximal effekt och därefter avtar.

Vilka toxiska gaser som bildas och i vilka koncentrationer är beroende av vad som brinner och under vilka syreförhållanden. De gaser som bildas är bland annat koldioxid (CO<sub>2</sub>), kolmonoxid (CO), vätecyanid (HCN), väteklorid (HCl), kvävedioxid (NO<sub>2</sub>) och andra organiska ämnen. I de flesta bränder är det koldioxid och kolmonoxid som är dominanta. Bränder som inträffar under syrefattiga förhållanden, s.k. underventilerade bränder, har en större tendens att producera större mängder kolmonoxid och vätecyanid än bränder i välventilerade förhållanden [5].

Effekterna av de toxiska gaserna är beroende av hur stor mängd en person exponeras för, kolmonoxid och vätecyanid är de gaser som har studerats mest avseende hur de påverkar människor. Dessa gaser orsakar medvetslöshet som sedan leder till dödsfall. Minskad mängd syre kan även ge negativa effekter på människor, när syrekoncentrationen sjunker under 15 % börjar effekterna av hypoxi att märkas genom att människor får sämre omdöme och motorik. Låg syrehalt leder också till en ökad andningsfrekvens då kroppen reagerar och vill få i sig mer syre. Detta leder dessvärre också till att övriga toxiska gaser i brandgaserna ökar i lungorna och kan leda till en kvävande effekt [6]. Utöver ovan nämnda gaser kan många andra typer av gaser bildas vid förbränning av specifika ämnen, exempelvis kan giftiga gaser som väteklorid (HCl), vätefluorid (HF) och svaveldioxid bildas vid brand i litiumjonbatterier [7].

Komplexiteten med avseende på hur olika typer av förbränningsprodukter påverkar människor är stor. Det mest etablerade sättet är att använda en så kallad fraktionsdosmodell, Fractional Effective Dose (FED), vilket är ett mått på luftburna föroreningar som en person andas in [8]. Se kapitel 3.4.1.

I Figur 3 nedan visas samband mellan koncentration och tid till medvetslöshet för kolmonoxid (CO) respektive vätecyanid (HCN). Graferna i figuren är uppmätta värden vid djurförsök, primater, men sambanden kan anses vara representativa även för människor. Det framgår tydligt att en ökad koncentration medför en markant minskning i tid till medvetslöshet [1].



Figur 3: Koncentration som leder till medvetslöshet som funktion av tiden [1].

Inom ramen för detta uppdrag har värden på CO<sub>2</sub> och O<sub>2</sub> som leder till medvetslöshet som funktion av tiden inte hittats. Komplexiteten inom detta område är hög dels då olika individer eller grupper av människor har olika toleransnivåer vad gäller exponering dels baserat på vilka brandgaser personerna utsätts för med avseende på koncentration över tid i kombination med att en brand växer och skapar högre koncentrationer av brandgaser. Det finns även begränsat med forskning kring hur människor påverkas av den blandning av olika toxiska ämnen som bildas vid brand.

### 3.4.1 FED (Fractional Effective Dose)

FED är ett sätt att fastställa nivåer av exponering av olika ämnen. FED beräknas genom att jämföra den beräknade dosen av ämnen som en person utsätts för mot en vald referensdos eller en dos som anses vara farlig för människor.

FED beräknas genom kvoten av den beräknade dosen och referensdosen[9]:  $FED = \frac{Dose}{Reference\ dose}$

I den här formeln är "dose" den faktiska mängd av ämnet som personen har exponerats för och "reference dose" är den mängd av ämnet som har fastställts som säker baserat på vetenskapliga studier och riskbedömningar. Referensdosen är till för att beskriva en dos där det uppstår skadlig effekt på människor.

För att beräkna det totala värdet av FED för flera ämnen används följande formel [1]:

$$FED_{TOT} = (FED_{CO} + FED_{CN} + FED_{Nox} + FED_{irr}) * HV_{CO_2} + FED_{O_2}$$

I Transportstyrelsens nuvarande föreskrifter utvärderas dock endast effekterna av koldioxid, kolmonoxid och syre. I beräkningsformeln nedan tillämpas en mer exakt uträkning där exempelvis FED för kolmonoxid får denna formel:

$$FED_{CO} = \int_0^t 2,764 * 10^{-5} (c_{CO}(t))^{1,036} dt$$

Genom att jämföra den faktiska dosen med referensdosen kan man avgöra om den beräknade exponeringen för ämnena ligger inom en förmodat säker nivå eller om det finns en risk för skadliga effekter. Om FED-värdet är lägre än 1 indikerar det på att exponeringen är under referensdosen för 50% av populationen.

Tabell 1: FED-värden som leder till olika påverkan på en population.

| FED-värde    | Population i % som förväntas bli medvetslösa |
|--------------|--|
| 0,1          | 1,1%   |
| 0,2          | 5,4 %  |
| <0,3         | <10 %  |
| Mellan 0,3-1 | 11-50 %                                      |
| Mellan 1-3   | 50-89 %                                      |
| >3           | <89 %  |

Utifrån de ovanstående gränsvärdena kan konstateras att spridningen avseende när personer inte klarar att genomföra en utrymning varierar stort inom en population.

### 3.4.2 FID (Fractional Incapacitation Dose)

En fraktionsdosmodell används för att beräkna de toxiska gaserna vid utrymning, modellen tar hänsyn till den samlade effekten av olika gaser, t ex kolmonoxid (CO) och koldioxid (CO<sub>2</sub>) samt minskningen av syrekoncentrationen (O<sub>2</sub>) och koncentrationen av vätecyanid (HCN). FID utgör en tillämpning av FED där medvetslöshet utgör gränsvärdet.

FID-värdet baseras på FLD (Fractional Lethal Dose) som baseras på LC50, Lethal Concentration, vilket är den koncentration av giftiga gaser som dödar 50 % av en grupp, t ex försöksdjur, under en viss tidsperiod.

FID = 0,3 används som gränsvärde i Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om personsäkerhet i tunnlar och plattformsrums för tunnelbana och spårväg (TSFS 2017:119), och motsvarar när 10 % blir medvetslösa.

## 4 OMVÄRLDSANALYS

Det finns inga internationella standarder eller regelverk för gränsvärden vid kritiska förhållanden vid riskbedömningar i vägtunnlar, varje land har sina egna nationella regelverk, standarder och föreskrifter. Det kan dock konstateras att flera av dessa bygger på varandra.

Genom att undersöka hur andra länder hanterar brandskyddet i tunnlar kan vi dra nytta av deras erfarenheter och deras studier. I tabell 1 redovisas några exempel på brandskyddsregler från olika länder.

Table 1: Kriterier avseende gränsvärden för ett antal olika länder.

| Land                  | USA   | Australien   | Nya Zeeland  | Singapore   | Norge   |
|-----------------------|---|--|--|---|---|
| <b>Regelverk</b>      | NFPA 502"Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways  | AS 4825 utgör r regelverket, det är en funktionsbaserat vilket innebär att det inte finns några konkreta kriterier. En branschförening har utarbetat en "practice note" som oftast används. "Practice note" kan sammanfattas till: | C/VM2 Används i byggnader.   | NFPA 502 och AHJ's requirements.<br><br>Singapore Fire Safety Engineering Guidelines  | N500 Vegtunneler  |
| <b>Toxiska gaser</b>  | FED-värde mindre än 0,3   | FED-värde på 1,0 men kan sänkas beroende på vilken typ av byggnad exempelvis om byggnaden ska användas av riskgrupper kan FED värdet anpassas.   | FED-värde för kolmonoxid < 0,3 eller ett värde för det totala FED <0,3 | FED-värde mindre än 0,3   | CO < 2000 ppm<br>CO <sub>2</sub> < 5%<br>O <sub>2</sub> >15 %<br>Där toxiciteten inte behöver beräknas om sikten är mer än 5 meter. |
| <b>Värmestrålning</b> | Värmestrålninge n bör inte överskrida 2,5 kW/m <sup>2</sup> under 30 minuter.   | 2,5 kw/m <sup>2</sup> , för kort exponering (<10 min)  | -  | Värmestrålninge n bör inte överskrida 2,5 kW/m <sup>2</sup> under 30 minuter.   | 2.5 kW/m <sup>2</sup>   |
| <b>Temperatur</b>     | Bilister ska inte bli exponerade för mer än 60 °C under en nödsituation.  | 100 °C (uppmätt på en höjd av 2m):   | Temperaturen beaktas vid FEDthermal <0,3                               | Bilister ska inte bli exponerade för mer än 60 °C under en nödsituation.  | Maximalt 80 °C  |
| <b>Sikt</b>           | En skylt med en luminans på 8,6 cd/m <sup>2</sup> ska kunna urskiljas vid 30 m och dörrar och väggar ska kunna vara synligt på ett avstånd av 10 m. | 10 m   | Sikten på en höjd av 2,5 m ska vara mer än 10 m.                       | En skylt med en luminans på 8,6 cd/m <sup>2</sup> ska kunna urskiljas vid 30 m och dörrar och väggar ska kunna vara synligt på ett avstånd av 10 m. | Inte mindre än 10 m på en höjd 2 m från golvet om arean är större än 100 m <sup>2</sup>   |

Källor: USA [12], Australien [13], Nya Zeeland [14], Singapore [15], Norge [16]

## 5 ANALYS AV KRITERIER

### 5.1 TEMPERATUR

Den temperatur som utrymmande utsätts för utgör en viktig parameter för att avgöra om utrymningen lyckas eller ej. Att ha temperatur som enskild indikator för när personer omkommer bedöms som en trubbig parameter, speciellt om den utgör ett fast gränsvärde utan att väga in den tid som en person utsätts för den aktuella temperaturen. Skälen till att temperaturen som enskild faktor inte ger en fullständig bild är följande:

#### *Toleransnivå:*

Människors tolerans för höga temperaturer varierar stort. En del personer kan klara kortvarig exponering av mycket höga temperaturer över 120 °C utan allvarliga konsekvenser medan andra personer kan påverkas negativt vid lägre temperaturer ca 60 °C.

#### *Exponeringstidens roll:*

Hur många grader det är i luften är inte det enda som påverkar hur mycket en människa blir påverkad av temperaturen utan exponeringstiden är egentligen den mer avgörande faktorn, därför är det svårt att använda ett fast värde t ex 80 °C där alla i en population omkommer/blir medvetslösa.

#### *Sammanfattningsvis:*

Att använda en fast temperatur som en enskild indikator på när personer omkommer i en brand är en mycket grov skattning och kan leda till att det blir fel fokus på var säkerhetshöjande åtgärder bör införas. Det är viktigt att överväga att använda kombinationer av flera faktorer såsom exponeringstiden, sikt och påverkan av toxiska gaser för att göra en mer korrekt bedömning om vilka som omkommer.

Temperaturen i ett utrymme där det brinner varierar mycket mellan golvnivå och taknivå varpå det är viktigt att styra var temperaturen ska mätas, 2 m över golvnivå används vanligen. I nuvarande föreskrift anges inga direktiv var temperaturen ska mätas.

### 5.2 SIKT

Sikt är en kritisk faktor i en brandsituation eftersom dålig sikt försämrar människors förmåga att orientera sig och hitta en väg ut. Vid en brand i en tunnel kan dålig sikt göra det svårt för personer att snabbt och effektivt ta sig ut, vilket i sin tur kan leda till att risken ökar för hur lång exponeringen blir för höga temperaturer och för giftiga gaser som bildas under brandförloppet.

Det är flera faktorer som påverkar hur siktförhållanden blir i en tunnel vid brand, dels av vilket ämne som brinner, om branden är välventilerad eller underventilerad vilket påverkar densiteten på brandgaserna i tunneln, dels hur ventilationssystemet är utformat samt hur yttre vindpåverkan och trafikflöden påverkar luftrörelserna och turbulensen i tunneln.

Även för siktkriteriet blir det mycket grovt att använda den som en enskild indikator vid siktförhållanden som medger en viss orientering för att bedöma när personer omkommer vid brand i en vägtunnel.

Siktbedömningen i sig bedöms inte vara dödande, nedsatt sikt kan medföra att personer blir exponerade under en längre tid då gånghastigheten sjunker, orienteringsförmågan blir sämre vilket leder till att utrymningstiden blir längre. Då gånghastigheten minskar kraftig på grund av minskad siktsträcka och att den inte tar hänsyn till toxiska effekter bör inte sikten understiga 3 m eftersom osäkerheterna vid dessa förhållanden är stora.

För att upprätta en tillförlitlig och robust bedömning av säkerheten i tunneln måste flera faktorer vägas in. Det innefattar inte bara sikt utan temperatur och toxiciteten. Därtill blir det även viktigt att definiera vilket bränsle som brinner. Eftersom brandgaser är mer täta i taknivå blir även sikten normalt försämrad med höjden över golv. Det är därför viktigt att definiera var sikten avmäts i simuleringarna, 2 m över golvnivå används vanligen [13]. I nuvarande föreskrift anges inga direktiv var sikt ska mätas.

## 5.3 STRÅLNING

Att använda värmestrålning om 2,5 kW/m<sup>2</sup> som en enskild parameter för att fastställa när en person kan omkomma vid en brand har varit föremål för en omfattande forskning. Det har utfördes ett antal stora tester i syfte att fastställa toleransnivåerna för mänsklig exponering för värmestrålning. Dessa tester varierade över ett brett spektrum av värmestrålning, det sträckte sig från nivåer vid 2,4 kW/m<sup>2</sup> till extrema nivåer vid 23,5 kW/m<sup>2</sup> [13]. Resultaten från dessa tester är noggrant analyserade för att hitta människors överlevnadschanser vid olika nivåer av värmestrålning. Det blev uppenbart att över en nivå om 2,5 kW/m<sup>2</sup> förelåg drastiskt sänkt chans att överleva. Att använda 2,5 kW/m<sup>2</sup> som gränsvärde bedöms ge ett korrekt resultat vid riskbedömning även om det självklart finns vissa variationer även här [13].

## 5.4 TOXISKA GASER

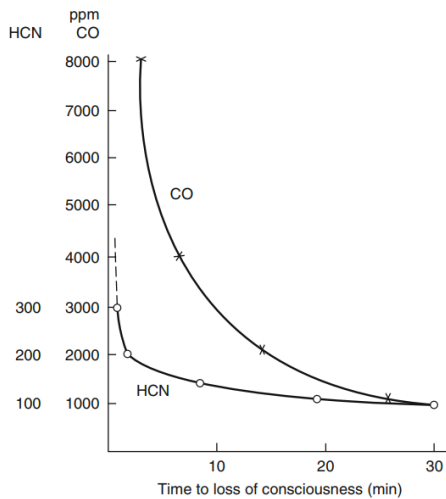
Kriterier (FED värden) och gränsvärden (t ex siktsträcka) för toxiska gaser som finns för utrymningsanalyser avser inte nivåer som medför att personer omkommer. I nuvarande föreskrift avses gränsvärdena att nyttjas för att verifiera utrymningssäkerheten då avståndet mellan utrymningsvägar förlängs dvs är längre än de kravställda 200 m. Det specificerats inte om dessa värden ska användas vid riskanalys. Nuvarande kriterier utgår från ett mer konservativt förhållningssätt där uppnådda gränsvärden innebär att en del av populationen kan antas bli påverkade och riskerar att tappa medvetandet. Som tidigare redovisats innebär dock inte exponering för kritiska förhållanden, t.ex. nedsatt sikt, att personer blir medvetlösa eller omkommer.

Vid beaktande av FED-värden används nivåer där en viss procentsats antas bli medvetlösa, vilket därmed kan medföra att personer också avlider. När FED används ger det en mer nyanserad analys. Exempelvis innebär det frekvent förekommande gränsvärdet FED 0,3 att ca 10% (11,4%) av befolkningen kan antas påverkas till en sådan grad att de tappar medvetandet och därmed riskerar att omkomma. Motsvarande procentsats för FED-nivån 1,0 innebär att 50% av befolkningen [15]. Det ska dock tydliggöras att FED 1,0 inte är att likställa med LC50-värden då testobjekt omkommer.

För en riskanalys är det t ex av intresse att kunna uppskatta hur många personer som omkommer, där LC50 är det kriterium som är mest rimligt att studera för enskilda ämnen. LC50-värden för människor som exponeras för brandrök finns av förklarliga skäl inte dokumenterade och kan således inte användas i riskanalyser. Att använda FED bedöms som det bästa tillgängliga kriterium att likställa med LC50. Vid analyser av exempelvis utrymningsförhållanden är det rimligt att använda gränsvärden på FED 0,3 medan det vid en riskanalys som studerar antalet omkomna blir ett alltför konservativt värde. Att använda FED 1,0 är också att ses som konservativt då halva populationen antas förlora medvetandet och därmed riskerar att omkomma. Vilket gränsvärde av FED som är mest lämpligt att använda för riskanalys i vägtunnel utgör underlag för vidare studier för mer exakta värden.

Vid beräkning av FED är det framför allt ackumulerade koncentrationer av kolmonoxid (CO) och vätecyanid (HCN) som studeras [15]. För att kunna göra en bedömning avseende FED behöver det därmed vara möjligt att beräkna koncentrationer av kolmonoxid och vätecyanid under brandförloppet. Detta ställer även krav på att definiera val av bränsle för analysen och att dess förbränningsprodukter kan mätas på ett representativt sätt, exempelvis det brinnande materialets kemiska sammansättning och dess produktion av bland annat kolmonoxid och vätecyanid. Hur detta kan göras på ett validerat och representativt sätt utgör underlag för vidare studier. Ett alternativt sätt med avseende på val av bränsle är att använda det bränsle som Boverket använder. I Boverkets ändring av verkets allmänna råd 2011:27 om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BBRAD3, föreskriver i tabell 6, ett bränsle men detta saknar dock värden på HCN-produktion och är mer representativt för rumsbränder.

När FED beräkningar genomförs analyseras vanligen följande komponenter i brandgaser: kolmonoxid (CO), koldioxid (CO<sub>2</sub>), syrekoncentrationen (O<sub>2</sub>) och vätecyanid (HCN). För den samlade bedömningen av säkerhetsnivå i vägtunnlar föreslås att dessa komponenter ingår i de kriterier som ingår i bedömningen.



Figur 4: Toxiska koncentrationer som leder till medvetslöshet som funktion av tiden [1].

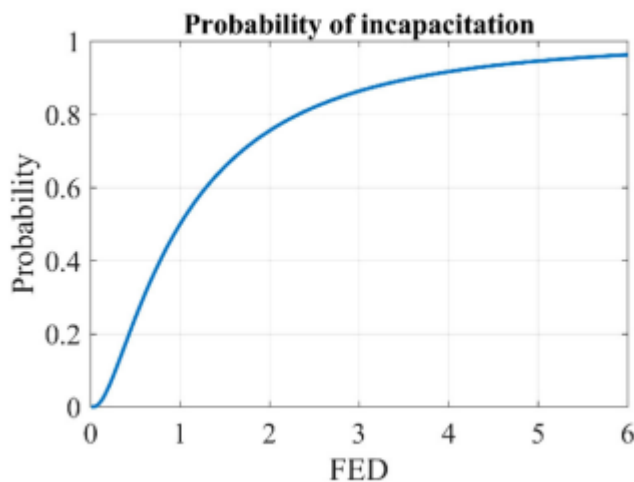
Utifrån de gränsvärden som t ex visas i figur 4 kan FED beräknas för personer som exponeras av brandgas i en tunnel för olika exponeringstider.

Följande kriterier föreslås för FED beräkningar:

FED = 0,3 ger påverkan på 10 % (11,4%) av en population och leder till att dessa ska bedömas som omkomna.

FED = 1,0 ger påverkan på 50 % av en population och leder till att dessa ska bedömas som omkomna [15].

FED = 3,0 ger påverkan på ca 89 % av en population och leder till att dessa ska bedömas som omkomna.



Figur 5: Grafen visar fördelningen av FED och sannolikheten för att personer blir medvetslösa [17].

Fördelningen av antal omkomna kan därmed beräknas fram för flera FED värden med hjälp av grafen ovan. Totala FED värdet räknas samman i enlighet med kap 3.4.1.

## 5.5 MÖJLIGA FELKÄLLOR – OSÄKERHETER

Vid val av kriterier och gränsvärden för vägtunnlar uppkommer frågan avseende vad som går att beräkna och hur pass tillförlitlig den utdata är som beräkningsprogrammen kan räkna fram. För att studera brandgasspridning genomförs ofta CFD-analyser (Computational Fluid Dynamics) i programvaran FDS (Fire Dynamic Simulator). FDS är utvecklad för att prediktera de flöden som skapas vid en brand och används frekvent för att studera brandgas- och värmespridning från bränder, främst i byggnader men också i tunnlar. Om FDS-modellen byggs upp enligt programvarans riktlinjer är dess resultat i form av brandgasspridning och

temperaturfördelning att bedöma som representativa. Med avseende på detta är sikt, temperatur, strålning och fördelning av toxiska ämnen möjliga gränsvärden att studera med denna programvara. De fysikaliska modellerna i FDS är avancerade men bygger likväl på förenklingar varför beräkningsresultat bör tolkas med viss försiktighet, precis som simulerings- och beräkningsprogram i övrigt.

En annan aspekt att beakta är att utdata från FDS, i likhet med andra simulerings- och beräkningsprogram, är högst beroende av dess indata. Resultat avseende sikt och fördelning av toxiska gaser är direkt beroende av vilka antaganden som görs med avseende på vilket material som brinner, hur ventilationsflöden påverkas samt hur de brinner. Exempelvis kan samma brandstorlek, exempelvis en bilbrand på 6 MW ge skilda resultat avseende sikt och koncentration av toxiska gaser om indata med avseende på sotproduktion och de övriga förbränningsprodukterna har bedömts olika. Vid diskussioner om lämpliga gränsvärden bör därför även val av indata beaktas. De val som görs påverkar även andra delar i dimensioneringen eftersom t ex brandgasproduktionen (sikt) till är styrande och kan påverka såväl mänskligt beteende vid brand (t.ex. varseblivningstid, val av utrymningsriktning) och påverkan på gånghastighet så det kan ha följdverkan även på utrymningsmodelleringen. Vid analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd har Boverket preciserat s dimensionerande värden för sotproduktion och brandgaser i det tidiga brandförloppet [17]. Motsvarande dimensionerande värden finns inte i någon vidare utsträckning för bränder i fordon eller för att kunna bedöma FED. Detta utgör således underlag för vidare studier.

Utöver programvarans kapacitet att mäta önskade resultat samt dess beroende av indata, är det även av betydelse hur och var resultatet samlas in. Utdata från FDS kan mätas på två sätt; vid specifika punkter eller i ett plan. Det förstnämnda ger utdata för den valda punkten medan det sistnämnda ger en översikt av hela planet eller sektionen utifrån en definierad skala. Att mäta utdata i hela planet är ett bra verktyg för att få en överblick av fördefinierade faktorer men gör det svårare att exempelvis analysera resultat kvantitativt. Att mäta utdata vid specifika punkter är därför att föredra då dessa värden kan analyseras i exempelvis Excel. Då utdata utläses vid en specifik punkt blir mätpunktens placering av stor vikt för resultatet. Att göra mätningar avseende toxiska gaser i brandgaslagret vid taknivå är för konservativt för att bedöma situationen för utrymmande, medan det i golvnivå är för icke-konservativt. En ytterligare faktor som påverkar utdata är att brandgaser i en tunnel kan fluktuera kraftigt pga turbulens, exempelvis på grund av ventilationssystem, tunnels utformning men också fordons placering mm. Detta gör att insamlad data vid specifika punkter också varierar. För att inte göra en simulering av brand för platspecifik bör därför medelvärden av flera mätpunkter vara dimensionerande för ett specifikt område i tunnel. Vägtunnlar kan därför med fördel delas in i olika zoner där mätdata sammanställs till dimensionerande värden för en viss zon. Ett ytterligare alternativ skulle kunna vara att ta ett medelvärde av tvärsnittsarean dvs en tvärsektion av tunneln. En etablerad metod är att mäta valda gränsvärden på en höjd om 2,0 m ovan golvnivå, vilket är att se som en konservativ höjd då detta är över populationens medellängd. Vid vilken höjd det är mest lämpligt att mäta utdata utgör ett ämne för vidare utredning alternativt bör en känslighetsanalys utföras på flera mätpunkter där höjden varieras i tunneltvårsnittet vid dimensionering.



## 6 RESULTAT AV ANALYS

De kriterier som används för dimensionering av utrymnings säkerhet i vägtunnlar internationellt är relativt lika. Kriterierna omfattar en temperaturgräns, en siktbarhetsgräns, en strålningsgräns och ett antal toxiska gränsvärden t ex för CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> och HCN. Några av regelverken pekar även på var mätdata ska mätas i beräkningarna t ex på 2 m höjd ovan golv. Det är dock inga som preciserar bränslet och hur det ska modelleras, dvs vilket ämne eller kombination av ämnen som förbränns och vilka förbränningsprodukter och koncentrationer som genereras.

Forskningsområdet kring kriterier när personer omkommer på grund av brand är stort och har en hög grad av komplexitet. Fokus inom forskningen har legat på att hitta gränsvärden för när personer får det svårt att utrymma för att möjliggöra en brandteknisk design som säkerställer att utrymningsnivån är acceptabel (här i bemärkelsen att ingen omkommer vid dimensionerande scenarion). Det är många olika faktorer som påverkar riskbedömningar/brandskyddsberäkningar av den aktuella sorten, vilka utgör populationen i en tunnel, hur påverkas olika personer av de kriterier som de mäts emot, vad är det som brinner, var hamnar brandgaser, hur påverkar ventilationsflöden, hur påverka trafiken och fordon etc. Mot denna bakgrund är det svårt att fastställa exakta värden därav behövs karaktäristiska scenarier och medelvärden användas till viss utsträckning och att ett visst mått av säkerhetsmarginal införs för att inte underskatta risknivån. Som resultat av denna analys och med avseende på det material som studerats, bedöms det för kriterierna med avseende på temperatur och sikt (till en viss nivå) vara lämpligt att dessa används i kombination med varandra som ett kriterium. Detta då dessa är väl etablerade som kriterier samt går att mäta på ett representativt sätt i tillgängliga analysprogram.

Nedanstående gränsvärden för siktbarhet respektive temperatur i kombination med varandra bedöms vara de mest representativa och föreslås användas som dimensionerande för beräkningar där antal omkomna vid brand behöver fastställas:

- Siktbarhet, får inte vara mindre än 5 meter
- Temperatur, får inte vara mer än 80 °C

Sikt kan dock även användas som ett enskilt gränsvärde då gånghastigheten hos utrymmande minskar med tätare brandgaser. Sikt som enskilt gränsvärde föreslås utgöras av att siktbarheten inte får vara mindre än 3 meter men då endast för personer i direkt närhet till utrymningsväg, mindre än 10 m ifrån utrymningsvägen.

Strålningsnivåer som kriterier i utrymningsberäkningar påverkar framför allt personer i brandens direkta närhet. Då branden sprider sig i en vägtunnel kan flera fordon brinna varpå strålningsnivåerna ökar på flera platser. Utifrån att utrymning bör ske i början av ett brandförlopp görs bedömningen att kriteriet inte genererar någon större andel av det riskbidrag som olika brandscenarier ger. Därav kan nuvarande nivå behållas dock ger strålningsnivåer på 2,5 KW/m<sup>2</sup> brännskador relativt snabbt som i sin tur kan leda till svårigheter att ta sig till säker plats.

Toxicitet bedöms vara det som de flesta personer i slutändan dör av vid brand i tunnel. Det är dock det kriteriet som är mest komplext att utvärdera då variationen är stor bland populationen.

Följande komponenter i brandgaser föreslås utgöra dimensionerande: kolmonoxid (CO), koldioxid (CO<sub>2</sub>), syrekoncentrationen (O<sub>2</sub>), vätecyanid (HCN). Toxiciteten bör beräknas med hjälp av metoder för beräkning av FED förslagsvis kan standarden "Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires" användas.[15]

Följande kriterier föreslås för FED beräkningar och beräkning av antal omkomna:

FED = 0,3 ger påverkan på ca 10 % (11,4 %) av en population och leder till att dessa ska bedömas som omkomna.

FED = 1,0 ger påverkan på 50 % av en population och leder till att dessa ska bedömas som omkomna.

FED = 3,0 ger påverkan på ca 90 % (89 %) av en population och leder till att dessa ska bedömas som omkomna.

Fördelningen av medvetlöshet, se figur 5 kan alternativt utgöra kriterier för FED beräkningar.

Samtliga mätdata föreslås beräknas på höjden 2 m.

## 7 DISKUSSION

Det finns flertalet svårigheter med att definiera de mest lämpliga kriterier och dess gränsvärden för en vägtunnel. Detta då kriterierna och dess gränsvärden ska kunna anses vara applicerbara i flertalet olika scenarier. Det ska också vägas in om kriterierna ska reflektera huruvida en genomsnittsperson kan antas avlida eller kriterierna ska återspegla förhållanden som är kritiska för en delmängd av populationen. För en nyanserad bedömning av påverkan av kritiska förhållanden behöver även exponeringstiden beaktas, en parameter som vanligen inte ingår i de deterministiska kriterier som tillämpas i projekteringssammanhang.

Övergripande slutsats utgör att det kan noteras att denna analys visar på behovet att studera rimliga kriterier och gränsvärden vidare för att validera dessa bättre.

### 7.1 OSÄKERHETER

Det finns flera osäkerheter som kan påverka resultatet av en riskbedömning. Att jämföra beräkningsresultat mot kriterier med hög grad av säkerhetsmarginal kan generellt väntas resultera i att säkerhetsnivå blir högre än den acceptabla. Mer precisa och underbyggda kriterier ger överlag ett mer nyanserat resultat och därmed kan slutsatser och lämpliga åtgärder bli mer korrekta.

En del i svårigheten med att välja lämpliga kriterier (FED värden) och gränsvärden (t ex siktsträcka) är de osäkerheter som valen medför. Vid val av lämpliga gränsvärden att beakta behöver en avvägning göras avseende hur konservativ analysen ska vara i förhållande till de osäkerheter som finns i både in- och utdata. Både för låga och för höga gränsvärden kan ge en skev riskbild. Exempelvis medför alltför konservativa gränsvärden att resultatet i riskanalysen kan visa på en för hög risknivå. För låga gränsvärden kan i stället ge motsatt effekt och resultera i att en tunnel bedöms som mer säker än vad den egentligen är

Att genomföra analyser med hjälp av FED kan anses vara lämpligt för att bedöma när personer kan antas omkomma. Dock medför FED ett flertal andra osäkerhetsparametrar, såsom svårigheter att hitta tillförlitliga indata, vilket gör att metodiken bör behandlas med försiktighet.

För att reducera osäkerheterna anses det i denna rapport rimligt att också utgå från etablerade kriterium, såsom exempelvis siktbarhet och temperatur. Detta då dessa är kriterier som går att mäta relativt tillförlitligt med tillgängliga analysprogram på ett validerat sätt, samt att det finns data som redogör för hur dess olika nivåer kan antas påverka utrymmande människor.

### 7.2 VIDARE STUDIER

Vid val av kriterier och gränsvärden för riskanalys i vägtunnel finns det flera aspekter att beakta. Detta då det förutom själva valet av dessa också behöver beaktas huruvida de är lämpliga att uppmäta samt var de borde mätas. Det anses således finnas flera aspekter som kräver vidare utredning, vilka listas nedan.

- Fördjupade studier om vilken kombination av sikt och temperatur som är mest lämplig att använda.
- Fördjupade studier om vilket kriterium av FED som är mest lämpligt att använda.
- Vilka toxiska ämnen som bör ingå i en FED-modell.
- Utredda gränsvärden för FIC/FEC som ett komplement till FED.
- Definiera representativa indata för det objekt som brinner, dimensionerande brand.
- Studera på vilka platser i en tunnel och på vilken höjd ovan vägbana som utdata ska uppmätas.

## 8 SLUTSATS

Att fastställa gränsvärden för när människor omkommer som följd av de förhållanden som skapas av en brand i en tunnel är mycket komplext. Att beräkna vilka förhållanden som uppstår och hur många personer som exponeras är också mycket komplext och innefattar flera osäkerheter. Kriterier för när personer omkommer på grund av konsekvenserna av brand är ett stort forskningsområde där det idag saknas en hel del data och forskningsresultat. Bränder skapar många olika toxiska gaser, många i mindre mängder, konsekvenserna av blandningen av dessa är svårt att förutse och inte utforskad. Detta gör även att det bör finnas ett mått av säkerhetsmarginal.

För att välja lämpliga kriterier och gränsvärden behöver hänsyn även tas till vad som går att mäta, hur väl det går att mäta samt vad som krävs för att mäta detta. Detta har inte kunnat avhandlats fullt ut i denna rapport, varpå det föreslås vidare studier i kapitel 6.

De kriterier som presenteras i kapitel 6 föreslås trots de osäkerheter som presenteras implementeras i föreskriften. För att kunna använda dessa på ett likvärdigt bör dock det bränsle som används vara specificerat med avseende på produktion av kolmonoxid (CO), koldioxid (CO<sub>2</sub>), syrekoncentrationen (O<sub>2</sub>), vätecyanid (HCN).

## Referenser

- [1] M. J. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Fifth Edition*, Springer, 2016.
- [2] Swedish standards institute, "Livshotande parametrar i händelse av brand – Vägledning för bedömning av tiden till kritiska förhållanden vid brand (ISO 13571, IDT)," Swedish standards institute, 2012.
- [3] K. m. Fridolf, "Människors gånghastighet i rök: Förslag till representation vid brandteknisk projektering," SP, Sveriges Tekniska forskningsinstitut, Borås, 2016.
- [4] T. Jin, "Studies on Human Behavior and Tenability in fire smoke," Fire Protection Equipment & Safety Center of Japan, 1997.
- [5] H. Ingason, L. Ying zhen och A. Lönnemark, *Tunnel Fire Dynamics*, Borås: Springer, 2015.
- [6] "Giftnotionscentralen," 20 08 2020. [Online]. Available: <https://giftnotion.se/lakare/substanser/brandrok/>.
- [7] Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB), "Vägledning, räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer," 2020.
- [8] D. Rosberg, A. Purchase och K. Fridolf, "Acceptance criteria in fire safety engineering: A review and case study," Malmö, 2018.
- [9] W. C. S.S. Han, "Calculating FED and LC50 for testing toxicity of materials in bench-scale tests with a cone calorimeter," Elsevier, 2005.
- [10] National Fire protection Association, *NFPA 502: Standard for road Tunnel and bridge fire protection*, National Fire protection Association, 2017.
- [11] *Practice Note for Tenability Criteria in Building Fires*, Barton: Society of Fire Safety NSW Chapter , 2014.
- [12] *Verification Method: Framework for fire safety design*, The Ministry of Business, Innovation and Employment, 2014.
- [13] *Singapore Fire Safety Engineering Guidelines 2015*, Singapore Civil Defence Force, 2015.
- [14] *N500 Vegtunneler*, Statens vegvesen, 2022.
- [15] International Standard, "Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires," International Standard, Geneva, 2012.
- [16] S. m. Hostikka, "Experimental investigation of human tenability and sprinkler protection in hospital room fires," Aalto University, Aalto, 2019.
- [17] Boverket, "Boverkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BBRAD," 2013.
- [18] H. Alling, E. Almgren , K. Andrée, T. Danielsson, A. Elias , T. Fagergren, H. Frantzich, J. Henningsson, N. Johansson, T. de Korostenski, D. Larsson, A. Mossberg, J. Nilsen, A. Norström, N. Olsson, H. Petterson, M. Runefors, J. Sandström, M. Sandvik, C. Spennare, J. Sender, D. Svensson, M. Vester, M. W Gyllentri, J. Werner, C. Wetterqvist och J. Wigren , *Brandskyddshandboken*, 2002.
- [19] D. A. Purser, "Modelling Toxic And Physical Hazard In Fire," Fire safety Science, 1989.

## VI ÄR WSP

WSP är en av världens ledande rådgivare och konsultbolag inom samhällsutveckling. Med cirka 55 000 medarbetare i över 40 länder samlar vi experter inom analys och teknik, för att framtidssäkra världen.

Tillsammans med våra kunder tar vi fram innovativa lösningar för en mänsklig, trygg och välfungerande morgondag. Vi planerar, projekterar, designar och projektleder olika uppdrag inom transport och infrastruktur, fastigheter och byggnader, hållbarhet och miljö, energi och industri samt urban utveckling. Så tar vi ansvar för framtiden.

**wsp.com**

### **WSP Sverige AB**

121 88 Stockholm-Globen  
Besök: Arenavägen 7

T: +46 10-722 50 00  
Org nr: 556057-4880  
**wsp.com**

