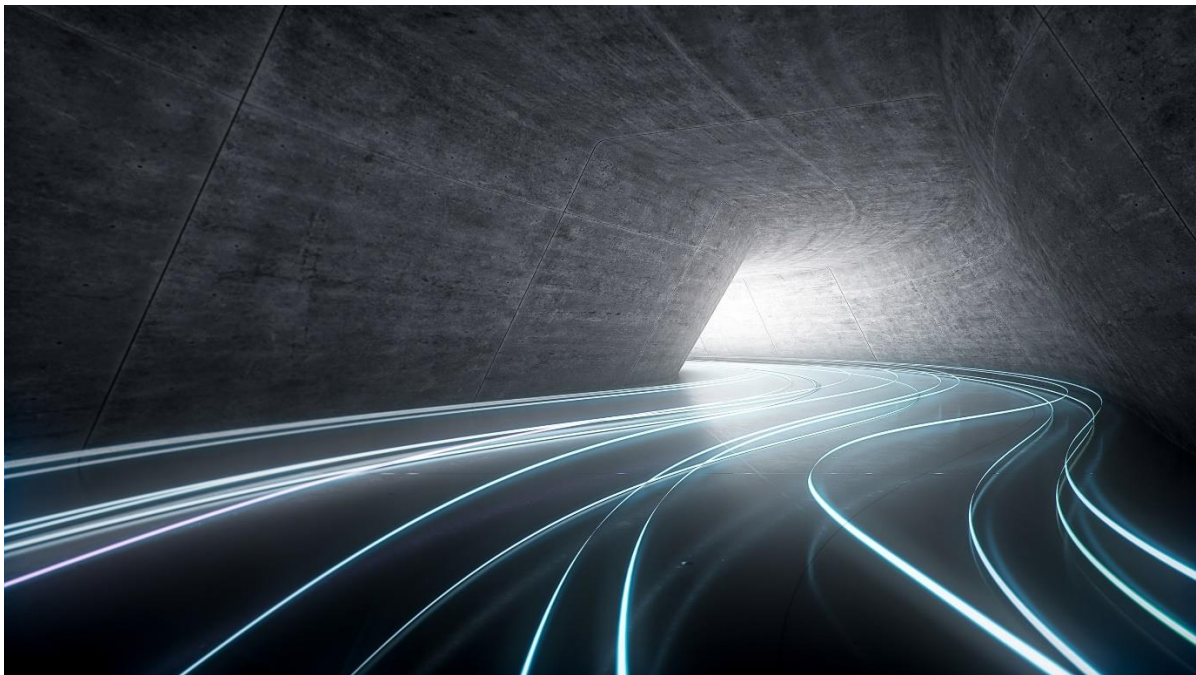


BASTUNNEL 400

BILAGA C: KONSEKVENSANALYS

2023-12-22



BASTUNNEL 400

Bilaga C: Konsekvensanalys

KUND

Transportstyrelsen

KONSULT

WSP

121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7
Tel: +46 10 7225000
WSP Sverige AB
Org nr: 556057-4880
wsp.com

KONTAKTPERSON

Göran Nygren
+46 10 722 85 77

WSP Brand & Risk
Stockholm – Globen

UPPDRAGSNAMN
Basstandardens förhållande till
säkerhetsmål för vägtunnlar

UPPDRAGSNUMMER
10357291

FÖRFATTARE
Eleonora Grönlund

DATUM
2023-12-08

ÄNDRINGSDATUM

Granskad av
Sofia Lundegårdh

Godkänd av
Göran Nygren

INNEHÅLL

1	INLEDNING	5
1.1	BAKGRUND	5
1.2	SYFTE OCH MÅL	5
1.3	AVGRÄNSNINGAR	6
1.4	UNDERLAG	6
1.5	KVALITETSKONTROLL	7
1.6	METODBESKRIVNING	7
2	KRAVBILD	8
3	DIMENSIONERANDE FÖRUTSÄTTNINGAR OCH INDATA	9
3.1	TUNNELUTFORMNING	9
3.2	DIMENSIONERANDE BRAND	10
3.2.1	Brand i personbil	11
3.2.2	Brand i buss	12
3.2.3	Brand i lastbil	13
3.2.4	Brandplacering	14
3.2.5	Tunnellutning	14
3.3	VENTILATION OCH YTTRE VINDFÖRHÅLLANDEN	15
3.4	AUTOMATISKT SLÄCKSYSTEM	15
3.5	UTRYMNINGSSTRATEGI	15
3.6	DIMENSIONERANDE PERSONANTAL	16
3.7	UTRYMNING	17
3.7.1	Zonindelning	17
3.7.2	Persontyper	18
3.7.3	Varseblivningstid	19
3.7.4	Förberedelsestid	20
3.7.5	Förflyttningstid	20
3.7.6	Framtagande av indata för utrymning	21
3.8	GRÄNSVÄRDEN FÖR KRITISKA FÖRHÅLLANDEN	21
3.9	SCENARIOBESKRIVNING	22
4	BRANDFÖRLOPP	23
4.1	SCENARIOBESKRIVNING	23
4.2	BRANDFÖRLOPPSMODELL	23
4.2.1	Dimensionerande bränder	24
4.2.2	Modellgeometri	25
4.2.3	Brandens geometri	25
4.2.4	Ventilation	26
4.2.5	Övriga indata	26

5	UTRYMNINGSFÖRLOPP	28
5.1	SCENARIOBESKRIVNING	28
5.2	UTRYMNINGSFÖRLOPPSMODELL	29
5.2.1	Geometri	29
5.2.2	Zonindelning	30
5.2.3	Varseblivnings- och förberedelsetid	30
5.2.4	Personantal	31
5.2.5	Övriga indata	31
6	RESULTAT	32
6.1	SCENARIER	32
6.1.1	Tunnellutning A	33
6.1.2	Tunnellutning B	34
6.2	DISKUSSION AV RESULTAT	35
6.2.1	Tunnellutning A	35
6.2.2	Tunnellutning B	36
6.2.3	Tunnellutning C	36
6.2.4	Scenariovariation: Felfungerande infartsbommar	37
7	KÄNSLIGHETSANALYS OCH OSÄKERHETER	38
7.1	OSÄKERHETER AVSEENDE BRANDFÖRLOPP	38
7.1.1	Scenarier	38
7.1.2	Modellgeometri	38
7.1.3	Dimensionerande bränder	39
7.1.4	Ventilation och yttre vindförhållanden	39
7.1.5	Bedömning av brandförloppsmodellernas tillförlitlighet	39
7.2	OSÄKERHETER AVSEENDE UTRYMNINGSFÖRLOPP	40
7.2.1	Scenarier	40
7.2.2	Modellgeometri	40
7.2.3	Persontypgrupper	40
7.2.4	Varseblivnings- och förberedelsetid	41
7.2.5	Personantal	42
7.2.6	Val av gränsvärden för kritiska förhållanden	42
8	SLUTSATS	43
9	REFERENSER	44
	APPENDIX A - C	46

1 INLEDNING

Denna konsekvensanalys är framtagen inom uppdraget Basstandardens förhållande till säkerhetsmål för vägtunnlar (vidare benämnd Bastunnel 400) och utgör bilaga till riskbedömningen.

WSP har av Transportstyrelsen fått i uppdrag att utvärdera vilken säkerhetsnivå en 400 m lång bastunnel får med de förutsättningar och de framtagna säkerhetskrav som finns i rapporten "Riskanalysmetod & Basstandard" (WSP, 2022), underlag till revidering av föreskrift 2019:93.

I detta inledande kapitel ges en bakgrund till denna konsekvensanalys. Vidare beskrivs konsekvensanalysens syfte och mål, innehåll och avgränsningar samt vilket underlag som legat till grund för analysen.

1.1 BAKGRUND

Inom ramen för uppdraget genomförs en detaljerad kvantitativ riskanalys, se denna bilagas huvudrapport "Riskbedömning, Basstandardtunnel, 400 m". I huvudrapporten görs en fullständig riskbedömning för att testa vilken säkerhetsnivå en 400 m lång bastunnel med ÅDT 15 000 får med givna förutsättningar enligt rapporten "Riskanalysmetod & Basstandard" (WSP, 2022). Givet en acceptabel säkerhetsnivå kan tunnlar inom intervallet 100-500 m därefter utformas med utefter basstandard. Tillvägagångssättet med en basstandard kan i grova drag liknas med förenklad dimensionering enligt BBR för byggnader.

Scenariobeskrivningarna i riskbedömningen skall omfatta riskuppskattning, dvs uppskattning av frekvens och konsekvens. Denna bilaga är framtagen för att uppskatta olyckssceniernas konsekvens och utgör därmed indata för den sammantagna riskbilden. För vidare information om riskbedömningen hänvisas till denna bilagas huvudrapport.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Konsekvensanalysens syfte är att utgöra underlag till riskbedömningen avseende personsäkerhet vid brand. Detta innebär att en kvantitativ brand- och utrymningsanalys utförs för att uppskatta hur många personer som inte bedöms kunna utrymma innan kritiska förhållanden uppstår, i händelse av olika brandförlopp.

Målet med konsekvensanalysen är att beskriva relevanta brandscenarier som utgör en fara för personsäkerheten i tunneln, samt uppskatta hur många personer som inte bedöms kunna utrymma innan kritiska förhållanden uppstår.

Resultatet av handlingen utgör underlag för "Riskbedömning, Basstandardtunnel, 400 m".

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Analysen studerar endast trafikutrymmen för vägtrafik. Eventuella teknikutrymmen inkluderas ej då sådana utrymmen endast utgör plats för tillfällig vistelse.

De olyckshändelser som analyseras utgörs av brand i fordon. Scenariobeskrivningarna omfattar endast konsekvenser av brand och ett generellt förväntat beteende hos trafikanter i tunnelsystemet. Andra typer av olyckor såsom riktade våldsdåd och terrorism analyseras ej i denna rapport.

I föreliggande rapport studeras ett urval av olyckshändelser avseende brand i fordon, som kan inträffa i vägtunneln. Detta innebär att valda brandscenarier anses representativa för flera olika typer av bränder som kan uppstå i vägtunneln. Det beaktas dock inte i någon vidare omfattning hur och/eller varför dessa bränder uppstår i vägtunneln. Urvalet görs utifrån de fordon som trafikerar vägtunnelsträckan och avseende hur bränder i dessa fordon utvecklas. I denna analys har inte brandspridning mellan fordon beaktas, detta innebär att studien endast beskriver ett eller flera fordon som brinner från en initial brandstart. Studien studerar därtill endast det tidiga skedet av ett brandförlopp, fram till ca 1200 s in i ett brandförlopp. Detta då utrymningen förväntas vara ske inom denna period.

I denna rapport görs ingen analys av förhållandena i brandens direkta närhet, där kritiska förhållanden uppstår relativt snabbt på grund av strålning och temperatur. Det förutsätts att personer inte kommer att vistas där utan söka sig därifrån. Föraren av det branddrabbade fordonet inkluderas ej. Eventuella trafikskadade personer beaktas ej heller.

Bränder utanför tunneln beaktas inte heller. Detta då bränder utanför tunneln inte bedöms medföra en större påfrestning för personer som vistas inom tunneln än vad bränder som uppstår inom tunneln medför.

Brandförlopp där farligt gods-fordon är inblandat i olyckan har inte studerats då sådana ej tillåts köra i Bastunnel 400. Dimensionerande bränder bedöms representera vanligt förekommande bränsle/material i fordon med tillhörande last. Detta för att täcka in en stor del av de olika scenarier som kan ske och i syfte att ge en heltäckande bild av de primärt studerade brandriskerna.

1.4 UNDERLAG

Underlag för upprättande av denna rapport utgör följande:

- Rapporten " Riskanalysmetod & Basstandard, underlag till revidering av föreskrift 2019:93" (WSP, 2022), framtagen av WSP, daterad 2022-06-10
- Rapporten "Kriterier och gränsvärden vid utrymning av vägtunnlar" (WSP, 2023), framtagen av WSP, daterad 2023-10-04

Då Bastunnel 400 endast är en teoretisk tunnel utan geografisk anknytning finns inga ritningar över tunneln.

1.5 KVALITETSKONTROLL

Rapporten är utförd av Eleonora Grönlund (Brandingenjör och Civilingenjör i Riskhantering) med Göran Nygren (Brandingenjör och Civilingenjör i Riskhantering) som uppdragsansvarig. I enlighet med WSP:s miljö- och kvalitetsledningssystem, certifierat enligt ISO 9001 och ISO 14001, omfattas denna handling av krav på internkontroll. Detta innebär bland annat att en från denna del uppdraget fristående person granskar förutsättningar och resultat i rapporten. Ansvarig för denna granskning har varit Sofia Lundegårdh (Civilingenjör Brandteknik).

Eftersom analytisk dimensionering med scenarioanalys som verifieringsmetod tillämpats på delar av brandskyddet har dessa beräkningars riktighet styrkts genom dimensioneringskontroll av Ida Ginstrup (Brandingenjör och Civilingenjör i Riskhantering) som inte tidigare varit delaktig i uppdraget.

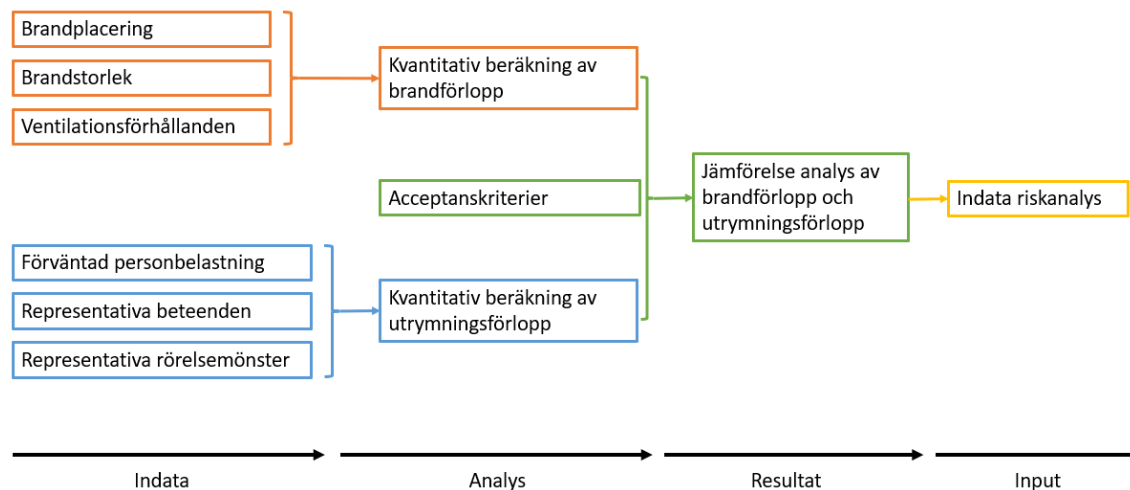
1.6 METODBESKRIVNING

I detta avsnitt redovisas den metod som har använts för att utföra denna analys. Konsekvensanalysens metod illustreras i Figur 1 nedan.

Konsekvensanalysen utgörs av två kvantitativa analyser – beräkning av brandförlopp samt utrymningsförlopp, där de båda baseras på indata för respektive analys. Detaljerad information om respektive analys samt dess indata presenteras i kapitel 4 – Brandförlopp samt kapitel 5 – Utrymningsförlopp i denna rapport.

Utifrån de kvantitativa beräkningarna avseende brandförlopp och utrymningsförlopp sker sedan en jämförelse mellan analyserna för att värdera hur många personer inom tunneln som utsätts för kritiska förhållanden för respektive scenario. För att värdera när kritiska förhållanden uppstår tillämpas gränsvärden för sikt, värmestrålning, temperatur och toxiska gaser.

Resultatet av jämförelsen utgör sedan indata till riskanalysen.



Figur 1. Illustration av metodbeskrivning

2 KRAVBILD

Flera lagstiftningar och styrande dokument anses relevanta att beakta i denna analys. I detta avsnitt redovisas de som är aktuella för denna konsekvensanalys. För vidare information om kravbild enligt lagstiftning och andra styrande dokument hänvisas till denna bilagas huvudrapport.

Med avseende på risk- och säkerhetsaspekter är TSFS 2019:93 med ändringar t.o.m. 2022:13 (Transportstyrelsen, 2022) den mest centrala. Även TRVINFRA 0233 (Trafikverket, 2021) innehåller delar som beaktas. Utöver dessa är även rapporten "Riskanalysmetod & Basstandard – underlag till revidering av föreskrift 2019:93" (WSP, 2022)" styrande.

Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i vägtunnlar m.m. (TSFS) (Transportstyrelsen, 2022) anger att krav för säkerhetsåtgärder baseras på resultatet av en samlad bedömning, enligt kapitel 3, paragraf §1-3. Denna bilagas huvudrapport utgör en sådan bedömning.

TSFS 2019:93 innehåller även allmänna råd avseende gränsvärden för kritiska förhållanden. De gränsvärden för kritiska förhållanden som utgör underlag för denna analys utgår dock från rapporten "Kriterier och gränsvärden vid utrymning av vägtunnlar" (WSP, 2023) och beskrivs i avsnitt 3.8. Dessa skiljer sig från de allmänna råd avseende gränsvärden för kritiska förhållanden som är gällande enligt nu gällande TSFS 2022:13.

De delar från TRVINFRA 0233 som beaktas ses som vägledning i särskilda frågor såsom exempelvis avseende gånghastigheter i vägtunnel och typ av bränder som bör beaktas.

Kravställande dokument ger ingen tydlig och detaljerad bild av kravnivån avseende parametrar som påverkar aktuell konsekvensanalys. Val av studerade parametrar diskuteras i kommande kapitel.

3 DIMENSIONERANDE FÖRUTSÄTTNINGAR OCH INDATA

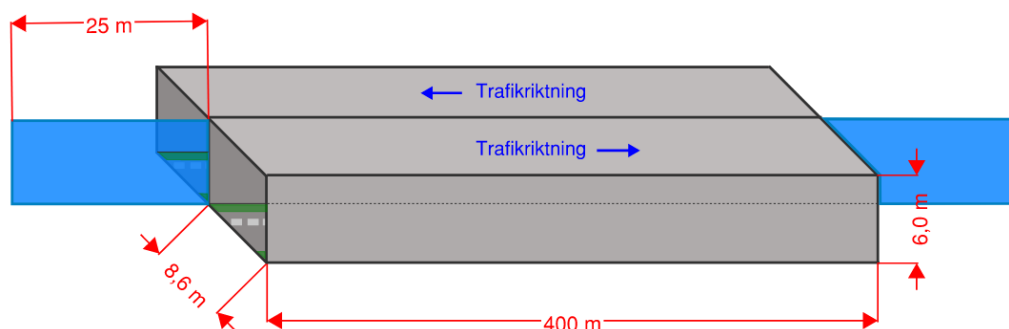
3.1 TUNNELUTFORMNING

Då Bastunnel 400 är en teoretisk tunnel saknas ritningsunderlag på dess utformning. Utformningen är framtagen i samråd med Transportstyrelsen. Tabell 1 nedan presenterar tunnelns huvuddrag.

Tabell 1. Utformning av Bastunnel 400.

	Utformning Bastunnel 400
Total längd i huvudsträckning	400 m
Totalt antal tunnelmeter	800 m
Antal tunnelrör	2
Antal körfält huvudsträckning	2 st / tunnelrör
Körfältens bredd	Minst 3,5 m
Nödgångvägar	0,8 m längs tunnelväggarna
Tunnels totala bredd	8,6 m / tunnelrör
Takhöjd i tunnel	6 m (fri höjd för fordon 4,7 m)
Rökgasskärmar vid mynningarna	25 m långa (mellan tunnelrören)
Linjeföring, horisontell led	Tunneln har en rak linjeföring mynning till mynning
Linjeföring, vertikal led (lutning)	3 % (maximal lutning)
Trafikflöde (prognos)	15 000 fordon, per tunnelrör och dygn
Hastighetsbegränsningar i trafiktunnlar	80 km/h
Avsedd trafikering/fordonskategorier	Motorfordon enbart
Andel tung trafik (tung lastbilar)	8 %
Avsedd tunnelkategori avseende farligt gods-transporter	Klass E, d.v.s. farligt gods tillåts ej.
Tunnelklass i enlighet med TRVINFRA	TC
Risk för köbildning	Nej, trafikstockningar/köbildning tillåts ej.
Bärande huvudsystem	Huvudsakligen förstärkt berg (sprutbetong) eller betongkonstruktion
System för trafikstyrning och signalering	Infartsbommar
Brandtekniska installationer	
Automatiskt brandlarm	Ja (signal sänds till bemannad plats)
Utrymningslarm	Nej
Utrymningsbefrämjande utrustning och åtgärder	Nödbelysning, utrymningsskyltar, anpassningar för funktionsnedsatta.
Ventilationssystem/ System för brandgaskontroll	Nej
Fast släcksystem	Nej

En schematisk bild av tunnelns utformning visas i Figur 2 nedan.



Figur 2. Schematisk bild av tunnelns utformning. Rök-gasskärmar vid mynnarna visas i blått.

3.2 DIMENSIONERANDE BRAND

TSFS 2019:93 anger att säkerhetsåtgärder i en tunnel ska vidtas utifrån en samlad bedömning av ett antal förutsättningar t ex tunnelkonstruktionen, vägutformning och fordon etc. Identifierade risker rör i huvudsak brand i fordon. TRVINFRA K43583 anger att *"Fordon ska betraktas som en möjlig brandkälla"*, där den förväntade branden beror av vilket fordonsslag som brinner.

De förväntade konsekvenserna av en brand i fordon beror i huvudsak på de styrande parametrarna brandtillväxthastighet, maximal brandeffekt och brandens varaktighet. Beroende av fordonsslag kan dessa parametrar variera kraftigt. Gemensamt för parametrarna brandtillväxthastighet, maximal brandeffekt och brandvaraktighet är att de i huvudsak styrs av vad som brinner och var det brinner.

Antalet möjliga brandscenarier är oändligt stort då det i huvudsak styrs av vilket eller vilka specifika fordon som involveras. Baserat på de fordonsslag som antas trafikera Bastunnel 400 bedöms följande principiella brandscenarier möjliga:

- Brand i personbil
- Brand i buss
- Brand i lastbil

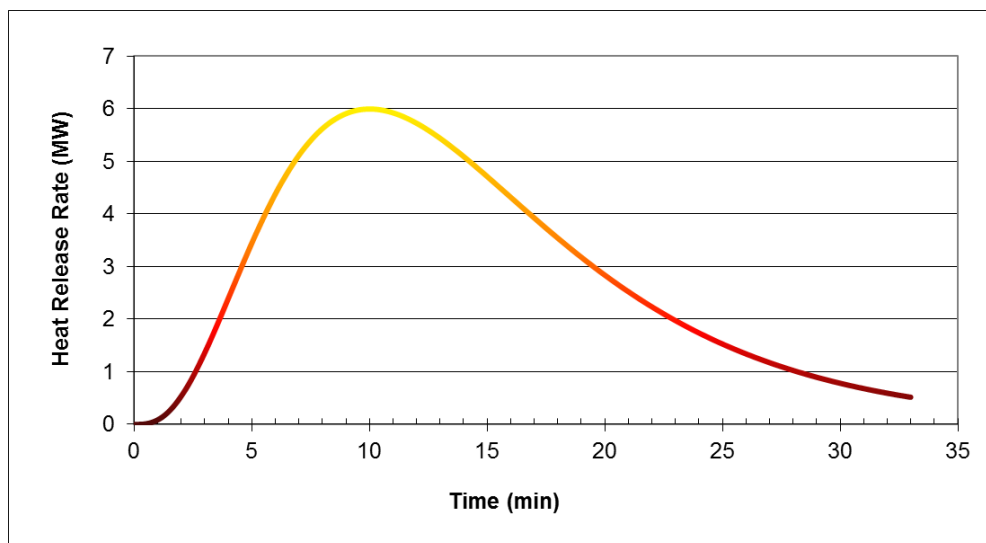
Då Bastunnel 400 ej utgör trafikled för farligt gods beaktas inte sådana brandscenarier i denna analys. Brand i lastbil involverar således inte farligt gods.

Brand i flertalet fordon, exempelvis flera personbilar som krockat eller där branden sprider sig från en bil till en annan, studeras ej. Detta då ett sådant scenario kan anses inkluderas i någon av de större brandscenerierna.

Framtagande av dimensionerande brand har utgått ifrån rapporten "Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar", som tagits fram av RISE (RISE, 2017). Rapporten gjordes med syftet att ta fram en katalog av brandeffektkurvor som funktion av tid, som senare skulle kunna utgöra underlag för projekt där hållfasthetsberäkningar krävs. Rapporten utgör en sammanställning av olika brandeffektkurvor för de mest vanliga fordonen som trafikerar svenska vägar. I rapporten har främst fordon som brinner i det fria studerats, ej brand i vägtunnel. Då Bastunnel 400 har en stor öppningsarea antas det att möjliga bränder inte kommer att bli ventilationskontrollerade, varpå RISE-rapportens resultat kan anses vara applicerbara även för aktuell tunnelutformning.

3.2.1 Brand i personbil

Brandeffekten för personbilar kan variera kraftigt och sträcka sig från enstaka MW upp till 9 MW (Ingason et al., 2015). Ett troligt val för en personbil som brinner är 6 MW efter 10 minuter med en varaktighet på 30 minuter (RISE, 2017) enligt Figur 3 nedan.



Figur 3. En trolig brandeffektkurva för en personbil (RISE, 2017)

Bränslets sammansättning för personbil beskrivs i Tabell 2 nedan.

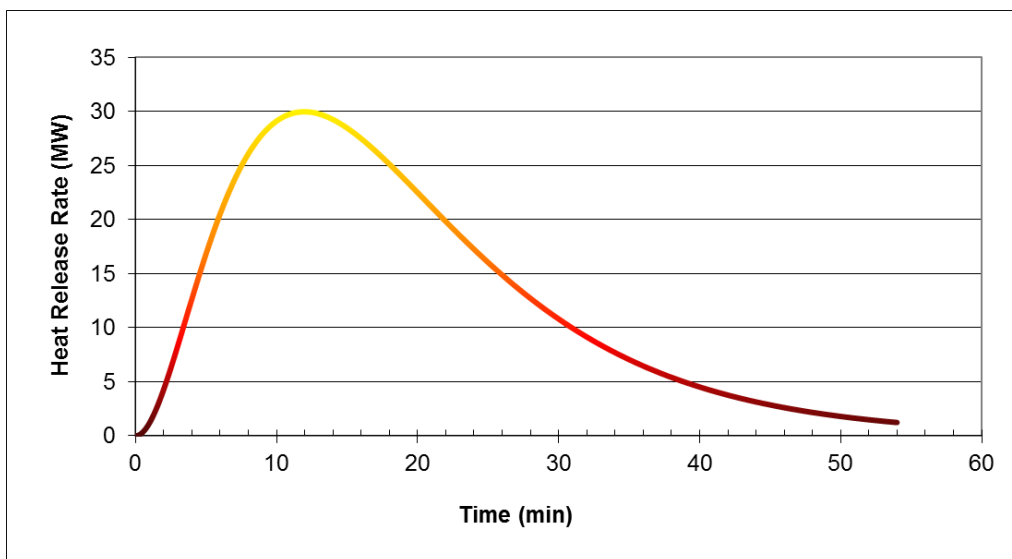
Tabell 2. Bränslets kemi - personbil

Brandscenario - Personbil			
Max HRR	6	MW	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Brandkällans area	1,8 x 3	m ²	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
HRRPUA [#]	1111	kW/m ²	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Förbränningsvärme	27,5	MJ/kg	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Sotproduktion	0,1	g/g	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
CO-produktion	0,1	kg/kg	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)

[#] HRRPUA = Heat Release Per Unit Area

3.2.2 Brand i buss

Den högsta brandeffekten för en buss kan variera från 25–34 MW där tiden tills max brandeffekten uppnås varierar mellan 7–14 minuter (Ingason et al., 2015). En trolig maximal effektutveckling för en brand i buss är 30 MW, där maximal HRR nås efter 12 minuter (RISE, 2017). Effektutvecklingen för en sådan brand presenteras i Figur 4 nedan.



Figur 4. En trolig brandeffektkurva för en buss (RISE, 2017)

Bränslets sammansättning för bussbrand beskrivs i Tabell 3 nedan.

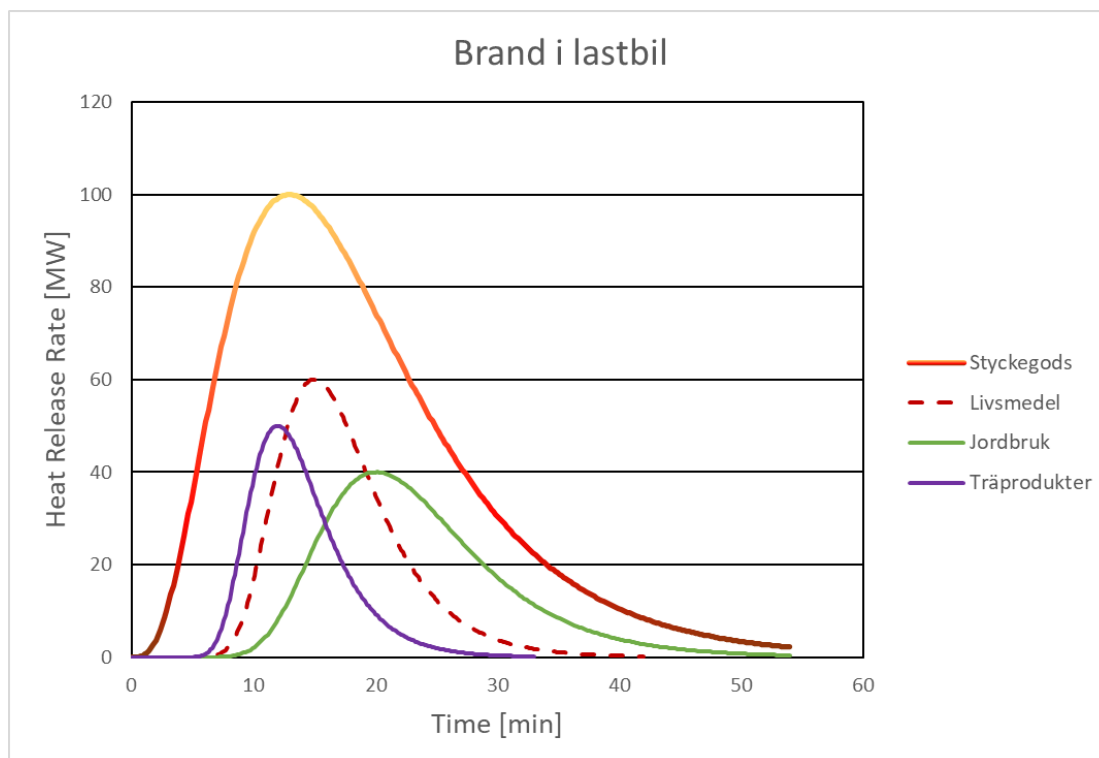
Tabell 3. Bränslets kemi - buss

Brandscenario - Buss			
Max HRR	30	MW	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Brandkällans area	2,6 x 20	m ²	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
HRRPUA [#]	577	kW/m ²	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Förbränningsvärme	25	MJ/kg	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Sotproduktion	0,06	g/g	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
CO-produktion	0,08	kg/kg	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)

[#] HRRPUA = Heat Release Per Unit Area

3.2.3 Brand i lastbil

Effekten för brand i lastbil kan variera stort då den beror av lastbilens gods. I Figur 5 presenteras de effektutvecklingar som togs fram av RISE, där kurvan för styckegods inkluderas i aktuell konsekvensanalys.



Figur 5. Beräknade brandeffektkurvor för varierande typer av gods (RISE, 2017)

Bränslets sammansättning för brand i lastbil beskrivs i Tabell 4 nedan.

Tabell 4. Bränslets kemi - lastbil

Brandscenario - lastbil			
Max HRR	100	MW	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Brandkällans area	2,8 x 10	m ²	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
HRRPUA [#]	3571	kW/m ²	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Förbränningsvärme	20	MJ/kg	Enligt RISE:s rapport (Ingason, 2017)
Sotproduktion	0,05	g/g	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
CO-produktion	0,05	kg/kg	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)

[#] HRRPUA = Heat Release Per Unit Area

3.2.4 Brandplacering

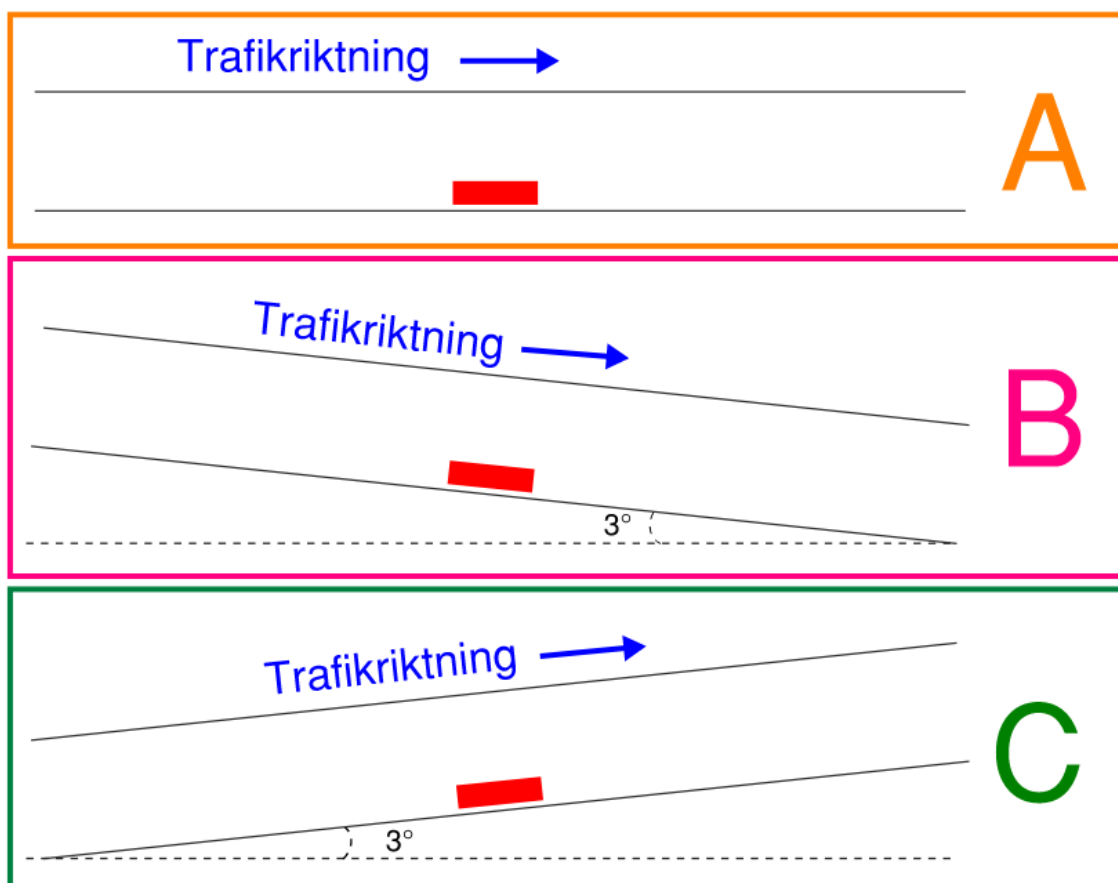
Samtliga dimensionerande bränder kan inträffa på alla platser i tunneln. Då tunneln har en homogen geometri bedöms en brand i mitten av tunneln vara representativ. Branden placeras således 200 m in i tunneln, då resultatet av beräkningar för en sådan placering kan ses som ett medelvärde på de konsekvenser som kan uppstå.

3.2.5 Tunnellutning

Då tunneln är utförd utan brandgasventilation har tunnellutningen stor påverkan på brandgasspridningen. För att fånga in effekter av lutningen på vägtunneln studeras tre olika lutningar. Följande tre tunnellutningar bedöms kunna representera merparten av tunneln:

- Tunnellutning A: ingen lutning
- Tunnellutning B: 3% nedåt
- Tunnellutning C: 3 % uppåt

Figur 6 visar en schematisk beskrivning av de olika lutningarna. Röd rektangel representerar brandens placering.



Figur 6. Studerade tunnellutningar och brandplaceringar i Bastunnel 400.

För tunnellutning A antas det att brandgaserna kommer spridas både framför och bakom branden. För tunnellutning B antas det att merparten av brandgaserna kommer spridas bakåt i tunneln. För tunnellutning C antas det att merparten av brandgaserna kommer spridas framåt i tunneln. Tunnellutning B antas således utgöra det mest utmanande fallet för utrymningen, då brandgaserna sprider sig mot de trafikanter som inte kan köra ut ur tunneln.

3.3 VENTILATION OCH YTTRE VINDFÖRHÅLLANDEN

Bastunnel 400 utförs utan mekanisk ventilation. Brandförloppsmodellerna i denna analys utförs även utan yttre vindförhållanden, då dessa beror av de platsberoende parametrarna dominerande vindriktning samt vindhastighet. Då Bastunnel 400 är en teoretisk tunnel finns inte sådan data att tillgå.

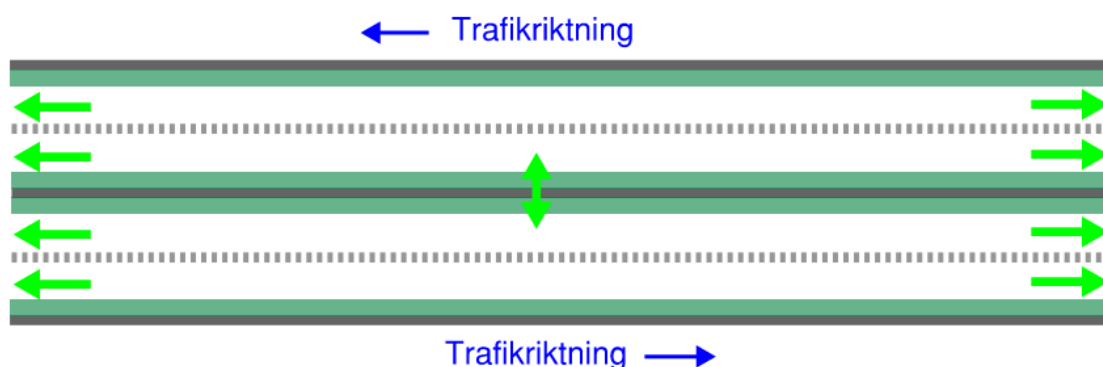
3.4 AUTOMATISKT SLÄCKSYSTEM

Bastunnel 400 utförs utan automatiskt släcksystem.

3.5 UTRYMNINGSSTRATEGI

Vid brand i trafiktunnelrör ska tunneln i första hand utrymmas genom att fordon kör ut. De trafikanter som inte kan köra ut ur tunneln ska i stället utrymma till fots. Utrymningsvägar består av mynningar samt en tvärförbindelse mellan tunnelrören, se Figur 7 nedan. Tvärförbindelsen är placerad i mitten av tunneln, dvs 200 m in i tunneln. Icke brandpåverkade tunnelröret utgör (tillfällig) säker plats. Härifrån kan personer själva ta sig till det fria.

Bastunnel 400 är utförd utan utrymningslarm. Detta innebär bl a det inte finns blyxtljus, utrymningslarm, tunnelinformationsskyltar (TIS) eller körfältssignaler (KFS). Bastunnel 400 är dock utförd med bommar som stänger infarter till tunneln. Dessa stängs automatiskt via detektionssystemet eller genom manuell aktivering från trafikcentral.



Figur 7. Översikt av tunnelns utrymningsvägar (gröna pilar).

Då Bastunnel 400 utförs utan mekanisk ventilation kommer brandgaser att sprida sig åt båda hållen i tunneln. I vilken omfattning de sprids beror av tunnelns lutning.

Trafikanter som befinner sig nedströms branden (dvs framför branden) förväntas kunna köra ut ur tunneln och behöver således inte utrymma till fots eller påverkas av branden i någon större omfattning.

Personer uppströms branden (dvs bakom branden) kan inte köra ut ur tunneln då det antas att det brinnande fordonet förhindrar bakomvarande att passera. Dessa förväntas därför lämna sina fordon och utrymma till fots via tvärförbindelsen eller tunnelmynningen där de körde in i tunneln. Då branden antas uppstå i mitten av tunneln och därmed invid tvärförbindelsen antas denna vara blockerad under hela utrymningsförloppet. Detta då personer förväntas söka sig bort från branden vid utrymning. Därmed sker utrymning i de studerade scenarierna endast via tunnelmynningen bakom trafikanterna.

Utrymningskonceptet förutsätter inte att räddningstjänsten skall medverka (principen för självutrymning gäller).

3.6 DIMENSIONERANDE PERSONANTAL

Årsmedeldygntrafiken (ÅDT) för Bastunnel 400 är 15 000 fordon/dygn i vardera riktningen, dvs per tunnelrör. Detta ÅDT är vald utifrån tunnelklasser i TRVINFRA 0233.

Trafiksammansättningen för Bastunnel 400 har antagits ha sammansättning av trafik och trafikanter enligt Tabell 5, se denna bilagas huvudrapport för mer information om detta antagande. I denna analys bortses från motorcyklar.

Baserat på ÅDT beräknas sedan hur många fordon som kan förväntas befinna sig i tunneln innan infartsbommarna stänger vägtunneln för inpassering samt hur många fordon som får plats i tunneln (bakom branden) när infartsbommarna felfungerar. Totalt antal fordon fördelas enligt fordonsslag baserat på andel enligt Tabell 5. Med avseende på fordonsslag beräknas därefter antalet trafikanter.

Tabell 5. Fordonsslag och trafikanter per fordon.

Fordonsslag	Andel	Antal per dygn (ÅDT)	Trafikanter per fordon	Fordonslängd [m]
Personbil	85–86 %	12750–12900	1,4*	7
Lätt lastbil	5 %	750	1,2	8
Tunga fordon	8 %	1200	1	11
Bussar	1–2 %	150–300	8, 15 eller 95	21

*Datakälla: Transportarbete 2000–2021 (Trafikanalys, 2022), Trafikanalys: Trafikarbete på svenska vägar

I analysen varierar om en buss eller två bussar befinner sig i tunneln, samt hur många personer som befinner sig på bussen. Antalet trafikanter i en buss varierar under dygnet där aktuell analys varierar antalet på bussen mellan 8 personer (nattrafik), 15 personer (dagtrafik) och 95 personer (rusningstrafik).

I de scenarier då infartsbommarna fungerar antas dessa stänga efter ca 3,5 minuter. Denna tid baseras på en detektionstid av brandlarmet efter ca 90–100 s. Detektionstid av brandlarm utgår från tid till då en värmekabel med detektionsnivå 68 °C detekterar, enligt genomförda brandförloppsmodeller. Därefter antogs en ca 2 minuters period av handläggningstid samt fysisk stängning av infartsbommarna. Baserat på ÅDT beräknas sedan hur många fordon som kan förväntas befinna sig i tunneln (bakom branden) efter 3,5 minuter.

I det scenario där tunnelns infartsbommar felfungerar är antal fordon baserat på hur många fordon som får plats i tunneln samtidigt, baserat på ungefärlig längd för respektive fordonsslag. I detta scenario antas två bussar finnas i tunneln. Båda bussarna antas trafikera i rusningstrafik, dvs med 95 personer vardera.

Antalet person som förväntas befinna sig i tunneln då infartsbommar stänger respektive felfungerar presenteras i Tabell 6.

Tabell 6. Dimensionerande personantal i tunnel då infartsbommar stänger respektive felfungerar.

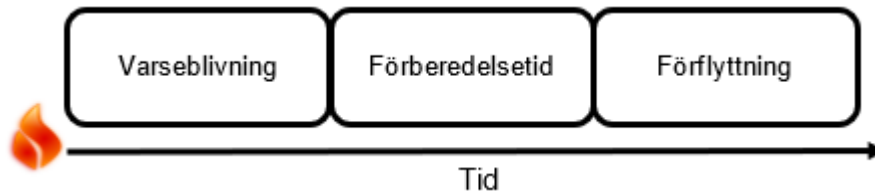
Benämning	Personantal andra fordon [pers]	Antal på buss [pers]	Totalt antal i tunneln [pers]
Infartsbommar stänger	50	8	58
	50	15	65
	50	95	145
Infartsbommar felfungerar	64	95 + 95	254

3.7 UTRYMNING

Tiden för total utrymning består av tre delar:

- Varseblivningstid ($t_{\text{varseblivning}}$)
- Förberedelsetid ($t_{\text{förberedelse}}$)
- Förflyttningstid ($t_{\text{förflyttning}}$)

Den totala utrymningstiden ($t_{\text{utrymning}}$) är summan av de olika delarna ovan, se Figur 8.



Figur 8 Modell av utrymningsförloppet

Personers beteende vid brand har skattats utifrån litteratur med avseende på varseblivningstid samt beslut- och reaktionstid. Personskada avser personer i tunnlarna, dvs trafikanter i vägtunneln.

Människors beteende vid brand kan variera stort baserat på exempelvis deras närhet till branden samt dess fysiska utrymningsförmåga. För att kunna göra en bedömning av personers beteenden och möjligheter att utrymma har personerna i denna analys delats in i olika utrymningsgrupper (UG). Att dela in utrymmande personer i olika utrymningsgrupper baserat på tid till varseblivning och förberedelse, närhet till branden samt fysiska utrymningsförmåga är ett rekommenderat tillvägagångsätt för utrymningsanalys i International Fire Engineering Guidelines (IFEG, 2005). Dessa riktlinjer är framtagna för brand i byggnad, men deras koncept och principer kan även appliceras på tunnlar. IFEG (2005) rekommenderar att utrymmande delas in i grupper baserat på deras avstånd till branden för att få en så heltäckande analys av tunneln som möjligt. Utrymningsgrupperna baseras både på en zonindelning av tunneln samt en persontypindelning av de utrymmande.

3.7.1 Zonindelning

I denna analys har det branddrabbade tunnelröret delats in i olika utrymningszoner baserat på avståndet till branden. Följande zoner har använts:

- Zon 1: 0-30 m från branden
- Zon 2: 30-130 m från branden
- Zon 3: 130-190 m från branden

3.7.2 Persontyper

Personers möjligheter att utrymma i händelse av brand beror både på deras förmåga att uppfatta att en brand har skett samt den fysiska förmågan att själv ta sig till säkerhet. Utrymningsförmågan kan således bestämmas av de utrymmandes fysiska och psykiska kapacitet. För att inkludera en så bred population som möjligt används följande personindelning:

- Över medel (ÖM)
 - Personer som ingår i denna grupp antas vara uppmärksamma på eventuella händelser i tunneln, samt ha goda fysiska förutsättningar att utrymma
 - Denna grupp antas utgöra 23% av de utrymmande
- Medel (M)
 - Personer som ingår i denna grupp antas vara ha medelgoda möjligheter att uppmärksamma eventuella händelser i tunneln samt ha medelgoda förutsättningar att utrymma
 - Denna grupp antas utgöra 64% av de utrymmande
- Under medel (UM)
 - Personer som ingår i denna grupp antas ha sämre möjligheter att uppmärksamma eventuella händelser i tunneln, samt begränsade fysiska möjligheter att utrymma
 - Denna grupp antas även inkludera föräldrar som reser med små barn som inte kan utrymma själv
 - Denna grupp antas utgöra 13% av de utrymmande

Andelen i persontypgrupp "under medel (UM)" inkluderar personer med en funktionsnedsättning som påverkar dess utrymningsförmåga. Då det inte finns något register på personer i Sverige med funktionsnedsättning är det svårt att uppskatta hur stor denna andel är. Resultat i form av andel med funktionsnedsättning i olika undersökningar varierar beroende av undersökningens utformning. Enligt Myndigheten för delaktighet (MDF) varierar andelen personer med funktionsnedsättning mellan ca 10-30%, baserat på vilken undersökning som studeras (MFD, 2022). Det ska då tilläggas att detta inkluderar alla typer av funktionshinder, dvs fysiska, psykiska och intellektuella, vilka inte alla har en påverkan på utrymningsförmågan.

Resultatet från Folkhälsomyndighetens nationella folkhälsoenkät med självrapporterad funktionsnedsättning var 19% år 2021 (Folkhälsomyndigheten, 2022). Generellt ger undersökningar där en direkt fråga om personer anser sig ha en funktionsnedsättning lägre resultat, än undersökningar där de tillfrågade får besvara flera generella frågor om långvarig sjukdom, syn-, hörsel-, rörelseförmåga och svårigheter att minnas (MFD, 2022). I det senare fallet definieras personer som svarar att de upplever sådana egenskaper som att de har en funktionsnedsättning, vilket inte alltid stämmer överens med den bild som den tillfrågade själv har.

För att utföra denna konsekvensanalys är endast funktionsnedsättningar som påverkar utrymningsförmågan av intresse, dvs sådana som påverkar den faktiska förmågan att utrymma i händelse av brand. Enligt en undersökning gjord av Europeiska unionens Statistics on Income and Living Conditions (EU-SILC) upplever 13% av de tillfrågade i Sverige att de har svårigheter att delta i aktiviteter eller klara sysslor som de flesta andra klarar av (EU-SILC, 2022). För denna analys antas att 13% ingår i persontypgruppen "under medel (UM)". En uppskattning av personer med begränsade utrymningsmöjligheter för Nya Zeeland var 12%, vilket baserades på data om personer med funktionsnedsättning (Statistics New Zealand, 2001). Det antagna värdet om 13% antas därmed som en rimlig uppskattning för aktuell analys.

Då undersökningar visar på en högre total andel personer med funktionsnedsättning kan det förväntas att fler personer med funktionsnedsättning kan befinna sig i tunneln. Detta inbegriper dock även funktionshinder som inte påverkar personers utrymningsmöjligheter, vilka antas utrymma enligt persongrupptyperna "över medel (ÖM)" eller "medel (M)" i denna analys. Personer med en grav funktionsnedsättning som kräver assistans, förväntas inte trafikera tunneln på egen hand. Dessa förväntas därmed utrymma med hjälp av sin befintliga assistans.

Resterande andel, 87%, fördelas med 64% till persontypgrupp "medel (M)" och 23% till persontypgrupp "över medel (ÖM)". Majoriteten av de utrymmande ansätts till persontypgrupperna "medel (M)" och "över medel (ÖM)" vilket bedöms representativt för personer som trafikerar ett eget fordon och därmed en representativ uppskattning för denna konsekvensanalys.

3.7.3 Varseblivningstid

Varseblivningstid definieras som den tid det tar fram till dess att personer upptäcker att något onormalt inträffat. Tiden beror i allmänhet på om personer ser branden eller dess brandgaser, samt om det finns något automatiskt detektionssystem som kan upptäcka branden. Inom tunneln har personer olika möjligheter att upptäcka en brand. Personer i brandens närhet kan förväntas ha en kortare varseblivningstid, medan personer längre bort kommer att ha längre varseblivningstid till följd av att det tar längre tid för brandgaserna att sprida sig i tunneln. Personer längre bort från branden kan därmed vara beroende av andra former av signaler och information för att bli varse branden, t ex från ett utrymningslarm. Information om att något onormalt inträffat kan också förväntas erhållas från andras beteende, så kallad social påverkan (Nilsson & Johansson, 2009). När en person ser att andra utrymmer kommer situationen troligen att tolkas som ett tecken på att något onormalt inträffat som påkallar ett agerande.

Varseblivningstiden i utförda analyser är baserad på brandgasspridningen i tunneln och därmed personers närhet till branden. Personer som befinner sig i brandens närhet har därmed antagits få en kortare varseblivningstid än personer i fordon längre från branden. Utrymningszoner med kortare avstånd från branden har därmed en kortare varseblivningstid än de med längre avstånd från branden. Respektive utrymningszon bedöms bli varse om branden då en tydlig brandgasspridning sker längs tunnelns tak. Den tydliga brandgasspridningen består av ett ca 2 m tjock brandgaslager där sikten understiger 10 m. Tunneln ska enligt förutsättningarna utföras med en rak linjeföring vilket medför att tunneln blir lätt överblickbar och det blir lättare för trafikanterna att se brandgasspridningen längs tunneltaket.

I utförd analys har samma varseblivningstid ansatts för de olika persontypgrupperna. Denna tid baseras på trafikanternas placering i tunneln (i vilken utrymningszon).

3.7.4 Förberedelsetid

Förberedelsetiden kan i allmänhet beskrivas som den tid det tar för att personer skall förstå att det brinner, tolka in betydelsen av (eventuella) larmsignaler från utrymningslarm, hjälpa andra att utrymma, förbereda sig med mera. För aktuell tunnel innefattar förberedelsetiden att bli medveten om faran, reagera på faran, ta sig ur fordonet och lämna fordonet. Faktorer som bidrar till kortare förberedelsetid kan vara att de utrymmande ser branden eller brandgaser, synliga utgångar, utrymningsskyltars placering, orienterbarheten i tunneln, andra trafikanter som utrymmer samt utrymningslarm och dess utformningen avseende exempelvis ljus och ljud.

I utförd analys baseras varseblivningstiden på tiden då brandgasspridning i taknivå sker i de olika utrymningszonerna i tunneln. Utöver brandgasspridningen finns inget utrymningslarm eller exempelvis tunnelinformationsskyltar (TIS) som uppmanar trafikanterna till att utrymma. Baserat på detta antas en relativt lång förberedelsetid. Förberedelsetiden för samtliga utrymningsscenarioer ansätts till 180 s för persontypgrupp "medel (M)". Detta är 1 minut snabbare än den förberedelsetid som anges i BBRAD (Boverket, 2013) för varuhus utan larm, vilket bedöms representativt då brandgasspridningen sker tydligt i tunneln samt att tunneln har en okomplicerad geometri jämfört med ex ett varuhus. Trafikanterna i zon 2 och zon 3 blir även uppmärksammade på att något skett då utrymmande från zon 1 passerar deras zon då de påbörjar sin utrymning först.

Förberedelsetid ansätts endast för persontypgruppen "medel (M)" för att sedan beräknas för persontypgrupp "över medel (ÖM)" och "under medel (UM)", se avsnitt 3.7.6 för beräkninggång.

3.7.5 Förflyttningstid

Förflyttningstid är den tid det tar för en person att förflytta sig till en säker plats efter det att beslut om utrymning har tagits. En säker plats kan vara en utrymningsväg, eller till det fria. Förflyttningstiden beror på gånghastighet, personantalet, tillgänglig utrymningsbredd samt gångavstånd till utrymningsväg. Förflyttningstiden modelleras i Pathfinder.

Gånghastigheter anges i Tabell 7 nedan. Det kan noteras att de angivna gånghastigheterna i TRVINFRA (Trafikverket, 2021) är långsammare än i BBRAD (Boverket, 2013), där de förstnämnda är baserade på en förlaga till BBRAD (Boverket, 2013). Gånghastigheterna i denna analys baseras på hastigheter angivna i TRVINFRA (Trafikverket, 2021), med undantag för persontypgruppen "under medel (UM)". Gånghastighet för denna grupp ansätts till medelvärdet av vad som anges i TRVINFRA (Trafikverket, 2021) respektive BBRAD (Boverket, 2013). För persontypgrupp "över medel (ÖM)" ansätts den snabbaste hastigheten i intervallet och för persontypgruppen "medel (M)" ansätts medelvärdet (avrundat uppåt till närmst heltal).

Tabell 7. Gånghastighet

Persontypgrupp	Gånghastighet enligt TRVINFRA K43643	Gånghastighet enligt BBRAD	Gånghastighet i denna analys
Över medel (ÖM)		n/a	1,3 m/s
Medel (M)	0,6 – 1,3 m/s	1,5 m/s	1,0 m/s
Under medel (UM)		1,0 m/s	0,8 m/s

Total utrymningstid simuleras enligt utrymningsförlopp beskrivet i kapitel 5.

3.7.6 Framtagande av indata för utrymning

För persontypgrupp "medel (M)" ansätts värde enligt beskrivningen i 3.7.4, varpå värden för persontypgrupp "över medel (ÖM)" och "under medel (UM)" beräknats med hjälp av faktorer. För persontypgrupp "över medel (ÖM)" kan ett lägre värde än ansatt antas, och för "under medel (UM)" kan ett högre värde antas.

Multiplikeringen med faktorer har utgått ifrån indata till två projekt där utrymningsgrupper och persontypgrupper har använts (Bilson, 2014) (Well-Connected Alliance, 2013). I båda projekten har varseblivnings- och förberedelsetiden för persontypgruppen "över medel (ÖM)" ansatts till hälften av tiden för "medel (M)". För aktuell tunnel appliceras denna faktor på förberedelsetiden (då varseblivningstiden är ansatt som samma för samtliga persontypgrupper inom samma utrymningszon).

För persontypgruppen "under medel (UM)" har projekten ansatt tider som är 1,2 respektive 1,4 gånger längre än för persontypgruppen "medel (M)". För persontypgrupp "under medel (UM)" i aktuell tunnel appliceras därför faktorn 1,3.

Varseblivnings- och förberedelsetiden för de respektive persontypgrupperna redovisas i kapitel 5.

3.8 GRÄNSVÄRDEN FÖR KRITISKA FÖRHÅLLANDEN

Gränsvärden för kritiska förhållanden för Bastunnel 400 baseras på framtagna gränsvärden i rapporten "Kriterier och gränsvärden vid utrymning av vägtunnlar" (WSP, 2023). Aktuella gränsvärden är framtagna för analyser då antalet omkomna vid brand behöver fastställas. Dessa gränsvärden skiljer sig därmed mot de gränsvärden som presenteras i exempelvis BBRAD (Boverket, 2013), TRVINFRA (Trafikverket, 2021) och TSFS (Transportstyrelsen, 2022) då dessa studerar kritiska förhållanden för godtagbar exponering som inte nödvändigtvis leder till att personer omkommer.

De gränsvärden som framtagits i rapporten "Kriterier och gränsvärden vid utrymning av vägtunnlar" presenteras i Tabell 8 nedan. För vidare motivering av valda gränsvärden för kritiska förhållanden hänvisas till nämnd rapport.

Samtliga av nedanstående gränsvärden studeras vid höjden 2 meter över golvnivå.

Tabell 8. Gränsvärden för när personer bedöms omkomma

Kriterium	Nivå
Siktbarhet	<3 m
Siktbarhet och temperatur	<5 m och >80°C
Strålning	2,5 kW/m ²
FED 10% omkommer	FED = 0,3
FED 50% omkommer	FED = 1,0
FED 90% omkommer	FED = 3,0

3.9 SCENARIOBESKRIVNING

Konsekvensanalysen studerar både brandförlopp och utrymningsförlopp för olika scenarier. Analysen av brandförlopp baseras på nio brandscenarier. Brandscenarierna utgår från tre representativa tunnellutningar och tre olika storlekar på bränder.

För respektive brandscenario genomförs utrymningsanalyser där tunneln fyllts upp med så många fordon som hinner köra in i tunneln innan infartsbommarna antas stänga. Infartsbommarna stänger efter 3,5 minuter. I dessa scenarier befinner sig en buss i tunneln uppströms branden. Tre olika utrymningsscenarier studeras då infartsbommarna stänger, där personantalet på bussen varierar. Utöver detta studeras även ett scenario då stängning av infartsbommarna antas felfunktionera varpå tunneln fylls upp med så många fordon som får plats bakom branden. I detta scenario antas två fullsatta bussar (rusningstrafik) befinna sig i tunneln.

Tabell 9 utgör en sammanställning av de brand- och utrymningsscenarier som studerats.

Tabell 9. Sammanställning studerade brand- och utrymningsscenarier.

Tunnellutning	Brand-scenario	Utrymningssscenario			
	Brandstorlek [MW]	Utrymnings-scenario A	Utrymnings-scenario B	Utrymnings-scenario C	Utrymnings-scenario D
		Personantal buss [pers]			
		8	15	95	95 + 95
A	6 ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹
A	30	x	x	x	x
A	100	x	x	x	x
B	6	x	x	x	x
B	30	x	x	x	x
B	100	x	x	x	x
C	6 ¹	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹
C	30	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹
C	100	x ¹	x ¹	x ¹	x ¹

¹ Scenario studeras ej vidare, se motivering i kapitel 6.

4 BRANDFÖRLOPP

I detta avsnitt redovisas hur dimensionerande bränder och tunnelns geometri har modellerats i analysen.

4.1 SCENARIOBESKRIVNING

Analysen av brandförlopp baseras på de nio brandscenarierna. Brandscenarierna utgår från tre representativa tunnellutningar och tre olika brandstorlekar, vilka beskrivs i nedanstående avsnitt.

Tabell 10 sammanfattar de studerade brandscenarierna.

Tabell 10. Studerade brandscenarier

Brand placering	Brandstorlek [MW]	Benämning	Kommentar
A	30	TRA-A-01-01	Samtliga system fungerar
A	100	TRA-A-02-01	Samtliga system fungerar
A	6	TRA-A-03-01	Studeras ej, se avsnitt 6.1 för motivering
B	30	TRA-B-01-01	Samtliga system fungerar
B	100	TRA-B-02-01	Samtliga system fungerar
B	6	TRA-B-03-01	Samtliga system fungerar
C	30	TRA-C-01-01	Samtliga system fungerar
C	100	TRA-C-02-01	Samtliga system fungerar
C	6	TRA-C-03-01	Studeras ej, se avsnitt 6.1 för motivering

Inga brandförloppsanalyser genomförs för brand i personbil (6 MW) för Tunnellutning A och Tunnellutning C, se avsnitt 6.1 för motivering.

4.2 BRANDFÖRLOPPSMODELL

De brandförloppsberäkningar som har genomförts och som presenteras i den här handlingen har utförts med CFD-modellen FDS (McGrattan, McDermott, Hostikka, Floyd, & Vanella, 2019) (NIST, u.d.). FDS har utvecklats av National Institute of Standards and Technology (NIST) i USA. Modellen är fritt tillgänglig och har ett vida spritt användande inom det brandtekniska området. Därtill sker en kontinuerlig utveckling och validering av modellen.

FDS är utvecklad för att prediktera de flöden som skapas vid en brand. Modellen löser numeriskt en form av Navier Stokes-ekvationer speciellt framtagna för termiskt drivna flöden med relativt låg hastighet och med tonvikt på brandgas- och värmespridning från bränder. Därtill kan även strålningpåverkan predikteras. Beräkningsmodellen är baserad på fyra differentialekvationer som löses med finita volymmetoden. Metoden innebär att det modellerade utrymmets volym delas upp i ett antal finita volymer samt att den termodynamiska jämvikten löses för varje finit volym. För en stabil modell skall jämvikten gå mot den korrekta lösningen eller den korrekta approximationen med avtagande volymstorlek, något som ställer stora krav på systemresurser och tar avsevärd simuleringstid i anspråk.

Beräkningsdomänen är uppbyggd enligt ett multidomänsystem. Det innebär att ett antal domäner är sammanlänkade med varandra för att skapa en total, gemensam beräkningsdomän. På så sätt kan känsliga delar i en modell modelleras med en finare volymindelning, medan mindre känsliga delar kan få en grövre volymindelning. Nackdelen är introduktion av övergångsfel mellan domänerna, något som totalt sett dock är underordnat behovet av en finare indelning nära branden med tillgänglig datorkapacitet.

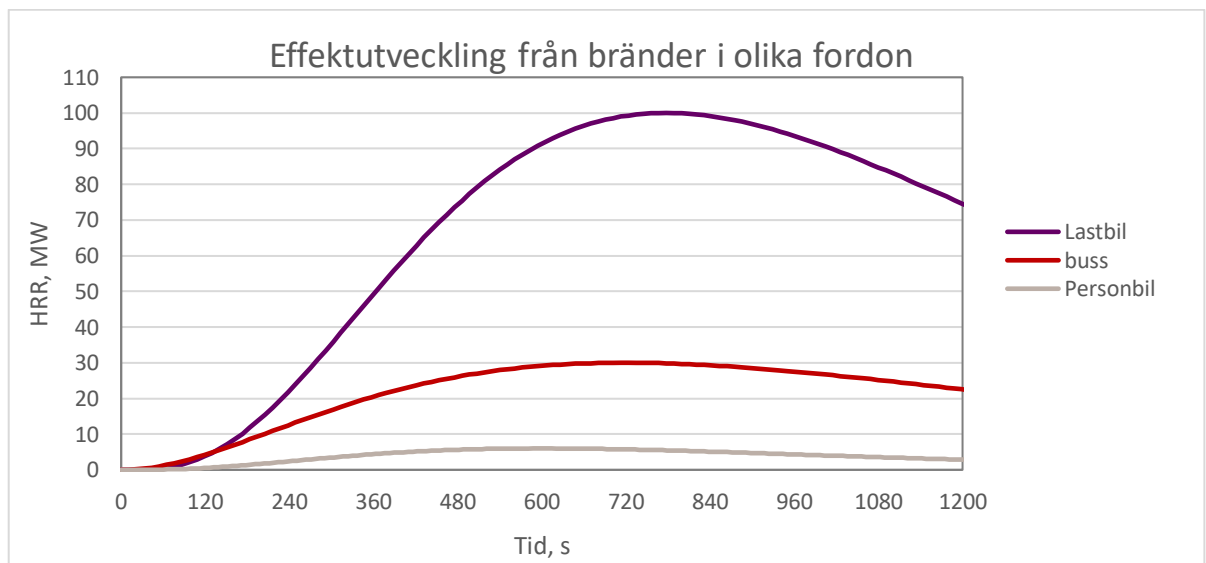
Generellt är de fysikaliska modellerna i FDS förenklade, varför framställda beräkningsresultat och prediktioner bör tolkas med försiktighet, precis som i likhet med alla simulerings- och beräkningsprogram. Det innebär att resultaten bör redovisas och analyseras av en erfaren brandingenjör med kunskap om CFD. Vidare är förenklingar avseende brandens geometri och den omgivande miljön är en förutsättning för att kunna genomföra CFD-analysen.

4.2.1 Dimensionerande bränder

Dimensionerande bränder utgår från att fordon ska betraktas som en möjlig brandkälla, enligt krav K43583 i TRVINFRA. Studerade bränder utgår från de effektutvecklingar som tagits fram i rapporten "Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar (RISE, 2017) och utgör följande:

- Brand i personbil – 6MW
- Brand i buss – 30 MW
- Brand i lastbil (styckegods) – 100MW

Effektutvecklingen från de dimensionerande bränderna presenteras i Figur 9.



Figur 9. Effektutveckling för dimensionerade fordonsbränder (RISE, 2017)

4.2.2 Modellgeometri

Modellen byggs upp med en multiblock-geometri, vilket innebär att volymen delas upp i flera s.k. beräkningsdomäner, som baseras på en sammansättning av celler. Detta medför en begränsning för hur exakt den modellerade geometrin kan motsvara den faktiska geometrin, med hänsyn till cellernas storlek. Den geometri som modelleras utgår från de teoretiska förutsättningarna givet tunnelns lutning, geometri och samt förväntade fordons storlekar. Där förenklingar sker är dessa utförda för att ge en så försumbar effekt på resultaten som möjligt. Modellen och de förenklingar och anpassningar av geometrin som utförts bedöms ge en god bild av ett brandförlopp och brandgasfyllnad av den aktuella tunneln. Modellen delas in i flera beräkningsdomäner med olika cellstorlekar. Beräkningsdomäner som inkluderar det brandutsatta tunnelröret har generellt en finare cellstorlek än det icke brandutsatta tunnelröret.

Figur 10 nedan åskådliggör brandförloppsmodellens översiktliga geometri. Branden utgörs av den röda markeringen. Tunnellutningen har modellerats genom numerisk justering av gravitationen vilket därmed inte syns i den geometriska modellen. Fordon har endast placerats ut i tunnelröret med brand då det inte har någon påverkan på resultatet i motsatt tunnelrör.

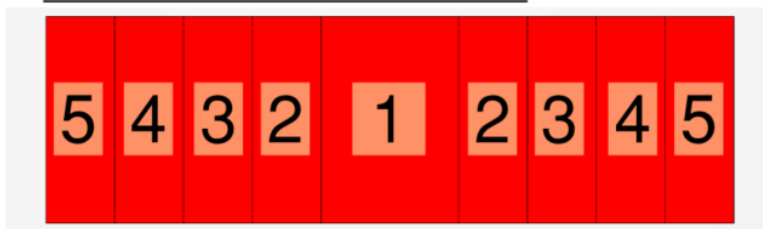


Figur 10. Brandförloppsmodell för samtliga brandscenarier.

4.2.3 Brandens geometri

Brandens totala effektutveckling är i samtliga scenarier uppdelade över ett antal mindre ytor. Detta görs för att på ett bättre sätt uppskatta och kontrollera effektutvecklingen för stora bränder i ett begränsat utrymme. Brandens tillväxthastighet ansätts enligt funktionen RAMP och samtliga ingående ytor kombineras för att tillsammans motsvara respektive dimensionerande brandeffektkurva. Figur 11 nedan åskådliggör brandens geometri för de tre brandstorlekarna. Branden som startar i fordonets mitt växer radiellt utåt enligt de växande numren.

100 MW - brand i lastbil



30 MW - brand i buss



6 MW - brand i bil



Figur 11. Brandförloppsmodell för brandens geometri.

4.2.4 Ventilation

Då Bastunnel 400 utförs utan mekanisk ventilation finns ingen ventilation i tunneln. Brandförloppsmodellen har ansats öppna domängränser utanför respektive tunnelmynning. Då hänsyn ej tas till eventuell yttre vindpåverkan har domängränserna inte ansatts något tryck/hastighet.

4.2.5 Övriga indata

I Tabell 11 redovisas indata för brandförloppsberäkningarna som genomförts i FDS.

Tabell 11. Indata till brandförloppsmodell

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Simuleringsparametrar			
Mjukvara och version	FDS 6.7.9	-	Samma version i alla modeller
Turbulensmodell	FDS standardinställning	-	FDS manual och användarhandbok
Numeriska parametrar	FDS standardinställning	-	FDS manual och användarhandbok
Konvergens	Inte tillämpat	-	Inga särskilda åtgärder vidtagna för att nå konvergens
Omgivningstemperatur	8	°C	Årsmedeldata Stockholm (Stockholms Stad, 2023). Då Bastunnel 400 inte har en geografisk plats valdes årsmedeldata från Stockholm.
Tid då modellen starar	0	s	Ingen tid för att etablera flöden tunneln
Tid då branden börjar tillväxa	0	s	Branden startar vid t=0
Total beräkningstid	1200	s	Total beräkningstid är kortare än varaktigheten för de dimensionerande bränderna. Resultat till och med 20 minuter kommer användas då denna analys studerar utrymning vilken kan antas vara klar inom denna tid.
Brand 1 - Personbil			
Max HRR	6	MW	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017)
Brandkällans area	1,6*3,2	m*m	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02). Anpassad area till modellgrid.
HRRPUA	1172	kW/m ²	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017). Anpassad HRRPUA till area för modellgrid.
Förbränningsvärme	27,5	MJ/kg	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017)
Sotproduktion	0,1	g/g	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
CO-produktion	0,1	kg/kg	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
Gridstorlek			
ΔX	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
ΔY	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
ΔZ	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
Q*	2,0	-	Rekommenderas ligga inom intervallet 0,1-10

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Brand 2 - Buss			
Max HRR	30	MW	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017)
Brandkällans area	2,8*20,8	m*m	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02). Anpassad area till modellgrid.
HRRPUA	515	kW/m ²	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017). Anpassad HRRPUA till area för modellgrid.
Förbränningsvärme	25	MJ/kg	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017)
Sotproduktion	0,1	g/g	Justeras upp till 0,1 g/g (från 0,06 g/g) för att utgöra konservativt antagande.
CO-produktion	0,08	kg/kg	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
Gridstorlek			
ΔX	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
ΔY	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
ΔZ	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
Q*	3,8	-	Rekommenderas ligga inom intervallet 0,1-10
Brand 3 – Lastbil, styckegods			
Max HRR	100	MW	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017)
Brandkällans area	3,2*8	m*m	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02). Anpassad area till modellgrid.
HRRPUA	3906	kW/m ²	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017). Anpassad HRRPUA till area för modellgrid.
Förbränningsvärme	20	MJ/kg	Enligt RISE:s rapport (Ingason, Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar, 2017)
Sotproduktion	0,1	g/g	Justeras upp till 0,1 g/g (från 0,05 g/g) för att utgöra konservativt antagande.
CO-produktion	0,05	kg/kg	Enligt mailkonversation med RISE (Ingason, Mailkonversation , 2018-02-02)
Gridstorlek			
ΔX	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
ΔY	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
ΔZ	0,2 / 0,4	m	0,2 nära branden, 0,4 längre från branden
Q*	6,0	-	Rekommenderas ligga inom intervallet 0,1-10

5 UTRYMNINGSFÖRLOPP

I detta kapitel redovisas hur utrymningen har modellerats.

5.1 SCENARIOBESKRIVNING

Analysen av utrymningsförlopp baseras på de nio brandscenarierna, se Tabell 12 nedan. För vardera av brandscenarierna genomförs utrymningsanalyser där personantalet på bussen varierar. Utöver detta studeras även ett scenario då stängning av infartsbommarna antas felfunkera varpå tunneln fylls upp med så många fordon som får plats bakom branden. Då inga utrymningsanalyser genomförts för brand i personbil (6 MW) samt för scenarier av Tunnellutning C kommer dessa fortsättningsvis exkluderas i detta kapitel. Analyserade utrymningsscenarier sammanfattas översiktligt i Tabell 12.

Tabell 12. Dimensionerande utrymningsscenarier.

Tunnel lutning	Brandstorlek [MW]	Antal på buss [pers]	Totalt personantal [pers]	Model ID	Kommentar
A	30	8	58	TRA-A-01-01-A	Samtliga system fungerar
A	30	15	65	TRA-A-01-01-B	Samtliga system fungerar
A	30	95	145	TRA-A-01-01-C	Samtliga system fungerar
A	30	95 + 95	254	TRA-A-01-01-D	Infartsbommar felfungerar
A	100	8	58	TRA-A-02-01-A	Samtliga system fungerar
A	100	15	65	TRA-A-02-01-B	Samtliga system fungerar
A	100	95	145	TRA-A-02-01-C	Samtliga system fungerar
A	100	95 + 95	254	TRA-A-02-01-D	Infartsbommar felfungerar
B	30	8	58	TRA-B-01-01-A	Samtliga system fungerar
B	30	15	65	TRA-B-01-01-B	Samtliga system fungerar
B	30	95	145	TRA-B-01-01-C	Samtliga system fungerar
B	30	95 + 95	254	TRA-B-01-01-D	Infartsbommar felfungerar
B	100	8	58	TRA-B-02-01-A	Samtliga system fungerar
B	100	15	65	TRA-B-02-01-B	Samtliga system fungerar
B	100	95	145	TRA-B-02-01-C	Samtliga system fungerar
B	100	95 + 95	254	TRA-B-02-01-D	Infartsbommar felfungerar
B	6	n/a	n/a	TRA-B-02-01-x	Inga kritiska förhållanden uppnås
C	30	n/a	n/a	TRA-C-01-01-x	Inga kritiska förhållanden uppnås
C	100	n/a	n/a	TRA-C-02-01-x	Inga kritiska förhållanden uppnås

5.2 UTRYMNINGSFÖRLOPPSMODELL

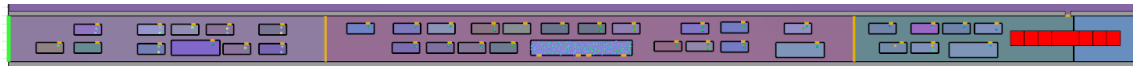
De utrymningsförloppsberäkningar som har genomförts och som presenteras i den här handlingen har utförts med beräkningsmodellen Pathfinder (Thunderhead Engineering, 2019).

5.2.1 Geometri

Pathfindermodellen och dess huvudsakliga geometri presenteras i Figur 12 och Figur 13 nedan. Brandens placering utgörs av röd rektangel.

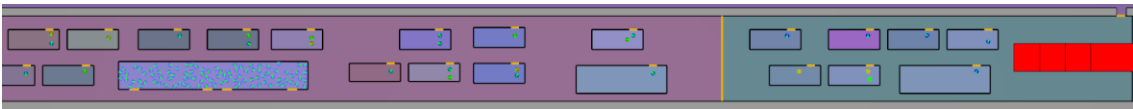


Figur 12. Översikt av utrymningsförloppsmodell för hela Bastunnel 400.

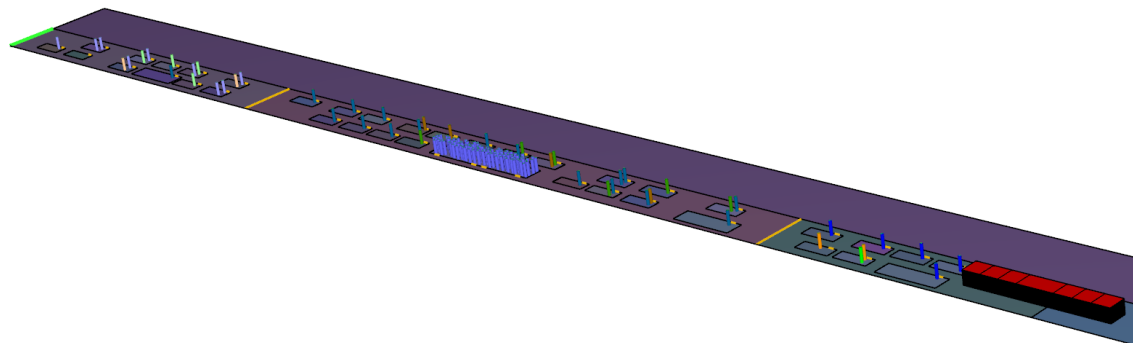


Figur 13. Översikt av utrymningsförloppsmodeller uppströms branden.

Figur 14 och Figur 15 nedan är en förstora bild av modellen som visar fordon och utrymnande i mer detalj. Utrymnande personer utgörs av blå/gröna/orangea prickar som befinner sig i olika typer av fordon i tunneln. Olika storlek på fordonen representerar de olika fordonstyperna.



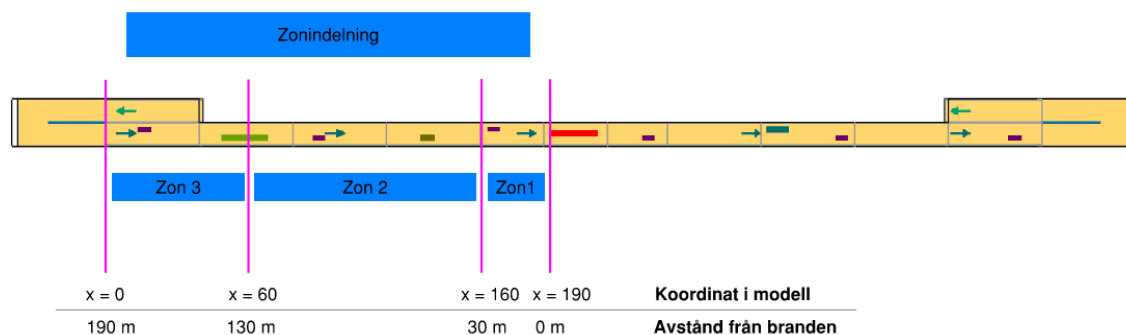
Figur 14. Förstora bild av utrymningsscenario - plan vy.



Figur 15. Förstora bild av utrymningsscenario - 3D-vy.

5.2.2 Zonindelning

Figur 16 nedan redovisar de olika utrymningszonerna med avseende på avstånd från branden. I enlighet med tunnelns utrymningsstrategi sker all utrymning för personer uppströms branden antingen via tvärförbindelsen eller tunnelmynningen (dvs bakåt i tunneln). Då branden antas blockera tvärförbindelsen till icke-branddrabbat tunnelrör, kvarstår endast tunnelmynningen bakom trafikanterna som väg ut ur tunneln. Detta innebär att samtliga trafikanter utrymmer via tunnelmynningen (till vänster i figuren).



Figur 16. Zonindelning för samtliga tunnelutningar.

5.2.3 Varseblivnings- och förberedelse-tid

Varseblivningstiden samt tid till start av utrymning för respektive scenario redovisas i Tabell 13 och Tabell 14 nedan. Tabellerna redogör för indata för respektive persontypsgrupp i respektive utrymningszon. Vid båda tunnelutningarna är varseblivningstiden längre för den större branden. Detta beror av att bussbranden (30 MW) har en brantare tillväxtkurva än lastbilsbranden (100 MW) i sitt initiala skede, se Figur 9.

Tabell 13. Varseblivnings- och förberedelse-tid samt tid till start av utrymning för Tunnelutning A.

Tunnelutning A	Brandstorlek	Person-typs-grupp	Varseblivningstid [s]			Förberedelse-tid [s]	Tid till start av utrymning [s]		
			Zon 1	Zon 2	Zon 3		Zon 1	Zon 2	Zon 3
			30 MW	ÖM	60		125	195	90
Medel	60	125		195	180	240	305	375	
UM	60	125		195	234	294	359	429	
100 MW	ÖM	75	145	210	90	165	235	300	
	Medel	75	145	210	180	255	325	390	
	UM	75	145	210	234	309	379	444	

Tabell 14. Varseblivnings- och förberedelse-tid samt tid till start av utrymning för Tunnelutning B.

Tunnelutning B	Brandstorlek	Person-typs-grupp	Varseblivningstid [s]			Förberedelse-tid [s]	Tid till start av utrymning [s]		
			Zon 1	Zon 2	Zon 3		Zon 1	Zon 2	Zon 3
			30 MW	ÖM	60		115	165	90
Medel	60	115		165	180	240	295	345	
UM	60	115		165	234	294	349	399	
100 MW	ÖM	75	132	180	90	165	222	270	
	Medel	75	132	180	180	255	312	360	
	UM	75	132	180	234	309	366	414	

5.2.4 Personantal

Personantal för samtliga analyser presenteras i Tabell 15.

Tabell 15. Personantal i tunnel uppströms branden.

Benämning	Personantal andra fordon [pers]	Antal på buss [pers]	Totalt antal i tunneln [pers]
TRA-x-xx-01-A	50	8	58
TRA- x-xx -01-B	50	15	65
TRA- x-xx -01-C	50	95	145
TRA- x-xx -01-D	64	95 + 95	254

5.2.5 Övriga indata

Övriga indata till utrymningsförloppsmodellerna redovisas i Tabell 16 nedan.

Tabell 16. Indata för Pathfinder-simuleringar

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
SIMULERINGSPARAMETRAR			
Gånghastighet			
- Över medel (ÖM)	1,3	m/s	<i>Enligt allmänt råd till TRVINFRA</i>
- Medel (M)	1,0	m/s	<i>K43643</i>
- Under medel (UM)	0,8	m/s	
Personflöde genom dörrar på bussen	1,1	p/s	<i>BBRAD 3, 3.2.4, Tabell 3 för kända dörrar</i> <i>Pga trängsel kan dock ett längre flöde uppstå vid utrymningen</i>

6 RESULTAT

I följande kapitel redovisas konsekvensanalysens resultat i form av antal personer som omkommer (dvs personer som inte bedöms kunna utrymma innan kritiska förhållanden uppstår) i händelse av olika brandscenarier.

För mer utförliga resultat av brandförloppet och utrymningsförloppet hänvisas till Appendix A-C.

6.1 SCENARIER

I nedanstående tabeller redovisas resultat för respektive tunnelltutning. Tabellerna redogör för tid till kritiska förhållanden för respektive designkriterium; siktbarhet (Sikt), siktbarhet och temperatur (Sikt + T), FED (FED 0.3, FED 1.0 resp. FED 3.0) samt strålning (S). I rutor där "x" anges överstigs inte gränsvärden för kritisk påverkan för utrymmande. I tabellerna anges även utrymningstiden för sista personen i respektive zon (Utr), hur många personer som inte hinner lämna zonen (D) innan kritiska nivåer uppnås samt totalt antal personer som inte hinner lämna tunneln innan kritiska nivåer uppnås (D tot). I samtliga fall är det siktbarheten som är det gränsvärde som uppnås först.

Resultatet av brand i personbil (6 MW) för Tunnelltutning B visar att kritiska förhållanden ej uppstår i tunneln. Då Tunnelltutning B är att ses som ett mer påfrestande scenario än Tunnelltutning A och Tunnelltutning C kan det antas att kritiska förhållanden ej heller uppstår för dessa tunnelltutningar. Resultat för brand i personbil (6 MW) för Tunnelltutning A och Tunnelltutning C redovisas således ej.

Då resultaten av brandscenarierna för Tunnelltutning C visar på att brandgaserna endast sprider sig framåt i tunneln (förutom i taknivå inom zon 1) har inga utrymningsanalyser gjorts för denna tunnelltutning.

6.1.1 Tunnellutning A

Tabell 17 redovisar tid till kritiska nivåer, utrymningstid samt antalet som utsätts för kritiska förhållanden vid Tunnellutning A. Resultaten visar att personer utsätts för kritiska förhållanden vid 100 MW-branden. Tider som anges "600 +" innebär att kritiska förhållanden uppnås efter 600 s. Då effektutvecklingen ej följer den teoretiska kurvan efter denna tidpunkt anges inte dessa tider mer specifikt, se avsnitt 6.2.1 för diskussion om detta. Utrymningstiden är oberoende av det totala antalet personer i tunneln, eftersom köbildning inte uppstår vid utrymningsvägar (tunnelmyning). Det är snarare tid till start av utrymning samt gånghastigheten för de utrymmande inom persontypgrupp "under medel (UM)" som har störst påverkan på utrymningstiden. På grund av längre tid till start av utrymning samt långsammare förflyttningstid utgör personer i denna persontypgrupp dimensionerande värden avseende utrymningstiden och antal omkomna. Detta innebär bl a att samtliga personer i bussen/bussarna (som är ansatt tid till start av utrymning enligt "medel (M)") hinner utrymma före de i persontypgrupp "under medel (UM)", oberoende av personantalet på bussen/bussarna.

Tabell 17. Resultat Tunnellutning A.

Model ID	Brandstorlek	Antal på buss [pers]	Zon 1								Zon 2								Zon 3								D tot
			Utr	Sikt	Sikt + T	FED 0.3	FED 1.0	FED 3.0	S	D	Utr	Sikt	Sikt + T	FED 0.3	FED 1.0	FED 3.0	S	D	Utr	Sikt	Sikt + T	FED 0.3	FED 1.0	FED 3.0	S	D	
TRA-A-01-01-A	30 MW	8	314	614	x T < 80	x	x	x	x	0	460	470	x T < 80	910	x	x	x	0	534	750	x T < 80	910	x	x	x	0	0
TRA-A-01-01-B	30 MW	15	314	614	x T < 80	x	x	x	x	0	460	470	x T < 80	910	x	x	x	0	534	750	x T < 80	910	x	x	x	0	0
TRA-A-01-01-C	30 MW	95	314	614	x T < 80	x	x	x	x	0	460	470	x T < 80	910	x	x	x	0	534	750	x T < 80	910	x	x	x	0	0
TRA-A-01-01-D	30 MW	95 + 95	314	614	x T < 80	x	x	x	x	0	460	470	x T < 80	910	x	x	x	0	534	750	x T < 80	910	x	x	x	0	0
TRA-A-02-01-A	100 MW	8	330	600 +	600 +/ 534	600 +	600 +	x	355	0	450+	450	422 / 600 +	600 +	600 +	x	600 +	3	523	554	x T < 80	600 +	x	x	x	0	3
TRA-A-02-01-B	100 MW	15	330	600 +	600 +/ 534	600 +	600 +	x	355	0	450+	450	422 / 600 +	600 +	600 +	x	600 +	3	523	554	x T < 80	600 +	x	x	x	0	3
TRA-A-02-01-C	100 MW	95	330	600 +	600 +/ 534	600 +	600 +	x	355	0	450+	450	422 / 600 +	600 +	600 +	x	600 +	3	523	554	x T < 80	600 +	x	x	x	0	3
TRA-A-02-01-D	100 MW	95 + 95	330	600 +	600 +/ 534	600 +	600 +	x	355	0	450+	450	422 / 600 +	600 +	600 +	x	600 +	3	523	554	x T < 80	600 +	x	x	x	0	3

6.1.2 Tunnellutning B

Tabell 18 redovisar tid till kritiska nivåer, utrymningstid samt antalet som utsätts för kritiska förhållanden vid tunnellutning B. Resultaten visar att personer utsätts för kritiska förhållanden både vid 30 MW-branden samt 100 MW-branden. Vid 100 MW-branden utsätts merparten av personerna i tunneln för kritiska förhållanden. För scenarierna när tunnelns infartsbommar fungerar är det 11 personer som kan utrymma vilket utgörs av personer ur persontypgrupp "över medel (ÖM)" samt "medel (M)" som befinner sig när tunnelns mynning. I scenario då tunnelns infartsbommar felfungerar kan 13 personer utrymma. Fler personer hinner utrymma i detta scenario då de även är fler personer i tunneln, varpå vissa (slumpmässigt) har placerats närmare tunnelmynning varpå de har möjlighet att utrymma innan kritiska förhållanden uppstår.

Tabell 18. Resultat Tunnellutning B.

Model ID	Brandstorlek	Antal på buss [pers]	Zon 1								Zon 2								Zon 3								D tot
			Utr	Sikt	Sikt + T	FED 0.3	FED 1.0	FED 3.0	S	D	Utr	Sikt	Sikt + T	FED 0.3	FED 1.0	FED 3.0	S	D	Utr	Sikt	Sikt + T	FED 0.3	FED 1.0	FED 3.0	S	D	
TRA-B-01-01-A	30 MW	8	314	x	x T < 80	x	x	x	x	0	394+	410	x T < 80	x	x	x	x	5	394+	394	x T < 80	x	x	x	x	15	20
TRA-B-01-01-B	30 MW	15	314	x	x T < 80	x	x	x	x	0	394+	410	x T < 80	x	x	x	x	5	394+	394	x T < 80	x	x	x	x	18	23
TRA-B-01-01-C	30 MW	95	314	x	x T < 80	x	x	x	x	0	394+	410	x T < 80	x	x	x	x	22	394+	394	x T < 80	x	x	x	x	74	96
TRA-B-01-01-D	30 MW	95 + 95	314	x	x T < 80	x	x	x	x	0	394+	410	x T < 80	x	x	x	x	45	394+	394	x T < 80	x	x	x	x	134	179
TRA-B-02-01-A	100 MW	8	310 +	446	446 / 468	550	580	710	330	2	310+	310	356 / 464	642	x	x	560	33	310 +	310	276 / 464	616	x	x	x	12	47
TRA-B-02-01-B	100 MW	15	310 +	446	446 / 468	550	580	710	330	2	310+	310	356 / 464	642	x	x	560	40	310 +	310	276 / 464	616	x	x	x	12	54
TRA-B-02-01-C	100 MW	95	310 +	446	446 / 468	550	580	710	330	2	310+	310	356 / 464	642	x	x	560	120	310 +	310	276 / 464	616	x	x	x	12	134
TRA-B-02-01-D	100 MW	95 + 95	310 +	446	446 / 468	550	580	710	330	2	310+	310	356 / 464	642	x	x	560	223	310 +	310	276 / 464	616	x	x	x	12	241

6.2 DISKUSSION AV RESULTAT

Då denna analys främst utförs för att utgöra indata till riskanalysen förs ingen diskussion avseende andra aspekter, såsom brandgasspridning förutom i den omfattning det påverkar de utrymmande eller vidare påverkan av felfungerade system eller liknande. CFD beräkningarna utförs på systemnivå och ska inte ses som verifiering av hela tunnels säkerhetskoncept. Utförd analys är applicerbar för de förutsättningar som presenteras i denna konsekvensanalys. Vid ändrade förutsättningar behöver utförd analys uppdateras.

Resultaten visar att tunnels lutning har stor inverkan på tid till kritiska förhållanden och därmed utrymningsmöjligheterna. Antal passagerare på bussen/bussarna har också stor inverkan på resultatet. Detta diskuteras närmare nedan.

Resultat av brandförloppsmodellen för brand i personbil (6 MW) för Tunnellutning B visar på att kritiska förhållanden ej uppstår i tunneln. Då detta utgör den mest ofördelaktiga lutningen kan det antas att kritiska förhållanden ej heller uppstår för Tunnellutning A/C. Med anledning av detta genomfördes inga utrymningsanalyser för dessa tunnellutningar för brandstorleken 6 MW.

Resultaten visar även att totalt personantal har stor påverkan på utfallet av antal som utsätts för kritiska förhållanden, särskilt vid Tunnellutning B. I vissa fall, då utrymningen knappt hinner starta innan kritiska förhållanden uppstår vid mynningen, omkommer merparten av trafikanterna i tunneln. Detta innebär även att antal personer på bussen har stor inverkan på resultatet. Att totala personantalet har stor påverkan på utfallet innebär även att total mängd fordon i tunneln påverkar utfallet.

Även bussens placering har stor påverkan på utfallet. Exempelvis kan det antas att flera personer kunnat utrymma innan kritiska förhållanden om bussen placerats i zon 3, dvs närmare tunnelmynningen. Det utgör ett konservativt antagande att placera bussen i zon 2, då detta generellt är den sämsta zonen när både resultat från brandförloppsmodell och utrymningsförloppsmodell beaktas. I zon 1 är varseblivningstiden kortast, varpå utrymning generellt sker snabbare från denna zon (även för en fullsatt buss).

Bussens placering i tunneln i brandförloppsmodellen har också påverkan på resultatet. Detta då en buss är högre än exempelvis bilar, vilket gör att den påverkar brandgasernas rörelse längs tunneltaket i större utsträckning. När brandgaserna når ner till bussens höjd uppstår mer turbulens då karossen påverkar brandgasernas framfart, då den fria tunnelarean tillfälligt blir mindre. Detta fenomen sker tidigare för buss och tung lastbil än exempelvis bilar. Den ökade turbulensen av brandgaser leder till att kritiska förhållanden avseende exempelvis siktbarhet uppstår tidigare.

6.2.1 Tunnellutning A

Resultaten för Tunnellutning A visar att personer endast utsätts för kritiska förhållanden vid brand i lastbil (100 MW). Samtliga personer som utsätts för kritiska förhållanden befinner sig i zon 2 och tillhör persontypgrupp "Under medel (UM)", vilka har en längre förberedelse- samt förflyttningstid. Detta innebär att de både startar sin utrymning senare samt går långsammare.

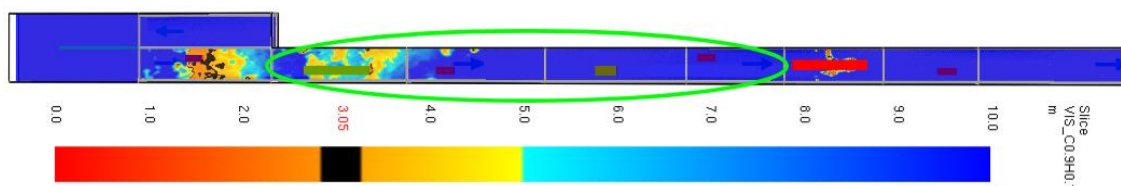
Brandförloppsmodellen visar att 100 MW-branden inte följer den teoretiska kurvan och därmed inte når 100 MW. Kvalitetskontrollen av branden visar hur effektutvecklingskurvan viker av från den teoretiska kurvan vid ca 600 s och 84 MW. Detta antas bero av att branden blir underventilerad. Då avvikelserna sker efter att utrymningen är avslutad och därmed inte har någon inverkan på resultatet av denna konsekvensanalys, behandlas detta inte vidare i denna rapport. Fullständiga resultat av effektutvecklingen och den teoretiska kurvan presenteras i Appendix A-C.

6.2.2 Tunnellutning B

Resultaten för Tunnellutning B visar att personer utsätts för kritiska förhållanden både vid brand i buss (30 MW) och vid brand i lastbil (100 MW). Kritiska förhållanden uppstår inte vid brand i personbil (6 MW).

För scenarierna med 30 MW-branden hinner alla trafikanter påbörja sin utrymning, men når inte hela vägen till mynningen (säker plats) innan kritiska förhållanden uppstår. Detta avser trafikanter från samtliga persontypgrupper. För scenarierna med 100 MW-branden hinner utrymning knappt starta innan kritiska förhållanden uppstår uppströms i tunneln. Därav är det endast enstaka personer som hinner utrymma.

Då Tunnellutning B har en nedåtgående lutning i trafikriktningen för aktuellt tunnelrör sprider sig merparten av brandgaserna snabbt uppåt i tunneln (och därmed bakåt). Att de varma brandgaserna stiger bidrar till att brandgasspridning sker bakåt i tunneln och försvårar utrymningsmöjligheterna för trafikanter uppströms branden. Då de varma brandgaserna närmar sig den bakre tunnelmynningen sker en inblandning av kallare luft varpå brandgaserna tappar stigningskraft och sjunker nedåt golvnivån i tunneln. Detta medför att kritiska nivåer av siktbarhet uppnås relativt tidigt i utrymningsskedet längre bak i tunneln. Kritiska förhållanden uppstår därför tidigare i zon 3 än i zon 1/zon 2, förutom i brandens absoluta närhet. Detta medför att merparten av de utrymmande blir "instängda" mellan branden och de kritiska förhållandena i zon 3, se Figur 17 för åskådliggörande. Den gröna ringen representerar område med godtagbar exponering. Framför branden (dvs nedåt i tunneln) sker endast en begränsad brandgasspridning och inga kritiska förhållanden uppnås. För denna tunnellutning hade exempelvis tätare placering av, dvs flera, tvärförbindelser till parallellt tunnelrör medfört att fler personer kunnat utrymma.



Figur 17. Åskådliggörande av hur kritiska förhållanden uppstår längst bak i tunneln (till vänster i bild), varpå trafikanter blir "instängda" mellan de kritiska förhållandena samt branden. Grön ring representerar yta där kritiska förhållanden ej uppstår. Det ska noteras att hela tunnelns längd inte visas i ovanstående figur, utan att denna är klippt och därmed inte visar hela tunnelns längd nedströms branden.

Utifrån genomförd analys av Tunnellutning B kan det antas att tätare placering av utrymningsvägar, dvs fler tvärförbindelser till parallellt tunnelrör, medför att fler personer kan utrymma. I vilken omfattning de ytterligare utrymningsvägarna behöver adderas är dock ej studerat i denna rapport. Det bedöms att en lämplig utgångspunkt kan vara att undersöka huruvida säker utrymning kan ske om denna tunnellutning har två alternativt tre tvärförbindelser.

6.2.3 Tunnellutning C

FDS-resultat av Tunnellutning C visar hur brandgaserna främst sprider sig nedströms (dvs framåt) i tunneln varpå kritiska förhållanden ej uppstår uppströms branden. Fordon nedströms branden bedöms hinna köra ut ur tunneln innan de blir påverkade av brandgaserna. Med anledning av detta genomfördes inga utrymningsanalyser för denna tunnellutning. Antal omkomna antogs således vara noll personer för samtliga fall.

6.2.4 Scenariovariation: Felfungerande infartsbommar

Scenarierna med felfungerade infartsbommar har ca 110 personer fler i tunneln, än scenarierna med fungerade infartsbommar och fullsatt buss. Dessa utgörs av en extra buss med 95 personer samt ytterligare 14 personer i andra typer av fordon. För Tunnellutning A har detta extra personantal ingen påverkan på resultatet. Samma applicering bedöms kunna göras för Tunnellutning C. För Tunnellutning B där kritiska nivåer uppnås snabbare än de andra tunnellutningarna medför ett större antal personer också ett större antal omkomna. Stora delar av de tillkommande personerna pga felfungerande infartsbommar omkommer, dock inte alla. Beroende på de tillkommande personernas placering av tunneln så kan vissa utrymma innan kritiska förhållanden uppstår.

7 KÄNSLIGHETSANALYS OCH OSÄKERHETER

Kvantitativa analyser innehåller många osäkerhetsfaktorer. Osäkerheter har analyserats och hanterats enligt dokumenterade rekommendationer (Holmstedt, 2008). I den kvantitativa analysen används beräkningsprogram som innehåller ett flertal modeller. Modellerna skall beskriva verkligheten i erforderlig utsträckning. De modeller som används i denna rapport har valts mot bakgrund av dagens kunskapsläge och bedöms vara de i dagsläget bäst lämpade för att utföra en kvantitativ brandanalys. Modellerna bedöms kunna ge en bra bild av hur ett verkligt förlopp ter sig. Det bör dock poängteras att varje modell i sig själv förknippas med ett antal begränsningar och antaganden.

Det ska även poängteras att denna konsekvensanalys utförs för att utgöra indata till en riskanalys. Syftet är därmed att uppskatta hur många personer som inte bedöms kunna utrymma innan kritiska förhållanden uppstår i händelse av olika brand- och utrymningsförlopp. Analysen ska därmed inte ses som en heltäckande brand- och utrymningsanalys för tunneln.

Känslighetsanalys har utförts för de parametrar som bedömts mest relevanta mot bakgrund av syftet med analysen. Generellt bedöms det att analysen av de olika scenarierna ger en representativ uppskattning av antalet som inte kan utrymma innan kritiska förhållanden uppstår.

Flera parametervärden har valts konservativt, vilket bör leda till att analysens resultat och de slutsatser som dras inte leder till överskattning av resultatet.

7.1 OSÄKERHETER AVSEENDE BRANDFÖRLOPP

I detta avsnitt diskuteras osäkerheter avseende brandförloppet.

7.1.1 Scenarier

Känsligheten för brandens placering och effektutveckling har beaktats genom att flera dimensionerande bränder har studerats. Då tunneln har en homogen geometri bedöms det representativt, med avseendet på syftet av denna konsekvensanalys, att placera branden i mitten av tunneln. Denna brandplacering bedöms ge en översiktlig bild av brandgasspridning i tunneln. Då flera tunnellutningar studeras bedöms det även att effekter av sådana har fångats in.

7.1.2 Modellgeometri

Förenklingar av tunnelns och fordonens geometri har applicerats i brandförloppsmodellen. Detta då beräkningsprogrammet har en begränsad möjlighet att representera en allt för detaljerad geometri, där vikten bör läggas på att korrekt modellera den geometrin som påverkar flöden. Mindre detaljer som inte har någon påverkan på flöden och brandgasspridningen kan därmed förenklas..

Intilliggande tunneller har endast inkluderats vid mynningarna för att studera ev brandgassmitta mellan tunneller. Utrymningsportalen i mitten av tunnel har ej inkluderats i brandförloppsmodellen då denna inte bedöms ge sådan påverkan på brandspridningen i tunneln att detta skulle påverka utfallet i konsekvensanalysen. Eventuell brandgasspridning till intilliggande tunneller via utrymningsportalen har därmed inte heller studerats. Denna förenkling bedöms vara acceptabel då syftet med genomförda analyser är att utgöra indata till riskanalysen, och ej vara en renodlad studie av tunnelns förutsättningar för brandgasfyllnad och utrymning.

7.1.3 Dimensionerande bränder

Indata avseende effektutveckling av de dimensionerande bränderna kommer från en rapport framtagen av RISE som studerar och beräknar just brandeffektkurvor för olika fordon. Sammansättningen av bränderna är också framtagna av RISE. Detta bedöms vara en tillförlitlig källa avseende dimensionerande bränder.

7.1.4 Ventilation och yttre vindförhållanden

Ingen mekanisk ventilation finns i modellen då Bastunnel 400 utförs utan sådan.

Yttre vindförhållanden har inte heller inkluderats i modellen. Detta då dessa beror av dominerande vindriktning samt vindhastighet, vilka är platsberoende. Då Bastunnel 400 är en teoretisk tunnel fanns inte sådan data att tillgå. En uppskattning av vindriktning och hastighet bedöms förenat med stora osäkerheter varför detta inte tillämpades.

Förenkling bedöms även acceptabel då syftet med genomförda analyser är att utgöra indata till riskanalysen, och ej vara en renodlad studie av tunnelns förutsättningar för brandgasfyllnad och utrymning.

7.1.5 Bedömning av brandförloppsmodellernas tillförlitlighet

För att bedöma trovärdigheten, rimligheten och säkerställa att FDS-beräkningarna har utförts med rimlig cellstorlek har bland annat följande aspekter beaktas:

- Cellstorlekarna i området kring branden bör ha tillräcklig upplösning för att ge representativa förhållanden avseende t ex flamtemperatur
- Lösningen skall vara oberoende av storleken på cellerna (grid-oberoende lösning).

Den första punkten har bedömts utifrån de flamtemperaturer som erhållits vid simuleringen samt visuellt i Smokeview. Vid simuleringen erhöles flamtemperaturer på mellan 700-1200°C, vilket överensstämmer med verkliga värden.

Att lösningen skall vara oberoende av cellstorleken är viktigt för att simuleringen ska ge korrekta och rimliga resultat. Brandens karakteristiska diameter (D^*) i förhållande till kontrollvolymernas storlek (dx) rekommenderas enligt Föreningen för brandteknisk ingenjörsvetenskap (BIV) att ligga i intervallet 10-20 nära branden (BIV, 2013). Om förhållandet (D^*/dx) ligger utanför rekommenderat intervall, riskerar t.ex. plymns drivkraft och brandgasfyllnaden att över/underskattas. BIV:s rekommendationer är dock anpassade för beräkningar i byggnader och BIV har inga ytterligare rekommendationer för beräkningar i tunnelmiljöer. Rapporten "Kvalitetsmanual för brandteknisk analys vid svenska kärntekniska anläggningar" (Frantzich & Nystedt, 2011) anger att kvoten av D^*/dx bör ligga mellan 10-20, men att även kvoter på 5-10 ger tillfredställande resultat.

Kvoterna för respektive brandstorlek uppgår till följande:

- Brand i personbil (6MW): kvot = 10
- Brand i buss (30 MW): kvot = 19
- Brand i lastbil (100MW): kvot = 30

Kvoterna av D^*/dx för brand i personbil (6 MW) och brand i buss (30 MW) ligger därmed inom det, av BIV, rekommenderande intervallet. Då kvoten för brand i lastbil (100 MW) överstiger intervallet innebär detta att en större grid hade kunnat användas, vilket bland annat hade kunnat minska simuleringstiden (minskat krävd datakapacitet). Att en för fin grid används bedöms dock inte ha påverkat resultatet av denna brandförloppsmodell, varpå ingen vidare känslighetsanalys görs avseende detta.

7.2 OSÄKERHETER AVSEENDE UTRYMNINGSFÖRLOPP

I detta avsnitt diskuteras osäkerheter avseende utrymningsförloppet.

7.2.1 Scenarier

Då Bastunnel 400 har en homogen geometri samt endast en tvärförbindelse i mitten av tunneln (som antas bli blockerad av branden) bedöms det rimligt att endast studera de utrymningsscenarier som gjorts. Detta innebär att samma brand- och fordonplacering använts i samtliga scenarier, men med ett varierat personantal. Det bedöms därmed att en sammantagen bild av utrymningsmöjligheterna från tunneln har beaktats, åtminstone till den detaljnivå som bedöms nödvändig för att kunna utgöra underlag till indata till riskanalysen.

7.2.2 Modellgeometri

Bastunnel 400 har en simpel geometri, vilket åskådliggörs i utrymningsförloppsmodellen.

Icke-brandutsatt tunnelrör är inte inkluderat i utrymningsförloppsmodellen. Detta då tvärförbindelsen är blockerad (pga närhet till branden), vilket medför att inga personer tar sig till det andra tunnelröret.

Hela tunneln är utförd utan lutning. Detta innebär en förenkling i samtliga fall för Tunnellutning B, då de 200 m uppströms branden har en höjdskillnad på 6 m. Höjdskillnaden medför att tunneln lutar svagt uppåt för de utrymmande, vilket skulle medföra en långsammare gånghastighet för de utrymmande. Ansatt gånghastighet enligt TRVINFRA K43643 är dock långsammare än gånghastighet enligt allmänt råd i BBRAD (Boverket, 2013). Krav K43643 baseras på BBRADs föregångare "Utrymningsdimensionering Boverket 2006". BBRAD anger hastigheten 1,0 för personer med nedsatt rörelseförmåga (motsvarande "under medel (UM)" i denna analys) och 1,5 m/s för övriga. Aktuell analys har hastighet 1,3 m/s för "över medel (ÖM)", 1,0 m/s för "medel (M)" och 0,8 m/s för "under medel (UM)", varför ansatta hastigheter kan anses konservativa för det horisontella planet. Dessa hastigheter kan därmed ses som representativa för viss lutning. Resultaten för Tunnellutning A (ingen lutning) visar att merparten av trafikanterna kan utrymma trots ansatta gånghastigheter enligt TRVINFRA. Resultaten för Tunnellutning B bedöms representativa då ansatta gånghastigheter kan liknas med förflyttning i viss lutning. Det ska även tilläggas att resultaten för Tunnellutning B till största del beror av den korta tiden till att kritiska förhållanden uppstår, ej trafikanternas gånghastighet.

Sammantaget bedöms inte genomförda förenklingar påverka utrymningen med avseende på den detaljnivå som studeras i denna analys.

7.2.3 Persontypgrupper

Det finns många osäkerheter med att försöka uppskatta trafikanters förmåga att utrymma från en tunnel. Att fördela trafikanterna i persontypgrupper anses därför vara ett representativt sätt att uppskatta denna förmåga. Andelarna som applicerades i aktuell utrymningsanalys var 23% "över medel (ÖM)", 64% "medel (M)" och 13% "under medel (UM)", där fördelningen till persontypgrupperna främst baserat på statistik för andelen "under medel (UM)". Det kan antas att fördelningen varierar under olika tider på dygnet baserat på förväntat trafik. Exempelvis kan det antas att äldre personer som är i behov av hjälpmedel generellt reser mindre under vanlig rusningstrafik. På samma sätt kan det finnas andra tidpunkter då fördelning kan antas se ut på andra sätt. Det bedöms därför vara ett rimligt antagande att utgå från en generell fördelning i tunneln.

Olika persontyper kan befinna sig i samma fordon i utförda beräkningar, dvs att en bil med två personer kan utgöras av en ur persontypgrupp "under medel (UM)" och en "medel (M)" samt att bussen innehåller passagerare av alla persontypgrupper. I ett verkligt utrymningsscenario bedöms det osannolikt att exempelvis en person ur persontypgruppen "medel (M)" lämnar bilen utan sin medpassagerare. På samma sätt bedöms det osannolikt i ett verkligt scenario att personer på bussen ur persontypgrupp "över medel (ÖM)" inte uppmanar resterande trafikanter på bussen att de borde utrymma. Med anledning av detta ansattes alla passagerare på bussen som "medel (M)" med avseende på dess förberedelsetid, dvs att de tar lika lång tid på sig att påbörja sin utrymning efter att de blivit varse om att brand har uppstått. Även busschauffören antas bidra till en relativt gemensam start på utrymningen från bussen. Med avseende på förflyttningshastighet ansattes de dock som olika persontypsgrupper enligt angiven fördelning.

Det tar ca en minut för passagerare på den fullsatta bussen (95 pers) att kliva av. Då trängsel sker inom bussen samt utanför bussen sker avstigningen med ett långsammare flöde än vad som är ansatt för respektive dörr. Vid färre personer på bussen erhålls effektivare flöden.

Detta utgör därmed en förenkling i utförda utrymningsförloppsanalyser. Förenkling bedöms acceptabel då syftet med genomförda analyser är att utgöra indata till riskanalysen, och ej vara en renodlad studie av tunnelns förutsättningar för utrymning.

7.2.4 Varseblivnings- och förberedelsetid

Varseblivningstiden i utförda analyser är baserad på brandgasspridningen i tunneln och därmed den ansatta zonindelningen. Framtagandet av varseblivningstid för persontypgrupp "medel (M)" är baserat på brandgasspridning i brandförloppsmodellerna. Respektive utrymningszon bedöms bli varse om branden då siktbarheten i minst hälften av zonen understiger 10 meter i tunneltaket. Vid valda tidpunkter för respektive zon kan det därmed antas att en tydlig brandgasspridning sker längs tunnelns tak. Detta bedöms vara ett representativt tillvägagångsätt att ta fram varseblivningstiden. Då tunneln saknar utrymningslarm, såsom informationsskyltar och/eller blyxtljus, är det endast brandgasspridningen samt utrymningen av andra trafikanter som kommer upplysa personerna i tunneln om att något skett.

Förberedelsetiden för samtliga utrymningsscenarioer har ansatts till 180 s (3 minuter) för persontypgrupp "medel (M)". Detta bedöms vara representativt då varseblivningen endast är baserad på att personer ser brandgaser sprida sig i tunneln, då det inte finns något utrymningslarm som bekräftar att brand uppstått och uppmanar trafikanter att utrymma. Trafikanterna måste därmed sedan självmant lämna sina fordon och påbörja sin utrymning. Den långa förberedelsetiden inkluderar även antagandet att personer tenderar att inte vilja lämna sina fordon. Detta dels då många tror att det är säkrare att sitta kvar i bilen, dels då många helt enkelt inte vill lämna sin bil bakom sig. Dessa tendenser uppstår inte vid utrymning av exempelvis byggnader.

Utifrån ansatta förberedelsetiden på 180 s för persontypgruppen "medel (M)" beräknades sedan värden för persontypgrupperna "över medel (ÖM)" och "under medel (UM)" fram med hjälp av faktorer. Bedömningen av faktorerna mellan persontypgrupperna baseras endast på två andra projekt, vilket kan anses vara ett skralt underlag. De båda projekten hade dock åtminstone snarlika förhållanden mellan persontypgrupperna, vilka även bedöms ligga inom ett rimligt intervall.

7.2.5 Personantal

Personantalet är baserat på årsdygnstrafik (ÅDT) om 15 000 personer för ett tunnelrör. Detta utgör indata baserat på tunnelklass för Bastunnel 400 enligt TRVINFRA 0233. Dessa personer är sedan jämnt fördelade över dygnets minuter, då ingen annan fördelning fanns att tillgå eftersom Bastunnel 400 utgör en teoretisk tunnel.

I scenarier då infartsbommarna felfungerar har personantalet i tunneln baserats på hur många bilar som får plats bakom branden.

Scenarierna är generellt av konservativ karaktär då de utgår från en tunnel med relativt många fordon bakom branden, då dessa inte haft möjligheten att köra ut ur tunneln. I samtliga fall har det även antagits att en buss finns placerad bakom branden.

7.2.6 Val av gränsvärden för kritiska förhållanden

Val av gränsvärden för kritiska förhållanden utgår från angivna värden i rapporten "Kriterier och gränsvärden vid utrymning av vägtunnlar", som är förankrad med Transportstyrelsen. Det bedöms därmed att angivna värden är representativa för den analys som görs.

8 SLUTSATS

Resultaten visar att variation i tunnellutningen har störst inverkan på resultatet.

Brandförloppsmodellerna visar på att brandgaserna sprider sig både uppströms och nedströms vid Tunnellutning A (ingen lutning), medan de mestadels rör sig uppströms (dvs bakåt) vid Tunnellutning B (nedåtgående lutning) samt mestadels nedströms (dvs framåt) vid Tunnellutning C (uppåtgående lutning).

I Tunnellutning A kan merparten av trafikanterna utrymma. Undantaget är tre personer ur persontypgrupp "under medel (UM)" vid brand i lastbil (100 MW). För denna tunnellutning påverkar inte personantalet i tunneln antalet omkomna.

I Tunnellutning B medför brandgaser vid tunnelmynningen uppströms att flertalet utrymmande personer "stängs in" mellan dessa och branden, varpå de inte kan utrymma innan de utsätts för kritiska förhållanden. Dessa fenomen inträffar både vid brand i buss (30 MW) samt vid brand i lastbil (100 MW). Antalet omkomna vid respektive brandstorlek kan tydligt korreleras med antaget personantal i tunneln. Vid brand i personbil (6 MW) kan dock samtliga personer utrymma då kritiska förhållanden ej uppstår.

I Tunnellutning C sker ingen brandgasspridning uppströms som orsakar kritiska nivåer. För denna tunnellutning påverkar således inte personantalet i tunneln antalet omkomna.

9 REFERENSER

- Bilson, M. o. (2014). *Determining Benefits of Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels – A Risk-Based Approach*. Marseille, Frankrike: ISTSS.
- BIV. (2013). *BIV:s tillämpningsdokument 2/2013 - Utgåva 1 - CFD-beräkningar med FDS*. Malmö: Föreningen för brandteknisk ingenjörsvetenskap (BIV).
- Boverket. (2013). *Boverkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BBRAD*.
- EU-SILC. (den 28 09 2022). *Functional and activity limitations statistics*. Hämtat från Eurostat Statistics explained: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Functional_and_activity_limitations_statistics#Self-reported_long-standing_limitations_due_to_health_problems
- Folkhälsomyndigheten. (den 28 09 2022). *Funktionsnedsättning (självrporterat) efter ålder, kön och år. Andel (procent)*. Hämtat från Folkhälsomyndigheten: http://fohm-app.folkhalsomyndigheten.se/Folkhalsodata/pxweb/sv/A_Folkhalsodata/A_Folkhalsodat a__B_HLV__bFyshals__bbcFyshalsfunkned/hlv1funkaald.px/table/tableViewLayout1/
- Frantzych, H., & Nystedt, F. (2011). *Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*. Lund: Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet.
- Holmstedt, G. (2008). *Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader*. Lund: LTH.
- IFEG. (2005). *International Fire Engineering Guidelines*. Australian Building Codes Board (ABCB).
- Ingason, H. (2017). *Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar*.
- Ingason, H. (2018-02-02). Mailkonversation .
- McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., Floyd, J., & Vanella, M. (2019). *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*. Washington: National Institute of Standards and Technology (NIST).
- MFD. (den 27 09 2022). *Statistik om personer med funktionsnedsättning*. Hämtat från Myndigheten för delaktighet: <https://www.mfd.se/resultat-och-uppfoljning/statistik-om-personer-med-funktionsnedsattning/>
- Nilsson, D., & Johansson, A. (2009). Social influence during the initial phase of a fire evacuation-Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre. *Fire Safety Journal*, 44(1), 71-79.
- NIST. (u.d.). *Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV)*. Hämtat från NIST: <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- RISE. (2017). *Beräkning brandeffektkurvor för personbilar, bussar och lastbilar*. Borås: RISE Research Institute of Sweden AB.
- Statistics New Zealand. (2001). *Disability Survey: 2001*. Statistics New Zealand Taturanga Aotearoa.
- Stockholms Stad. (2023). *Årsmedeltemperatur*. Stockholm: Stockholm Stad.

- Thunderhead Engineering. (2019). *Technical Reference: Pathfinder 2019*. Manhattan: Thunderhead Engineering.
- Trafikanalys. (2022). *Fordon 2021*. Trafikanalys & Sveriges Officiella Statistik (SOS).
- Trafikverket. (2021). *TRVINFRA-00233 - Krav tunnelbyggande. Version 1.0*. Trafikverket.
- Transportstyrelsen. (2022). *Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i vägtunnlar m.m; (konsoliderad elektronisk utgåva)*. Transportstyrelsens författningssamling.
- Well-Connected Alliance. (2013). *Egress Design Report*. Auckland: Waterview Connection Project.
- WSP. (2022). *Risikanalytisk metod & Basstandard*. Stockholm: WSP.
- WSP. (2023). *Kriterier och gränsvärden vid utrymning av vägtunnlar*. Stockholm: WSP.

APPENDIX A - C

Se separat dokument.

VI ÄR WSP

WSP är en av världens ledande rådgivare och konsultbolag inom samhällsutveckling. Med cirka 48 700 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. Så tar vi ansvar för framtiden.

wsp.com

WSP Sverige AB

121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7

T: +46 10 7225000
Org nr: 556057-4880
wsp.com

