

Upphöjda gångvägar i järnvägstunnlar

En samhällsekonomisk analys av upphöjda utrymningsgångvägar

Emma Dahlstrand

Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety
Lund University, Sweden

Brandteknik och Riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Report 5430, Lund 2014

Upphöjda gångvägar i järnvägstunnlar

En samhällsekonomisk analys av upphöjda utrymningsgångvägar

Emma Dahlstrand

Lund 2014

Titel: Upphöjda gångvägar i järnvägstunnlar – En samhällsekonomisk analys av upphöjda utrymningsgångvägar

Title: Elevated escape pathways in railway tunnels – The socioeconomic benefits with elevated escape pathways are analyzed

Emma Dahlstrand

Report 5430

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB—5430--SE

Number of pages: 80

Illustrations: Emma Dahlstrand

Keywords: Railway tunnel, escape, escape pathways, platform

Sökord: Järnvägstunnel, utrymning, gångväg, plattform

Abstract

This study was performed to investigate whether elevated escape pathways in railway tunnels are a cost-effective measure from a socioeconomic perspective. Only future construction of single track drilled tunnels, designated for evacuation without external help, was considered in this report. Literature studies, interviews, and scenario analyses were used to perform a cost-benefit evaluation. The study shows that if a passenger train is forced to stop inside a tunnel because of a fire, elevated escape pathways increase the possibilities for a safe evacuation from the train. Furthermore, it is evident from the results that elevated escape pathways are beneficial from a cost perspective.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2014.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

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

Telefon: 046 - 222 73 60
Telefax: 046 - 222 46 12

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

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

Telephone: +46 46 222 73 60
Fax: +46 46 222 46 12

Summary

Fires in railway tunnels are rare, but the consequences can be very serious. The possibilities for rescuing people from outside the tunnel are most often extremely limited. Therefore, it is important that both the trains and the tunnels are designed to have good possibilities for self-evacuation. This report analyzes the socioeconomic benefits of having elevated escape pathways instead of escape pathways at ground level. The reduced vertical movement during evacuation is expected to result in a faster evacuation process, thereby facilitating self-evacuation.

Only future construction of *single track drilled tunnels, designated for evacuation without external help*, is considered in this report.

Literature studies, interviews, and scenario analyses were used in the present study to perform a cost-benefit evaluation.

This study has resulted in the following conclusions and recommendations.

- If the train is forced to stop inside a tunnel because of a fire, elevated escape pathways increase the possibilities for a safe evacuation from the train. The main reasons for this are:
 - A challenging vertical movement is avoided.
 - The evacuation flow rate through the train doors increases, which contributes to a faster evacuation process.
 - Well-defined escape pathways make the passengers feel more secure during the evacuation. This is expected to cause a slight increase in walk speed.
 - Elevated escape pathways can reduce the occurrence of bottlenecks along the pathways.
 - All passengers are given the opportunity to evacuate without external help.
- According to the analyses that were performed, elevated escape pathways are beneficial from a financial perspective.
 - The total building costs of newly constructed railway tunnels with elevated escape pathways are shown to be lower than the costs of tunnels with escape pathways at track level.
- Elevated escape pathways are shown to be beneficial both from a financial perspective and from a safety increasing perspective. This means that the socioeconomic benefit of elevated escape pathways are close to infinite. This leads to the following recommendations:
 - Elevated escape pathways should be part of all new tunnel constructions.
 - Escape pathways should be built on both sides of the track if the tunnel is designated for passenger trains.
 - The recommended height of these platforms is 71-74 cm. This is in accordance with one of the standard platform heights that exist in Sweden today.

In the scenario analysis, it was assumed that 240 people will try to escape from a train that is stuck in a tunnel, with a 15 MW fire situated in one of the front carriages. Eight scenarios were studied and for each scenario two calculations were carried out: one with elevated escape pathways and one with escape pathways at ground level. The results show that all passengers will be able to reach a safe location in all eight scenarios if elevated escape pathways are in place. In case of escape pathways at ground level, four scenarios lead to eight unconscious passengers, while the other four scenarios result in death for eight of the passengers.

In order to assess the trustworthiness and accuracy of the results, it is important to know something about their uncertainties. In this report, the evaluations of probabilities and costs are based on limited statistical data and assumptions. These assumptions were made on the basis of consultations with experts. The statistical data carry uncertainties in assumed parameters like wind conditions, temperature in the tunnel, the train model, passenger profile and fire.

Further studies are suggested in which cost evaluations are also performed for exploded tunnels and multi-track tunnels. The possibilities to build elevated escape pathways in existing tunnels should also be investigated. On top of that, it is recommended that further analyses should be carried out to evaluate other appropriate safety measures which can be used when a fire larger than 15 MW is assumed.

Sammanfattning

Brand i järnvägstunnlar är ovanliga, men när en brand inträffar kan konsekvenserna bli mycket omfattande. Möjligheten till räddningsinsatser utifrån är oftast ytterst begränsad. Därför är det viktigt att både tåg och tunnlar dimensioneras för optimala möjligheter till självutrymning. I denna rapport analyseras den samhällsekonomiska nyttan med att bygga upphöjda utrymningsgångvägar istället för att placera gångvägarna i rälsnivå. En byggnation av upphöjda utrymningsgångvägar reducerar den vertikala förflyttningen vid avstigning från tåg till gångväg. En minskad vertikal förflyttning förväntas resultera i ett snabbare utrymningsförlopp och således underlätta självutrymning.

Rapporten behandlar enbart *nybyggnation av enkelspåriga borrade järnvägstunnlar som dimensioneras för självutrymning*.

Rapportmetoden baseras på litteraturstudier, intervjuer, grovanalys, scenarioanalyser, kostnadsuppskattningar samt bedömning av kostnad-nytta.

Rapporten har resulterat i följande slutsatser och rekommendationer.

- Om ett tåg tvingats stanna inne i en järnvägstunnel till följd av en brand, så ökar upphöjda gångvägar möjligheten till en säker utrymning. Detta främst på grund av följande faktorer:
 - En krävande vertikal förflyttning undviks.
 - Utrymningsflödet genom tågens dörröppningar ökar vilket bidrar till ett snabbare utrymningsförlopp.
 - Väldefinierade gångvägar ökar passagerarnas trygghetskänsla vid förflyttning längs med utrymningsgångvägen och således bör även gånghastigheten öka något.
 - Risken för uppkomst av flaskhalsar längs med gångvägen minskar.
 - Samtliga passagerare ges möjlighet till självutrymning på grund av att en krävande vertikal förflyttning undviks.
- Enligt utförda analyser är en säkerhetshöjande åtgärd i form av upphöjda gångvägar en lönsam åtgärd ur ett kostnadsperspektiv.
 - De totala kostnaderna för nybyggnation av järnvägstunnlar är lägre då gångvägarna höjs upp än då gångvägarna placeras i rälsnivå. Upphöjda gångvägar kan resultera i ett minskat tunneltvärnsnitt och kostnadsbesparingarna för ett minskat tunnelsnitt har visat sig vara betydligt större än kostnaderna för att höja upp gångvägen.
- Upphöjda utrymningsgångvägar har visat sig vara en lönsam åtgärd både ur ett kostnadsperspektiv och ur ett säkerhetshöjande perspektiv. Det innebär att den samhällsekonomiska nyttan med upphöjning av utrymningsgångvägarna är närmast att betrakta som oändlig. Följande rekommendationer bör således tillämpas:
 - Upphöjda gångvägar bör byggas vid samtliga nybyggnationer.
 - Tunnlar som är planerade för persontåg bör förses med gångvägar på båda sidorna av rälsen.
 - Rekommenderad höjd på gångvägarna är 71-74 cm. Detta är i enlighet med en av de standardplattformshöjder, hög, som är mest utpräglade i Sverige idag.

I scenarioanalysen ansätts att 240 passagerare ska utrymma ett tåg som stannat inne i en tunnel, detta till följd av en 15 MW brand som är placerad i en av vagnarna. Åtta scenarier studerades och för varje scenario utfördes två beräkningar: en med upphöjda gångvägar och en med gångvägar i rälsnivå. Resultatet visar att samtliga passagerare lyckas ta sig till en säker plats i de åtta scenarier där utrymning sker via upphöjda gångvägar. Om gångvägarna däremot är placerade i rälsnivå så leder fyra scenarier till åtta medvetlösa passagerare och fyra scenarier till att åtta passagerare omkommer.

I scenarioanalysen studerades även fyra scenarier med en större ansatt brand på 20 MW. Resultatet från dessa scenarier visar att ytterligare säkerhetshöjande åtgärder, utöver en upphöjning av utrymningsgångvägarna, krävs för att en säker självutrymning ska kunna ske.

Exempel på kunskapsosäkerheter i rapporten är bedömning av sannolikheter och kostnader, som i allt väsentligt bygger på en begränsad statistik och uppskattningar i samspråk med experter. Exempel på stokastiska osäkerheter är variationer i ansatta parametrar som exempelvis vindförhållanden, temperatur i tunneln, tågmodell, passagerarprofiler och brandutveckling.

Vidare studier föreslås där kostnadsuppskattningar även genomförs för sprängda järnvägstunnlar, för flerspåriga tunnlar samt för möjligheterna att bygga upphöjda utrymningsgångvägar även i befintliga järnvägstunnlar. Utöver detta, rekommenderas att vidare analyser genomförs för att utvärdera andra lämpliga säkerhetsåtgärder som kan tillämpas när större bränder än 15 MW ansätts.

Förord

Detta examensarbete är en del i kursen Examensarbete – Riskhantering (VBR920) som ges vid avdelningen för Brandteknik och Riskhantering vid Lunds Tekniska Högskola, LTH. Kursen omfattar 30 högskolepoäng och redovisas i form av en skriftlig rapport samt vid ett offentligt redovisningstillfälle.

Jag vill rikta ett stort tack till alla er som varit behjälpliga i arbetet med detta examensarbete.

- Personal på Trafikverket och Skanska Vinci – *Som bidragit med underlag, stöd och data*
- Personal på Trafikverkets utställning om Hallandsåstunneln – *Som bidragit med material, kontakter och inspiration*
- Tyréns brand, risk och säkerhetsavdelning – *Som bidragit med studieplats, utrustning, trivsel under arbetets gång samt tips och råd*
- Karl Fridolf, doktorand vid avdelningen för Brandteknik på LTH – *Som bidragit med material och data*
- Daniel Nilsson, universitetslektor vid avdelningen för Brandteknik på LTH – *I egenskap av examinator*

Sist men inte minst vill jag rikta ett stort tack till min handledare Håkan Frantzich, universitetslektor vid avdelningen för Brandteknik på Lunds Tekniska Högskola, för vägledning under hela projektet.

Emma Dahlstrand

Lund 2014

Innehåll

1. Inledning	1
1.1. Bakgrund.....	1
1.2. Frågeställningar	1
1.3. Syfte.....	2
1.4. Mål.....	2
1.5. Avgränsningar.....	2
1.6. Metod.....	3
2. Utformning av järnvägstunnlar	6
2.1. Systemet järnvägstunnel	6
2.2. Krav och råd.....	7
2.3. Plattformar	9
2.4. Byggmetod.....	12
3. Samhällsekonomiska värderingsmetoder	14
3.1. Värdering av människoliv	14
3.2. Metod för beslutsfattande.....	15
3.3. Riskhanteringskultur och strategi.....	16
3.4. Acceptanskriterier och ambitionsnivåer	16
4. Utrymningssäkerhet vid brand i järnvägstunnel	19
4.1. Brand	19
4.1.1. Brandorsak	19
4.1.2. Brandutveckling och brandgasspridning.....	19
4.1.3. Beräkningar av brandförlopp	22
4.2. Utrymning.....	23
4.2.1. Utrymningstid	23
4.2.2. Beräkning av utrymningsförlopp.....	27
4.3. Utrymningsmiljö och tid till kritiska förhållanden	27
5. Analysens uppbyggnad	29
5.1. Grovanalys.....	29
5.2. Scenarioanalys	30
5.3. Kostnadsuppskattningar	31
5.4. Bedömning av kostnad-nytta.....	31
5.5. Hantering av osäkerheter.....	31
6. Grovanalys	32
6.1. Riskidentifiering.....	32

6.2.	Sannolikhetsbedömning.....	32
6.3.	Konsekvensuppskattning.....	33
6.4.	Riskmatris.....	34
7.	Scenarioanalys.....	36
7.1.	Val av scenarier.....	36
7.1.1.	Konstanta indata.....	36
7.1.2.	Varierande indata.....	40
7.1.3.	Sammanfattning av valda scenarier.....	43
7.2.	Beräkning av utrymningsförlopp.....	44
7.3.	Beräkning av brandförlopp.....	45
7.4.	Utrymningsförhållanden vid brand.....	45
7.5.	Resultat.....	47
8.	Kostnadsuppskattningar.....	50
8.1.	Kostnad.....	50
8.2.	Kostnadsbesparing.....	51
9.	Bedömning av kostnad-nytta.....	53
10.	Diskussion.....	54
10.1.	Osäkerhetshantering.....	54
10.2.	Säkerhetshöjande effekter.....	55
10.3.	Behov av ytterligare säkerhetsåtgärder.....	56
10.4.	Åtgärden har en hög lönsamhet ur ett kostnad-nytta perspektiv.....	56
10.5.	Applicerbarhet på andra tunnelutformningar.....	56
10.6.	Fortsatta studier inom området.....	57
11.	Slutsatser och rekommendationer.....	58
12.	Referenser.....	59
	Appendix 1. Material- och byggnadskostnader per meter tunnel.....	62
	Appendix 2. Sammanfattning av olycksfrekvenser.....	65
	Appendix 3. Gångvägarnas utformning och placering.....	66
	Appendix 4. Utrymningsberäkningar.....	69
	Appendix 5. Matlab beräkningar.....	70
	Appendix 6. Brandberäkningar.....	76
	Appendix 7. Dos för medvetlöshet.....	79
	Appendix 8. Möjlighet till självutrymning vid funktionsnedsättning.....	80
	Appendix 9. Exempel på fallstudie.....	81

1. Inledning

1.1. Bakgrund

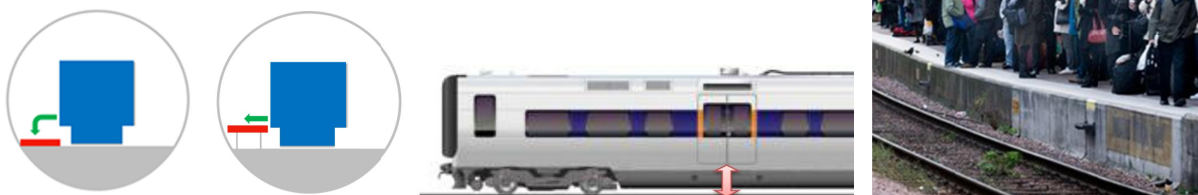
Den spårbundna trafiken drabbas inte av så många olyckor men när en olycka väl inträffar kan konsekvenserna bli mycket omfattande. Brand i järnvägstunnlar kan leda till förödande konsekvenser där räddningsinsatsens möjligheter i många fall är mycket begränsad. Komplexiteten vid räddningsinsatser i järnvägstunnlar grundar sig främst på att insatsen kan behöva bedrivas långt inne i en tunnel där tågets placering, brandens placering, brandutveckling samt antal passagerare i många fall kan vara helt okänd. Inte sällan kan hundratals passagerare transporteras i ett och samma tåg vilket innebär att antalet dödsfall kan bli väldigt högt i händelse av brand. Exempel på bränder i järnvägstunnlar som har resulterat i förödande konsekvenser under de senaste åren är bland annat branden i Bakus tunnelbana år 1995 där 298 människor omkom och 265 skadades, branden i Kitzsteinhorntunneln i Österrike år 2000 där 155 människor omkom samt branden i Daegus tunnelbana i Sydkorea år 2003 där 189 människor omkom och 142 skadades (Carvel & Marlair, 2005).

På grund av den komplexitet som råder vid räddningsinsatser i järnvägstunnlar är det ytterst viktigt att både tåg och tunnlar dimensioneras med goda möjligheter för självutrymning. Självutrymning innebär att samtliga passagerare på egen hand ska kunna förflytta sig till en säker plats innan de utsätts för kritiska förhållanden, dvs utan yttre assistans från räddningstjänst eller dylikt. Enligt Trafikverket, tidigare Banverket, ska samtliga järnvägstunnlar dimensioneras efter självutrymningsprincipen (Paulsson, 2007).

God belysning, väldefinierade utrymningsgångvägar, handräcken, en gångbredd som tillåter ett högt personflöde, minskad avstigningshöjd mellan tåg och utrymningsgångväg, tydligt markerade utrymningsvägar samt god information är några typexempel på säkerhetsåtgärder som kan underlätta vid en självutrymning från tåg som befinner sig inne i järnvägstunnlar.

1.2. Frågeställningar

I detta examensarbete kommer en säkerhetshöjande åtgärd som kan underlätta vid självutrymning från tåg som befinner sig inne i tunnlar att studeras närmre. Den säkerhetsåtgärd som studeras närmre är en upphöjning av den utrymningsgångväg som finns placerad längs med rälsen inne i järnvägstunnlar. En upphöjning av denna gångväg minskar eller helt reducerar höjdskillnaden mellan tågets dörröppning och således underlättar den vertikala förflyttningen. Höjdskillnaden mellan tåg och gångväg illustreras i Figur 1 nedan.



Figur 1. Bilderna ovan illustrerar hur den vertikala höjdskillnaden minskas eller helt reduceras vid avstigning till upphöjda gångvägar. De två figurerna till vänster inte är helt skalenliga.

En reducerad vertikal förflyttning förväntas främst underlätta förflyttningen från tåg till gångväg för rullstolsburna personer, personer med funktionsnedsättning samt skadade personer, men även personer med god fysik kan uppleva stora problem vid en kraftig vertikal förflyttning. En reducerad vertikal förflyttning bör resultera i ett snabbare utrymningsförlopp där en större andel av passagerarna ges bättre möjligheter till självutrymning.

I detta examensarbete kommer följande frågeställningar att försöka besvaras:

- *Vilken säkerhetshöjande effekt ger en upphöjning av utrymningsgångvägarna?*
- *Är investeringen i säkerhetsåtgärden samhällsekonomiskt lönsam?*

Om det visar sig att den säkerhetshöjande åtgärden ger en positiv effekt på säkerheten och är samhällsekonomiskt lönsam så ska även följande frågeställning besvaras:

- *Hur bör den upphöjda utrymningsgångvägen utformas med avseende på höjd, bredd och placering?*

1.3. Syfte

Syftet med examensarbetet är att ta reda på hur en säkerhetsåtgärd i form upphöjda utrymningsgångvägar påverkar säkerheten vid ett utrymningsförlopp från en borrarad enkelspårig järnvägstunnel som är dimensionerad för självutrymning. Syftet med examensarbetet är även att ur ett kostnadsperspektiv bedöma huruvida en sådan säkerhetsåtgärd är samhällsekonomiskt lönsam eller inte samt identifiera den mest kostnadseffektiva lösningen på utrymningsgångvägens utformning.

1.4. Mål

Målet med examensarbetet är att med hjälp av litteraturstudie, intervjuer och analyser kunna ge tydliga rekommendationer på vilken utformning på utrymningsgångvägarna som är mest samhällsekonomiskt lönsam vid nybyggnation av enkelspåriga borrarade järnvägstunnlar som dimensioneras efter självutrymningsprincipen. Rekommendationerna ska följa befintliga lagar och krav.

1.5. Avgränsningar

För att värdera nyttan av den säkerhetshöjande åtgärden beaktas endast nyttan av antal räddade liv. Antal räddade liv avgränsas i denna rapport grovt till att innefatta de individer som till följd av den säkerhetshöjande åtgärden klarar av att utföra en säker utrymning i enlighet med självutrymningsprincipen. Analysen bortser alltså från skador på människor, egendomsskador, förseningar, etcetera.

För att bedöma hur kostnadseffektiv den säkerhetshöjande åtgärden är måste kostnaderna för den säkerhetshöjande åtgärden uppskattas. Dessa kostnader kan innehålla väldigt många delkostnader men fokus i denna rapport läggs på att värdera de grövre kostnader som råder vid en nybyggnation av järnvägstunnlar så som material- och byggnationskostnader. Detta innebär att vissa kostnader, som exempelvis kostnader för underhåll, försummas.

Rapporten avgränsar sig till att enbart behandla borrarade enkelspåriga järnvägstunnlar. Anledningen till denna avgränsning är att de olika byggstilarna, borrhning och sprängning, innebär stora variationer vid beräkning av material- och byggnationskostnader samt att de olika byggstilarna resulterar i olika formationer på tunneltvärsnittet. Vid borrhning av tunnlar så bildas

ett helt runt tvärsnitt till skillnad mot de tunnlar som sprängs, tvärsnittet vid sprängning kan utformas mer anpassat till tågens profiler och nödvändiga installationer i tunneln. Likaså har antalet spår som läggs i en järnvägstunnel stor påverkan på de totala material- och byggnationskostnaderna, olika antal spår leder till olika tunneltvärsnitt samt olika behov av antal utrymningsgångvägar.

Kostnadsuppskattningar för den säkerhetshöjandeåtgärden utförs på borrhade järnvägstunnlar vars väggar kläs in i betongfundament. Det vill säga inte i miljöer med berg och liknande där det är mer vanligt att använda sig av sprängning som metod.

Tunneln som behandlas i denna rapport avgränsas även till att vara rak och utan lutning. Att tunneln ansätts vara rak innebär att kostnadsberäkningarna i denna rapport ej måste ta i beaktande att det krävs olika tunneltvärsnitt i kurvor gentemot raksträckor. Detta anses inte påverka kostnadsjämförelserna då enbart raka tunnlar jämförs mot raka tunnlar. Att tunneln inte ansätts lutar innebär att det inte kommer att ske så stora luftflöden i tunneln vilket kan påverka de brandberäkningar som ska genomföras. Därför borde en kvalitativ bedömning göras på huruvida en lutning i tunneln kan påverka resultatet.

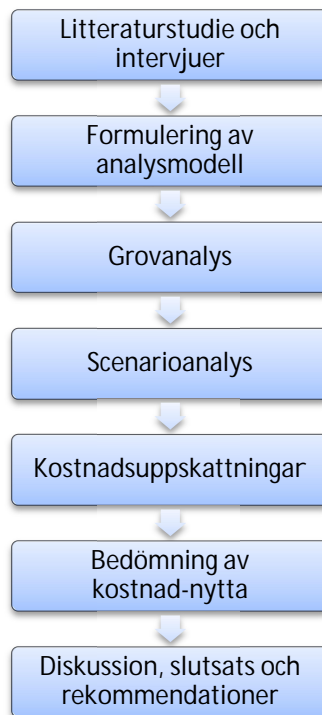
För att spegla dagens och framtidens behov vid nybyggnation av järnvägstunnlar studeras relativt moderna tåg i denna rapport. Nyare tåg ska bland annat uppfylla vissa specifika brandkrav och trenderna för nyare tåg går mot ett större antal dörrar och en smidigar på och avstigning från tåg till perrong.

Enbart säkerhetshöjande åtgärder med avseende på utrymningsgångvägar behandlas i denna rapport. Kortare diskussioner kring till exempel belysning, räcken, material, skyltar, information, etcetera går att finna i rapporten, men inga förslag på åtgärder ges ur dessa perspektiv.

1.6. Metod

Rapporten syftar till att verifiera effekterna av en säkerhetshöjande åtgärd i form av upphöjda utrymningsgångvägar. För att verifiera dessa effekter kommer hälften av scenarierna att analysera självutrymning via gångvägar placerade längs med rälsnivå och hälften av scenarierna att analysera självutrymning via upphöjda gångvägar.

Med hjälp av följande punkter beskrivs övergripande den metod som ska mynna ut i konkreta rekommendationer på om en byggnation av upphöjda utrymningsgångvägar är samhällsekonomiskt lönsam eller inte. Figur 2 visar ett flödesschema för metoden.



Figur 2. Flödesschema för tillämpad metod.

Litteraturstudier och intervjuer

Litteraturstudier och intervjuer genomförs i ett första skede för att bygga upp en mer generell kunskapsbank inom området järnvägstunnlar. Relevant kunskap kring tunnlar utformning och dess olika byggnadsdelar så som utrymningsgångvägar, nödutgångar, tvärtunnlar, plattformar, byggmetoder, byggkostnader, tunneldimensioner, etcetera studeras.

I informationssökandet ingår även att kartlägga information om redan utförd forskning samt att studera tidigare olyckor, aktuella lagar och krav, mänskligt beteende vid brand, olika tågmodeller och passagerarprofiler, relevanta beräkningsmodeller för brand- och utrymningsberäkningar, etcetera.

Formulering av analysmodell

Målet med analysdelen är att besvara de frågeställningar som angivits i avsnitt 1.2. Analysen grundar sig på en grovanalys, en scenarioanalys, kostnadsuppskattningar samt en bedömning av kostnad-nytta.

Grovanalys

En grovanalys med riskidentifiering, sannolikhetsbedömning och konsekvensbedömning genomförs med hjälp av både kvalitativa och kvantitativa bedömningar. Resultatet från grovanalysen redovisas i form av en riskmatris och med utgångspunkt från detta resultat beslutas om ett antal olycksscenarioer som ska behandlas vidare i en mer utförlig analys i form av en scenarioanalys.

Scenarioanalys

Vid hälften av de scenarier som behandlas i scenarioanalysen ska utrymning ske via gångvägar placerade i rälsnivå och vid hälften av de scenarier som behandlas i scenarioanalysen ska utrymning ske via upphöjda gångvägar. Detta görs för att ta reda på hur många personer som

utsätts för kritiska förhållanden i de olycksscenarierna som valts ut i grovanalysen beroende på om utrymning sker via rälsnivå eller via upphöjda gångvägar.

Scenarioanalysen grundar sig på utrymnings- och brandberäkningar som grundar sig på data från tidigare genomförda försök samt på olika beräkningsmodeller. Vid beräkning av tid till kritiska förhållanden för de utrymmande passagerarna är det viktigt att beakta att brandförhållandena varierar med avseende på var i tunneln individen befinner sig och vid vilken tidpunkt.

Kostnadsuppskattningar

Kostnadsuppskattningar utförs på de olika tunnelutformningar som ansätts i respektive scenario. Detta görs för att kunna jämföra de totala investeringskostnaderna för nybyggnation av järnvägstunnlar där gångvägarna är upphöjda gentemot en nybyggnation där gångvägarna är placerade i marknivå. Kostnadsuppskattningar grundar sig främst på litteraturstudier och samspråk med experter.

Bedömning av kostnad-nytta

För att ta reda på om den säkerhetshöjande åtgärden är samhällsekonomiskt lönsam eller inte jämförs nyttan av åtgärden mot kostnaderna för åtgärden. Nyttan ansätts vara antalet räddade liv till följd av säkerhetsåtgärden och kostnaden ansätts vara de extra kostnader som en upphöjning av utrymningsgångvägarna för med sig vid nybyggnation av järnvägstunnlar.

Diskussion, slutsats och rekommendationer

Slutsatser och rekommendationer görs baserat på att resultaten från genomförd analys med mål att besvara frågeställningen i avsnitt 1.2. Resultatet diskuteras med avseende på osäkerheter i antaganden, kostnadsuppskattningar, beräkningsmodeller, etcetera och vidare studier inom området föreslås.

2. Utformning av järnvägstunnlar

2.1. Systemet järnvägstunnel

Nedan följer en beskrivning över systemet järnvägstunnel. Trafiksystemet delas upp i sex delar: tunnel, bana, utrymningsväg, tåg, trafik samt yttre assistans.

Tunnel

Tunnelns utformning kan både påverka utrymningsmöjligheterna samt byggnations- och materialkostnaderna. Faktorer i tunnelns utformning som kan påverka utrymningsmöjligheterna är bland annat tunnelns längd, tunnelns tvärsnitt, tunnelns lutning samt vilken tunneltyp det rör sig om, så som enkelspårs- eller dubbelspårstunnel (Paulsson, 2007).

Bana

Banans utformning kan påverka bedömningen av risker. Beroende på spårets utformning, spårets placering, växlar, närheten till stations- och bangårdsområden, etcetera kan bland annat risker för kollision och urspårning variera (Paulsson, 2007).

Banverkets föreskrift BVF 586.20 anger de krav som gäller på fritt utrymme utmed banan.

Utrymningsväg

Längs med rälsen inne i järnvägstunnlar finns en eller flera utrymningsgångvägar placerade. Dessa utrymningsgångvägar kan antingen vara placerade längs med rälsnivå eller på en upphöjd plattform. Utrymningsgångvägarnas främsta syfte är att möjliggöra en förflyttning längs med spåret till en utrymningsväg eller nödutgång. I en järnvägstunnel kan utrymningsvägarna antingen utgöras av tvärtunnlar som sammanbinder två oberoende tunnlar, horisontella eller vertikala utrymningsvägar eller tunnelmynningarna. När en passagerare tagit sig igenom passagen till en utrymningsväg anses passageraren tagit sig till en säker plats.

Tåg

En järnvägstunnel kan trafikeras av olika tågtyper med olika egenskaper så som personbelastning och möjlighet till avstigning. Exempel på trafik som kan trafikera en tunnel är bland annat persontåg, sovvagnståg och godståg.

Faktorer i tågets utformning som kan variera med olika typer av tåg är bland annat tågets längd, tågets bredd, antal vagnar, antal dörröppningar, dörröppningarnas bredd, det vertikala avståndet från tågets dörröppningar ner till rälsnivå, passagerarmängden och passageraregenskaperna. Även tågets konstruktion och material kan variera, bland annat på grund av när de är byggda, modernare tåg har till exempel högre brandkrav.

De modernare persontågen är främst motortåg med öppna planlösningar vilket innebär att passagerarna kan förflytta sig fritt genom hela tåget. De modernare tågagnarna måste även uppfylla vissa specifika brandkrav. Många av de modernare vagnarna är även försedda med låggolvskonstruktioner för att underlätta på- och avstigning för bland annat personer med funktionsnedsättning och är välanpassade till dagens perronghöjder. De modernare tågen tenderar att ha något bredare dörröppningar än de äldre tågen och tendenser tyder även på att antalet dörröppningar successivt kommer att öka. Det finns dock inget tydligt mönster på var och hur tätt de modernare tågen väljer att placera sina dörrar. Ett exempel på ett modernare

persontåg är tågtypen Contessa, även är känd vid namn Öresundståg, som är tillverkad av Bombardier (Tellerup & Tellerup, 2014). Om man jämför tågtypen Contessa med till exempel modell X2, snabba motorvagnståg som började tillverkas 1990 och som idag körs under namnet X2000, kan man konstatera att avståndet från dörröppningarna ner till marknivå skiljer sig betydande (Tellerup & Tellerup, 2014). Höjdskillnaden mellan dörröppningarna till räls är betydligt större för tågmodell X2 än för tågtypen Contessa, tågmodellen X2 kompenserar dock denna höjdskillnad genom att vara försedda med ett antal trappsteg för att nå ner till perrongnivå.

Trafik

En järnvägstunnel kan trafikeras av olika typer av tåg så som till exempelvis godståg med eller utan farligt gods, persontåg och sovvagnar. Trafikmängd och vilken typ av tåg som färdas i en tunnel kan variera kraftigt mellan olika järnvägstunnlar. En vanlig enhet att mäta tågtrafik i tunnlar med är antal tågakilometer, tågkm, och antalet tågakilometer kan till exempel anges per dygn eller per år. Om två identiska tunnlar har olika trafikbelastningar så kommer den tunnel som har högst trafikbelastning att ha fler olyckor per tidsenhet än den tunnel som har en mindre trafikbelastning (Paulsson, 2007).

Yttre assistans

Vid en olycksituation kan passagerare och tågpersonal behöva yttre assistans. En sådan yttre assistans kan bestå av räddningstjänstens resurser och personal som kan bidra med insatsstyrka och utrustning (Paulsson, 2007). Även Trafikverket och tågoperatörer kan bidra med yttre assistans främst i form av tunnelbeskrivningar (Paulsson, 2007).

2.2. Krav och råd

Nedan följer ett antal krav och råd som ska eller bör tillämpas vid projektering av järnvägstunnlar.

Tekniska specifikationer får driftkompatibilitet, TSD

European Association for Railway Interability är en europeisk organisation som har fått i uppdrag av EU-kommissionen att fastställa tekniska specifikationer för driftkompatibilitet för höghastighetståg i det transeuropeiska järnvägssystemet. Organisationen har utarbetat ett antal dokument som benämns TSI, Technical specifications for interoperability, som har tagits fram för att möjliggöra och underlätta tågövergångar mellan EU:s olika medlemsländer genom att införa vissa detaljerade minimikrav (Defosse & Martos, 2012). De krav som ställs i TSI är bindande för samtliga EU:s medlemsländer och därmed också för Sverige. I Sverige benämns dessa dokument som TSD, Tekniska specifikationer för driftkompatibilitet (Transportstyrelsen, 2012).

Det TSD dokument som behandlar personsäkerheten i järnvägstunnlar kallas SRT, Safety in railway tunnels (The Commission of the European Communities, 2008). I detta dokument ställs tekniska krav på utformning, dimensionering och säkerhet av järnvägstunnlar i det transeuropeiska järnvägsnätet, TEN. De krav som ställs i TSD SRT berör främst järnvägstunnlar som är mellan 1 och 20 km långa och inkluderar inte tunnelbana eller spårvagn.

Enligt kraven i TSD ska utrymningsgångvägar byggas på åtminstone ena sidan av spåret i enkelspåriga järnvägstunnlar och utrymningsgångvägens lägsta nivå får inte ligga under

rälsunderkant. Ledstänger ska sättas upp cirka 1 meter ovanför utrymningsgångvägarna och placeras utanför gångvägens minimibredd. Därtill ska gångvägarnas ytor vara gångvänliga.

En utrymningsväg som leder till en säker plats kan antingen vara en horisontell eller vertikal nödutgång, en tvärtunnel som leder till en angränsande oberoende tunnel eller en tunneldmyning som leder direkt till det fria. För tunnelar som överstiger 1 kilometer ska avståndet mellan vertikala eller horisontella nödutgångar vara maximalt 1000 meter. Byggs två parallella järnvägstunnelar ska tvärtunnelar byggas som sammanbinder de båda tunnelarna och avståndet mellan tvärtunnelarna ska vara maximalt 500 meter.

TRVK Tunnel 11

De krav som ställs i TSD SRT är som tidigare nämnt bindande för samtliga EU:s medlemsländer och därmed också för Sverige. Dock finns det möjlighet för enskilda länder att komplettera och höja dessa krav vilket Trafikverket har gjort. Trafikverket har höjt en del av kraven i Sverige och dessa kompletterande krav går att finna i TRVK Tunnel 11 (TRV 2011:087) där Trafikverket redovisar de tekniska krav som ställs vid dimensionering och utformning av järnvägstunnelar i Sverige.

Med avseende på utrymningsgångvägar i järnvägstunnelar så innefattar Trafikverkets kompletterande krav i TRVK Tunnel 11 främst utökade krav när det gäller utrymningsgångvägens bredd samt lägsta belysningsnivå gentemot kraven i TSD SRT.

TRVR Tunnel 11

Utöver kraven i TRVK Tunnel 11 så har Trafikverket även tagit fram ett antal råd som går att finna i TRVR Tunnel 11 (TRV 2011:088). I dessa råd anger Trafikverket bland annat att en verifiering av personsäkerheten med hjälp av analyser alltid bör genomföras för järnvägstunnelar vars längd överstiger 1000 meter vilket är ett krav utöver de krav som anges i TSI SRT. I råden anges även att behovet av en analys bör bedömas för varje enskilt fall för tunnelar som är mellan 300-1000 meter långa och om en tunnel understiger 300 meter behöver ingen analys genomföras.

Järnvägslagen (2004:519)

I Järnvägslagen (2004:519) ställs bland annat krav gällande järnvägsinfrastruktur, järnvägsfordon samt utformning och material i järnvägssystemet. I lagen ställs exempelvis krav på utformning och material, detta för att förebygga skador och att en säker verksamhet ska bedrivas.

Personsäkerhet i järnvägstunnelar, BVS 1585.45

BVS 1585.45 är en standard som ställer krav vid utformning av järnvägstunnelar. I standarden anges bland annat vilken risk för olyckor som kan accepteras och hur risken för olyckor ska verifieras med hjälp av säkerhetsanalyser.

BVH 585.30

BVH 585.30 är en handbok innehållande råd för hur en värdering av personsäkerheten i järnvägstunnelar kan gå tillväga med förslag på lämpliga analysmetoder och acceptanskriterier. Handboken beskriver bland annat hur utförandet av kvalitativa analyser, kvantitativa analyser och scenarioanalyser kan gå till väga samt anger exempel på olycksfrekvenser som har använts i tidigare riskanalyser vid projektering av järnvägstunnelar.

Lag (2003:778) om skydd mot olyckor

Lag (2003:778) om skydd mot olyckor, LSO, trädde i kraft 1 januari 2004. Denna lag ställer bland annat krav på att ägare och nyttjanderättshavare till anläggningar i skälig omfattning ska hålla utrustning för släckning av brand samt för livräddning vid brand eller annan olycka. Därtill ställer lagen krav på att ägare och nyttjanderättshavare till anläggningar ska vidta de åtgärder som krävs för att förebygga brand och för att förhindra eller begränsa skador till följd av brand.

Plan- och bygglagen (2010:900) och Plan- och byggförordningen (2011:338)

Plan- och bygglagen samt Plan- och byggförordningen ställer krav på tekniska egenskapskrav på byggnadsverk vilket är den kategori som järnvägstunnlar faller inom. Lagen och förordningen ställer bland annat krav på byggnadsverkets bärförmåga vid brand, utveckling och spridning av brand inom byggnadsverket samt att personer som befinner sig inom byggnadsverket kan förflytta sig till en säker plats eller räddas på annat vis.

2.3. Plattformar

Vid järnvägsstationer byggs i regel alltid perronger i form av plattformar. Detta görs för att underlätta på- och avstigningar. Ibland byggs även plattformar inne i järnvägstunnlar. Exempel på relativt nybyggda järnvägstunnlar där man valt att bygga plattformar även inne i tunnlar är Stora Bälttunneln samt Citytunneln i Malmö. Plattformarnas syfte är främst att underlätta vid en eventuell utrymningsituation, men de används även för att underlätta underhållsarbete i tunneln samt för att bygga in teknisk utrustning.

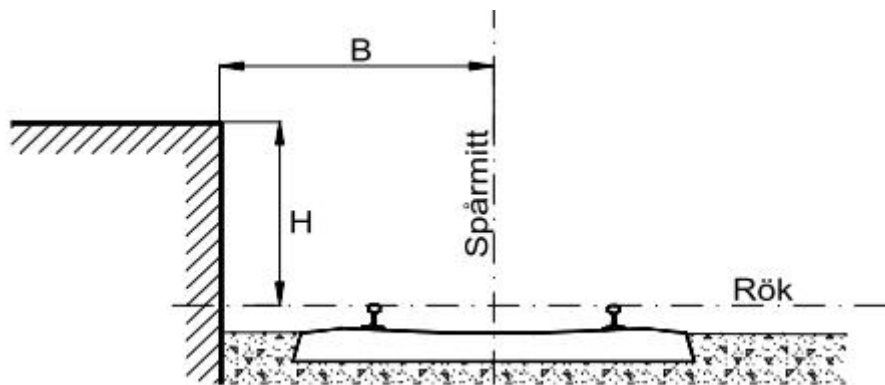
Plattformarnas bredd och höjd

I Sverige finns det idag tre olika standardhöjder på plattformar; låg, mellanhög och hög. De höjder som är mest utpräglade i Sverige är mellanhög och hög plattform.

Om en plattform ska användas som en utrymningsgångväg ställs krav på plattformens bredd. Enligt TSD SRT och TRVK Tunnel 11 bör utrymningsgångvägar vara minst 1.2 meter breda, behov av bredare plattformar kan dock förekomma. Till exempel så kan ett högt passagerarantal eller föremål som finns placerade längs med eller på plattformen medföra ett behov av ett bredare gångutrymme.

Plattformarnas placering

Enligt aktuella krav i TRVK Tunnel 11 och TSD SRT ställs vid enkelspåriga tunnlar endast krav på en utrymningsgångväg och vid dubbelspåriga tunnlar ställs krav på två utrymningsgångvägar. Dock kan genomförda analyser visa att behov av fler utrymningsgångvägar föreligger. Det är viktigt att plattformarna placeras så att de inte inkräktar på banans fria utrymme. Figur 3 visar hur plattformen kan placeras i förhållande till spåret. B anger avståndet från spårmittpunkt till plattformens kant och H anger avståndet från rälsöverkant, Rök, till plattformens överkant.



Figur 3. Plattformens placering intill spåret. Bild: Banverket, 1995

I Tabell 1 redovisas de grundvärden på avstånd B och H som gäller vid ny- och ombyggnation av plattformar intill spår (Södergren, 1995). Värdena grundar sig på att en bekväm och säker på- och avstigning ska kunna ske samtidigt som plattformarna inte ska hindra tunga och breda laster, såsom godståg, att ta sig fram (Södergren, 1995). De mått som anges i tabellen stämmer överens med de tre olika standardplattformhöjder som idag finns i Sverige.

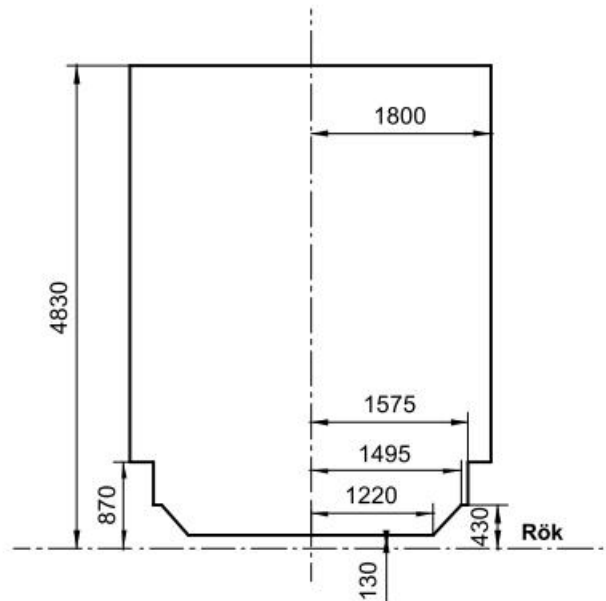
Tabell 1. Standardhöjder på plattformar i Sverige samt plattformens placering intill spåret (Banverket, 1995).

Standardhöjd	B, Bredd [mm]	H, Höjd [mm]
Låg plattform	+ 40 1550 - 0	+ 10 350 - 20
Mellanhög plattform	+ 40 1700 - 0	+ 10 580 - 20
Hög plattform	+ 40 1700 - 0	+ 10 730 - 20

Fritt utrymme

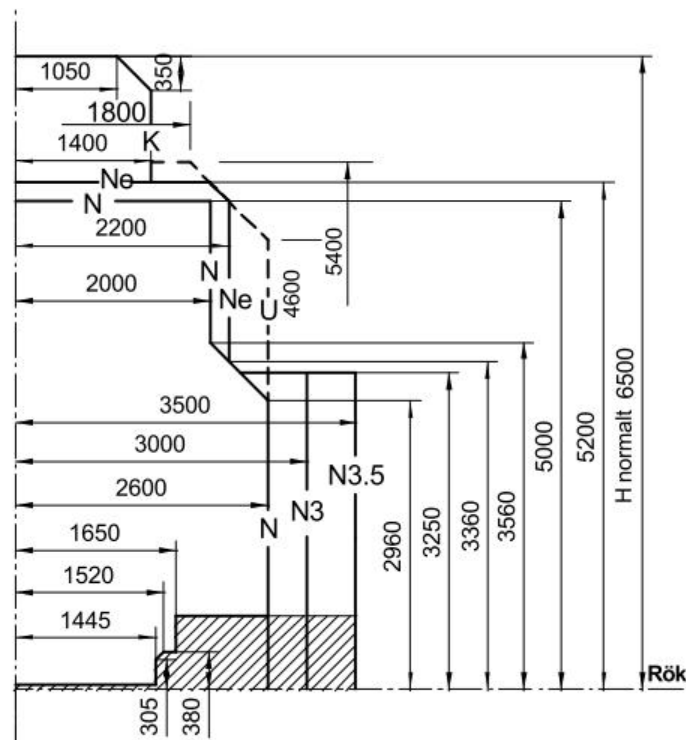
Enligt BVH 586.30 ska fordon och laster dimensioneras så att de aldrig överskrider gränsen för det fria utrymmet.

För att uppnå dessa krav dimensioneras alla rullande materiel på Trafikverkets spår efter det så kallade normalfordonet och den så kallade normallasten. I föreskriften BVF 586.20 anges att den framtida normallasten kommer ha ett tvärsnitt enligt Figur 4. Dessa mått för normallasten började successivt införas år 1999 (Lundberg, 1998).



Figur 4. Normallastens lastprofil där måtten är angivna i millimeter. Bild: Banverket, 1998

Figur 5 visar normalsektionen för det fria utrymmet där den streckade linjen utgör spårets mitt (Lundberg, 1998). I allmänhet gäller sektion N. Sektion N3 gäller vid långsträckta hinder som är mellan 1 och 15 meter långa och sektion N3,5 gäller vid långsträckta hinder som är längre än 15 meter. Inom det streckade området får plattformar placeras.



Figur 5. Normalsektionen för det fria utrymmet ovanför 50 mm över RÖK. Bild: Banverket, 1998

Det minsta fria utrymme som krävs i höjled från rälsöverkant, Rök, är 6500 mm. Denna höjd inkluderar utrymmet för kontaktledningar, inom sektion K, som endast får innehålla utrustning för kontaktledningar. Sektion Ne visar det fria utrymmet som gäller för elektriskt förande konstruktioner.

2.4. Byggmetod

Det finns främst två tekniker som används vid byggnation av järnvägstunnlar: sprängning respektive borrhning. Denna rapport studerar i enlighet med avgränsningarna i avsnitt 1.5 enbart borrhade enkelspåriga järnvägstunnlar.

Nedan görs en beskrivning av byggprocessen för en enkelspårig borrhad järnvägstunnel och beskrivningen bygger på att två parallella enkelspåriga järnvägstunnlar byggs och sammanbinds med tvärtunnlar. Beskrivningen grundar sig främst på publikationer från Skanska Vinci (2013) och Trafikverket (2012). Viktigt att nämna är att byggprocessen grundar sig på ett typexempel och kan skilja sig betydande mellan olika tunnelprojekt.

För att spräcka loss berggrund, jord och övriga material används vanligtvis en tunnelborr med ett roterande och kutterförsedd borrhuvud. Under borrhadets gång bildas kontinuerligt schaktmassa som förs ut ur tunneln med hjälp av transportband för vidare hantering. Väggarna i den färdigborrade tunneln kläs efter hand med betongfundament vilket resulterar i ett cylinderformat tunnelrör, se Figur 6. Eventuella hålrum mellan betongfundament och berggrund fylls ut med fyllnadsmaterial.



Figur 6. Bilden visar pågående byggprocess vid bygget av Hallandsås tunneln som är en enkelspårig borrhad betongjärnvägstunnel vars gångvägar i ett senare skede av byggprocessen ska placeras i rälsnivå. Bild: Emma Dahlstrand, 2013

Vid byggnation av två parallella enkelspåriga järnvägstunnlar byggs, i enlighet med kraven i TSD och TRVK Tunnel 11, tvärtunnlar som sammanbinder de båda järnvägstunnlarna. Sådana tvärtunnlar byggs främst för att underlätta evakuering vid eventuella stopp eller olyckor, men de kan även användas som förvaringsplats för järnvägsteknik eller underlätta vid framtida underhållsarbeten. Tvärtunnlar byggs med maximalt 500 meters mellanrum och förses med branddörrar som skapar en eller flera slussar mellan de båda järnvägstunnlarna, detta för att höja säkerheten ytterligare genom att minska risken för att brandgaser sprider sig vidare till den intilliggande järnvägstunneln.

När tunneln är färdig fortsätter arbetet med att utföra installationer inne i tunneln. Botten av det cylinderformade tunnelröret fylls upp med material, exempelvis makadam, vilket resulterar i att tunnelrörets slutgiltiga tvärsnitt blir hästskoformat istället för cirkulärt. På den plana botten som bildas läggs spår och bredvid spåret byggs minst en gångväg avsedd för evakuering och underhåll. I taket installeras normalbelysning, kontaktledningar samt antennkablar och längs

med tunnelns väggar monteras nödljus, skyltar, ledstänger och signaler. Eventuell järnvägsteknik installeras i tvärtunnlarna.

Ett alternativ är att bygga upphöjda gångvägar inne i järnvägstunnlarna istället för att placera gångvägarna i rälsnivå. Vid byggnation av upphöjda gångvägar så finns alternativet att placera en del av järnvägstekniken inuti plattformarna.

3. Samhällsekonomiska värderingsmetoder

3.1. Värdering av människoliv

För att kunna genomföra olycksutvärderingar underlättar det om ett förlorat liv kan värderas i monetära enheter. Detta görs idag med hjälp av ett värde som kallas VSL, värdet av ett statistiskt liv. VSL är ett mått som främst bygger på individens marginella betalningsvilja för att minska risken att dö till följd av en olycka (Mattsson, 2000). Genom att uttrycka det som "värdet av ett statistiskt liv" vill man förknippa VSL med förändringar i hela samhällets välfärd och inte på individnivå. Detta främst för att undvika sådana konflikter som kan uppstå vid värdering av ett människoliv. Till exempel så anser många att ett människoliv har ett oändligt högt värde och att det därför inte är omöjligt att värdera ett människoliv mot kostnaderna för säkerhetsåtgärder (Mattsson, 2000).

Flertalet värden har beräknats fram för värdet av ett statistiskt liv. Till exempel så angav Trafikverket år 2012 ett värde på 22,3 miljoner kronor för ett statistiskt liv, vilket symboliserar samhällets nyttoförlust till följd av ett förlorat människoliv på grund av dödsfall i trafikolycka (Trafikverket, 2012).

Vid värdering av risk så använder sig Trafikverket främst av följande kriterier (Boverket, 2005).

- Rättighetsbaserade kriterier
- Nyttobaserade kriterier
- Funktionskrav
- Detaljkrav

Rättighetsbaserade kriterier

Rättighetsbaserade kriterier beskriver den högsta tillåtna risknivån och grundar sig på rättviseaspekter. Rättviseaspekterna syftar till att ingen människa ska behöva utsättas för en högre risknivå än andra människor. De rättighetsbaserade kriterierna används ofta vid val av acceptanskriterier och är ofta relativt enkla att verifiera matematiskt trots att indata, osäkerheter och beräknade värden ofta ifrågasätts (Boverket, 2005).

Inom vägsektorn finns nollvisionen som innebär att målet är att ingen ska dö till följd av en olycka i vägtrafiken. Denna vision anses i många fall omöjlig att uppnå och kan endast verifieras i efterhand (Boverket, 2005).

Risknivån kan även bestämmas till en högsta tillåten risknivå, vilket är enkelt att verifiera rent matematisk. Dock kan den beslutade nivån ifrågasättas med avseende på bland annat beräknade värden, osäkerheter, indata och med argumentet att en hög risknivå kan räknas hem för enkelt (Boverket, 2005).

Nyttobaserade kriterier

Nyttobaserade kriterier innebär att den förväntade risknivån jämförs mot den förväntade nyttan. De vanligast förekommande nyttobaserade modellerna är kostnad-nyttoanalys och kostnadseffektanalys (Boverket, 2005).

Kostnad-nyttoanalysen beskrivs mer ingående i avsnitt 3.2 och bygger på att fördelar vägs mot kostnader i monetära enheter. Väger fördelarna mer än kostnaderna anses lösningen vara samhällsekonomiskt lönsam.

En kostnadseffektanalys bygger istället på att ett säkerhetsmål ska uppnås med så låga kostnader som möjligt. I en kostnadseffektanalys bestäms dock risknivån oftast utifrån ett rättighetsbaserat kriterium.

Funktionskrav och detaljkrav

Funktionskrav och detaljkrav är sådana krav som till exempel ställs i standarder, lagar och förordningar och som kraftigt styr och påverka utformningen av järnvägstunnlar. Problem som kan uppstå då ett projekt till största delen baseras på detaljkrav är att fokus på funktion tappas, vilket kan hindra utvecklingen av nya lösningar (Boverket, 2005).

3.2. Metod för beslutsfattande

Arbetsgruppen för Samhällsekonomiska kalkyler rekommenderar att utvärderingar av olika åtgärds paket inom trafiksektorn bör grunda sig på cost-benefit-analyser (CBA) eller så kallade kostnad-nyttoanalyser (ASEK, 2008). Detta för att uppnå "målet om samhällsekonomisk effektivitet och målet om långsiktig hållbarhet". Arbetsgruppen för Samhällsekonomiska kalkyler belyser även vikten av att dessa samhällsekonomiska analyser lever upp till angivna transportpolitiska mål och restriktioner.

Kostnad-Nyttoanalys

Redan på 1930-talet skrev ekonomerna Hicks och Kaldor artiklar med försök att skapa en bedömningsgrund för hur man bedömer åtgärder som medför både förlorare och vinnare (Hicks, 1939 och Kaldor, 1939). Det grundläggande kriterium som Hicks och Kaldor kom fram till kan sammanfattas enligt följande; "om vinnarna kan överkompensera förlorarna innebär åtgärden en välfärdsökning för samhället" (Mattsson, 2000).

Hicks-Kaldor kriteriet utgör idag grunden för de kostnad-nyttoanalyser som idag i stor utsträckning tillämpas för att avgöra om en åtgärd är samhällsekonomiskt lönsam eller inte (Mattsson, 2000). CBA används främst som beslutsunderlag för att avgöra om kollektiva nyttigheter, dvs. sådana nyttigheter som alla i samhället kan utnyttja (Mattsson, 2000). Exempel på sådana nyttigheter är bland annat beslut kring vilka vägar som ska byggas och beslut om farligt gods ska förbjudas inom vissa tätorter eller inte.

Med samhällsekonomisk menas att åtgärden ökar välfärden i samhället, där samhället ofta definieras som samtliga invånare i nationen (Mattsson, 2000). Finns det flera åtgärdsval att välja mellan väljs vanligtvis det alternativ med störst nettofördelar (Mattsson, 2000).

Svårigheten med CBA ligger främst i att värdera samtliga kostnader och nyttor i en och samma skala. Exempel på kostnader och nyttor som kan vara svåra att värdera är bland annat antal skadade och omkomna människor, mindre bullrig miljö och en vackrare utsikt. Till grund för att utföra dessa värderingar används främst individernas betalningsvilja (Mattsson, 2000). Betalningsvilligheten måste inte uttryckas i monetära enheter men av praktiska skäl försöker man hålla sig till monetära enheter (Mattsson, 2000).

3.3. Riskhanteringskultur och strategi

Inom järnvägssektorn är olyckor sällsynt förekommande och den kultur som utvecklats innebär att den viktigaste strategin för riskhantering är att undvika att olyckor inträffar (Boverket, 2005). Detta innebär att sannolikhetsreduktion utgör den främsta riskhanteringen inom järnvägssektorn till skillnad från kulturen inom vägsektorn som i en betydligt högre utsträckning prioriterar att begränsa konsekvenserna av en olycka då den redan inträffat, detta för att uppnå nollvisionen inom väggkulturen (Boverket, 2005). Dock bör det poängteras att järnvägssektorn, trots fokus på sannolikhetsreduktion, även utvecklat en kultur där man arbetar mycket med konsekvensreducering.

3.4. Acceptanskriterier och ambitionsnivåer

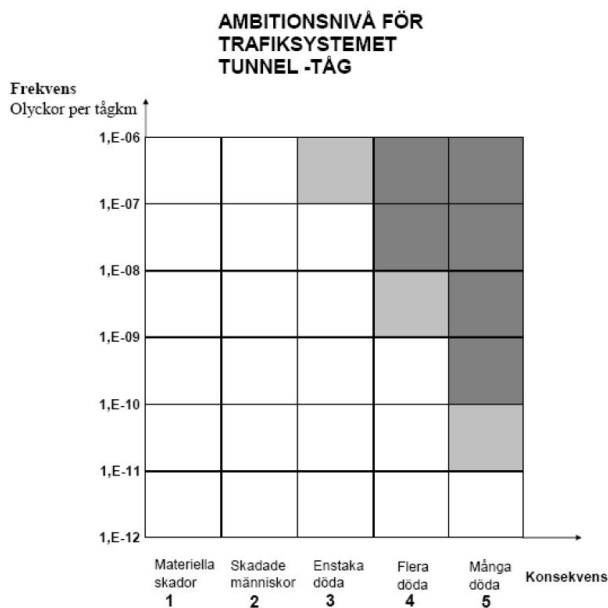
Vid projektering av nya järnvägstunnlar så finns det ett antal acceptanskriterier gällande risker samt ambitionsnivåer gällande säkerhet som ska tas i beaktande. I BVH 585:30 beskrivs ambitionsnivån även enligt nedan vilket innebär att säkerheten för tågtrafik inne i järnvägstunnlar ska vara lika god som säkerhet för tågtrafik på markspår.

”Järnvägstrafik per kilometer tunnel skall vara lika säkert som järnvägstrafik per kilometer på markspår, exklusive plankorsningar.”

I BVH 585.30 uttrycks personsäkerheten i konsekvens per tågakilometer och ambitionsnivån redovisas både i form av en riskmatris och i form av ett F/N-diagram. Både riskmatrisen och F/N-diagrammet inkluderar en aversionsfaktor mot större olyckor. Det innebär att man väljer att värdera 10 omkomna individer vid ett tillfälle i ett högre pengavärde jämfört med 10 omkomna individer vid 10 olika tillfällen.

Riskmatris

I Figur 7 redovisas ambitionsnivån i BVH 585:30 i form av en riskmatris (Paulsson, 2007). Matrisens vita område innebär att ambitionsnivån är uppnådd och att riskerna därmed kan accepteras. Det ljusgråa området innebär att ytterligare åtgärder bör utredas, därefter ska de åtgärder som anses rimliga genomföras. Det mörkgrå området innebär att åtgärder för att höja säkerheten måste vidtas.



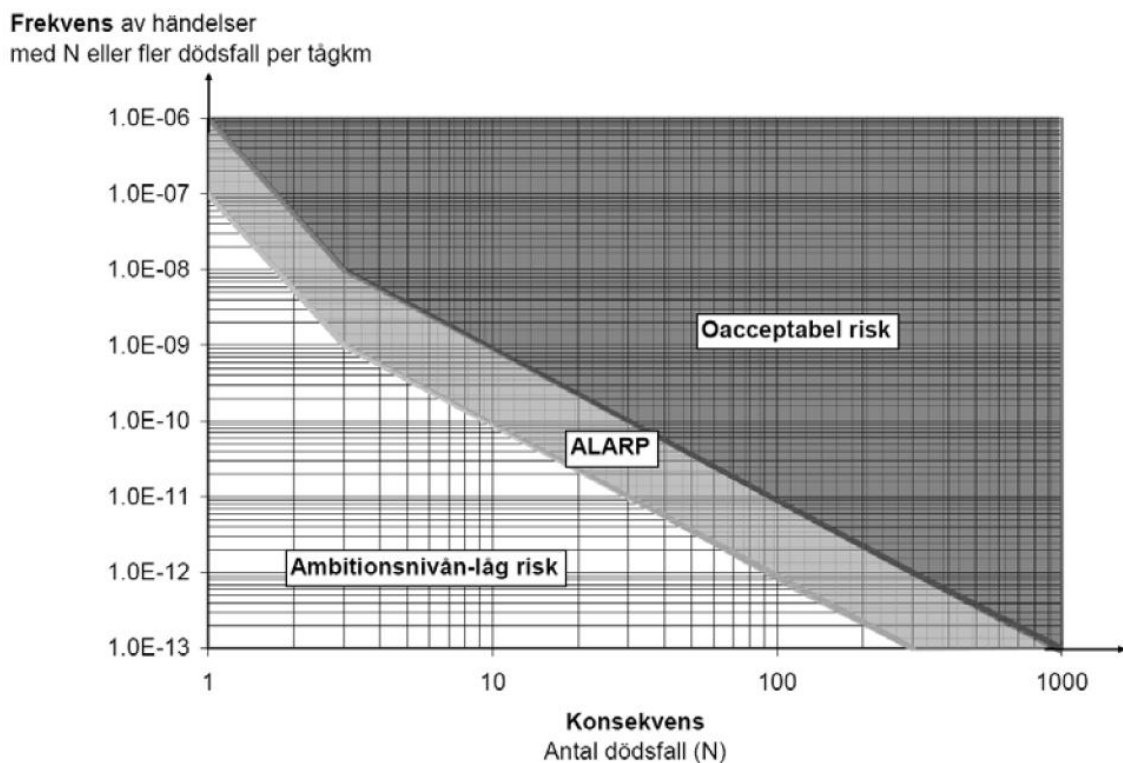
Figur 7. Riskmatris. (Banverket, 2007)

Frekvensaxeln redovisar olyckor per tågkilometer och konsekvensaxeln innehåller konsekvensklasser som inte är exakt kvantifierade men som grovt tolkas enligt följande i BVH 585.30:

- Konsekvensklass K1: endast materiella skador
- Konsekvensklass K2: skadade människor
- Konsekvensklass K3: 1-3 döda
- Konsekvensklass K4: 3- ca 30 döda
- Konsekvensklass K5: fler än 30 döda

F/N diagram

I Figur 8 redovisas ambitionsnivån i BVH 585:30 i form av ett F/N diagram (Paulsson, 2007). För att visa att olyckor med större konsekvenser än 30 döda kan inträffa har Trafikverket även tagit fram ett F/N diagram där ambitionsnivåns aversionslinje fortsätter ända upp till olyckor som medför en konsekvens på 1000 döda. De risker som befinner sig inom ALARP (As Low As Reasonably Practicable) området kan accepteras i den utsträckningen att samtliga rimliga åtgärder har vidtagits. För samtliga risker som befinner sig inom ALARP området bör alltså kostnader vägas mot nytta, det vill säga reduktionen av risk ska vägas mot kostnader. F/N diagrammet i Figur 8 visar tydligt att acceptansen för större olyckor är lägre och att skyddsnivån ska utformas för att undvika just större konsekvenser.



Figur 8. F/N diagram framtaget av Banverket (2007).

Gränsvärden vid självutrymning

I Tabell 2 anges de gränsvärden som redovisas i BVH 585.30 för att principen om självutrymning ska uppfyllas och således en acceptabel utrymningssäkerhet för de utrymmande passagerarna.

Tabell 2. Gränsvärden för acceptabel utrymningssäkerhet i enlighet med BVH 585.30.

	Gränsvärde för att uppnå principen om självutrymning
Temperatur	Akkumulerad fraktionsdos $F_{temp} < 1,0$
Strålning	För beräkning kan gränsvärdet $2,5 \text{ kW/m}^2$ användas vid långvarig strålningsintensitet och gränsvärdet 10 kW/m^2 för kortvarig strålningsintensitet eller en maximal strålningsenergi på $< 60 \text{ KJ/m}^2$ utöver energin från strålning på 1 KW/m^2 . Värmestrålning behöver normalt inte beaktas, då brandgaser och toxiska gaser är dimensionerande enligt Banverket (2007).
Sikt	Utrymmande får inte vistas längre än 15 min i siktsträckor som understiger 3 m.
Toxicitet	Den sist utrymmande gruppen ska kunna ta sig till en säker plats innan de toxiska gaserna leder till medvetslöshet.

4. Utrymningssäkerhet vid brand i järnvägstunnel

4.1. Brand

4.1.1. Brandorsak

När det gäller den spårbundna tunneltrafiken så utgörs de största brandorsakerna av tekniska och elektriska fel (Carvel & Marlair, 2005). I rapporten BVH 585.30 ges ytterligare ett antal exempel på brandorsaker som kan leda till brand i tåg som befinner sig inne i järnvägstunnelar, dessa listas nedan:

- Tekniska och elektriska fel
- Självantändning
- Gnista från bromsblock
- Sabotage/terrorism
- Kollaps av konstruktion
- Naturolycka så som ras och skred
- Urspårning på grund av höga vindhastigheter
- Brand i installationer eller föremål i tunneln
- Brand ovanför eller utanför tunneln
- Brand på grund av urspårning
- Brand på grund av sammanstötning med lätt/tungt föremål

4.1.2. Brandutveckling och brandgasspridning

Den instängda och avlång miljö som råder inne i järnvägstunnelar påverkar brandens effektutveckling och brandgaserna kan snabbt sprida sig på ett sådant sätt att passagerarna tvingas utrymma genom de giftiga, varma och siktnedsättande brandgaserna. Ingason (2005) förklarar hur förhållandena i en tunnel skiljer sig från en brand i en öppen och fri miljö. Han förklarar att tunnelmiljön kan generera en både högre och effektivare värmestrålning från de varma väggarna och de varma brandgaserna. En högre värmestrålning kan i sin tur både öka brandens intensitet och göra miljön i tunneln mer farlig för de utrymmande. Ingason förklarar även att tunnelmiljön kan leda till ventilationskontrollerade förhållanden, till följd av en låg syretillgång, vilket i sin tur kan skapa en högre grad ofullständig förbränning.

Rådande klimatförhållanden inne i en järnvägstunnel så som temperatur och luftflöden kan ha stor påverkan på hur brandgaserna sprider sig. Huvuddelen av brandgaserna kommer att förflytta sig horisontellt med vindriktningen. I takt med denna horisontella förflyttning kommer brandgaserna successivt att kylas av och brandgaserna få snarlika temperaturer som övrig luft i tunneln. Denna temperaturutjämning innebär i sin tur att den termiska stigkraften på brandgaserna minskar. På så sätt tenderar hela tunneltvärsnittet att bli fyllt med brandgaser. Detta medför att brandgaserna påverkar de utrymmande personerna i en större utsträckning samt försvårar räddningsinsatsen ytterligare till skillnad mot om brandgaserna fortsatt sprida sig endast horisontellt längst med taket.

Vid beräkning av brandutveckling och brandgasspridning i en järnvägstunnel finns det väldigt många variabler att ta i beaktande. Variabler som påverkar brandutvecklingen och brandgasspridningen betydande är bland annat:

- Väderförhållanden (temperatur, vindhastighet och vindriktning)
- Tunnelns geometri (tvärsnittsarea, längd och lutning)
- Branden (placering, brandbelastning, effektutveckling och tillväxthastighet)
- Släckinsats av passagerare eller tågpersonal

Det har utförts en del storskaliga och småskaliga försök för att studera effektutvecklingen och tillväxthastigheten från en brinnande tågagn med stålkonstruktion.

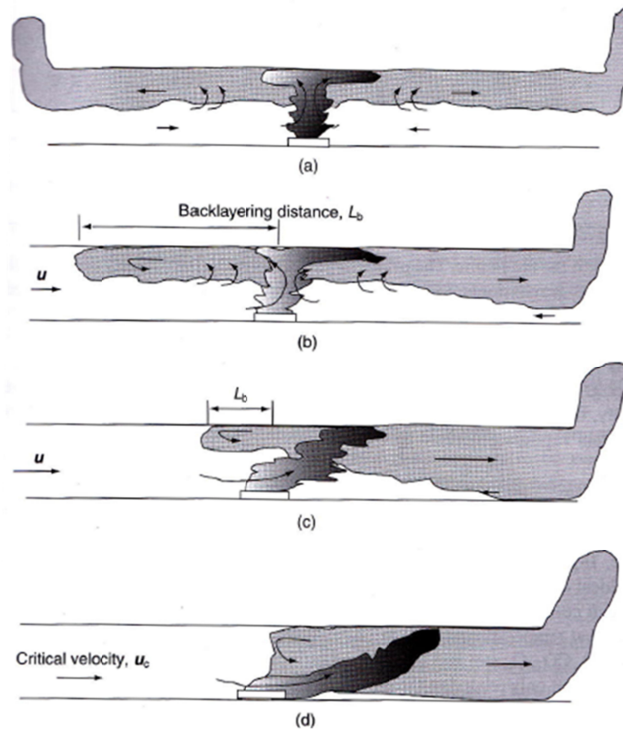
Enligt Beard och Carvel (2011) genererar bränder i tåg en maxeffekt på 7 till 45 MW och tiden till maxeffekt varierar mellan 5 och 80 minuter. Om en brand i en vagn sprider sig till en intilliggande vagn så kan maxeffekten dock bli betydligt högre (Beard & Carvel, 2011). I EUREKA försöken uppmättes ett medelvärde på maxeffekten vid brand i stålvagnar till 15 MW (Ingason, 1995). Likaså anges i handboken BVH 585:30 att en stor brand i en personvagn av stålkonstruktion kan genererar en maxeffekt på 15 MW och ha en brandtillväxt på cirka $0,012 \text{ kW/s}^2$ (α), dvs. en brand av typen "medium fire". I Figur 9 illustreras tid-effektkurvan för en sådan brand.



Figur 9. Exempel på tid-effektkurva för stor brand i personvagn. Bild: Banverket, 2007

Det finns dock studier som visar på att en stor brand i en modern personvagn av stålkonstruktion kan generera en betydligt högre effektutveckling än 15 MW. Ingason och Lönnermark (2004) förklarar hur stor betydelse tillflödet av luft, från till exempel söndriga eller öppna fönster och dörrar, har för brandens utveckling och maxeffekt. I EUREKA försöken uppmättes värden mellan 13-19 MW för moderna stålvagnar, dock förklarar Ingason och Lönnermark att samtliga fönster var i god kvalitet och intakta då bränderna startade. Om flertalet fönster hade varit sönder, till exempel på grund av en kollision eller urspårning, hade uppmätta maxeffekter kunnat bli betydligt högre. Ingason uppskattar av maxeffekterna i sådana fall hade kunnat nå upp till 30-45 MW, dock betonar Ingason att det är osannolikt att samtliga fönster går sönder och faller ut under en kollision eller urspårning. På grund av tillluftens inverkan på brandförloppet rekommenderar Ingason och Lönnermark att det högsta uppmätta värdet för stålvagnar i EUREKA försöken används istället för medelvärdet av de uppmätta värdena. Dock avrundar Ingason för enkelhetens skull upp det rekommenderade värdet till 20 MW. Likaså visar nya studier från *The Metro Project* att en effektutveckling på 20 MW och en tillväxthastighet på $0,012 \text{ kW/s}^2$ (α) är lämplig att använda vid brand i tåg som befinner sig i en järnvägstunnel (Ingason, o.a., 2012)

Beard och Carvel (2011) delar in vindhastigheterna i en järnvägstunnel till mycket låg, låg, måttlig samt en vind som överstiger kritisk vind. En mycket låg till låg vindhastighet (0 – 1 m/s) innebär att det bildas en viss grad av backlayering, detta innebär att den svaga vinden skapar en virvel som medför att en del av brandgaserna förflyttar sig mot vindens riktning, se Figur 10. Även vid en måttlig vindhastighet (1-3 m/s) kommer brandgaserna till viss del att förflytta sig mot vindens riktning. Om vindhastigheten överstiger kritisk vindhastighet (3 m/s) sker ingen backlayering utan samtliga brandgaser kommer att förflytta sig i vindens riktning.



Figur 10. Samtliga bilder visar trolig brandgasskiktning vid olika lufthastigheter. Den översta bilden (a) illustrerar en mycket låg lufthastighet (0-0.3 m/s), den näst översta bilden (b) illustrerar en vindhastighet på cirka 1 m/s, den tredje bilden illustrera en vindhastighet på 1-3 m/s och den sista bilden illustrerar en kritisk vindhastighet som överstiger 3 m/s. (Beard & Carvel, 2011)

Vid en mycket låg till låg vindhastighet bör den låga horisontella förflyttningshastigheten i vindens riktning innebära att brandgaserna bör leda till mer ogynnsamma förhållanden för de passagerarna som utrymmer nära branden. Högre vindhastigheter kommer i sin tur medföra att brandgaserna utför en snabbare horisontell förflyttning i vindens riktning. Detta innebär att brandgaserna kommer att påverka miljön till det sämre längre bort från själva brandhärden samtidigt som förhållandena i närheten av branden bör förbättras på grund av högre utspädning. En vindhastighet som överstiger kritisk vindhastighet (3 m/s) innebär att brandgaserna sprider sig ännu fortare längs med tunneln och att brandgaserna på så sätt kan påverka personer som utrymmer ännu längre bort från branden, dock i en mer gynnsam och utspädd utsträckning.

4.1.3. Beräkningar av brandförlopp

Det finns ett flertal olika modeller som kan beräkna brandutveckling och brandgasspridning i järnvägstunnlar, både handberäkningsmodeller och tredimensionella CFD-teknik kan tillämpas och de olika metoderna har olika för- och nackdelar.

Handberäkningsmodeller

Enligt Beard och Carvel (2011) är endimensionella beräkningar av brandgasspridning lämpliga att använda för den geometri som råder inuti en järnvägstunnel. Detta på grund av geometrin är relativt enkel. Brandgaserna kan antas förflytta sig homogent och endast variera med avseende på avståndet från branden. Anledningen till att en homogen fördelning av brandgaserna kan antas över tunneltvärsnittet beror främst på att brandgasernas termiska stigkraft tenderar att minska kraftigt en bit bort från själva brandhärden. Detta medför att brandgaserna kan blanda sig nästintill homogent med luften så att brandgaserna fördelar sig jämt längs med tunnelns tvärsnitt. Dock förklarar Beard och Carvel (2011) att en tvåzonsmodell är bättre lämpad i närheten av själva brandhärden. Att en tvåzonsmodell lämpar sig bättre i närheten av själva brandhärden beror främst på att temperaturskillnaderna mellan luft och brandgaser inte hinner utjämnas tillräckligt fort för att skapa en homogen brandgasfördelning över tunneltvärsnittet närmast brandhärden. Handberäkningar kan resultera i utdata för bland annat temperatur, koncentrationer av brandgaser och olika toxiska ämnen vid olika tidpunkter och vid olika platser i en tunnel. Fördelarna med handberäkningsmodeller är främst att de inte kräver så lång beräkningstid. En kort beräkningstid gör det därför möjligt att studera ett större antal scenarier än då till exempel CFD-beräkningar tillämpas som är betydligt mer tidskrävande. Möjlighet att ta med fler variabler i beräkningarna kan i slutändan ha stor påverkan på resultatet (Beard & Carvel, 2011).

Nackdel med handberäkningsmodeller är främst att de resulterar i ett grövre och mindre tillförlitligt resultat än CFD-beräkningar (Strömngren, o.a., 2005). Detta främst på grund av att en del förenklingar gällande brandgasernas spridning görs, så som en homogen spridning över tunneltvärsnittet endimensionella brandberäkningar, samt att tidsstegen mellan de beräkningar som används ofta är ganska så stora.

CFD

Den modell som idag anses generera i det mest tillförlitliga resultatet avseende brandgasspridning i en tunnel är CFD som står för Computational Fluid Dynamics. Med CFD-teknik kan tredimensionella beräkningar av brandensspridning genomföras och generera resultat så som röktäthet, temperaturer, variationer i lufthastigheter och brandgasernas förflyttning. Tredimensionella CFD-beräkningar bygger på att volymen i en tunnel delas in i ett stort antal små celler. Vid en CFD simulering sker beräkning av den massa och energi som rör sig mellan de olika cellerna. Fördelarna med CFD beräkningar är att de kan ge relativt tillförlitliga och detaljerade resultat. Nackdelarna med CFD beräkningarna är dock att dessa beräkningar är tidskrävande då det är ett stort antal och komplicerade beräkningar som ska genomföras. Dessutom innebär en tunnels smala och avlånga geometri att simuleringarna måste ta väldigt många variabler i beaktande, variabler i yttre förhållanden så som vind, lutning, temperaturer, etcetera kan vara mycket resurs- och tidskrävande (Beard & Carvel, 2011).

4.2. Utrymning

4.2.1. Utrymningstid

Den totala utrymningstiden är den tid det tar från att en brand startat tills att samtliga utrymmande personer tagit sig till en säker plats. Den totala utrymningstiden brukar delas upp i tre delar; varseblivningstid, förberedelsetid och förflyttningstid.

SP har gett ut en rapport där följande samband beskriver den totala utrymningstiden vid utrymning av fordon från undermarks anläggningar (Ingason, Bengtson, & Hiort, 1997):

$$t_{\text{utrymning}} = t_d + t_b + t_f + t_g + t_p$$

där:

$t_{\text{utrymning}}$ = Total utrymningstid

t_d = Tid tills man upptäcker branden

t_b = Tid för beslut och reaktion

t_f = Tid för utrymning genom fordon

t_g = Tid att gå till utrymningsväg

t_p = Tid att passera öppning till utrymningsväg

Tid från brandstart till påbörjad utrymning

Innan utrymning kan påbörjas måste passagerare och tågpersonal bli varse om att en brand har inträffat. Beroende på var branden är placerad kan tiden tills att branden detekteras variera avsevärt. Branden kan detekteras av rökdetektorer, passagerare eller av tågpersonal. Om en brand inträffar inuti en fullsatt passagerarvagn bör branden kunna detekteras av passagerare eller tågpersonal i ett relativt tidigt skede. Om en brand istället inträffar under vagnen eller i taket kan tiden till detektering bli betydligt längre. Varseblivningen kan på så sätt varieras mellan några få sekunder till flera minuter beroende på brandens placering. Detekteras branden av ett automatiskt brandlarm så går vanligtvis först en signal till föraren som sedan ber tågpersonalen att kontrollera så att det verkligen brinner. Först därefter tas ett evakueringsbeslut.

Efter att tågpassagerare och tågpersonal blivit varse om att en brand har inträffat råder en besluts- och reaktionstid innan utrymningen påbörjas. Under denna tid ska passagerarna förstå att det brinner, antingen genom att de ser branden eller genom att lyssna till ett talat meddelande samt förbereda sig för utrymning.

I BVH 585.30 anges ett antal tillämpbara exempel på tid påbörjad utrymning. Som ett "mest troligt värde" på påbörjad utrymning anges ett exempel på tid till påbörjad utrymning på 7 minuter, detta med en triangel fördelning mellan 2-12 minuter (Paulsson, 2007).

Förflyttning

När utrymningen väl har påbörjats ska de utrymmande personerna förflytta sig från passagerarvagnen ner till en utrymningsgångväg som är placerad längs med spåret. Därefter ska de välja utrymningsriktning för att sedan förflytta sig längs med spåret tills de når en säker plats i form av tvärtunnlar, nödutgångar eller tunnelmyningar.

Avstigning

När förflyttningen väl påbörjats så bör de utrymmande personernas första mål vara att ta sig ut ur tåget genom att förflytta sig till tågets dörröppningar. Förflyttningen till dörröppningarna

kan innebära mycket trängsel och flaskhalsar där föremål som stora väskor, rullstolar och barnvagnar kan utgöra hinder. Både Norén och Winér (2003) samt Oswald et al.(2005) har via försök konstaterat att bredden på tågets dörröppning inte är av vidare betydelse för personflödet genom dörröppningarna. Försöken visar att oavsett bredd tenderar endast en passagerare åt gången att lämna tågets dörröppning. Norén och Winér (2003) förklarar detta genom att det i vanliga fall finns passager inne i tåget som är trängre än själva dörröppningen.

Efter att passagerarna tagit sig fram till tågets dörröppningar är målet att ta sig ut ur tåget och ner till utrymningsgångvägen bredvid tåget. Utrymningsgångvägen befinner sig vanligtvis i höjd med spåret vilket innebär en kraftig vertikal förflyttning från tågets dörröppning till utrymningsgångvägen längs med rälsnivå.

Dagens personvagnar har vanligtvis en vagnsgolvsnivå på mellan 1,10–1,30 meter, detta med undantag för bland annat dubbeldäckare och tåg med speciella låggolvskonstruktioner (Fröidh, 2010). Anledningen till att golvnivån oftast är väldigt hög beror på att hjul och övrig teknisk utrustning ska rymmas under golvet (Fröidh, 2010).

Passagerarna kan välja att hantera den vertikala höjdskillnaden antingen genom att hoppa ner till marknivå eller genom att använda sig av en brant sluttande stege (Frantzich, 2000).

Gångvägar längs med rälsen inne i järnvägstunnlar kan höjas upp istället för att ligga i nivå med rälsnivå, på så sätt kan den vertikala förflyttningen från tågets dörröppningar till gångvägen kraftigt minska. Ett sådant kliv, till en upphöjd gångväg, kan i grova drag liknas vid den vertikala förflyttning som vanligtvis sker mellan tåg och perrong.

Under de senaste åren har det utförts ett antal utrymnings- och avstigningsförsök från tåg. Försöken har innefattat allt från avstigning till en perrong till avstigning till en smal utrymningsgångväg längst med rälsnivå. En del av dessa försök redovisas nedan.

Heinz och Kottenhoff (2001) redovisar hur avstigningstiden från tåg till perrong är beroende av bland annat dörrbredd, instegshöjd (plant insteg eller insteg via trappa) samt bagage så som väskor och barnvagnar. Heinz och Kottenhoff konstaterar en väsentlig tidsskillnad då avstigning sker via trappa respektive via ett plant insteg. Vid plant insteg (Arlanda express) redovisar de en medelavstigningstid på 1,4 sekunder per resenär medan de vid avstigning via trappa (X2000) redovisar en medelavstigningstid på 4,4 sekunder per resenär. Observera att dessa tider endast gäller avstigning till perrong och inte till en utrymningsgångväg inne i en järnvägstunnel.

Ett flertal olika försök visar hur problematisk höjdskillnaden mellan tåg och gångväg kan vara för de utrymmande personerna. Exempelvis så har Oswald et al.(2005) under utrymningsförsök låtit passagerare utrymma från en rökfylld tågvagn. Trots att försökspersonerna representerades av en åldersmässigt relativt ung grupp så visade videodokumentation att över 50 procent av försökspersonerna hade problem med höjdskillnaden. Genom att studera ett antal utrymningsförsök visar även Norén och Winér (2003) hur tydligt den vertikala höjdskillnaden påverkar personflödet genom tågets dörröppningar. Enligt Norén och Winér bör höjdskillnader undvikas i största mån för att underlätta en så snabb utrymning som möjligt. Noréns och Winérs studier visar att personflödet halveras från ingen höjdskillnad till en höjdskillnad på upp till 0,7 meter och vid större vertikala höjdskillnader minskar personflödet ytterligare.

Fridolf et al (2013) har utfört utrymningsförsök för att studera hur utrymningsflödet från tågets utgångar ner till utrymningsgångvägen bland annat beror på dörröppningens utförande, varierande belysning, om stege används vid utrymning eller inte samt hur stor höjdskillnaden är. Höjdskillnaden varierade mellan 0,7 och 1,4 meter i de olika försöken. Försöksresultaten visar att en minskad höjdskillnad mellan tåg och gångväg hade en positiv effekt på utrymningsflödet. En minskad höjdskillnad från 1,4 meter till 0,7 meter resulterade i ett ökat utrymningsflöde på 0,0182 personer per sekund och meter dörrbredd. Anledningen till att utrymningsflödet inte visade sig öka väsentligt mer berodde främst på att det rådande personflödet längst med gångvägarna inte tillät ett fritt flöde ut genom tågets dörröppningar (Fridolf, Nilsson, & Frantzich, 2013). Utrymningsförsöken visade ett utrymningsflöde genom dörröppningarna på cirka 0,3 personer per sekund och meter dörrbredd vid en höjdskillnad på 0,7 meter medan ett något lägre utrymningsflöde uppmättes då höjdskillnaden var 1,4 meter (Fridolf, Nilsson & Frantzich, 2013)

Frantzich (2000) har utfört två utrymningsförsök från tunnelbanevagnar i Stockholms tunnelbana. Under dessa försök varierade belysningen och passagerarna fick själva besluta om de ville använda sig av en utrymningsstege eller inte under den vertikala förflyttningen. I försöken utfördes en vertikal förflyttning ner till marknivå. I det första utrymningsförsöket fanns ingen belysning inne i tunneln utan vagnens nödbelysning var den enda belysning som passagerarna hade tillgång till. Försöket resulterade i ett personflöde på mellan 0,1-0,2 personer per sekund där det högre personflödet representerar utrymning utan stege och det lägre personflödet representerar utrymning via stege. I det andra utrymningsförsöket användes nödbelysning även i tunneln och här uppmättes ett personflöde på cirka 0,4-0,6 personer per sekund, även i detta fall motsvarar det lägsta personflödet användning av stege. Under det sistnämnda försöket hade försökspersonerna precis gjort ett liknande försök och var på så sätt tränade, detta kan innebära att personflödet på 0,4-0,6 personer per sekund kan vara något i överkant.

Frantzich (2000) finner fler problem än fördelar med att använda stege vid utrymning. Detta främst på grund av att användningen av stege tenderar att minska personflödet genom dörrarna samt att personflödet längs med utrymningsgångvägarna tenderar att minska till följd av att stegen tar upp en del av utrymningsgångvägens bredd. Andra faktorer som kan påverka utrymningen negativt är bland annat att det kan ta lång tid att montera stegen och att det kan bildas onödiga köer vid den dörröppning som stegen är monterad vid trots att det finns andra fria dörröppningar, utan stege, som passagerarna kan välja att utrymma genom.

Gånghastighet längst med utrymningsgångvägen

Det finns ett flertal faktorer som kan påverka de utrymmande personernas gånghastighet. Sådana faktorer kan exempelvis vara belysningsnivå, utrymningsgångvägens bredd, trängsel och flaskhalsar. Likaså kan de förhållanden som branden ger upphov till så som giftiga brandgaser, dålig sikt och värmepåverkan markant påverka de utrymmande.

Fridolf et al. (2013) redovisar med hjälp av scenarioanalyser ny data gällande gånghastighet inne i rökfyllda järnvägstunnlar. Resultatet redovisar en medelhastighet på 0,9 meter per sekund inne i rökfyllda tunnlar med en medelsikt på 1,5–3,5 meter (Fridolf, Ronchi, Nilsson, & Frantzich, 2013).

Försök visar på att gånghastigheten längs med gångvägen kan vara relativt hög om det finns någon typ av belysning inne i tunneln (Frantzich, 2000). En gånghastighet på cirka 1,4 m/s kan vara rimligt vid god belysning vilket motsvarar normal gånghastighet på plant underlag (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001). Om belysning helt saknas kan däremot gånghastigheten sjunka ända ner till 0,5 m/s (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001). Dålig sikt kan även uppstå på grund av en tät och irriterande rök vilket kan medföra ännu lägre gånghastigheter (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001). Dock anses minsta gånghastigheten vara 0,2 m/s oberoende av siktsträcka (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001).

I Frantzich (2000) redovisas resultatet från två utrymningsövningar i Stockholms tunnelbana. Målet med utrymningsövningarna var att studera passagerarnas förmåga att förflytta sig inuti en järnvägstunnel då ett persontåg tvingats stanna i tunneln på grund av brand. Försöken utfördes med olika belysningsnivåer, från totalt mörker till vanlig belysning. Försöken visar att gånghastigheten kan vara relativt hög beroende på om det finns belysning i tunneln eller inte. Gånghastigheterna uppmättes under något osäkra förhållande på grund av att rök befann sig framför kamerorna. Både utan belysning samt med reservbelysning uppmättes gånghastigheter på mellan 0,8 – 1,1 m/s längs med tåget, där variationerna främst berodde på hur tät röken var. Frantzich förklarar de snarlika hastigheterna med att det oftast är den långsammaste personen som styr hastigheten på gruppen.

Den genomsnittliga gånghastigheten vid en utrymning beror alltså inte enbart på individens gånghastighet utan det som styr gruppens hastighet är främst hur fort den långsammaste personen i gruppen förflyttar sig (Frantzich, 2000). Det har även konstaterats att utrymningsflödet längs med gångvägarna är starkt beroende av de passagerare som ansluter till gångvägarna via tågets dörröppningar (Oswald, Kirchberger & Lebeda, 2008). Passagerare som successivt ansluter till gångvägarna, stegar som minskar gångvägarnas bredd samt övriga hinder längs med gångvägen, riskerar att skapa flaskhalsar som kan minska personflödet och därmed även den genomsnittliga gånghastigheten.

Fridolf et al. (2012) har med hjälp av utrymningsförsök konstaterat att ojämna underlag och en lutande tunnel inte medför någon markant skillnad på gånghastigheten. Likaså visar utrymningsförsöken att det totala gångavståndet inte har någon väsentlig påverkan på gånghastigheten, utrymmande personer tenderar varken att gå fortare eller långsammare om man enbart tittar på parametern hur långt gångavstånd de har förflyttat sig.

Val av gångriktning

När de utrymmande personerna tagit sig ner till utrymningsgångvägen ska de välja utrymningsriktning, höger eller vänster. Ser de utrymmande personerna rök eller brand i en utav riktningarna är det högst troligt att de instinktivt väljer den motsatta riktningen.

Svårigheter med att lokalisera utrymningsvägarna

Vid dålig sikt kan det vara svårt för de utrymmande personerna att hitta de utrymningsvägar som utgörs av tvärtunnlar eller vertikala och horisontella nödutgångar. Särskilda svårigheter kan uppstå för de passagerare som förflyttar sig längs med den gångväg som innebär att en förflyttning över spåret måste ske för att de ska kunna nå utrymningsvägarna.

4.2.2. Beräkning av utrymningsförlopp

Den totala utrymningstiden består alltså av den tid det tar från att branden startar tills att de utrymmande personerna förflyttat sig till en säker plats. Tiden för ett utrymningsförlopp kan beräknas antingen med hjälp av handberäkningsmodeller eller med hjälp av datoriserade utrymningsmodeller.

Handberäkningsmodeller

Vid beräkningar av utrymningsförlopp kan handberäkningar tillämpas. Fördelarna med handberäkningsmodeller är främst att beräkningstiden för respektive beräkning som genomförs inte är så lång, använder man sig av en dator för att genomföra handberäkningarna så kan man genomföra beräkningarna på någon sekund. Detta innebär att man på ett enkelt sätt kan variera och prova många olika parametrar och erhålla snabba resultat vilket kan vara tillämpligt om många olika scenarier ska studeras.

Det kan dock vara komplicerat att genomföra handberäkningar då ett stort personantal ska utrymma samtidigt. Denna svaghet kan hanteras genom att endast studera de grupper som anses mest relevanta att studera, så som den grupp av individer som utrymmer sist.

Datoriserade utrymningsmodeller

Det finns ett flertal olika datoriserade utrymningsmodeller som kan simulera utrymning så som Simulex, Pathfinder, STEPS, etcetera. Ett generellt problem med dess datoriserade utrymningsmodeller är att de inte är anpassade till den geometri som råder inne i en järnvägstunnel. Dessa modeller är anpassade till helt andra typer av geometrier så som höghus eller shoppingcentrum. Detta innebär att de datoriserade utrymningsmodellerna måste anpassas till de förhållanden som råder inne i en järnvägstunnel, till exempel måste tid för avstigning av tåg samt gånghastigheter justeras. Fördelarna med de datoriserade utrymningsmodellerna är att det är relativt enkelt att hantera ett stort antal utrymmande. Några datoriserade utrymningsmodeller även ta hänsyn till hur brandförhållandena i tunneln påverkar de utrymmande, så som toxisk påverkan, genom data från CFD-beräkningar.

4.3. Utrymningsmiljö och tid till kritiska förhållanden

Beroende på hur en brand i en järnvägstunnel utvecklas kan rådande brandförhållanden leda till stor påverkan på de utrymmande personernas utrymningsmiljö och säkerhet. Under förflyttningen till en säker plats kan de utrymmande personerna utsättas för bland annat höga temperaturer som är skadliga för människokroppen, inandning av toxiska gaser samt dålig sikt. Detta kan i sin tur medföra stora förflyttningsproblem, medvetslöshet eller till och med ge upphov till dödliga förhållanden.

FED

För att ta reda på den ackumulerande dosen av giftiga gaser och höga temperaturer som en specifik individ eller grupp utsätts för måste hänsyn tas till hur de förflyttar sig i tunneln och vilka förhållanden de exponeras för.

För att beräkna hur de giftiga gaserna påverkar människokroppen används en fraktionsmodell kallad FED, Fractional Effective Dose. En sådan fraktionsmodell tar både hänsyn till vilka koncentrationsnivåer en individ utsätts för samt under hur lång tid individen utsätts för en viss koncentrationsnivå. För att ta reda på hur koncentrationerna av giftiga gaser varierar över tiden och beroende på var i tunneln individen befinner sig under ett brandförlopp delas tiden in i olika

intervall. På så sätt kan den dos av giftiga gaser som individen exponeras för inom olika tidsintervall bestämmas. Vid varje tidsintervall kan sedan den erhållna dosen jämföras mot olika gränsvärden för bland annat medvetslöshet (FID) och dödlighet (FLD). De giftiga gaser som denna modell beskriver är kolmonoxid (CO), koldioxid (CO₂), vätecyanid (HCN) samt den effekt som en minskad syrekoncentration ger upphov till (Paulsson, 2007).

Beräkningarna av FED-värdet kan utföras i olika detaljeringsgrader främst beroende på hur stora tidssteg som tillämpas mellan beräkningarna av toxicitet och de utrymmandes placering i tunneln.

FID värdet beräknas för respektive tidsintervall i enlighet med ekvationen nedan. Om FID värdet är lika med eller större än 1 anses gränsvärdet för medvetslöshet ha uppnåtts, detta enlighet med BVH 585.30.

$$FID = \text{Dos}_{\text{exponerad}} / \text{Dos}_{\text{kriterie}}$$

Där:

$\text{Dos}_{\text{exponerad}}$ = den dos som en specifik människa exponerats för

$\text{Dos}_{\text{kriterie}}$ = dos för att förlora medvetandet

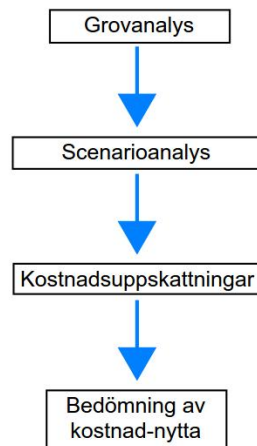
Beräkningen ovan upprepas för samtliga tidsintervall och för samtliga giftiga gaser som nämnts ovan. Doserna för respektive tidsintervall och för respektive giftig gas adderas. Denna addering resulterar i ett värde på den totala förgiftningsnivån som uppnåtts vid respektive beräknat tidsintervall. På så sätt erhålls ett värde på när individerna riskerar att förlora medvetandet.

Sikt

Produktion av brandgaser kan inte enbart medföra toxicitet utan även leda till dålig sikt, vilket kan försämra de utrymmande passagerarnas orienteringsmöjligheter och i hög utsträckning påverka gånghastigheten negativt (Boverket, 2005). Därmed kan en försämrad sikt även leda till ökad exponering av höga temperaturer och inandning av giftiga gaser.

5. Analysens uppbyggnad

I Figur 11 redovisas analysmodellens uppbyggnad och målet med analysmodellen är att ta reda på vilken säkerhetshöjande effekt som en byggnation av upphöjda utrymningsgångsgångvägar ger upphov till samt om investeringen av säkerhetsåtgärden är samhällsekonomiskt lönsam eller inte. Målet med analysen är att besvara den frågeställning som står angiven i avsnitt 1.2.



Figur 11. Flödesschema för analysmodellens uppbyggnad.

I detta examensarbete kommer endast järnvägstunnlar som är mellan 1 – 20 km att studeras närmre. För järnvägstunnlar som är mellan 1 – 20 km så ska enligt BVH 585.30 både kvalitativa, kvantitativa och stödjande analyser tillämpas i projekteringsfasen. De kvalitativa analyserna i denna rapport kommer att bestå av en grovanalys. De kvantitativa analyserna kommer att bestå av uppskattningar av sannolikheter och konsekvenser med hjälp av statistiskt underlag eller kvalificerade bedömningar och de stödjande analyserna kommer att bestå av en scenarioanalys av brand och utrymning.

Utöver de analyser som nämns i BVH 585.30 för järnvägstunnlar som är mellan 1 – 20 km långa så kommer även en kostnad-nyttoanalys att tillämpas i detta examensarbete. Detta för att kunna ta reda på om en säkerhetshöjande åtgärd i form av upphöjda gångvägar är samhällsekonomiskt lönsamt eller inte. För att kunna genomföra denna kostnad-nyttoanalys genomförs även kostnadsuppskattningar på de olika tunnelutformningar som behandlas i scenarioanalysen.

5.1. Grovanalys

Enligt BVH 585.30 ska en grovanalys eller liknande genomföras för järnvägstunnlar vars längd överstiger 1000 meter. En grovanalys är en metod som innebär en översiktlig värdering och bedömning av riskkällor (Davidsson, Haeffler, Ljungman, & Frantzich, 2003). Kvalitativa analyser kan tillämpas som stöd för att identifiera olyckshändelser samt för att göra enklare bedömningar av sannolikhet och konsekvens för att kunna genomföra en enklare värdering av de olyckshändelser som identifieras.

När det finns statistiskt underlag eller om det går att genomföra kvalificerade bedömningar av sannolikheter och konsekvenser så kan en kvantitativ analys tillämpas. I en sådan analys uppskattas sannolikheter och konsekvenser för de händelser som tidigare identifierats med hjälp av en kvalitativ analys. Riskmatriser eller händelsetråd kan utgöra ett bra stöd vid denna typ av analyser. När både sannolikheter och konsekvenser uppskattats så kan dessa vägas samman och till exempel jämföras mot olika ambitionsnivåer och/eller olika mått för individ-

och samhällsrisk. Om önskade mått eller ambitionsnivåer inte uppfylls krävs åtgärder och/eller vidare analys. I BVH 585.30 står Trafikverkets ambitionsnivåer angivna både i form av en riskmatris, ett FN-diagram samt i tabellform och dessa nyttjas i grovanalysen.

I BVH 585.30 går det att finna en sammanfattning av tidigare olycksfrekvenser som har tillämpats vid projektering av järnvägstunnlar. Denna sammanfattning kan vara tillämpbart vid uppskattning av sannolikheter.

5.2. Scenarioanalys

Med utgångspunkt från genomförd grovanalys så väljs ett antal värsta troliga scenarier ut för att behandlas vidare i en stödjande analys. En stödjande analys ska enligt BVH 585.30 genomföras för samtliga järnvägstunnlar vars längd överskrider 1000 meter.

I BVH 585.30 beskrivs tre olika typer av stödjande analyser.

- Scenarioanalys av brand och utrymning
- Analys av räddningsinsatsen
- MTO-analyser

I denna analys kommer enbart scenarioanalys av brand och utrymning att tillämpas samt till viss del även MTO-analyser. Analys av räddningsinsatsen är inte aktuellt i denna analys då endast självutrymnings beaktas i enlighet med avgränsningarna i avsnitt 1.5, dvs. att passagerarna på egen hand ska kunna förflytta sig till en säker plats vid en olyckshändelse.

Med hjälp av scenarioanalysen är målet att ta reda på vilken säkerhetshöjande effekt en upphöjning av utrymningsgångvägar för med sig gentemot om utrymning sker via rälsnivå.

Scenarioanalysen genomförs för att ta reda på hur många personer som utsätts för kritiska förhållanden i respektive scenario. För respektive scenario som identifierats i grovanalysen så ska två beräkningar genomföras; en med upphöjda gångvägar och en med gångvägar i rälsnivå. Scenarioanalysen genomförs med hjälp av utrymningsberäkningar och brandberäkningar. Vid beräkning av tid till kritiska förhållanden är det viktigt att beakta att brandförhållandena varierar med avseende på var i tunneln individen befinner sig och vid vilken tidpunkt. Vid scenarioanalysen anses främst giftiga brandgaser, dålig sikt samt värmepåverkan ge upphov till kritiska förhållanden. Både utrymningsberäkningarna och brandberäkningarna grundar sig på data från tidigare genomförda försök, litteraturstudier, kvalitativa och kvantitativa bedömningar, samt på handberäkningsmodeller. De scenarier som väljs i denna analys ska representera ett antal värsta troliga scenarier och osäkerheterna i valet av scenarier behandlas enligt avsnitt 5.5.

För att genomföra beräkningar på utrymningsförloppet i denna analys så tillämpas i viss grad även MTO-analyser för att genomföra bedömningar av besluts- och reaktionstider samt kommunikationstider mellan förare, personal och passagerare.

Scenarioanalysen utförs med en kombination av brandberäkningar, utrymningsberäkningar och beräkning av toxisk påverkan på utrymmade passagerare. Detta i enlighet med FED-modellen, se avsnitt 4.3.

5.3. Kostnadsuppskattningar

För samtliga tunnelutformningar som behandlas i scenarioanalysen så genomförs kostnadsuppskattningar för att bygga de olika utformningarna på järnvägstunneln. Kostnadsuppskattningarna genomförs för att ta reda på vilken extra kostnad som en nybyggnation av järnvägstunnlar resulterar i om gångvägarna höjs upp. Kostnadsuppskattningar genomförs även för att ta reda på vilka kostnadsbesparingar i form av antalet räddade liv som en byggnation av upphöjda utrymningsgångvägar kan resultera i.

Kostnadsuppskattningarna genomförs med hjälp av litteraturer samt i samspråk med experter.

5.4. Bedömning av kostnad-nytta

De scenarier som behandlats, i scenarioanalysen och i kostnadsuppskattningarna, analyseras vidare i en kostnad-nyttoanalys. I kostnad-nyttoanalysen vägs investeringskostnader mot värdet av antalet räddade liv för bedöma om den säkerhetshöjande åtgärden är samhällsekonomiskt lönsam eller inte.

5.5. Hantering av osäkerheter

För att öka tillförlitligheten i rapportens resultat är det viktigt att hantera osäkerheter på ett tydligt och strukturerat sätt. Det finns ett flertal olika tillvägagångssätt för att behandla osäkerheter. Paté-Cornell redovisar ett antal olika nivåer för hantering av osäkerheter (Cornell, 1996). Den variant som tillämpas i denna rapport är Paté Cornells nivå 2, dvs. "värsta troliga fall". Vid tillämpning av "värsta troliga fall" används deterministiska och konservativa värden på osäkra parametrar, vilket medför att hänsyn till olika händers sannolikheter vägs in redan i val av ingående parametrar i händelseförloppet. Denna metod kan dock tendera att överskatta risken och på så sätt göra det svårt att verifiera hur konservativt ett resultat verkligen är och på så sätt göra det svårt att bedöma om effekterna av den säkerhetshöjande åtgärden verkligen är så höga som resultatet visar. Genom att osäkra parametrar tilldelas ett konservativt värde så hanteras osäkerheterna indirekt redan då ingående värden till analysen väljs.

De osäkerheter som råder delas vanligen in i kunskapsosäkerheter och stokastiska osäkerheter. Kunskapsosäkerheter kan till exempelvis vara problem i att bedöma sannolikhet till följd av att tillgången till information är låg (Paulsson, 2007). Exempel på kunskapsosäkerheter i denna analys är främst bedömning av sannolikhet och bedömning av kostnader, som bygger på en begränsad statistik och uppskattningar i samspråk med experter. Stokastiska osäkerheter kan vara osäkerheter i parametrar som varierar på grund av den naturliga variationen och slumpen (Paulsson, 2007). Nedan listas några av de osäkerheter som anses kunna ha markant inverkan på denna analys resultat.

- Bedömning av sannolikheter
- Bedömning av kostnader
- Osäkerheter i indata till brand- och utrymningsberäkningarna
 - Vindens hastighet och riktning
 - Passagerarantal och andelen passagerare med funktionsnedsättning
 - Tågets längd
 - Brandens effektutveckling och tillväxthastighet
 - Belysning i tunneln

6. Grovanalys

6.1. Riskidentifiering

I avsnitt 4.1 redovisas ett antal tänkbara brandorsaker varav tekniska och elektriska fel är de vanligaste (Carvel & Marlair, 2005). En brand i en järnvägstunnel kan till exempelvis starta i ett tåg eller i tunnelns installationer.

I enlighet med avsnitt 5.5 så kommer enbart "värsta troliga scenarier" att tillämpas i denna analys. En kvalitativ bedömning görs med utgångspunkt från vilket scenario som är det värsta troliga som kan inträffa i en järnvägstunnel. Det värsta troliga scenariot som kan inträffa inne i en järnvägstunnel antas vara ett scenario som utsätter ett stort antal individer för fara. De tåg som anses transportera störst antal individer är fullsatta persontåg under rusningstrafik. I denna analys behandlas därmed ett fullsatt persontåg under rusningstrafik som tvingas stanna inne i en järnvägstunnel till följd av en brand.

Alternativet att studera en brand i nattåg med sovvagnar har också övervägts. Dock är personantalet vid fullsatta nattåg lägre än för sittvagnar och samtliga nattåg anses idag vara försedda med automatiskt brandlarm och utrymningslarm, vilket innebär att förflyttningen i ett nattåg inte bör påbörjas betydligt senare än i ett persontåg med vakna passagerare.

6.2. Sannolikhetsbedömning

Sannolikheten för att ett persontåg ska stanna i tunneln till följd av en brand är, enligt tidigare genomförda sannolikhetsbedömningar vid projektering av järnvägstunnlar, låg (Paulsson, 2007). Om en brand inträffar i ett tåg som befinner sig i en tunnel så har dagens tågförare tydliga direktiv om att köra ut det brinnande tåget från tunneln om så är möjligt (Paulsson, 2007). För att undvika att tåget nödbromsas inne i tunneln är dagens modernare persontåg försedda med nödbromsblockering, detta i enlighet med TSD kraven. Nödbromsblockeringen innebär att ett tåg inte kan nödbromsas utan förarens godkännande. Med hjälp av kvalitativa bedömningar anses att ett brinnande persontåg som färdas i en tunnel med största sannolikhet därmed kommer att köra ut ur tunneln (99 %) innan föraren stoppar tåget om inte brandorsaken är en urspårning, kollision, sabotage eller någon form utav sammanstötning som direkt leder till att tåget stannar i tunneln (1 %).

I denna rapport behandlas endast enkelspåriga järnvägstunnlar i enlighet med avgränsningarna i avsnitt 1.5. Detta innebär att frekvensen för en del risker bör minskas i viss utsträckning, så som risken för sammanstötning och risken för urspårning. Anledningen till att risken för sammanstötning kan anses minska i enkelspåriga järnvägstunnlar grundar sig främst på att det inte finns några plankorsningar eller mötande tåg som kan orsaka en kollision eller sammanstötning. Anledningen till att även risken för urspårning anses minska något beror främst på att enkelspåriga tunnlar generellt har ett mindre antal växlar och signaler som kan ställa till problem och föranleda en urspårning.

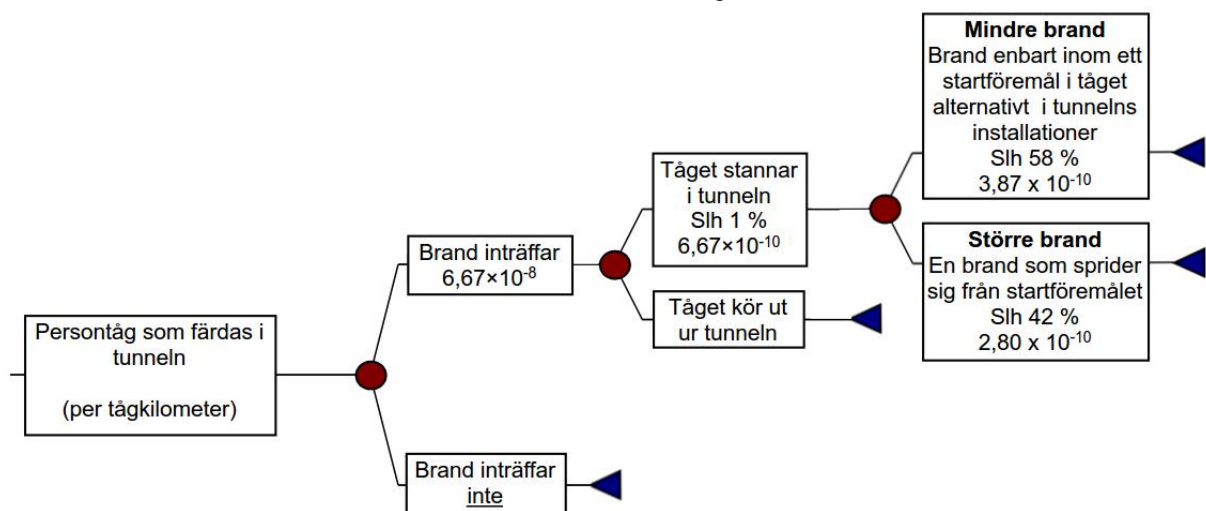
Olycksfrekvenser

I BVH 585.30 redovisas ett antal olycksfrekvenser som använts i samband med projektering av idag befintliga järnvägstunnlar samt generisk data. De tunnlar som studerats närmre är bland annat Citybanans tunnlar, Citytunnelns tunnlar, Hallandsåstunneln och Ådalsbanan (Paulsson, 2007).

I appendix 2 har en sammanfattning gjorts i tabellform utifrån de olycksfrekvenser som anges i handboken BVH 585.30 och som berör just brand i persontåg. Bedömningarna av olycksfrekvens anges i olyckor per tågakilometer. Sammanfattningen av tidigare genomförda bedömningar av olycksfrekvenser samt generisk data resulterar i ett medelvärde på $6,67 \times 10^{-8}$ och en median på $4,44 \times 10^{-8}$ bränder per tågakilometer för persontåg.

Tyvärr finns det varken bra statistik eller bra försök som visar hur stor sannolikheten för spridning är inom och mellan olika tågvagnar. För att få en uppfattning av hur stor sannolikheten är att branden sprider sig från startföremålet, innan någon har hunnit släcka den eller att branden har slocknat av sig själv, används istället statistik framtagen av MSB över hur en brand sprider sig i bostäder. Enligt MSB (2009) släcks eller slocknar cirka 58 % av bränderna innan de hinner sprida sig vidare från startföremålet. Utifrån denna rapport görs det grova och kvalitativa antagandet om att 58 % av de bränder som inträffar i persontåg endast sprider sig inom startföremålet och att 42 % av de bränder som inträffar i persontåg sprider sig från startföremålet och därmed genererar en större brand.

Enligt händelseträdet i Figur 12 är sannolikheten för att ett brinnande persontåg stannar inuti en tunnel cirka $6,7 \times 10^{-10}$. Sannolikheten för att en sådan brand mynnar ut i ett händelseförlopp där branden endast sprider sig inom startföremålet eller inom tunnelns installationer är cirka $3,9 \times 10^{-10}$ och sannolikheten för att branden utvecklar sig till en större brand är cirka $2,8 \times 10^{-10}$.



Figur 12. Händelseträd för brand i ett persontåg som befinner sig inne i en tunnel med tillhörande sannolikheter och olycksfrekvenser.

6.3. Konsekvensuppskattning

Mindre brand

En mindre brand kan till exempelvis vara en brand som inträffar i järnvägstunnelns installationer eller bränder som inträffar i tåget men som endast sprider sig inom startföremålet. En stor del av de bränder som inträffar inne i tåg självslocknar eller släcks av passagerare eller tågpersonal i ett tidigt skede. Om en brand uppstår inne i tunneln och dess installationer, så som kablar och belysning, bedöms brandbelastningen vara relativt låg.

En mindre brand anses med avseende på en relativt låg effektutveckling medföra små konsekvenser. En mindre brand anses inte medföra att passagerare omkommer, dock föreligger

risk för materiella skador på tåget och tunneln samt att enskilda passagerare skadar sig till följd av att de befinner sig väldigt nära branden eller att de skadar sig under ett släckningsförsök.

Konsekvenserna av en mindre brand uppskattas därmed till konsekvensklass K1-K2 i enlighet med BVH 585.30. Konsekvensklasserna beskrivs närmre i avsnitt 3.3.

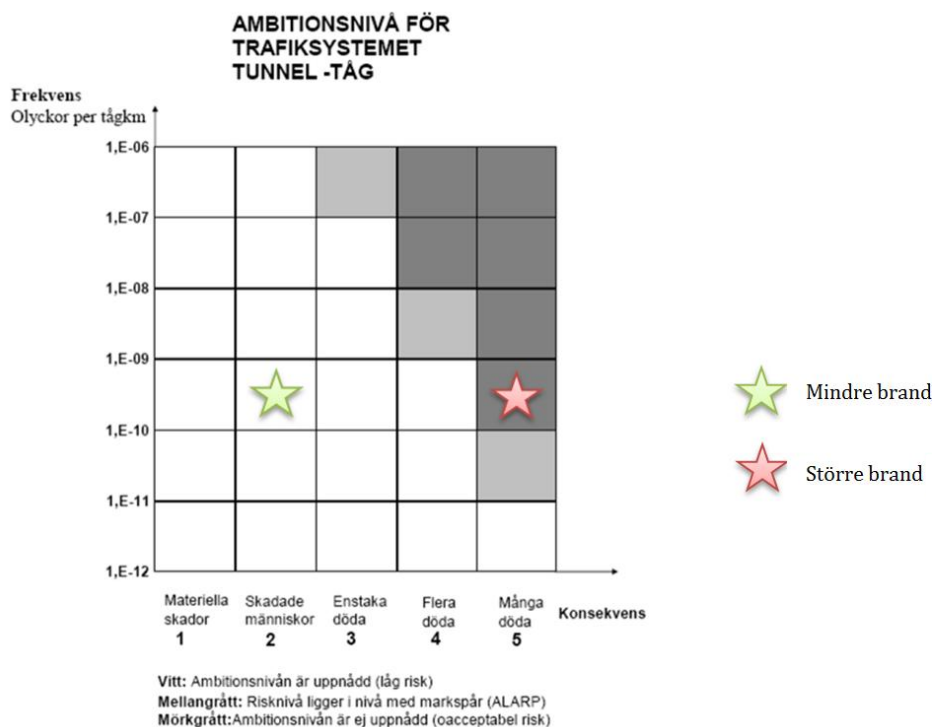
Större brand

En brand som sprider sig från startföremålet och inom en hel vagnsdel anses kunna leda till stora konsekvenser för passagerarna. En sådan effektutveckling kan leda till att kritiska förhållanden uppstår för passagerarna under utrymningsförloppet och utsätta passagerarna för giftiga brandgaser, dåligt sikt och höga temperaturer. I värsta fall kan dessa förhållanden leda till att passagerarna blir medvetlösa eller till och med omkommer.

Konsekvenserna av en större brand som sprider sig inom en hel passagerarvagn uppskattas till konsekvensklass K1-K5 i enlighet med BVH 585.30.

6.4. Riskmatris

Bedömningarna av sannolikhet och konsekvens sammanfattas med hjälp av riskmatrisen i Figur 13 som grundar sig på Trafikverkets ambitionsnivå som är angiven i BVH 585.30.



Figur 13. I denna riskmatris sammanfattas resultatet från sannolikhets- och konsekvensuppskattningarna, där sannolikhet och konsekvens för två olika händelseförlopp redovisas. Notera att endast de högsta konsekvensklasserna anges för respektive händelseförlopp.

Mindre bränder som endast sprider sig inom startföremålet förväntas inte medföra att passagerare omkommer och enligt riskmatrisen ovan bör sådana bränder uppfylla Trafikverkets ambitionsnivåer med marginal. Därmed analyseras inte "mindre bränder" vidare i kommande analyssteg.

De händelseförlopp som studeras vidare är istället de händelseförlopp som leder till stora konsekvenser i form av större bränder. Anledningen till att enbart de händelseförlopp som leder till stora konsekvenser analyseras vidare grundar sig på att denna analysmodell tillämpar verifieringsmetoden scenarioanalys där "värsta troliga scenarier" studeras närmre. Dessa bränder bedöms kunna medföra att passagerare omkommer, vilket innefattar konsekvensklass K3-K5 i riskmatrisen ovan.

Med utgångspunkt från det resultat som redovisas i riskmatrisen beslutas att de händelseförlopp som befinner sig inom de gråmarkerade områdena i riskmatrisen ska analyseras vidare i kommande analyssteg.

7. Scenarioanalys

7.1. Val av scenarier

Scenarioanalysen kommer att utföras på ett antal olika scenarier där hälften av scenarierna behandlar utrymning via upphöjda gångvägar och hälften av scenarierna behandlar utrymning via gångvägar placerade i rälsnivå. Ett antal grundförutsättningar kommer att vara identiska för samtliga scenarier, men för att genomföra en enklare känslighetsanalys varierar ett antal betydande parametrar och indata.

Exempel på parametrar och indata som måste bestämmas innan beräkningar påbörjas är brandens startpunkt, brandens effektutveckling och tillväxthastighet, vindriktning och vindhastighet, temperatur, tågets utformning, passagerarmängd och passagerarnas egenskaper, tid till påbörjad utrymning, tunnelns utformning, etcetera.

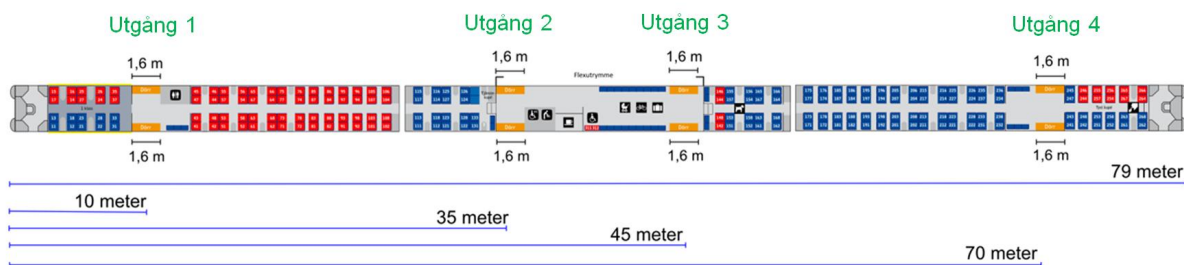
7.1.1. Konstanta indata

Grundförutsättningarna för scenarioanalysen är i att ett fullsatt persontåg under rusningstrafik befinner sig inne i en enkelspårig borrarad järnvägstunnel. Ett värsta troligt händelseförlopp anses vara att tåget tvingas stanna inne i tunneln till följd av en brand och att branden utvecklar sig till en "större brand" vilket skapar ett behov av att snabbt utrymma tåget.

Tågmodell och passagerarmängd

För samtliga scenarier ansätts en tågmodell och personbelastning som motsvarar ett vanligt förekommande persontåg under rusningstrafik. Variabler som förväntas ha stor inverkan på scenarioanalysens resultat, med avseende på tågmodell och passagerare, är bland annat tågets längd, antal vagnar, antal dörröppningar, dörröppningarnas bredd, avstånd från dörröppningar till marknivå, plant insteg eller trappa, planlösning inne i tåget, antal personer med funktionsnedsättning samt maxbelastning av passagerare.

I samtliga scenarier kommer Öresundstågen att användas som utgångspunkt för att representera ett modernt elmotordrivet persontåg med hög personbelastning med målet att kunna spegla både dagens och framtidens behov. För att avgränsa rapportens omfattning studeras endast ett tågsätt. Tågsättet anses ha maximal trolig personbelastning under samtliga scenarier. I Figur 14 visas en skiss på ett tågsätt av modell Öresundståg.



Figur 14. Skissen illustrerar ett typ exempel på ett tågsätt modell Öresundståg, bland annat så framgår tågets längd, dörröppningarnas placering samt en namngivning av utgångarna.

Ett sådant tågsätt har cirka 229 sittplatser och med ståplatser inräknat anses cirka 240 passagerare kunna sitta i tågsättet vid olyckstillfället (Öresundståget.se, 2013). Tågsättet är cirka 79 meter långt och har åtta dörröppningar placerade enligt figuren ovan med en dörrbredd på vardera 1600 mm (Öresundståget.se, 2013).

Passagerarnas fysiska status kan variera kraftigt och inkludera allt ifrån ungdomar med god fysik till barn, äldre, rullstolsburna, etcetera. För mer information kring möjligheten till självutrymning från ett Öresundståg för personer med nedsatt rörelseförmåga hänvisas till appendix 8.

Enligt Andersson (2012) har cirka 3,5 % av Sveriges befolkning som befinner sig i den aktiva åldern mellan 16 och 64 år en omfattande nedsatt rörelseförmåga. För den äldre delen av befolkningen, 65-84 år är andelen personer med omfattande nedsatt rörelseförmåga betydligt högre, cirka 18,4 % (Andersson, 2012).

Fullsatta persontåg anses främst förekomma under rusningstrafik. Därför kan det vara rimligt att avgränsa sig till att merparten av de personer som befinner sig i tåget tillhör den aktiva åldern mellan 16 och 64 år. I scenarioanalysen kommer därför 3,5 % av de personer som befinner sig på tåget ansättas ha en omfattande nedsatt rörelseförmåga. Det bör noteras att denna procent kan vara något i underkant vid tidpunkter då rusningstrafik inte råder. Detta på grund av att äldre personer, med en högre andel nedsatt rörelseförmåga, tenderar att transportera sig på andra tider än vid just rådande rusningstrafik.

I Tabell 3 redovisas de siffror som tillämpas för scenarioanalysen gällande tågets utformning och personantal.

Tabell 3. Siffror för det tågsätt som behandlas i scenarioanalysen.

Antal passagerare per tågsätt	240 passagerare (229 sittplatser)
Tågets totala längd	79 meter
Antal dörröppningar	8 stycken
Dörröppningarnas bredd	1600 mm
Antal passagerare med nedsatt rörelseförmåga	Cirka 8 personer (3,5 %)

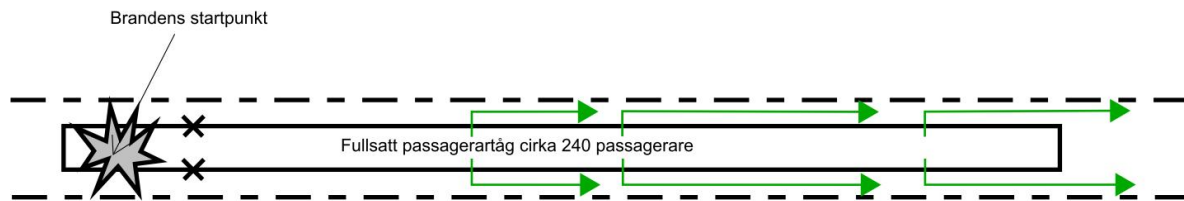
Brandens placering i tåget

Beroende på var branden är placerad kan utrymningsscenarierna se väldigt olika ut. När de utrymmande personerna tagit sig ner till utrymningsgångvägen ska de välja utrymningsriktning, höger eller vänster. Ser de utrymmande personerna rök eller brand i en av riktningarna är det högst troligt att de instinktivt väljer den motsatta riktningen. Om branden är placerad i en av tågsättets ändar innebär detta att samtliga passagerare tenderar att utrymma åt samma håll. Om branden däremot startar någonstans mitt i tåget bör passagerarna som befinner sig till höger om branden tendera att utrymma åt höger och passagerarna som befinner sig till vänster om branden tendera att utrymma åt vänster.

För att analysen inte ska bli för omfattande behandlas endast den placering av branden som innebär att samtliga passagerare utrymmer åt samma håll. Då endast denna brandplacering behandlas bör det noteras i vidare analyser att det är ett konservativt antagande att samtliga personer utrymmer åt samma håll, det vill säga bort från brandens startpunkt. Detta innebär att samtliga passagerare riskerar att utsättas för brandgaserna och att flödet utmed utrymningsgångvägarna blir betydligt högre då samtliga passagerare utrymmer åt samma håll.

Branden antas konservativt starta inne i en personvagn och hindra utrymning via två av passagerartågets åtta dörröppningar.

I Figur 15 illustreras var branden startar i tågsättet samt åt vilket håll som passagerarna tenderar att utrymma.



Figur 15. Skiss över brandens startpunkt i tågsättet samt vilken riktning passagerarna tenderar att utrymma. Notera att skissen inte är helt skalenlig.

Självutrymningsprincipen

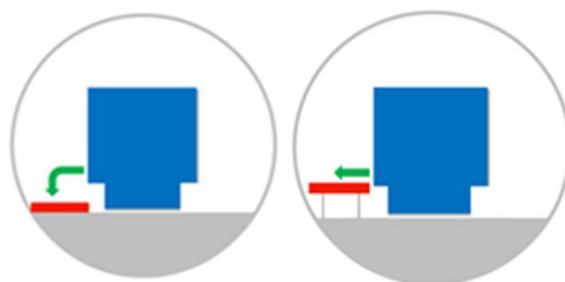
I denna rapport tillämpas självutrymningsprincipen i enlighet med BVH 585.30. Det innebär att varje person på egen hand ska kunna förflytta sig till en säker plats innan de utsätts för kritiska förhållanden. Ingen yttre assistans tas med i analysen. Anledningen till att ingen yttre assistans tas i beaktande beror främst på den komplexitet som en räddningsinsats inne i järnvägstunnlar kan innebära. Även Bergqvist et al. (2001) har gett ut en rapport som tydligt förklarar att utrymningsstrategin ur en järnvägstunnel bör grunda sig på självutrymning och inte förlita sig på räddningstjänstens insats.

I rapporten BVH 585.30 betonas dock att självutrymning inte kan förutsättas för samtliga passagerare. Exempel på passagerare som inte kan förutsättas självutrymma är; skadade personer, fastklämda eller instängda personer, personer utan normala fysiska förutsättningar för att självutrymma samt personer som agerar irrationellt (Paulsson, 2007).

Tillgång till utrymningsvägar samt utrymningsstrategi

I samtliga scenarier antas två av de åtta dörröppningarna avskärmas av branden och således göra dem obrukbara under själva utrymningsförloppet.

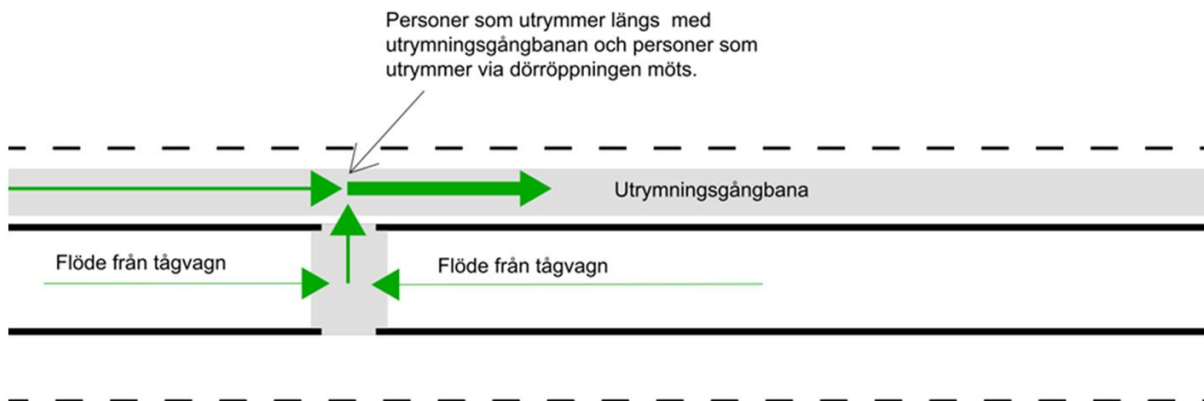
Två olika utrymningsstrategier studeras och dessa strategier beror på tunnelns utformning. Den första utrymningsstrategin symboliseras av utrymning via gångvägar i rälsnivå och den andra utrymningsstrategin symboliseras av utrymning via upphöjda gångvägar, vilket illustreras i Figur 16.



Figur 16. Den översta figuren illustrerar utrymning via rälsnivå och i den nedersta bilden illustreras utrymning via upphöjda gångvägar. Notera att figurerna inte är skalenliga.

I samtliga scenarier förutsätts att tåget står upprätt efter stoppet i tunneln. Självutrymningsprincipen innebär att passagerarna på egen hand ska kunna förflytta sig till tågets dörröppningar, ta sig ner till den utrymningsgångväg som finns placerade längs med

spåret. Figur 17 illustrerar hur utrymningsflödet kan tänkas se ut vid en av tågets dörröppningar.



Figur 17. Hur flödet av utrymmande passagerare varierar och riskerar att bilda flaskhalsar vid en av dörröppningarna.

När de utrymmande passagerarna väl tagit sig ner till utrymningsgångvägen så ska de förflytta sig längs med utrymningsgångvägen tills de når en utrymningsväg som leder till en säker plats.

Utrymningsvägar som betjänar fler än 150 personer bör enligt Boverkets byggregler, vars regler dock ej är tillämplbara för järnvägstunnlar, ha tillgång till minst två oberoende utrymningsvägar (Boverket, 2011). På grund av att ett fullsatt tågsätt utryms i scenarioanalysen görs en kvalitativ uppskattning av att det är lämpligt att genomföra utrymningsberäkningarna med två utrymningsgångvägar och inte en utrymningsgångväg som är minimikravet enligt TRVK Tunnel 11 och TSD SRT.

Gångsträcka och tågets placering i tunneln

De utrymmande personernas gångsträcka kan variera mellan 0-500 meter längs med utrymningsgångvägen till en utrymningsväg beror på var branden startar, var tåget är stannat i förhållande till utrymningsvägarna samt vilken vagn den utrymmande individen befinner sig i samt vilken dörröppning individen väljer att använda sig av.

Gångsträckan till närmsta utrymningsväg påverkar direkt hur länge de utrymmande personerna kommer att befinna sig i tunneln och därmed vilken mängd giftiga och varma brandgaser de kommer att utsättas för. De händelseförlopp som innebär att de passagerare som befinner sig längst ifrån en utrymningsväg måste förflytta sig cirka 500 meter för att nå fram till en utrymningsväg väljs vilket är ett konservativt antagande, dvs. tåget stannar i ett ogynnsamt läge i förhållande till utrymningsvägarna. I Figur 18 illustreras hur utrymningsvägen till vänster om tåget avskärras av branden och i vilken riktning passagerarna tvingas utföra sin förflyttning.



Figur 18. Skissen visar hur en av utrymningsvägarna avskärras av branden och tvingar samtliga passagerare att utrymma åt höger.

Parametrarna ovan kan både variera och innehålla osäkerheter. Vid val av dessa parametrars värden tillämpas konservativa värden, dock med kvalitativt rimliga bedömda kombinationer.

Tid till påbörjad utrymning

Vid val av tid till påbörjad utrymning används litteraturstudien i avsnitt 4.2.1 som stöd. Tid till påbörjad utrymning kan variera mellan omkring 2-12 minuter och variationen beror främst på vilken information passagerarna får tillgång till via föraren eller tågpersonalen genom tågets högtalarsystem. I samtliga scenarier som studeras förutsätts att det är ett relativt modernt persontåg som stannar inne i tunneln till följd av en brand, därför görs ett kvalitativt antagande av att föraren i tåget har möjlighet att informera passagerarna om olycksituationen via tågets högtalarsystem.

Om branden inträffar inne i ett fullsatt passagerartåg så anses tiden till påbörjad utrymning vara relativt kort då passagerarna kan detektera branden i ett tidigt skede. För ett sådant scenario väljs en relativt kort tid till påbörjad utrymning på 3 minuter. Dessa tre minuter anses innefatta den tid det tar från att branden utbrutit tills att tåget stannat och utrymning påbörjats. För att tid till påbörjad utrymning inte ska vara längre än 3 minuter ansätts grovt följande tidssteg. En tidig detektion av branden förutsätts till följd av det automatiska brandlarmet eller på grund av att passagerarna som befinner sig i den brinnande vagnen meddelar tågpersonalen i ett tidigt skede (60 s). När tågpersonalen fått vetskap om branden och kontrollerat att det verkligen brinner tas ett beslut om evakuering (30 s). Om tåget fortfarande rör sig framåt måste föraren stanna tåget (60 s). Under eller efter inbromsning uppmanar tågpersonalen eller föraren passagerarna till utrymning med hjälp av ett talat meddelande via tågets ordinarie hörtalarssystem. När meddelandet väl nått fram till passagerarna så har de en individuell besluts- och reaktionstid innan de väl påbörjar sin förflyttning (30 s).

Om branden istället skulle starta på ett mer dolt ställe så som i järnvägstunnelns konstruktion eller under en passagerarvagns golv eller tak anses varseblivningstiden bli betydligt längre. För att analysera ett sådant scenario väljs en betydligt längre varseblivningstid på 6 minuter och den totala tiden till påbörjad utrymning anses i enlighet med ovan angivna antaganden bli 8 minuter.

Avstigningstid

Utifrån teorin i avsnitt 4.2.1 antas ett utrymningsflöde på cirka 0,25 passagerare per sekund oberoende av dörrbredden för utrymning via gångvägar i rälsnivå. Till grund för detta val ligger främst resultaten från Frantzich utrymningsförsök år 2000 samt Fridolf, Nilssons och Frantzich utrymningsförsök år 2013. Utrymning via upphöjda utrymningsgångvägar antas i sin tur ha ett utrymningsflöde på cirka 0,7 passagerare per sekund. Flödet 0,7 passagerare per sekund grundar sig på tidigare försök, främst Heinz och Kottenhoff (2001) som redovisar en medelavstigningstid på 1,4 sekunder per resenär vid plant insteg samt Winér och Noréns rapport som via studier visar att personflödet halveras från ingen höjdskillnad till en höjdskillnad på upp till 0,7 meter.

De valda avstigningstiderna ovan anses vara oberoende av dörrbredden då tidigare nämnda referenser så som Norén och Winér samt Oswald et al.(2005) via försök har konstaterat att bredden på tågets dörröppning inte är av avgörande betydelse för personflödet genom dörröppningarna.

Brandens effektutveckling och tillväxthastighet

Vid val av brandscenarier väljs sådana bränder som i hög utsträckning kan påverka personsäkerheten. Enligt grovanalysen analyseras endast de bränder som sprider sig inom en hel vagn.

För att illustrera ett värsta troliga scenario behandlas en 20 MW brand med en snabb tillväxthastighet på cirka 0,047 kW/s², denna effektutveckling ansätts med utgångspunkt från litteraturstudierna i avsnitt 4.1. En 20 MW brand anses kunna utgöra en trolig brand för moderna tåg i stålkonstruktion bland annat enligt Ingason och Lönnermark (2004). En större maxeffekt väljs inte för att representera ett värsta troliga scenario, detta främst på grund av att de flesta fönster i tågvagnen anses vara intakta efter att olyckan har skett samt på grund av att tågvagnen förväntas uppfylla vissa brandkrav på inredningen. Dessutom är det viktigt att tilläggas att det mindre konservativa antagandet görs om att brandspridning inte sker till den intilliggande vagnen.

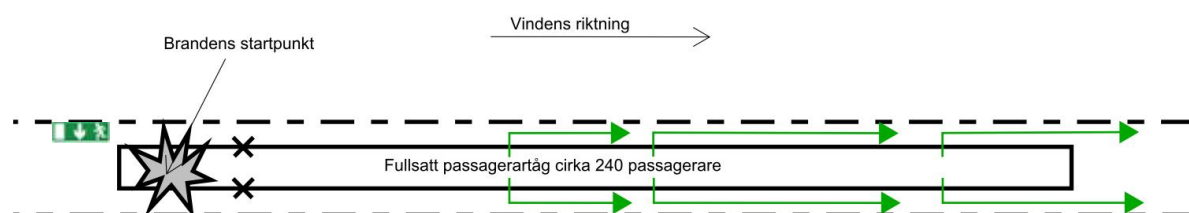
Flertalet studier och rapporter samt handboken BVH 585.30 rekommenderar i enlighet med litteraturstudierna i avsnitt 4.1 en maxeffekt på 15 MW och en tillväxthastighet på cirka 0,012 kW/s² (α) för en brand i en modern passagerarvagn med stålkonstruktion. Utöver 20 MW branden bedöms därmed även en brand med en maxeffekt på 15 MW och en tillväxthastighet på cirka 0,012 kW/s² vara lämplig att studera. Om branden däremot startar under vagnens golv eller i vagnens tak eller väggar så anses tillväxthastighet vara något lägre, därför studeras även en 15 MW brand med en låg tillväxthastighet på 0,0029 kW/s².

Bränder med lägre effektutvecklingar anses också utgöra troliga scenarier för en brand i en modern passagerarvagn. Dock analyseras endast de bränder som anses vara något mer konservativa.

Vindhastighet och vindriktning

Brandgasernas spridning och skiktning är starkt beroende av vindens hastighet och riktning. I tunnar föreligger nästintill alltid en viss vind på grund av lutningar, väderförhållanden utanför tunneln, temperaturskillnader, tågrörelser i tunneln, etcetera (Paulsson, 2007). Låga vindhastigheter förutsätts medföra att de utrymmande personerna utsätts för sämre förhållande än vid höga vindhastigheter då höga vindhastigheter sprider ut brandgaserna mer och således minskar dess koncentration.

Gynnsamma vindriktningar har visat sig underlätta utrymningen avsevärt då de utrymmande personerna i bästa fall inte alls behöver utrymma genom de giftiga och varma brandgaserna och i denna analys ska osäkerheterna hanteras främst med konservativa val av parametrar och därmed studeras enbart ogynnsamma vindriktningar.

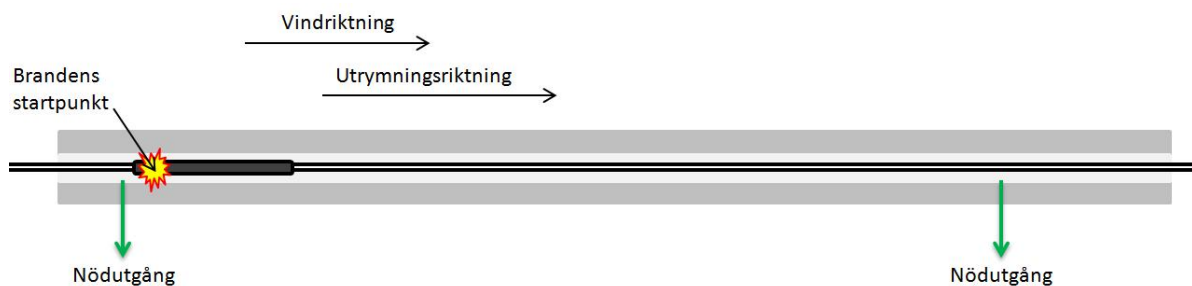


Figur 20. Skissen illustrerar en ogynnsam vindriktning, vilket medför att de giftiga och varma brandgaserna sprider sig mot de utrymmande passagerarna.

Vid val av vindhastighet behandlas främst de fall som tros leda till störst fara för de utrymmande passagerarna. Vid mycket låga till låga vindhastigheter sprider sig brandgaserna relativt långsamt längs med vindens riktning vilket bör innebära att koncentrationerna av brandgaser i närheten av branden bli högre än då högre vindhastigheter råder. För att analysera ett scenario där de utrymmande personerna utsätts för så höga brandgaskoncentrationer som möjligt studeras en låg vindhastighet på 0,5 m/s. För att analysera ett scenario där så många passagerare som möjligt tvingas utrymma genom brandgaserna, dock i något mer utspädd form, studeras även en måttlig vindhastighet på 1,5 m/s där brandgaserna sprider sig fortare längs med tunneln i vindens riktning.

7.1.3. Sammanfattning av valda scenarier

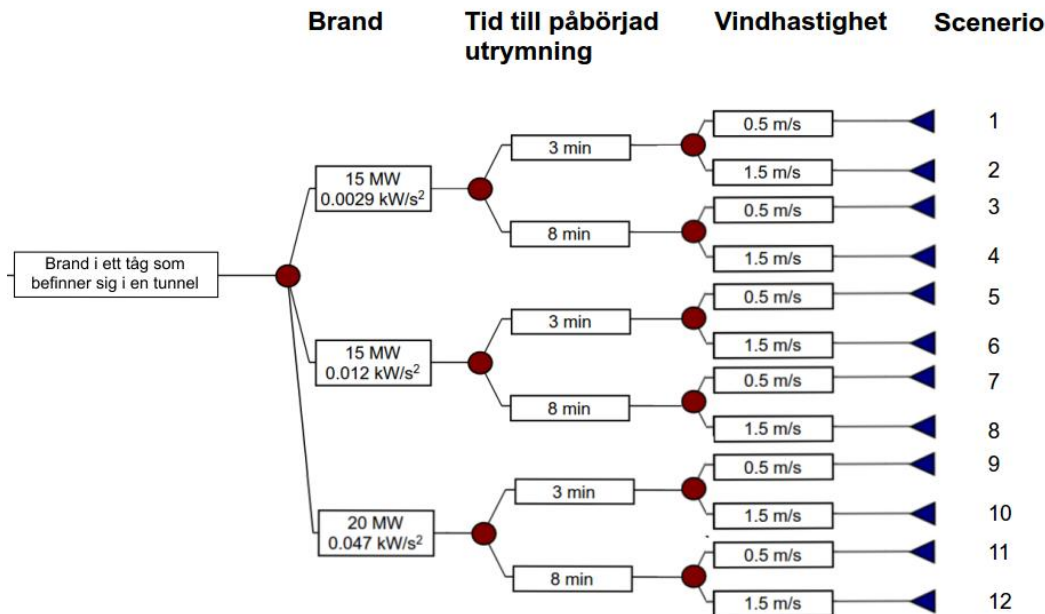
I Figur 21 redovisas några av de förutsättningar som gäller för samtliga scenarier. I bilden kan bland annat brandens startpunkt, tågets placering i förhållande till nödutgångarna, vindriktning samt utrymningsriktning utläsas. Dessa grundförutsättningar är de samma för samtliga scenarier.



Figur 21. Skiss över tågets placering i tunneln. Notera att skissen inte är helt skalenlig.

I samtliga scenarier utförs beräkningarna på ett tågsätt av modellen Öresundståg. Totalt antas 240 passagerare befinna sig på tåget vid olyckstillfället. I samtliga scenarier finns två tillgängliga utrymningsgångvägar, en på varje sida om spåret. Sex av åtta dörröppningar antas vara tillgängliga för utrymning och ha en bredd på vardera 1600 mm.

I Figur 22 nedan anges de 12 scenarier som ska beräknas, där brandens effekt och tillväxthastighet, tid till påbörjad utrymning samt vindhastighet varierar mellan de olika scenarierna. För varje scenario genomförs två beräkningar; en med upphöjda gångvägar och en med gångvägar i rälsnivå.



Figur 22. Samtliga scenarier som ska beräknas med respektive utan upphöjda utrymningsgångvägar.

Tillsammans påverkar kraven och råden i avsnitt 2.2 projekteringen av utrymningsvägar inne i tågtonnar utifrån ett utrymnings- och brandsäkerhetsperspektiv. Nedan sammanfattas de krav och råd med avseende på projektering av utrymningsgångvägar och utrymningsvägar som är aktuella för de scenarier som studeras.

Tabell 4. Sammanställning av krav och råd som påverkar dimensioneringen av utrymningsgångvägar och utrymningsvägar.

Sammanställning av de krav och råd som gäller vid dimensionering av utrymningsvägar och utrymningsgångvägar för enkelspåriga järnvägstunnlar i Sverige vars längd överskrider 1000 m	
Antal gångvägar:	Krav på minst en gångväg i enkelspåriga tågtonnar.
Maximalt avstånd mellan tvärtunnlar: (tvärtunnlar ska byggas mellan parallella tågtonnar)	500 meter
Minsta bredd på gångvägen:	1,2 meter* (ledstänger ska placeras utanför gångvägens minimibredd)
Minsta fria höjd ovanför gångvägen:	2,25 meter
Minimimått för nödutgång:	2,25 x 1,5 meter (h x b)
Minimimått för dörr i nödutgång:	2,0 x 1,4 meter (h x b)
Det fria utrymnet längs med banan:	Dimensioneras i enlighet med Banverkets föreskrift (BVF 586.20)

* Lokala trånga passager som orsakas av hinder i utrymningsområden ska undvikas. Förekomsten av hinder får inte minska minimibredden till mindre än 0,7 m och hindret får inte vara längre än 2 m.

7.2. Beräkning av utrymningsförlopp

Utrymningsförloppet kan beräknas antingen med hjälp av handberäkningsmodeller eller med hjälp av datoriserade utrymningsmodeller, dock tillämpas enbart handberäkningsmodeller i denna analys.

Den främsta anledningen till att handberäkningsmodeller tillämpas är på grund av att de är betydligt mindre tidskrävande än de datoriserade utrymningsmodeller, vilket innebär att man på ett betydligt enklare sätt kan variera flertalet av de ingående parametrarna och erhålla snabba resultat. Dessutom är de datoriserade utrymningsprogrammen i första hand anpassade

till helt andra geometrier än tunnelmiljöer så en justering av dessa hade varit nödvändig om de tillämpats.

Utrymningsberäkningarnas ekvationer och utförande redovisas mer ingående i appendix 4. Handberäkningarna har genomförts med hjälp av en datorberäkning som redovisas i appendix 5, detta för att förkorta beräkningstiden.

7.3. Beräkning av brandförlopp

Vid beräkning av brandförlopp kan både handberäkningar och CFD-beräkningar tillämpas, se avsnitt 4.1.3. I denna rapport utesluts dock CFD-beräkningar på grund av att de är väldigt resurs- och tidskrävande vid beräkning av brandgasspridning. I denna analys ska ett relativt stort antal brandscenarier beräknas och därmed är endimensionella handberäkningsmodeller mer tillämpbara.

Brandberäkningarnas ekvationer och utförande redovisas mer ingående i appendix 6. Handberäkningsmodellen för brandförhållanden redovisas även i appendix 5 i form av Matlab skript.

7.4. Utrymningsförhållanden vid brand

För att uppnå en acceptabel utrymningssäkerhet får den förväntade utrymningstiden inte överskrida tiden tills förväntade kritiska förhållanden uppstår. I Tabell 2 redovisas de gränsvärden som anges i BVH 585.30 för att en acceptabel utrymningssäkerhet ska uppnås med avseende på temperatur, strålning, sikt samt toxiska gaser. Det är viktigt att poängtera att kritiska förhållanden inte nödvändigtvis behöver innebära personskador eller dödsfall utan endast att utrymningen inte längre kan fortskrida under acceptabla förhållanden.

Det är även viktigt att poängtera att det är de ackumulerade doserna av temperatur, strålning, sikt respektive toxicitet som studeras. I takt med att brandförloppet fortskrider kommer olika brandförhållanden att råda på olika avstånd från branden. Likaså kommer individerna att förflytta sig bort från branden i takt med att brandförloppet fortskrider. De doser som individerna utsätts för beror alltså både på var i tunneln de befinner sig samt vid vilken tidpunkt. Exponeringen av de förhållanden som branden ger upphov till antas pågå från den tidpunkt då respektive individ kliver ur tåget tills att individen befinner sig på en säker plats.

I denna analys beräknas FID (Fractional Incapacitation Dose) samt FLD (Fractional Lethal Dose) som representerar gränsvärden för då medvetlöshet samt dödlighet kan antas inträffa. Dessa gränsvärden redovisas i appendix 7.

De gaskoncentrationer som studeras är koldioxid, kolmonoxid samt syre. Dessutom studeras fraktionsdosen för höga temperaturer. Beräkningar för dessa koncentrationer och temperaturer redovisas i appendix 6. I appendix 7 redovisas hur dessa koncentrationer och temperaturer används för att beräkna fram FID samt FLD värdet.

Med hjälp av endimensionella brandberäkningar bestäms temperatur, koncentrationer av giftiga gaser samt siktsträcka vid olika tidpunkter och vid olika platser i tunneln. På detta sätt kan utrymningsmiljön för de utrymmande personerna bestämmas. Vilken utrymningsmiljö som de utrymmande personerna utsätts för beror på var i tunneln de befinner sig och vid vilken tidpunkt vilket i sin tur bland annat beror på gånghastigheten samt hur lång reaktionstiden är.

För att förenkla och minska omfattningen av antalet beräkningar studeras inte varje enskild individ för sig. Istället studeras en grupp bestående av ett antal individer. Individerna i denna grupp anses utsättas för samma förhållanden under utrymningen och agera likadant. Beroende på scenario delades individerna in i grupper om 8 eller 21 personer, hur stora dessa grupper är beror på hur många individer som hinner förflytta sig från tågets dörröppning ner till gångvägen under ett beräkningssteg på 30 sekunder. Hur många individer som hinner förflytta sig från en dörröppning till gångvägen beror i sin tur främst på höjdskillnaden mellan dörröppning och gångväg. Antagandet görs om att individerna i gruppen exponeras för de brandförhållanden som råder i tunneln först när hela gruppen tagit sig ut ur tåget.

Gånghastigheten påverkas direkt av rådande brandförhållanden i tunneln. Gånghastigheten har visat sig vara starkt beroende av röktätheten och det är just röktätheten som ligger till grund för beräkning av gånghastighet. Minsta gånghastigheten anses dock vara 0,2 m/s oberoende av siktsträcka (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001).

För att beräkna hur gånghastigheten påverkas av siktförhållandena används röktätheten, k , som definieras i appendix 6. Efter att röktätheten beräknats kan gånghastigheten beräknas enligt ekvationerna nedan som bygger både på Jins experiment 1978, SHEBA experimentet 2004 (Galea et al.) samt Frantzich och Nilsson experiment 2004. Den framräknade gånghastigheten beror således på den röktäthet som råder i tunneln där den specifika gruppen befinner sig. Det bör även nämnas att ekvationerna nedan bygger på det konservativa antagandet om att branden alltid genererar en irriterande rök.

Gånghastigheten då $k < 0.23 = 1.142$ [m/s]

Gånghastigheten då $0.23 \leq k \leq 2.00 = 1.24182 - 0.434463 \times k$ [m/s]

Gånghastigheten då $k > 2.00 = 0.373$ [m/s]

I Matlab-beräkningarna sätts tidsdifferensen mellan varje beräkningssteg till 30 sekunder. Hur långt gruppen förflyttar sig inom respektive beräkningssteg beräknas enligt ekvationen nedan.

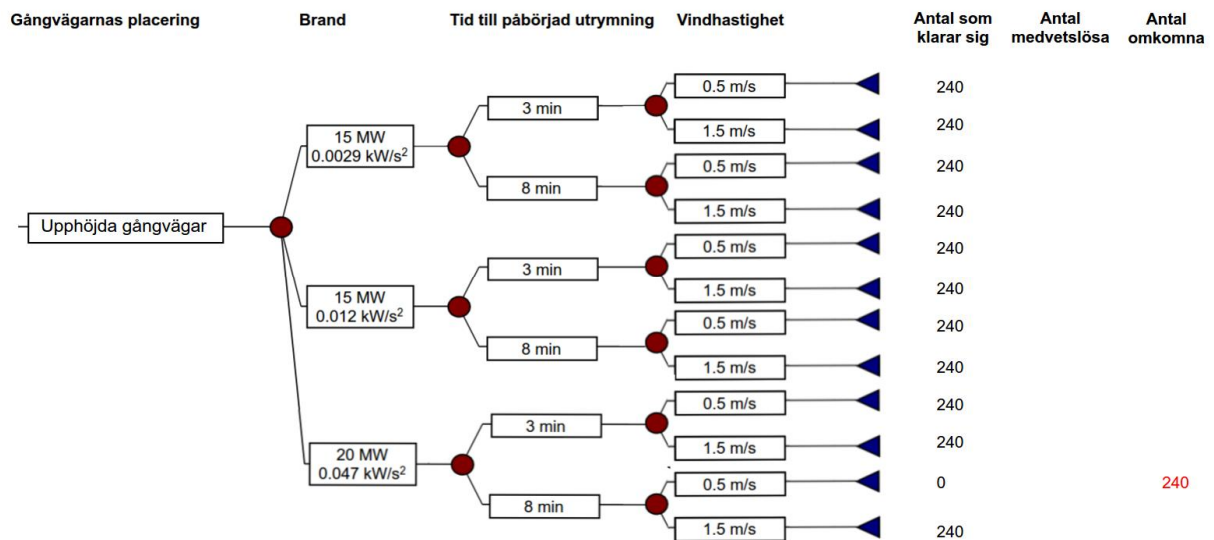
Delta avstånd, $\Delta x = \text{gånghastigheten} \times \text{tidsdifferensen} = \text{gånghastighet} \times 30$

I appendix 7 redovisas beräkningarna för hur höga temperaturer samt inandning av toxiska gaser kan leda till medvetslöshet respektive död. Uppnår gruppen medvetslöshet, $FID=1$, avbryts genast utrymningen för den specifika gruppen och utrymningshastigheten sätts till 0 m/s.

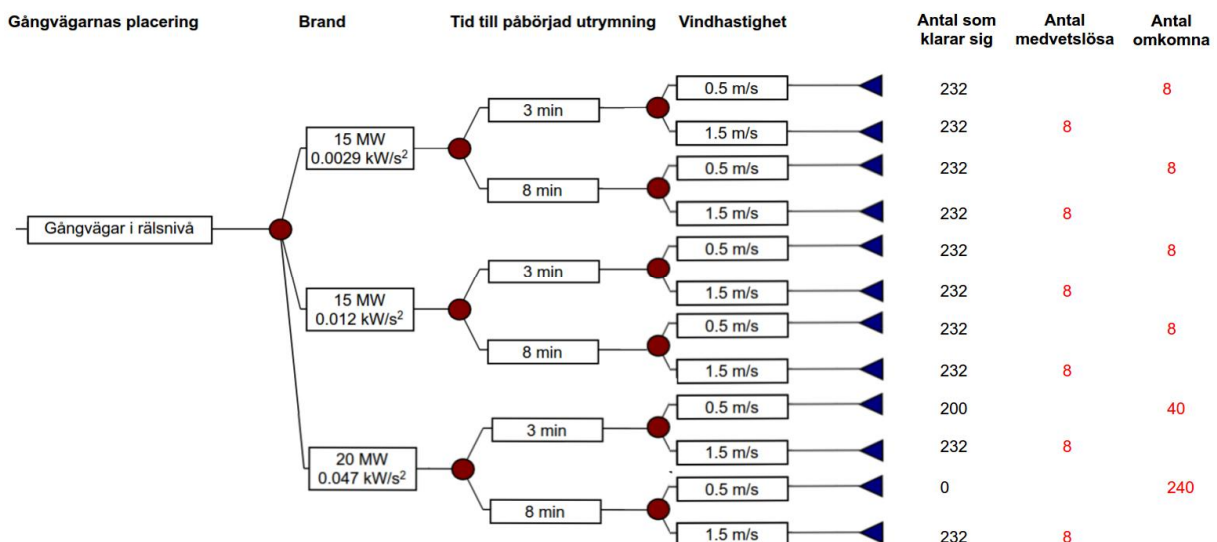
För de scenarier där utrymning sker via rälsnivå utförs även beräkningar där en andel av de utrymmande passagerarna inte anstas kunna utföra den vertikala förflyttningen från tågets dörröppning ner till gångvägen. I enlighet med avsnitt 7.1.1 antas 3,5 % av de 240 passagerare som befinner sig på tåget ha en så omfattande nedsatt rörelseförmåga eller skador till följd av stoppet i tunneln så att de inte kan utföra den vertikala förflyttningen. Förflyttningshastigheten för dessa individer sätts till 0 m/s genom hela utrymningsförloppet och de antas befinna sig jämt fördelade i nivå med tågets dörröppningar.

7.5. Resultat

Resultatet från brand- och utrymningsberäkningarna redovisas i Figur 24 och Figur 23. I figurerna redovisas hur många av de 240 passagerarna som lyckas ta sig till en säker plats innan kritiska förhållanden uppstår då utrymning sker via upphöjda gångvägar samt via gångvägar i rälsnivå. Av de passagerare som inte hinner förflytta sig till en säker plats anges huruvida de endast faller i medvetslöshet eller om de omkommer inom en beräkningstid av 120 minuter.



Figur 23. Resultat från scenarioanalysen då utrymning sker via upphöjda gångvägar.

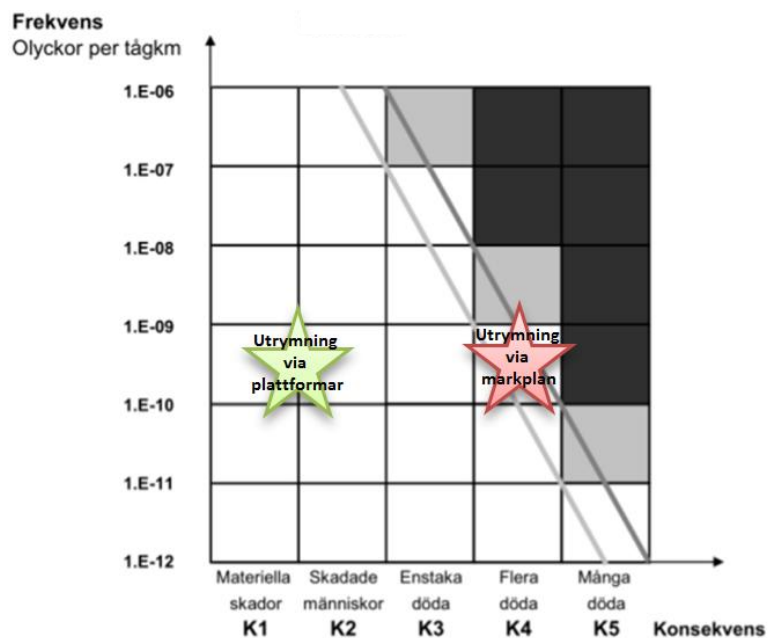


Figur 24. Resultat från scenarioanalysen då utrymning sker via gångvägar i rälsnivå.

I Figur 23 och Figur 24 kan utläsas att vid en brand med en maxeffekt på 15 MW klarar sig samtliga utrymnande personer om utrymning sker via upphöjda gångvägar. Om utrymning däremot sker via rälsnivå så kommer vid hälften av scenarierna 8 personer att falla i medvetslöshet och vid hälften av scenarierna 8 personer att omkomma. Dessa 8 personer utgörs av de 3,5 % av passagerarna som enligt avsnitt 7.1.1 har någon form av funktionsnedsättning och som till följd av sin funktionsnedsättning inte förutsätts klarar av den vertikala flyttningen från tåg till gångväg och således blir stillastående under hela beräkningstiden på 120 minuter.

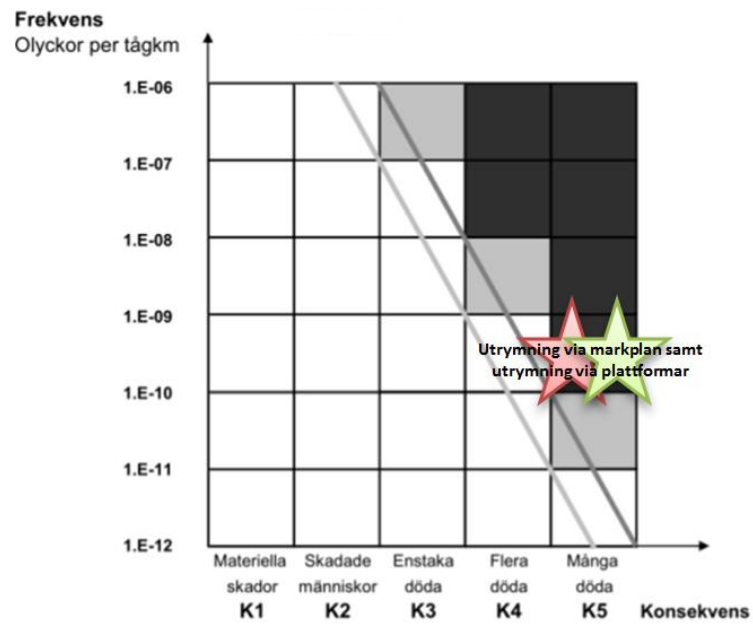
För det mest konservativt ansatta scenariot med en brand på 20 MW omkommer samtliga passagerare då en ogynnsam vindhastighet (0,5 m/s) och en lång tid till påbörjad utrymning (8 min) råder, både då utrymning sker via rälsnivå samt via upphöjda gångvägar.

I Figur 25 visas huruvida ambitionsnivån i BVH 585.30 uppnås för de scenarier som en maxeffekt på 15 MW ansatts. De inritade värdena i figurerna är oberoende av trafik och tunnällängd. I diagrammet kan utläsas att utrymning via upphöjda utrymningsgångvägar lever upp till ambitionsnivån i BVH 585:30 med god marginal då samtliga beräknade scenarier resulterar i att samtliga passagerare hinner förflytta sig till en säker plats innan de utsätts för medvetlöshet. Då utrymning däremot sker via gångvägar placerade i rälsnivå så upplevs inte ambitionsnivån i BVH 585:30 då ambitionsnivån hamnar inom ALARP området, således bör åtgärder vidtas om åtgärderna anses ha en rimlig kostnad. Orsaken till att ambitionsnivån inte uppfylls då utrymning sker via gångvägar i rälsnivå är på grund av att samtliga passagerare med någon form av funktionsnedsättning inte förväntas klara av den vertikala förflyttningen från tåg till gångväg och utsätts för medvetlöshet alternativt omkomma.



Figur 25. Figuren ovan visar om Trafikverkets ambitionsnivå uppfylls eller inte vid en 15 MW brand.

Figur 26 visar huruvida ambitionsnivån i BVH 585.30 uppfylls för de scenarier som en maxeffekt på 20 MW ansatts. I diagrammet kan utläsas att en sådan brand kan leda till ett stort antal dödsfall både då utrymning sker via gångvägar i rälsnivå och då utrymning sker via upphöjda gångvägar. Om en brand på 20 MW inträffar i ett persontåg som befinner sig inne i en järnvägstunnel så krävs således ytterligare säkerhetshöjandeåtgärder, utöver en upphöjning av utrymningsgångvägarna, för att en säker självutrymning ska kunna ske.



Figur 26. Figuren ovan visar om Trafikverkets ambitionsnivå uppfylls eller inte vid en 20 MW brand.

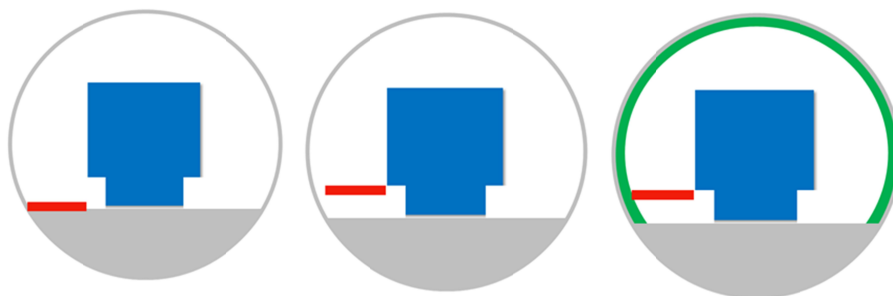
8. Kostnadsuppskattningar

8.1. Kostnad

För att kunna bedöma kostnaderna för den säkerhetshöjande åtgärden så jämförs kostnaderna för att bygga järnvägstunnelar med upphöjda gångvägar mot kostnaderna för att bygga järnvägstunnelar med gångvägar placerade i rälsnivå. På så sätt kan kostnaden för den säkerhetshöjande åtgärden uppskattas.

Tidigare byggnationer av järnvägstunnelar samt samspråk med experter har visat att en tunnels innerdiameter direkt påverkar de totala byggnations- och materialkostnaderna. Vid byggnation av enkelspåriga borrhade järnvägstunnelar kan man se en markant minskning i totala byggnations- och materialkostnader vid ett minskat tvärsnitt.

Enligt genomförda beräkningar i appendix 1 kan en nybyggnation av borrhade enkelspåriga järnvägstunnelar resultera i ett mindre tunneltvärsnitt än om gångvägarna är placerade i rälsnivå. I Figur 27 nedan illustreras hur en upphöjning av gångvägen kan medföra ett mindre tunneltvärsnitt. Om en gångväg placerad i rälsnivå höjs upp och dess bredd bibehålls så föreligger förutsättningar för att minska tunnelns tvärsnitt.



Figur 27. Bilden illustrerar hur tunneltvärsnittet kan minskas då gångvägens bredd bibehålls men höjs upp. Notera att bilderna inte är skalnligna, de enbart illustrerar principen på hur tunneltvärsnittet kan minskas vid en upphöjning av gångvägarna.

Ett genomsnittsvärde som anses tillräckligt detaljerat på hur de totala material- och byggnadskostnaderna varierar med avseende på olika tunnelutformningar har beräknats fram i samspråk med sakkunniga från Trafikverket och Skanska Vinci. Kostnadsberäkningar redovisas i appendix 1 och resulterar i följande totala byggnations- och materialkostnaderna i kronor per kilometer tunnel. Resultaten är beroende av tunnelns innerradie, tunneltjocklek samt antalet upphöjda gångvägar som byggs.

- Då utrymning sker via två upphöjda gångvägar bedöms totalkostnaden för tunnelbyggnationen vara 246 miljoner kronor per km tunnel inklusive byggnationen av plattformar.
- Då utrymning sker via gångvägar i rälsnivå bedöms totalkostnaden för tunnelbyggnationen vara 269 miljoner kronor per km tunnel.
- Total kostnad för säkerhetshöjande åtgärd = 246 – 269 = –23 MSEK per km tunnel

De kostnadsbesparingar som ett minskat tunneltvärsnitt för med sig har visat sig vara betydligt större än kostnaderna för att installera utrymningsgångvägar i tunneln. Den totala kostnaden för den säkerhetshöjande åtgärden blir således tydligt negativ.

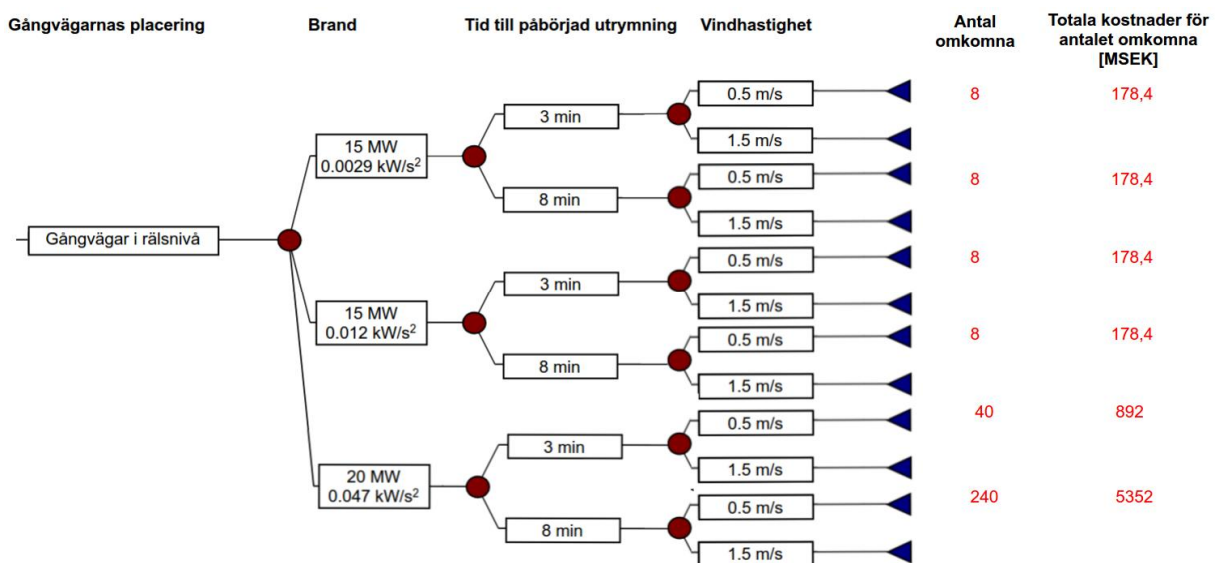
8.2. Kostnadsbesparing

Kostnadsbesparingarna på grund av den säkerhetshöjande åtgärdens effekt avser antalet räddade liv.

För att kunna utföra olycksutvärderingar måste ett förlorat liv kunna värderas i monetära enheter. Detta görs idag med hjälp av ett värde som kallas VSL vilket beskrivs närmre i avsnitt 3.1. Avseende infrastruktursektorn i Sverige, däribland transportsektorn, rekommenderar SIKA (2008) VSL värdet 22,3 miljoner kronor vid händelse av dödsolycka. Detta värde bygger på 2006 års prisnivå och i detta värde ingår både riskvärderingen och de materiella kostnaderna. SIKA rekommenderar även värden för svårt skadade samt lindrigt skadade personer, och dess rekommendationer är cirka 4,1 miljoner kronor för svårt skadade och 200 000 kronor för lindrigt skadade.

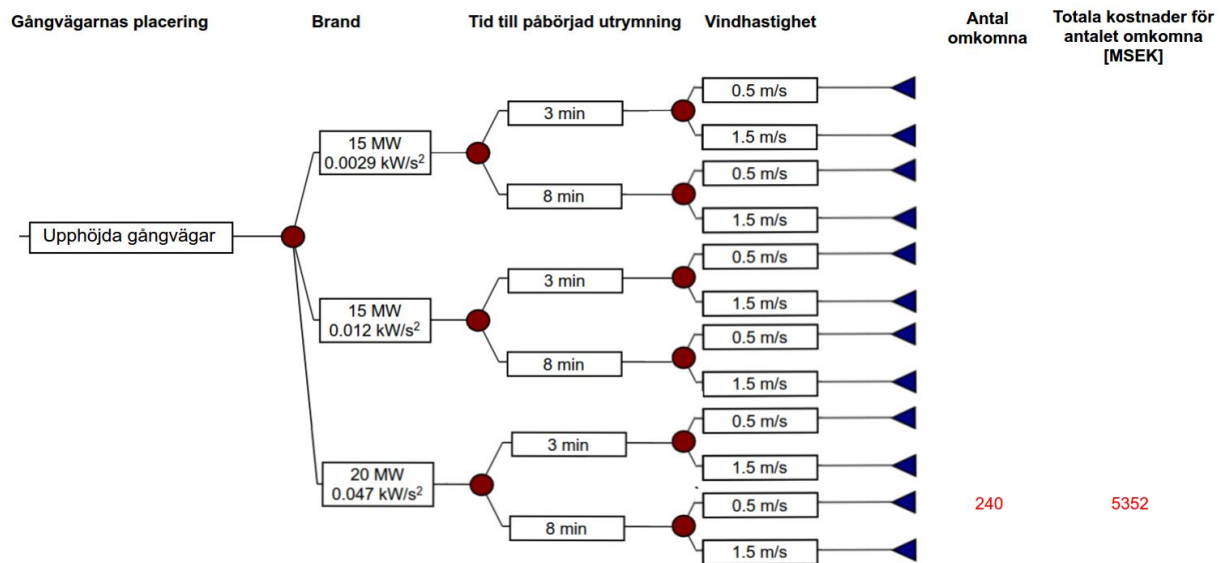
Kostnaderna för personskador avgränsas till att endast omfatta antalet omkomna. Antalet omkomna har i sin tur beräknats fram med hjälp av tidigare scenarioanalys. Kostnaderna beräknas genom att multiplicera antalet omkomna i respektive scenario med SIKAs (2008:3) rekommenderade värde på VSL. I tabellen nedan redovisas kostnaderna för antalet omkomna i respektive scenario. Kostnaderna för personskador, egendomsskador, förseningar, underhåll, etcetera har avgränsats bort.

I Figur 28 redovisas kostnaderna för antal förlorade liv då utrymningsgångvägarna är placerade längst med rälsnivå.



Figur 28. Kostnad för förlorade liv då utrymning sker via gångvägar i rälsnivå.

I Figur 29 redovisas kostnaderna för antal förlorade liv då utrymningsgångvägarna är upphöjda.



Figur 29. Kostnad för förlorade liv då utrymning sker via upphöjda gångvägar.

Viktigt att notera är att de framräknade kostnaderna i Figur 28 och Figur 29 endast innefattar de kostnader som uppstår då en olycka inträffar. De framräknade kostnaderna tar således inte hänsyn till sannolikheten att en olycka inträffar. De framräknade kostnaderna för antal förlorade liv beräknas endast fram i ett första skede med avseende på att verifiera att den säkerhetshöjande åtgärden har positiva effekter.

9. Bedömning av kostnad-nytta

Kostnader för den säkerhetsåtgärden vägs mot den nytta som den för med sig i form av minskade kostnader för personskador. Kostnaderna för personskador avgränsas till att endast gälla de kostnader som uppstår till följd av förlorade människoliv. Detta trots att Trafikverkets ambitioner i BVH 585.30 är att ingen av de utrymmande personerna ska utsättas för medvettslöshet.

Med hjälp av kostnadsuppskattningarna i kapitel 8 kan nyttor och kostnader vägas mot varandra. Den säkerhethöjande åtgärden i form av en upphöjning av gångvägarna både räddar fler liv om en olycka inträffar samt minskar investeringskostnaderna för byggnation och material av järnvägstunneln. Därmed kan slutsatsen dras om att den samhällsekonomiska nyttan av en säkerhethöjande åtgärd i form av upphöjda utrymningsgångvägar är entydigt positiv.

Det är dock viktigt att nämna att för de bränder vars maxeffekt överstiger 15 MW så är skillnaden i antalet räddade liv ej så markant som för de beräkningar som utförs på bränder med en maxeffekt av 15 MW. Trots att inte en markant ökning av antalet räddade liv kan påvisas för en 20 MW brand i denna analys så bedöms den säkerhetsåtgärden vara samhällsekonomiskt lönsam på grund av att tunnelutformningen blir mer kostnadseffektiv med avseende på byggnations- och materialkostnader.

Fiktivt exempel

I appendix 9 utförs beräkningarna av säkerhetsåtgärdens nuvärde utifrån ett fiktivt exempel på en tunnel och dess trafik. I den fiktiva fallstudie som utförs i appendix 9 ansätts en tunnellängd på 10 km och en rådande trafik på 40 000 tåg per år. Resultatet från den fiktiva fallstudien visar tydligt att nuvärdet av den säkerhethöjande åtgärdens effekter är positivt. Dock kan det framräknade nuvärdet av effekter tyckas vara relativt lågt, anledningen till det låga nuvärdet är att sannolikheten för att en olycka inträffar är oerhört låg. Även om nuvärdet är lågt så kan införandet av säkerhetsåtgärden närmast betraktas som oändligt lönsam. Grundinvesteringen i det fiktiva exemplet innebär nämligen en besparing i byggnations- och materialkostnader på cirka 230 Mkr (10 km x 23 Mkr) i jämförelse mot om gångvägarna istället placerats längs med rälsnivå.

10. Diskussion

10.1. Osäkerhetshantering

I analysen har ett antal avgränsningar och bedömningar gjorts vilka kan påverka examensarbetets resultat och slutsatser. Nedan anges några av de avgränsningar och bedömningar som anses kunna ha störst påverkan på resultatet och slutsatserna.

Enzonsmodell

Den brandgasspridningsmodell, enzonsmodell, som använts i analysen innebär ett antal begränsningar. Den tillämpade enzonsmodellen bygger på att brandgaserna blandas om direkt och är homogena längst med hela tunnelvärsnittet. Vilken höjd som de utrymmande passagerarna befinner sig på blir således oväsentlig. Den tillämpade modellen speglar inte ett helt riktigt brandscenario, i brandens direkta närhet borde en tydlig uppdelning ske mellan en varm och en kall zon. Tillämpandet av en enzonsmodell, främst i brandens direkta närhet där en tydligt termisk stigkraft bör råda, kan i genomförda beräkningar således ha gynnat de scenarier där utrymning sker via upphöjda gångvägar. Detta på grund av att passagerarna kommer att finna sig närmre taket i de scenarier där utrymning sker via upphöjda gångvägar än då utrymning sker via gångvägar i rälsnivå.

Effektutveckling

I de scenarier där utrymning sker via upphöjda gångvägar är tunnelvärsnittet något mindre än då utrymning sker via gångvägar i rälsnivå. I de brandberäkningar som genomförts har samma brandeffekt använts oavsett tunnelvärsnitt vilket kan anses vara en begränsning. Brandens effektutveckling borde skilja sig något mellan de olika tunnelvärsnitten bland annat på grund av värmestrålning från tunnelns väggar samt tillgången på syre. Lönnermark och Ingason (2004) har konstaterat att ett större tunnelvärsnitt medför ett något gynnsammare brandförlopp än ett mindre tunnelvärsnitt. Skillnaden är dock inte så stor och bedöms således inte ha någon större inverkan på resultaten och slutsatserna i detta examensarbete.

Andel passagerare med funktionsnedsättning

Andelen passagerare med funktionsnedsättning har visat sig ha stor påverkan på analysens resultat. I de scenarier där utrymning sker till utrymningsgångvägar i rälsnivå visar scenarioanalysen att de individer som sitter kvar inne i tåget, på grund av att de har en funktionsnedsättning som försvårar den vertikala förflyttningen, omkommer eller faller i medvetlöshet inom 120 minuter vid en större brand på 15 till 20 MW.

I genomförd analys antas cirka 3,5 % av passagerarna ha en funktionsnedsättning som i kombination med en kraftig vertikal förflyttning skapar ett handikapp som innebär att individen inte förutsätts kunna självutrymma. I genomförd scenarioanalys har samtliga av dessa passagerare antagits sitta kvar inne i tåget då utrymning sker via gångvägar längs med rälsnivå. I de scenarier där utrymning sker via upphöjda utrymningsgångvägar har samtliga av dessa passagerare antagits kunna förflytta sig ner till utrymningsgångvägen på egen hand. Analysen bortser alltså från möjligheten att ett antal av passagerarna som har en funktionsnedsättning eventuellt kommer att få hjälp av andra medpassagerare för att förflytta sig ut ur tåget och vidare längs med gångvägen. Om en viss andel av de passagerarna som antagits ha en funktionsnedsättning hade fått hjälp av sina medresenärer att förflytta sig hade nyttan av den säkerhetshöjande åtgärdens effekter således minskat.

Andelen passagerare med funktionsnedsättning varierar med avseende på ålder. I scenarioanalysen ansätts 3,5 % av de individer som befinner sig på tåget ha en omfattande nedsatt rörelseförmåga. Detta bygger på antagandet att en olycka inträffar under rusningstrafik med en homogen grupp av individer mellan 16 och 64 år. Om en större åldersspridning antagits hade en större andel av de passagerare som färdats i tåget haft problem med att utföra den vertikala förflyttningen från tåg till utrymningsgångväg. En större åldersspridning hade inneburit att fler passagerare med funktionsnedsättning hade suttit kvar inne i tåget utan att självutrymma vilket hade förstärkt nyttan av den säkerhetshöjande åtgärden.

Giftiga gaser

I genomförd analys har enbart de giftiga gaserna CO, CO₂ och O₂ tagits med i beräkningarna av hur människokroppen påverkas. Det finns ytterligare en giftig gas som kan genereras då till exempel PUR som kan finnas inne i tåg brinner nämligen vätecyanid (HCN). Finns HCN i tågen så kan denna giftiga gas ha en betydande påverkan på människokroppen och således hade konsekvenserna för de utrymmade passagerarna blivit värre. Hade den giftiga gasen vätecyanid tagits med i beräkningarna hade konsekvenserna av samtliga scenarier, både utrymning via rälsnivå och via upphöjda gångvägar, kunnat förvärras.

10.2. Säkerhetshöjande effekter

En säkerhetshöjande åtgärd i form av upphöjda gångvägar ökar möjligheten till en säker utrymning främst på grund av nedanstående punkter.

Samtliga passagerare ges möjlighet till självutrymning

Enligt Trafikverket ska samtliga passagerare ges möjlighet till självutrymning vilket enligt genomförd analys inte kan förutsättas då utrymningsgångvägarna är placerade längs med rälsnivå. De individer som ges ökad möjlighet till självutrymning vid en upphöjning av gångvägarna är främst individer med någon form utav funktionsnedsättning som i samband med en kraftigt vertikal förflyttning kan skapa ett handikapp. Genom att höja upp gångvägarna kan avstigningen från tåg till gångväg istället liknas vid den avstigning som normalt sker mellan tåg och perrong.

Utrymningsflödet genom dörrarna ökar betydande vilket bidrar till ett snabbare utrymningsförlopp

Med hjälp av litteraturstudier samt tidigare genomförda utrymningsförsök har avstigningstiden per passagerare, från dörröppning till gångväg, bedömts mer än halvera avstigningstiden då utrymning sker till upphöjda gångvägar istället för till gångvägar placerade i rälsnivå. En snabbare avstigningstid medför att det totala utrymningsförloppet går snabbare vilket ökar möjligheten till en säker självutrymning för de utrymmade passagerarna.

En krävande vertikal förflyttning undviks

En säkerhetshöjande åtgärd i form av upphöjda gångvägar kan vara en avgörande faktor för huruvida passagerare som har med en funktionsnedsättning, som i kombination med en kraftigt vertikal förflyttning skapar ett handikapp, kan förutsättas självutrymma eller inte. Om en passagerare med funktionsnedsättning inte får hjälp att utrymma, till exempel av andra medresenärer, så bör dessa passagerare inte förutsättas kunna utrymma på egen hand om utrymning sker via gångvägar placerade i rälsnivå. Genomförda beräkningar visar att de individer som inte kan utföra en kraftigt vertikal förflyttning och således blir kvar inne i tåget

omkommer eller faller i medvetlöshet inom 120 minuter om en större brand, 15-20 MW, råder i tunneln.

Upphöjda gångvägar kan minska uppkomsten av flaskhalsar längs med gångvägen.

Stegar som upptar en del av gångvägen och personer som utför en relativt långsam förflyttning ner till gångvägen kan minska gångvägens bredd och således ge upphov till flaskhalsar och lägre personflöde längs med gångvägen. I denna rapport görs bedömningen av att inga kraftiga flaskhalsar uppstår vid dörröppningarna då avstigning sker till upphöjda gångvägar, de två gångvägarnas totala bredd bedöms kunna svälja flödet av utrymmande människor. Om däremot ett längre tåg, med ett större passagerantal, hade tvingats till utrymning i en tunnel till följd av brand bör risken kring uppkommandet och effekterna av flaskhalsar eventuellt analyseras ytterligare.

10.3. Behov av ytterligare säkerhetsåtgärder

I scenarioanalysen genomförs beräkningar på en 20 MW brand och i dessa scenarier omkommer flertalet individer både då utrymning sker via rälsnivå och via upphöjda utrymningsgångvägar. Således uppfylls inte principen om en säker självutrymning enbart med införandet av upphöjda gångvägar, utan vid större bränder än 15 MW krävs ytterligare åtgärder för att en säker självutrymning ska kunna ske.

10.4. Åtgärden har en hög lönsamhet ur ett kostnad-nytta perspektiv

Vid byggnation av upphöjda utrymningsgångvägar i en borrade enkelspårig järnvägstunnel visar kostnadsuppskattningar gjorda för en betongtunnel att de totala material- och byggnadskostnaderna till och med minskar vid en byggnation av upphöjda gångvägar istället för gångvägar i rälsnivå. Anledningen till att kostnaderna kan minska är att en byggnation av upphöjda gångvägar kan resultera i ett mindre tunneltvårsnitt och således bespara större kostnader än vad kostnaden är för byggnationen av plattformar.

Det mindre tvärsnittet beror på att om en utrymningsgångväg, med bibehållen bredd, placeras längre upp i tunneltvårsnittet så krävs det ett mindre tvärsnitt givet samma tågförutsättningar och krav på fritt utrymme längst med spårbanan.

10.5. Applicerbarhet på andra tunnelutformningar

Rapporten behandlar enbart nybyggnation av enkelspåriga borrade järnvägstunnlar som dimensioneras för självutrymning. Dock kan det vara intressant för vidare studier att föra en diskussion kring hur resultatet från denna analys även skulle kunna vara applicerbart på andra tunnelutformningar, såsom flerspåriga tunnlar, sprängda tunnlar samt befintliga tunnlar.

En säkerhetshöjande åtgärd i form av upphöjda utrymningsgångvägar anses ge likartade fördelar även för andra tunnelutformningar när det gäller möjlighet till en säker självutrymning. En kraftig vertikal förflyttning undviks vilket bland annat minskar avstigningstiden från tåg till gångväg, uppkomsten av flaskhalsar samt risken för att funktionsnedsättningar hos individer utvecklas till handikapp, vilket resultera i ett snabbare utrymningsförlopp.

Kostnadsuppskattningarna i denna rapport är endast tillämpbara på enkelspåriga borrade järnvägstunnlar. Vid en annan byggmetod eller ett annat tunneltvårsnitt måste nya kostnadsberäkningar genomföras.

10.6. Fortsatta studier inom området

Nedan redovisas förslag på fortsatta studier inom området.

- *Utföra kostnadsuppskattningar även för sprängda järnvägstunnlar*
Utveckla en metod för kostnadsuppskattningar även för sprängda järnvägstunnlar.
- *Undersöka alternativet att placera upphöjda utrymningsgångvägar även i flerspåriga järnvägstunnlar*
Var bör utrymningsgångvägarna placeras i flerspåriga järnvägstunnlar? Hur många utrymningsgångvägar är lämpligt för flerspåriga järnvägstunnlar?
- *Undersöka möjligheten att bygga upphöjda utrymningsgångvägar även i befintliga tunnlar*
Hur stora åtgärder krävs för att kunna förse befintliga järnvägstunnlar med upphöjda utrymningsgångvägar? Finns tillräckligt utrymme? Vilka och hur stora problem uppstår med den befintliga tekniska utrustningen i tunneln? Om det är möjligt att förse befintliga tunnlar med upphöjda utrymningsgångvägar vad är då kostnaderna för en sådan åtgärd?
- *Vilka ytterligare säkerhetsåtgärder kan genomföras för att en säker självutrymning ska kunna ske även vid större bränder*
Vilka ytterligare åtgärder kan underlätta självutrymning då större bränder än 15 MW inträffa i järnvägstunnlar? Vilka ytterligare säkerhetsåtgärder behövs/rekommenderas för att en säker självutrymning ska kunna ske även vid större bränder än 15 MW?
- *Vindhastigheter*
Baserat på resultatet från scenarioanalysen rekommenderas att vidare studier utförs på lägre vindhastigheter eller den lägsta vindhastighet som har ansatts i denna rapport. Detta på grund av att resultatet från scenarioanalysen tydligt har påvisat att höga vindhastigheter medför mildare förhållande för de utrymmande passagerarna.

11. Slutsatser och rekommendationer

Följande rekommendationer bör tillämpas vid nybyggnation av enkelspåriga berrade järnvägstunnlar som dimensioneras för självutrymning.

- *Upphöjda gångvägar bör byggas vid samtliga nybyggnationer.*

Genomförd analys visar att samtliga passagerare ej ges möjlighet till självutrymning då utrymningsgångvägarna är placerade i rälsnivå. Detta på grund av en kraftig vertikal förflyttning som bland annat kan ge upphov till förflyttningsproblem för personer med någon form av funktionsnedsättning. Vid en upphöjning av utrymningsgångvägarna visar genomförd analys att möjligheten till självutrymning ökar.

Utöver att en upphöjning av utrymningsgångvägarna har påvisat tydliga säkerhetshöjande effekter så har åtgärden visat sig vara kostnadseffektiv vid bedömning av kostnad-nytta.

- *Järnvägstunnlar som är planerade för persontåg bör förses med två gångvägar.*

Enligt dagens aktuella krav krävs endast en gångväg i enkelspåriga järnvägstunnlar. Dock bör två gångvägar byggas då persontåg färdas i tunneln. Rekommendationen grundar sig främst på resultatet från genomförd scenarioanalys.

- *Rekommenderad höjd på gångvägarna är 71-74 cm. Detta i enlighet med de standardplattformshöjder, mellanhög och hög, som är mest utpräglade i Sverige idag.*

De flesta perronger som finns i Sverige idag är utförda som mellanhög plattform (560-590 mm höga) eller som hög plattform (710-740 mm höga). På grund av att dagens persontågtrafik är anpassade för på- och avstigning till just dessa plattformshöjder anses någon av dessa höjder mest lämpade att tillämpa vid byggnation av plattformar till de upphöjda utrymningsgångvägarna inne i järnvägstunnlarna.

Höga plattformar har beräknats leda till ett något mindre tunneltvärsnitt än mellanhöga plattformar. Detta innebär att höga plattformar resulterar i lägre byggnations- och materialkostnader än mellanhöga plattformar och är därmed att rekommendera.

12.Referenser

- Ahlfont, J., & Lundström, F. V. (2012). *Tunnelutrymning - Effekten av gångbanans bredd på förflyttningshastighet vid utrymning i en spårtunnel*. Lund: Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet.
- Andersson, D. (2012). *Dörrarna stängs innan alla fått plats - Rapport för den svenska funktionshinderrörelsen sommaren 2012*. Handikappförbunden och Lika Unika.
- ASEK. (2008). *Samhällsekonomiska principer och kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 4*. Östersund: SIKA.
- Beard, A., & Carvel, R. (2011). *Handbook of Tunnel Fire Safety*.
- Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K., & Ingason, H. (2001). *Räddningsinsatser vid tunnelbränder*. Karlstad: Räddningsverket.
- Boverket. (2005). *Helhetssyn på tunnelns livscykel - med inriktning på persontäthet - Delprojekt 3, bilaga till Regeringsuppdrag Personssäkerhet i tunnlar*. Karlskrona: Boverket.
- Boverket. (2005). *Riskvärdering - Delprojekt 2.1, bilaga till regeringsuppdrag Personssäkerhet i tunnlar*. Karlskrona: Boverket.
- Boverket. (2011). *Regelsamling för byggande, BBR 2012*. Karlskrona: Boverket.
- Carvel, R., & Marlair, G. (2005). A History of Fire Incidents in Tunnels. i A. Beard, & R. Carvel, *The Handbook of Tunnel Fire Safety* (s. Kapitel 1). London: Thomas Telford Publishing.
- Cornell, P. (1996). *Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment*. Reliability Engineering and System Safety 54.
- Davidsson, G., Haeffler, L., Ljungman, B., & Frantzich, H. (2003). *Handbok för riskanalys*. Karlstad: Räddningsverket.
- Defosse, A., & Martos, O. (2012). *European union rail system, TSI "Safety in railway tunnels"*. Interoperability unit.
- Frantzich, H. (2000). *Utrymning av tunnelbanetåg*. Karlstad: Räddningsverket.
- Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2013). *The Flow Rate of People during Train Evacuation in Rail Tunnels: Effects of Different Train Exit Configurations*. Lund, Sweden: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Fridolf, K., Ronchi, E., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2013). Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety Journal*, Volyme 59, Sida 8-21.
- Fröidh, O. (2010). *Resande och trafik med Gröna tåget*. Stockholm: Avdelningen för trafik och logistik KTH.
- Heinz, W., & Kottenhoff, K. (2001). *Effektiva handikappsreducerande fordon*. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan, Institutionen för infrastruktur och samhällsplanering.
- Hicks, J. R. (1939). *The Foundations of Welfare Economics*. England: Economic Journal.

- Ingason, H., & Lönnermark, A. (2004). *Brandbelastning och brandscenarier för järnvägstunnlar*. Borås: SP Brandteknik.
- Ingason, H., Bengtson, S., & Hiort, F. (1997). *Brand och brandskydd i undermarksanläggningar*. SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut.
- Ingason, H., Kumm, M., Nilsson, D., Lönnermark, A., Claesson, A., Li, Y. Z., o.a. (2012). *The Metro Project*. Västerås: Mälardalen Universitet Press.
- Kaldor, N. (1939). *Welfare Propositions of Economic and Interpersonal Comparisons of Utility*. England: Economic Journal.
- Lundberg, B. (1998). *Föreskrift BVF 586.20 - Fritt utrymme utmed banan*. Borlänge: Banverket, Järnvägssystem.
- Mattsson, B. (2000). *Riskhantering vid skydd mot olyckor*. Karlstad: Räddningsverket.
- MSB. (2009). *Statistik och analys - Räddningstjänst i siffror 2008*. Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- Olofsson, O. (2005). *BV Tunnel, BVS 585.40*. Borlänge: Banverket.
- Oswald, M., Kirchberger, H., & Lebeda, C. (2008). *Evacuation of a High Floor Metro Train in a tunnel situation: Experimental Findings*. Vienna, Austria: Vienna University of Technology.
- Oswald, M., Lebeda, C., Schneider, U., & Kirchberger, H. (2005). *Full-Scale Evacuation Experiments in a smoke filled Rail Carriage - a detailed study of passenger behavior under reduced visibility*. Vienna, Italien.
- Paulsson, B. (2007). *Personssäkerhet i järnvägstunnlar - Handbok BVH 585.30*. Borlänge: Banverket.
- SIKA. (2008). *Samhällsekonomiska principer och kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 4*. Östersund: Statens institut för kommunikationsanalys.
- Skanska Vinci. (2013). Hallandsåstunneln.
- Skanska Vinci. (2013). Resan genom Hallandsåsen.
- Strömngren, M., Harrami, O., Lindberg, E., Freiholtz, B., Hansen, J., Abrahamsson, S., o.a. (2005). *Riskanalysmetoder - Delprojekt 2.2, bilaga till regeringsuppdrag Personssäkerhet i tunnlar*. Karlskrona: Boverket.
- Söderdelegationen. (2006). *Järnvägstunnlar i Helsingborg - Idéstudie april 2006*. Helsingborg.
- Södergren, B. (1995). *Föreskrift BVF 586.26 Plattformar och lastkajer*. Borlänge: Banverket, Tekniska Avdelningen.
- Tellerup, F., & Tellerup, M. (den 7 Juli 2014). *järnväg.net*. Hämtat från järnväg.net : <http://www.jarnvag.net/index.php/vagnuide/historia> den 7 Juli 2014

The Commission of the European Communities. (2008). *Commission Decision 2008/163/EC of 20 December 2007 concerning the technical specification of 'safety in railway tunnels' in the trans-European conventional and high-speed rail system*. Official Journal of the European Union.

Trafikverket. (2011). *TRVK Tunnel 11*. 2011:087.

Trafikverket. (2012). Projekt Hallandsås - Nyhetsbrev vintern 2012/2013.

Trafikverket. (2012). *Samhällsekonomiska principer och kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 5*.

Trafikverket. (den 27 Januari 2012). *Trafikverket: Bandata*. Hämtat från <http://www.trafikverket.se/Privat/Vagar-och-jarnvagar/Sveriges-jarnvagsnat/Bandata/> den 1 Augusti 2013

Trafikverket. (den 24 Oktober 2013). *Trafikverket*. Hämtat från <http://www.trafikverket.se/Om-Trafikverket/Trafikverket/Manatlig-trafikrapport/Trafikvolym-jarnvag/> den 1 Augusti 2013

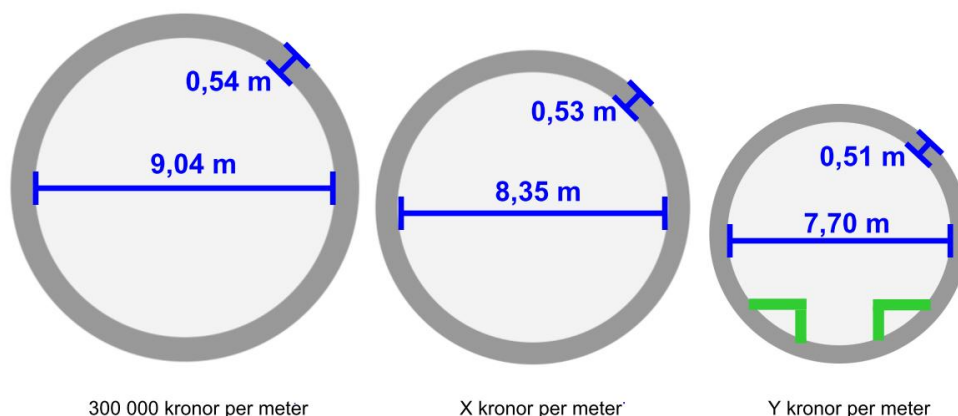
Winér, J., & Norén, A. (2003). *Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and design for faster evacuation*. Lund: Brandteknik, Lunds tekniska högskola.

Öresundståg. (2013). *Öresundståg: Öresundstågen (Fakta och Siffror samt Vagnsskiss)*. Hämtat från <http://www.oresundstag.se/sv/Om-oss/Oresundstagen/> den 24 Oktober 2013

Appendix 1. Material- och byggnadskostnader per meter tunnel

För de definierade tunneltvårsnitten i appendix 2 är målet att ta reda på skillnaden i kostnader per meter tunnel. Utgångspunkten vid följande beräkningar är kostnaderna per meter tunnel för Hallandsåstunneln som har en innerdiameter på 9,04 meter. Kostnaden för Hallandsåstunneln har i samverkan med sakkunniga på Trafikverket och Skanska Vinci uppskattats till 300 000 kronor per meter tunnel. Även beräkningsmetoden nedan har tagits fram i samverkan med sakkunniga på Trafikverket och Skanska Vinci.

Figuren nedan visar de tre tunneltvårsnitten som beräkningsmetoden tillämpats på. För att kunna beräkna fram det minsta lämpliga innerdiametern på järnvägstunneln har normalfordonets mått, normalsektionen för det fria utrymmet samt krav på utrymningsgångvägarnas utformning tagits i beaktande.



Figur 30. Illustrationen av tunneltvårsnitten är inte skalenlig.

Ett genomsnittsvärde som anses tillräckligt detaljerat på hur material- och byggnadskostnaderna varierar med avseende på olika tvärsnittsdiamentrar har beräknats fram med hjälp av uppskattningar i samspråk med sakkunniga på Trafikverket och Skanska Vinci.

Nedan redovisas de kostnader som är intressanta att ta i beaktande för att kunna bedöma de totala materialkostnaderna:

- Kostnader per kubikmeter betongfundament
- Kostnader för att hantera schaktmassa
- Kostnader för att fylla upp tunnelrörets botten till en plan yta
- Kostnader för utrymningsvägar/tvårtunnlar
- Kostnader för olika borrhål
- Kostnader för arbete
- Kostnader för slitage
- Kostnader för teknisk utrustning
- Kostnader för övriga materiella kostnader
- Kostnader för byggnation av plattformar

Vid nybyggnation av borrhål järnvägstunnlar görs antagandet att byggnads- och materialkostnaderna kan sättas i proportion till antal kubikmeter betong som används. Antal kubikmeter betong som används är i sin tur starkt beroende av tvärsnittsdiamentern. Övriga material- och byggnadskostnader bortsett från teknikutrustningen antas ha en likvärdig

procentuell variation i material- och byggnadskostnader beroende på tvärsnittsdiаметern och kan därmed räknas in i den totala kostnaden. Trots att kostnaderna för tekniskutrustning inte är beroende av tvärsnittet försummas detta i kostnadsberäkningarna nedan, motiveringen till att detta kan göras ligger främst i att dessa kostnader inte anses så stora i förhållande till exempelvis betong- och borrhkostnaderna.

Kostnader med avseende på tunnelns innerradie

En borrarad järnvägstunnel med innerradien 4,52 m och ytterradien 5,06 m kostar cirka 300 000 kronor per meter att bygga (utgår från Hallandsåstunneln). I en sådan tunnel utgörs cirka 16,5 m³ av tvärsnittet av betong per meter. De totala byggnads- och materialkostnaderna per meter tunnel blir då i proportion till antal kubikmeter betong där kostnaderna anges i kronor enligt följande:

$$\text{Kostnaderna per meter tunnel} = \frac{300000}{16,5} \times \text{antal m}^2 \text{ betong per meter}$$

$$\text{Kostnaderna per meter tunnel} \approx 18181 \times \text{antal m}^2 \text{ betong per meter}$$

$$\text{Kostnaderna per meter tunnel} \approx 18181 \times (\pi \times (r_{\text{ytter}})^2 - \pi \times (r_{\text{inner}})^2)$$

Där:

r_{ytter} = tunnelns ytter radie, dvs. från tunnelns mitt till betongblockens yttre kant [m]

r_{inner} = tunnelns inner radie [m]

Betongblockens tjocklek anses variera beroende på tunnelns innerdiameter. Vid minskad innerdiameter behöver inte betongblocken vara lika tjocka. En tunnel med innerdiameter 9 m kräver att betongblocken är cirka 54 cm tjocka, medan en tunnel med innerdiameter 8 m kräver en tjocklek på cirka 52 cm och en tunnel med innerdiameter 7 meter kräver en tjocklek på cirka 50 cm. Ekvationen ovan anses ha ett giltighetsområde på innerdiametrar mellan 7 till 9 meter.

Kostnader för byggnation av plattformar

Vid byggnation av plattformar längst med spårets ena sida uppskattas kostnaderna till cirka 3 - 4 000 kr per meter tunnel.

Totala kostnader per meter tunnel

Ekvationen nedan resulterar i de totala byggnations- och materialkostnaderna i kronor per meter tunnel. Resultatet av ekvationen varierar med olika innerradier samt vilket antal plattformar som byggs inuti tunneln.

$$18181 \times (\pi \times (r_{\text{ytter}})^2 - \pi \times (r_{\text{inner}})^2) + \text{Antal plattformar} \times 3500$$

Utrymning via rälsnivå

De scenarier som innefattar utrymning via rälsnivå antas ha en innerradie på 4,18 meter och ytterradie på 4,71 meter och ingen byggnation av plattformar sker.

$$\text{Total kostnad per meter tunnel} = 18181 \times (\pi \times (4,71)^2 - \pi \times (4,18)^2) + 0 \times 3500 \\ \approx 269\,000/\text{m}$$

Utrymning via upphöjda gångvägar

De scenier som innefattar utrymning via upphöjda gångvägar antas ha en innerradie på 3,85 meter och en ytterradie på 4,36 meter och två plattformar byggs.

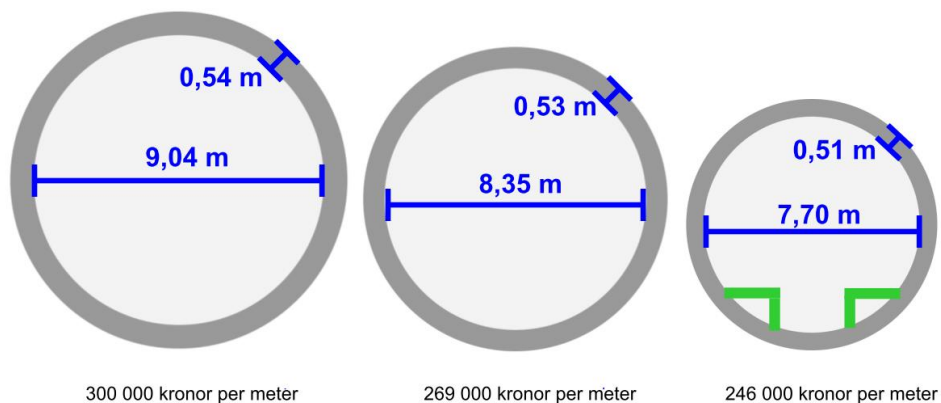
$$\text{Total kostnad per meter tunnel} = 18181 \times (\pi \times (4,36)^2 - \pi \times (3,85)^2) + 2 \times 3500 \\ \approx 246\,000 \text{ kr/m}$$

Verifiering av kostnadsuppskattningarna

Kostnadsberäkningarna ovan bygger på faktiska kostnader för befintliga borrade enkelspåriga järnvägstunnlar samt samspråk med sakkunniga.

Då kostnadsberäkningarna ovan ligger till stor grund för rapportens kostnad-nytta bedömning har författaren sökt fler möjligheter att verifiera trovärdigheten i kostnadsberäkningarna. Bland annat så har Söderdelegationen (2006) konstaterat att kostnaderna ökar med 2 % per decimeter inom intervallet 7,0 – 8,5 meter, vilket stämmer bra överens med beräkningarna ovan.

I figuren nedan visas resultatet av beräkningarna.



Figur 31. Resultat av beräkningar. Figuren är inte skalenlig.

Appendix 2. Sammanfattning av olycksfrekvenser

I rapporten *Personssäkerhet i järnvägstunnelar* redovisar Banverket (2007) ett antal olycksfrekvenser som använts i samband med projektering av idag befintliga tunnelar samt generisk data. De tunnelar man tittat närmre på är bland annat Citybanans tunnelar, Citytunnelns tunnelar, Hallandsåstunneln och Ådalsbanan.

I Tabell 5 har en sammanfattning gjorts utifrån Banverkets rapport av de olycksfrekvenser som berör brand i persontåg. Bedömningarna av olycksfrekvens anges i olyckor per tågakilometer.

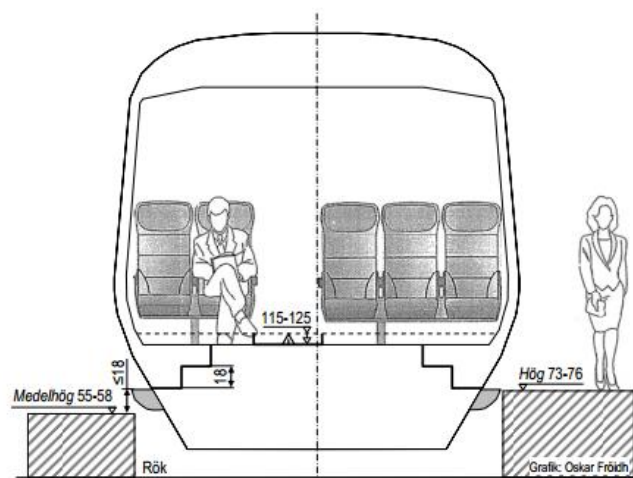
Tabell 5. Sammanfattning av olycksfrekvenser för persontåg vilket bygger på Banverkets (2007) rapport.

Referens	Brand i persontåg [Olyckor per tågakilometer]
1995 Generisk data Urspårning, kollisioner och bränder på svenska järnvägar mellan åren 1985-1995, Erik Sparre	Persontåg: $1,2 \times 10^{-7}$
2000 Generisk data Analys av olycksstatistik i HÄR 1994-1999 Brand, kollision och urspårning, A Olsson, S Authén	Fordonsfel: $9,05 \times 10^{-8}$ Sekundära fel i form av urspårning och kollision: $4,35 \times 10^{-9}$ Övrig orsak: $3,92 \times 10^{-8}$
2004 Citybanans tunnelar	Motorvagn: $4,05 \times 10^{-8}$ Lokdragnet tåg: 18×10^{-8}
2002 Citytunnelns tunnelar	Motorvagnståg: $4,03 \times 10^{-8}$ Sitt- och restaurangvagn: $4,8 \times 10^{-10}$ Lok: $3,3 \times 10^{-8}$ Ligg- eller sovvagn: $1,2 \times 10^{-10}$
1999 Grödingebanan	Sitt eller restaurangvagn: $1,5 \times 10^{-8}$ Sov- eller liggvagn: $1,5 \times 10^{-8}$ Lok: $1,5 \times 10^{-8}$
2003 Hallandsåstunneln	Motorvagnståg: $3,7 \times 10^{-8}$ Lok: $1,1 \times 10^{-9}$ Ligg- eller sovvagnar/Sitt- och restaurangvagn: $2,0 \times 10^{-10}$
2002 Nygårdstunneln	Sitt eller restaurangvagn: $1,5 \times 10^{-8}$ Sov- eller liggvagn: $1,5 \times 10^{-8}$ Lok: $1,5 \times 10^{-8}$
2004 Ådalsbanan	Sitt eller restaurangvagn: $2,3 \times 10^{-8}$ Sov- eller liggvagn: $1,3 \times 10^{-8}$ Lok: $5,7 \times 10^{-8}$

Appendix 3. Gångvägarnas utformning och placering

I samtliga scenario finns två utrymningsgångvägar placerade längst med respektive sida av spåret. Dessa utrymningsgångvägar leder till utrymningsvägar i form av tvärtunnelar eller tunnelmynningar som är placerade med maximalt 500 meters mellanrum. Höjden och bredden på gångvägarna varierar beroende på om utrymning sker via rälsnivå eller via upphöjda utrymningsgångvägar. Anledningen till att gångvägens bredd varierar beror främst på att olika gångbaneformationer leder till olika tunneltvärsnitt och att tunneltvärsnittet kan tillåta bredare gångvägar utan att tunnelns innerdiameter ökar.

För att ta reda på var utrymningsgångvägarna kan placeras är det viktigt att beakta det fria utrymme som krävs längs med spårbanan. Banverkets föreskrift BVF 586.20 anger de krav som gäller på fritt utrymme utmed banan.



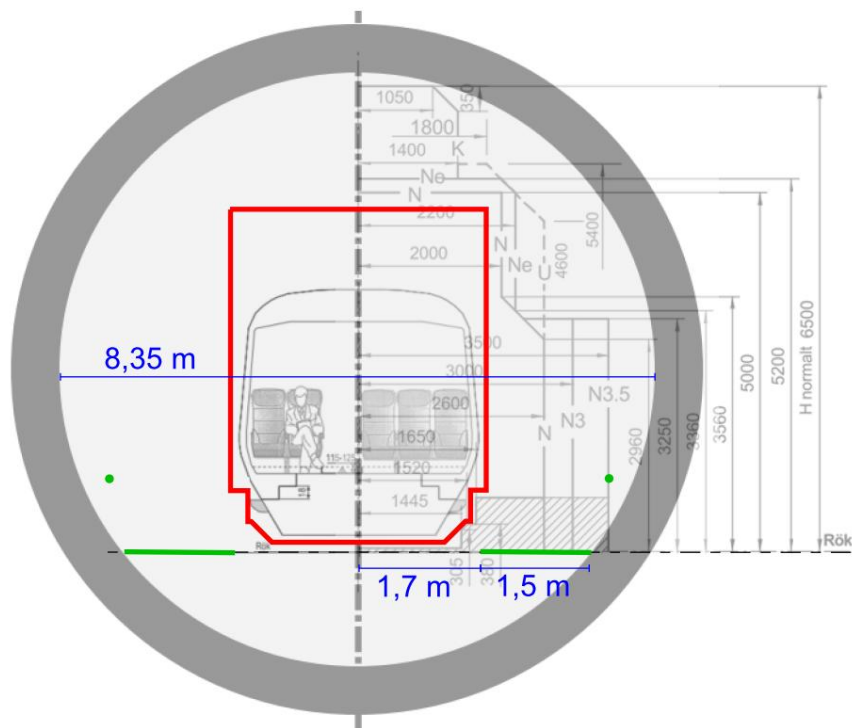
Figur 32. Till vänster i bild sker avstigning till en medelhög plattform (55-58 cm) via tre trappsteg medan det till höger i bild sker avstigning till en hög plattform (73-76 cm) via två trappsteg. Bild: Fröidh, 2010

Vid val av plattformshöjd är det lämpligt att utgå från de standardplattformshöjder som finns i Sverige idag nämligen medelhöga och höga plattformar (55 – 76 cm). Avstigning till dessa plattformshöjder illustreras i Figur 32. Den plattformshöjd som resulterar i minst tunneltvärsnitt och därefter bredast gångvägar väljs, dock förutsätts att minimikraven på 1.2 meters bredd uppfylls.

Utrymning via rälsnivå

Utrymning via rälsnivå medför att passagerarna måste utföra en kraftig vertikal förflyttning ner till en av de båda utrymningsgångvägarna. Detta antingen genom att klättra eller genom att hoppa ner till en utav gångvägarna längst med tåget. En sådan vertikal förflyttning antas enligt avsnitt 4.2.1 leda till ett personflöde på cirka 0.25 passagerare per sekund genom dörröppningen vid tillfredställande nödbelysning.

Ledstängerna ska placeras cirka 1 meter ovanför utrymningsgångvägen och minst 3.5 meter från spårets mittpunkt. Till följd av ledstängernas placering tillåts utrymningsgångvägarna automatiskt att blir något bredare än de ställda kraven på 1.2 meters bredd nämligen 1.5 meter.

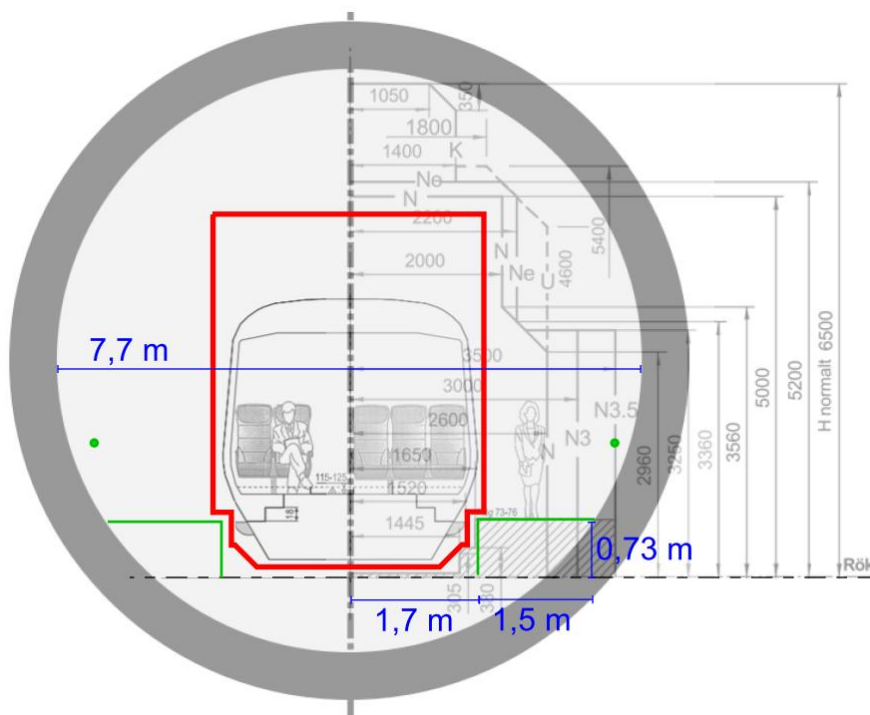


Figur 33. Bilden illustrerar tunnelvärsnittet då utrymning sker via rälsnivå.

Uppskattningar och beräkningar i appendix 1 resulterar i en total byggnations- och materialkostnad på cirka 269 000 kr per meter tunnel. Dessa beräkningar utgår från en innerdiameter på 8,35 meter och att inga plattformar byggs.

Utrymning via upphöjda utrymningsgångvägar

Utrymning via upphöjda utrymningsgångvägar innebär att två vertikala förflyttningar kan krävas för att en utrymnande person ska kunna nå en utrymningsväg. Anledningen till att två vertikala förflyttningar kan krävas är att utrymningsvägarna i många fall endast finns placerade längst med ena tunnelväggen och därmed kan de utrymnande personerna i ett senare skede tvingas korsas spåret vilket innebär två vertikala förflyttningar.



Figur 34. Bilden illustrerar tunneltvärsnittet då utrymning sker via upphöjda gångvägar.

Uppskattningar och beräkningar i appendix 1 resulterar i en total byggnations- och materialkostnad på cirka 246 000 kr per meter tunnel. Dessa beräkningar utgår från en innerdiameter på 7,7 meter och att två plattformar byggs.

Ledstängernas placering

Enligt TSD SRT och Trafikverket Tunnel 11 ska ledstängerna placeras cirka 1 meter ovanför gångvägarna och utanför gångvägarnas minimibredd. Ledstängerna bedöms som ett långsträckt hinder vilket innebär att de måste placeras minst 3,5 meter från spår mitt. Det finns dock inga krav på hur långt ifrån gångvägen ledstängerna tillåts placeras. Författaren uppskattar dock att ledstängerna bör placeras maximalt 25 cm från utrymningsgångvägens ytterkant så att avståndet till ledstängerna inte hindrar de utrymmande att utnyttja dem.

Appendix 4. Utrymningsberäkningar

För att ta reda på om en individ hinner utrymma innan kritiska förhållanden uppstår måste man ta reda på hur branden påverkar individen under förflyttningen till en säker plats. Temperatur, halter av giftiga gaser samt siktsträcka varierar beroende på var individen befinner sig i förhållande till branden och vid vilken tidpunkt. Genom att dela in individens förflyttning i olika tidsintervall kan man studera vilka förhållanden individen utsätts för under respektive tidsintervall. Förhållandena som individen utsätts för under respektive tidsintervall används för att beräkna gånghastigheten under nästkommande tidsintervall samt för att ackumulera fraktionsdoserna av O_2 , CO , CO_2 och temperatur. Där det sistnämnda görs för att beräkna den totala dos av värmepåverkan och toxicitet som individen utsätts för inom respektive tidsintervall. Uppnås kritisk dos antas medvetlöshet uppstå och förflyttningen stoppas.

För att förenkla utrymningsberäkningarna antas de utrymmande individerna förflytta sig i grupper där samtliga individer i gruppen förflyttar sig med samma hastighet och utsätts för samma förhållanden. De olika grupperna antas inte heller påverka varandra under utrymningsförloppet. Så länge gruppen befinner sig inuti tåget antas gruppen inte påverkas av branden. Först när gruppen tagit sig ut i tunneln antas branden börja påverka gruppen.

Om medvetlöshet uppstår antas gruppen inte kunna fullfölja sin förflyttning till en säker plats och gruppens förflyttning upphöra. Beräkningarna utförs i tidssteg om 30 sekunder. Doserna ackumuleras för respektive tidssteg tills kritiska förhållanden uppnåtts eller tills gruppen förflyttat sig till en säker plats.

Förhållandena som gruppen utsätts för varierar med avseende på tid (t) och avstånd från brandens startpunkt (x).

Utrymningsberäkningarna upprepas för varje tidssteg samt för respektive grupp.

Appendix 5. Matlab beräkningar

Vad som beräknas i Matlab

Matlab beräkningarna innefattar främst följande punkter.

- Beräkning av FID värdet (Fractional Incapacitation Dose) vilket mäter hur långt gången en individ är mot att tappa medvetandet.
- Beräkning av FLD värdet (Fractional Lethal Dose) vilket mäter hur långt gången en individ är mot att omkomma.
- Beräkning av dos rökpartiklar. Där koncentrationen mäts i massa g/m³.
- Beräkning av följande gas koncentrationer: CO, CO₂ samt O₂. Där koncentrationerna anges enligt följande: CO ppm, O₂ % samt CO₂ %.
- Samt gånghastigheten med avseende på rådande förhållanden i tunneln.

Kod för handberäkningar i Matlab

```
function
[ fed, fedco2, fld, smoke, ftemp, temp, xo2, xco2, xco, visibility, deltadistance ] = FED( tid, distance, reactiontime, deltatime, move )

% Calculation of FID value (Fractional Incapacitation Dose, unconsciousness) and
% FLD value (Fractional Lethal Dose, Mortality)
% The calculation also includes:
% Dose of smoke particles, where the concentration is measured in g/m3
% The following gases: CO ppm, CO2% and O2%

% Constants:
To=6; % [Degree Celsius] Start temperature in the tunnel.
Area=46.57; % [m2] Varies with the tunnels cross section. With platforms.
%Area=54.76; % [m2] Without platforms.
htot=0.03;
wind=0.5; % [m/s]
%wind=1.5; % [m/s]
beta=0.001;
Perim=33.4; % [m] Varies with the tunnels cross section. With platforms 30,8 and
without platforms 33,4.
smkpot=0.09;

% Current time
realtime=(tid+reactiontime)/60; %[min]
tau=(realtime*60)-distance/wind; %[sec]
if tau<0
    tau=1;
end

% Heat release rate for scenario 1 - 15 MW and 0.012 kW/s2
%alfa=0.012; % [kW/s2]
%Qmax=15000; % [kW]
%if tau<1140
%    Qtau=alfa*tau^2;
%elseif tau>4440
%    Qtau=Qmax*exp(-beta*(tau-sqrt(Qmax/alfa)));
%else
%    Qtau=Qmax;
%end

% Heat release rate for Scenario 2 - 15 MW and 0.0029 kW/s2
%alfa=0.0029; % [kW/s2]
%Qmax=15000; % [kW]
%if tau<2274
%    Qtau=alfa*tau^2;
%elseif tau>4913
%    Qtau=Qmax*exp(-beta*(tau-sqrt(Qmax/alfa)));
```

```

%else
%   Qtau=Qmax;
%end

% Heat release rate for Scenario 3 - 20 MW and 0.047 kW/s2
alfa=0.047; % [kW/s2]
Qmax=20000; % [kW]
if tau<652
    Qtau=alfa*tau^2;
elseif tau>1220
    Qtau=Qmax*exp(-beta*(tau-sqrt(Qmax/alfa)));
else
    Qtau=Qmax;
end

% Calculation of the current gas temperature
Tfire=To+(0.7*Qtau/(1.2*wind*Area));
temp=To+(Tfire-To)*exp(-htot*Perim*distance/(1.2*wind*Area*1));

%Calculation of current oxygen concentration in percent
xo2=(0.2095-((Qtau*29*(0.2095*(32/29)+3.5)))/(30000*32*1.2*wind*Area))*100;
if xo2<0
    xo2=0.0001;
end

% Calculation of current carbon dioxide concentration in percent
xco2=(Qtau*(1+3.5)*100)/(30000*1.2*wind*Area);

% Calculation of current carbon monoxide concentration in ppm
xco=(0.05*29*Qtau*1E6)/(28*30000*1.2*wind*Area);

% Calculation of current smoke concentration in kg/m3
koncmass=smkpot*Qtau/(30000*wind*Area);

% Calculation of extinction coefficient, k, for a specific time step with no unit
k=2.3*koncmass*3300;

% How the smoke density affect the walking speed in m/s - Assumes irritating smoke
walkingspeed=1.24182-0.434463*k;
if k<0.23
    walkingspeed=1.142;
end
if k>2.00
    walkingspeed=0.373;
end
deltadistance=walkingspeed*deltatime; %[m]

% INCAPACITATION DUE TO TOXIC INHALATION
FICO=((8.2925E-4)*(xco^1.036)*(deltatime/60))/(30);
FIO2=(1/exp(8.13-0.54*(20.9-xo2)))*(deltatime/60);
VCO2=exp(0.1903*xco2+2.0004)/7.1;
FICO2=(1/exp(6.1623-0.5189*xco2))*(deltatime/60);

% INCAPACITATION DUE TO CONVECTIVE HEAT (Only if temp is over 37 degrees)
if temp>37
    FITEMP=1/(exp(5.18-0.0273*temp))*(deltatime/60);
else
    FITEMP=0;
end

%VISIBILITY DISTANCE (according to Haukurs paper)
visibility=exp(0.257-0.898*log(3300*koncmass));

%TOTAL TOXIC IMPACT (Output incapacitation)
fed=FICO*VCO2+FIO2; % Accumulated dose of FID
fedco2=FICO2; % Accumulated dose of CO2
ftemp=FITEMP; % Accumulated dose of temp

```

```
% Pursers model. If not achieved incapation level ie moving = 1 for the first term.
Otherwise, the calculated CO intake with a lower RMV.
% If any concentration of O2 below the acute toxic level set FLD = 2, which will
stop the evacuation. Average value between 7.8% and 9.6% according sfpe / Purser

% LETHAL CONDITIONS
% Pursers model. If the passenger not have achieved incapation level (moving =1)
are the first expression used. Otherwise the calculation of CO are made with a
lower RMV.
% If any concentration for O2 is below 8.7 percent FLD will be set to FLD=2, which
will stop the evacuation.
if move==1
    FLCO=8.2925E-4*xco^1.036*deltatime/(60*50);
else
    FLCO=1.99E-4*xco^1.036*deltatime/(60*50);
end

%OUTPUT LETHAL
fld=FLCO*VCO2+FIO2;
if xo2<8.7
    fld=2;
end

smoke=koncmass*1000*deltatime/60; % It shall be in g/m3 therefor times 1000.
```

```

% Calculates FED for passengers walking in the tunnel. Assuming that there is a
function file called by FED(time,distance,reactiontime,deltatime,move)
clear

clear all

% Constants:
reactiontime=180; %[sec] Decision- and reaction time for passengers.
%reactiontime=480; %[sec] Decision- and reaction time for passengers.
NoStep=240; % [240 calculation steps] 240x30sec=7200sec=120min
L=25; %[m] Distance between the fire and the exit the group of passengers use.
First exit.
%L=35; %[m] Second exit.
%L=60; %[m] Third exit.

deltatime=30; %[sec] Interval in seconds

deltaL1=1; % Initial value of the groups movement forward in the tunnel
deltaL2=1;
deltaL3=1;
deltaL4=1;
fed1=0;
fed2=0;
fed3=0;
fed4=0;
kumfed1=0;
kumfed2=0;
kumfed3=0;
kumfed4=0;
kumfed1co2=0;
kumfed2co2=0;
kumfed3co2=0;
kumfed4co2=0;
kumfld1=0;
kumfld2=0;
kumfld3=0;
kumfld4=0;
kumsmoke1=0;
kumsmoke2=0;
kumsmoke3=0;
kumsmoke4=0;
kumtemp1=0;
kumtemp2=0;
kumtemp3=0;
kumtemp4=0;
moving1=1;
moving2=1;
moving3=1;
moving4=1;
temp1=6;
temp2=6;
temp3=6;
temp4=6;
xo2_1=21;
xo2_2=21;
xo2_3=21;
xo2_4=21;
xco2_1=0;
xco2_2=0;
xco2_3=0;
xco2_4=0;
xco_1=0;
xco_2=0;
xco_3=0;
xco_4=0;
visibility1=100;
visibility2=100;
visibility3=100;

```

```

visibility4=100;
t=15; % Start time for the first step. Only used for the calculation of values in
the middle of each step.

x1=L;
x2=L;
x3=L;
x4=L;

% Same value as x1 for the current time step. Only used to print the results matrix
WALKDISTANCE.
x1ber=L;
x2ber=L;
x3ber=L;
x4ber=L;
timestep=1;

% Calculations for groups that are escaping from the same door, in those
calculation we count with four different groups.
% The calculations start:
for timestep = 1:NoStep

[fed1,co2fed1,fld1,fsmoke1,ftemp1,temp1,xo2_1,xco2_1,xco_1,visibility1,deltaL1]=FED
(t,x1,reactiontime,deltatime,moving1);
    moving1=0;
    kumfed1=kumfed1+fed1;
    kumfed1co2=kumfed1co2+co2fed1;
    kumfld1=kumfld1+fld1;
    kumsmoke1=kumsmoke1+fsmoke1;
    kumtemp1=kumtemp1+ftemp1;
    temp1=temp1;
    x1ber=x1;
    if kumfed1<1
        if kumfed1co2<1
            if kumtemp1<1
                x1=x1+deltaL1;
                moving1=1;
            end
        end
    end
end

    if timestep >= 2

[fed2,co2fed2,fld2,fsmoke2,ftemp2,temp2,xo2_2,xco2_2,xco_2,visibility2,deltaL2]=FED
(t,x2,reactiontime,deltatime,moving2);
    moving2=0;
    kumfed2=kumfed2+fed2;
    kumfed2co2=kumfed2co2+co2fed2;
    kumfld2=kumfld2+fld2;
    kumsmoke2=kumsmoke2+fsmoke2;
    kumtemp2=kumtemp2+ftemp2;
    temp2=temp2;
    x2ber=x2;
    if kumfed2<1
        if kumfed2co2<1
            if kumtemp2<1
                x2=x2+deltaL2;
                moving2=1;
            end
        end
    end
end
end

    if timestep >= 3

[fed3,co2fed3,fld3,fsmoke3,ftemp3,temp3,xo2_3,xco2_3,xco_3,visibility3,deltaL3]=FED
(t,x3,reactiontime,deltatime,moving3);
    moving3=0;
    kumfed3=kumfed3+fed3;

```

```

kumfed3co2=kumfed3co2+co2fed3;
kumfld3=kumfld3+fld3;
kumsmoke3=kumsmoke3+fsmoke3;
kumtemp3=kumtemp3+ftemp3;
x3ber=x3;
if kumfed3<1
    if kumfed3co2<1
        if kumtemp3<1
            x3=x3+deltaL3;
            moving3=1;
        end
    end
end
end

if timestep >= 4
[fed4,co2fed4,fld4,fsmoke4,ftemp4,temp4,xo2_4,xco2_4,xco_4,visibility4,deltaL4]=FED
(t,x4,reactiontime,deltatime,moving4);
moving4=0;
kumfed4=kumfed4+fed4;
kumfed4co2=kumfed4co2+co2fed4;
kumfld4=kumfld4+fld4;
kumsmoke4=kumsmoke4+fsmoke4;
kumtemp4=kumtemp4+ftemp4;
x4ber=x4;
if kumfed4<1
    if kumfed4co2<1
        if kumtemp4<1
            x4=x4+deltaL4;
            moving4=1;
        end
    end
end
end
end

% Time in minutes after the evacuation from the train starts.
time=timestep*0.5; %[min]

% Time in minutes from the time the fire started (including reaction time)
realtime=time+reactiontime/60; %[min]

RESDFED(timestep,:)=[timestep realtime fed1 fed2 fed3 fed4];
RESFED(timestep,:)=[timestep realtime kumfed1 kumfed2 kumfed3 kumfed4];
RESFEDCO2(timestep,:)=[timestep realtime kumfed1co2 kumfed2co2 kumfed3co2
kumfed4co2];
RESFLD(timestep,:)=[timestep realtime kumfld1 kumfld2 kumfld3 kumfld4];
RESSMOKE(timestep,:)=[timestep realtime kumsmoke1 kumsmoke2 kumsmoke3
kumsmoke4];
RESFTEMP(timestep,:)=[timestep realtime kumtemp1 kumtemp2 kumtemp3 kumtemp4];
RESTEMP(timestep,:)=[timestep realtime temp1 temp2 temp3 temp4];
RESXO2(timestep,:)=[timestep realtime xo2_1 xo2_2 xo2_3 xo2_4];
RESXCO2(timestep,:)=[timestep realtime xco2_1 xco2_2 xco2_3 xco2_4];
RESXCO(timestep,:)=[timestep realtime xco_1 xco_2 xco_3 xco_4];
RESSIKT(timestep,:)=[timestep realtime visibility1 visibility2 visibility3
visibility4];
RESGANG(timestep,:)=[timestep realtime x1ber x2ber x3ber x4ber];
t=t+deltatime; %[sec]

end

```

Appendix 6. Brandberäkningar

Nedan anges de modeller som används vid beräkning av temperatur, gaskoncentration och röktäthet. Beräkningarna görs vid olika tidpunkter och på olika avstånd från brandens startpunkt.

På grund av de stora osäkerheter som råder både vid utrymningsberäkningar och vid brandberäkningar har en så enkel modell som möjligt valts vid brandberäkningarna. Antagande görs om att brandgaserna följer vindens riktning och att en fullständig omblandning av brandgaser och luft sker redan vid brandens startpunkt. Detta innebär att följande beräkningar bortser från den skiktning av brandgaser som sker närmast själva brandhärden på grund av den termiska stigningen. Studier visar att skiktningen tenderar att upphöra på ett avstånd som är cirka 10-20 gånger längre än den hydrauliska diametern (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001). I fallet med en helt cylindrisk tunnel motsvarar den hydrauliska diametern tunnelns innerdiameter. Antagandet att en fullständig omblandning sker redan vid brandens startpunkt medför att tiden till kritiska förhållanden överskattas. Brandspridning till andra passagerarvagnar tas inte med i beräkningarna.

I kommande ekvationer används uttrycket τ för att beskriva den tidsförskjutning som uppstår till följd av brandgasernas transporttid. τ uttrycks enligt nedanstående ekvation.

$$\tau = \text{tid från brandstart} - \frac{\text{avstånd från brandens startpunkt}}{\text{vindhastighet}} = t - \frac{x}{u}$$

Brandgastemperatur

Brandgastemperaturen närmast brandens startpunkt kan vid antagandet om fullständig uppblandning beräknas enligt ekvationen nedan.

$$T_{g,0}(t) = T_0 + \frac{0.7Q(t)}{\rho_0 u A} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Brandgasernas temperatur varierar med avseende på tid (t) och avstånd från brandens startpunkt (x) enligt ekvationen nedan.

$$T_g(x, t) = T_0 + [T_{g,0}(\tau) - T_0] e^{-\frac{h_{\text{tot}} P_x x}{\rho_0 u A C_p}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Där:

$$\tau = t - \frac{x}{u} = \text{Tidsförskjutning till följd av brandgasernas transporttid [s]}$$

$$T_0 = \text{Start temperatur i tunneln} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$x = \text{avstånd från brandens startplats [m]}$$

$$P_x = 2b + 2h = 4 \times \text{tunnelns tvärsnitt i meter} \approx 28 \text{ m}$$

$$\rho_0 = \text{densiteten för luft} = 1,2$$

$$u = \text{vindens hastighet} = 1 \text{ m/s}$$

$$t = \text{tid från brandens start [s]}$$

$$h_{\text{tot}} = \text{värmeförlustkoefficienten för utsprängda tunnlar antas till} = 0.03 \text{ kW/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_p = 1 \text{ kW/}^\circ\text{C kg för luft}$$

Effektutveckling och tillväxthastighet

Brand 1

Efter 19 minuter antas en konstant brandeffekt på 15 MW tills branden börjar avta efter cirka 74 minuter.

$$\begin{aligned} Q(\tau) &= \alpha_L \times \tau^2, & \text{om } \tau < 1140 \text{ sek} \\ Q(\tau) &= Q_{\max} \times e^{(-\beta \times (\tau - \sqrt{Q_{\max}/\alpha_L}))}, & \text{om } \tau < 4440 \text{ sek} \\ Q(\tau) &= Q_{\max}, & \text{om } 1140 \text{ sek} \leq \tau \leq 4440 \text{ sek} \end{aligned}$$

Där:

$$\alpha_L = \text{brandtillväxtkoefficienten} = 0,012 \text{ kW/s}^2$$

$$Q(\tau) = 15 \text{ MW}$$

$$\beta = 0,001$$

Brand 2

Efter 38 minuter antas en konstant brandeffekt på 15 MW tills branden börjar avta efter cirka 81 minuter.

$$\begin{aligned} Q(\tau) &= \alpha_L \times \tau^2, & \text{om } \tau < 2274 \text{ sek} \\ Q(\tau) &= Q_{\max} \times e^{(-\beta \times (\tau - \sqrt{Q_{\max}/\alpha_L}))}, & \text{om } \tau < 4913 \text{ sek} \\ Q(\tau) &= Q_{\max}, & \text{om } 2274 \text{ sek} \leq \tau \leq 4913 \text{ sek} \end{aligned}$$

Där:

$$\alpha_L = \text{brandtillväxtkoefficienten} = 0,0029 \text{ kW/s}^2$$

$$Q(\tau) = 15 \text{ MW}$$

$$\beta = 0,001$$

Brand 3

Efter 11 minuter antas en konstant brandeffekt på 20 MW tills branden börjar avta efter cirka 20 minuter.

$$\begin{aligned} Q(\tau) &= \alpha_L \times \tau^2, & \text{om } \tau < 652 \text{ sek} \\ Q(\tau) &= Q_{\max} \times e^{(-\beta \times (\tau - \sqrt{Q_{\max}/\alpha_L}))}, & \text{om } \tau < 1220 \text{ sek} \\ Q(\tau) &= Q_{\max}, & \text{om } 652 \text{ sek} \leq \tau \leq 1220 \text{ sek} \end{aligned}$$

Där:

$$\alpha_L = \text{brandtillväxtkoefficienten} = 0,047 \text{ kW/s}^2$$

$$Q(\tau) = 20 \text{ MW}$$

$$\beta = 0,001$$

Koncentration syre, koldioxid samt kolmonoxid

Gaskoncentrationerna för syre, koldioxid och kolmonoxid varierar med avseende på tid (t) och avstånd från brandens startpunkt (x). Dessa gaskoncentrationer kan beräknas enligt ekvationerna nedan.

$$\text{Konc syre} = X_{O_2}(t, x) = \left[X_{\infty} - \frac{Q(\tau)}{\Delta H} \frac{M_a}{M_{O_2}} \left(\frac{X_{\infty} \frac{M_{O_2}}{M_a} + r_0}{\rho_0 u A} \right) \right] \times 100[\%]$$

$$\text{Konc koldioxid} = X_{\text{CO}_2}(t, x) = \left[\frac{Q(\tau) (1 + r_0)}{\Delta H \rho_0 u A} \right] \times 100 [\%]$$

$$\text{Konc kolmonoxid} = X_{\text{CO}}(t, x) = \left[Y_{\text{CO}} \frac{M_a}{M_{\text{CO}}} \frac{Q(\tau)}{\Delta H \rho_0 u A} \right] \times 1\text{E}6 [\text{ppm}]$$

Där:

$$M_{\text{O}_2} = 32\text{g/mol}$$

$$M_a = 29\text{g/mol}$$

$$M_{\text{CO}} = 28\text{g/mol}$$

ΔH = effektiva förbränningsvärdet $\approx 30\text{MJ/kg}$

r_0 = stökiometrisk förbränningskoefficienten ≈ 3.5

Y_{CO} = Andelen Co per gram bränsle som förbränns \approx från 0.01 till 0.05g/g

Rökkoncentration, röktäthet samt sikt

Beroende på hur mycket rök som bildas kan siktförhållandena inne i tunneln variera. Rökkoncentrationen (C_s) varierar med avseende på tid (t) och avstånd från brandens startpunkt (x). Beräkningarna av rökkoncentration nedan grundar sig på att rökutvecklingen per gram bränsle är relativt konstant under brandförloppet.

$$C_s(t, x) = Y_s \frac{Q(\tau)}{\Delta H u A} [\text{kg/m}^3]$$

Där:

Y_s = Andelen rök som bildas då 1 gram bränsle förbränns, antas i många fall till 9% (g rök/g bränsle) (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001)

Då rökkoncentrationen, C_s , beräknats kan även röktätheten (k) beräknas enligt nedan:

$$k, \text{extinction coefficient} = 2,3 \times 3300 \times C_s$$

Då rökkoncentrationen, C_s , beräknats kan även siktsträckan beräknas med hjälp av ekvationen nedan. Där siktsträckan varierar med avseende på tid (t) och avstånd från brandens startpunkt (x).

$$S(t, x) = e^{(0.257 - 0.898(\ln(3300C_s)))}$$

Appendix 7. Dos för medvetlöshet

Under utrymning utsätts de utrymmande människorna för toxisk påverkan i form av giftig gas, värme och dålig sikt. När människorna utsätts för en viss total toxisk dos kan kritiska förhållanden uppstå.

I rapporten används främst fraktionsdosen för kombinationen av CO och CO₂, fraktionsdosen för CO₂, fraktionsdosen för syrehalten samt fraktionsdosen för höga temperaturer för att ta reda på när medvetlöshet inträffar.

Giftiga gaser

Fraktionsdoserna för medvetlöshet (FID) till följd av inandning av giftiga gaser beräknas enligt nedan, där t är tiden i minuter.

$$\text{Fraktionsdos kolmonoxid} = F_{\text{CO}} = \frac{8,2925 \times 10^{-4} (\text{koncCO})^{1,036}}{30} \times t$$

$$\text{Fraktionsdos syre} = F_{\text{O}_2} = \frac{1}{e^{(8,13 - 0,54(20,9 - \text{koncO}_2))}} \times t$$

$$\text{Fraktionsdos koldioxid} = F_{\text{CO}_2} = \frac{1}{e^{(6,1623 - 0,5189 \text{koncCO}_2)}} \times t$$

Andningsfrekvensen kan ökas till följd av inandad koldioxid (V_{CO_2}) och sänkt syrehalt. En korrigering måste därför göras till följd av den ökade andningsfrekvensen. Ekvationen nedan anger den totala fraktionsdosen för medvetlöshet (FID) då kolmonoxiden kombineras med en korrelationsfaktor för andningsfrekvensen.

$$\text{Total fraktionsdos för medvetlöshet} = \text{FID} = V_{\text{CO}_2} \times F_{\text{CO}} + F_{\text{O}_2}$$

Där:

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{e^{(2,0004 + 0,1903 \text{koncCO}_2)}}{7,1}$$

Värmepåverkan

Fraktionsdosen för medvetlöshet till följd av höga temperaturer på brandgaserna beräknas enligt nedan, där t är tiden i minuter och fraktionsdosen för temperatur endast används då temperaturen är över 37°.

$$\text{Fraktionsdos temperatur} = F_{\text{Temp}} = \frac{1}{e^{(5,18 - 0,0273T)}} \times t$$

Sikt

Siktsträckan bestäms i enlighet med hjälp av följande ekvation.

$$S(t, x) = e^{(0,257 - 0,898(\ln(3300C_s)))}$$

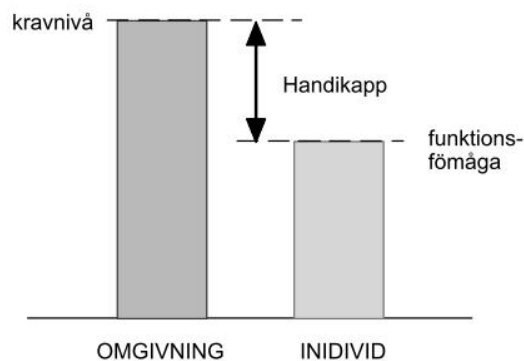
Total toxisk påverkan

Medvetlöshet antas inträffa när minst ett utav följande gränsvärden uppnåts.

- FID > 1
- Ackumulerad dos $F_{\text{Temp}} > 1$
- Ackumulerad dos $F_{\text{CO}_2} > 1$

Appendix 8. Möjlighet till självutrymning vid funktionsnedsättning

I Sverige finns drygt en miljon människor som själva uppger att de har någon form utav funktionsnedsättning (Andersson, 2012). Dessa funktionsnedsättningar kan exempelvis bero på synnedsättning, hörselnedsättning eller rörelsenedsättning. Heinz och Kottenhoff (2001) förklarar vikten av att förstå skillnaden mellan funktionsnedsättning och handikapp. De förklarar att en individs funktionsnedsättning är oberoende av omgivningen medan ett handikapp är en kombination av den omgivning individen befinner sig i och individens funktionsförmåga. Är omgivningen anpassad för en specifik funktionsnedsättning uppstår alltså inget handikapp. Heinz och Kottenhoff förklarar också att en icke funktionshindrad person kan uppleva ett handikapp. Som exempel nämner de att en icke funktionshindrad person som bär på mycket bagage så som barnvagn, cykel, skidor eller hund kan uppleva ett handikapp då han eller hon exempelvis ska ta sig upp för en brant trappa. Genom att reducera omgivningens krav så att kraven inte överstiger funktionsförmågan kan alltså handikapp reduceras, se Figur 35. Heinz och Kottenhoff drar genom detta enkla resonemang slutsatsen att "långt ifrån alla handikappade situationer är kopplade till någon funktionsnedsättning hos resenären".



Figur 35. Figuren illustrerar att ett handikapp är beroende av omgivningens kravnivå. Bild: Heinze & Kottenhoff, 2001

Många av de modernare motortågen är idag handikappvänliga. Som exempel kan nämnas de moderna Öresundstågen som har utrustats med en handikappvänlig vagn. I denna vagn finns rullstolsplatser, en rymlig toalett och dessutom har nivåskillnaden mellan vagn och plattform minimerats. De senaste årtiondena har det genomförts en hel del åtgärder för att öka tågtrafikens tillgänglighet. I dagsläget är till exempel alla X2000-tåg, Intercitytåg och pendeltåg försedda med minst en men ofta flera rullstolsplatser.

Ahlfont och Lundström (2012) rekommenderar efter genomförda försök att gångbanebredder inte bör understiga 0,9 meter för att ge rullstolsburna passagerare en möjlighet till att självutrymma. Ahlfont och Lundströms försök gick ut på att låta försökspersoner promenera längst med utrymningsgångvägar med olika bredder för att ta reda på vilket flöde olika bredder resulterade i samt hur trygga passagerarna kände sig vid olika bredder. (Ahlfont & Lundström, 2012).

För rullstolsburna rekommenderar SFPE-handboken (Society of Fire Protection Engineers) en förflyttningshastighet på 0,69 m/s och om den rullstolsburna blir assisterad rekommenderas en förflyttningshastighet på 1,3 m/s.



Figur 36. Handikappvänligt Öresundståg, med rullstolsplats samt ett lågt och jämnt insteg. Bild: Öresundståg, 2013

Appendix 9. Exempel på fallstudie

Diskonteringsräntan används för att räkna om framtida kostnader och nyttor till ett nuvärde. SIKA (2008:3) rekommenderar en samhällsekonomisk diskonteringsränta på 4 procent vilket även står angivet i ASEK 4.

Enligt BVS 585.40 bör den ekonomiska livslängden för betongkonstruktioner samt inredning så som innertak och innerväggar vara minst i klass TLK 80 vilket motsvarar livslängdsklass L50. För bärande huvudsystem bör livslängdsklassen vara minst 120 TLK vilket motsvarar livslängdsklass L100 (Olofsson, 2005). Beräkningarna nedan utförs både med en livslängd på 50 samt 100 år.

$$\text{Nettonuvärdet} = \text{PV}(\text{Nytta}) - \text{PV}(\text{Kostnad}) = \sum_{t=0}^n \frac{\text{Nytta}_t}{(1+s)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{\text{Kostnad}_t}{(1+s)^t}$$

Där:

$s = \text{diskonteringsränta} = 4 \%$

$t = \text{tiden i år}$

För att genomföra beräkningarna ovan saknas dock ett antal specificeringar som krävs för att kunna genomföra en kostnad-nyttoanalys till fullo. De parametrar som saknas är främst följande.

- En specificering av tunnelns totala längd
- En specificering av den trafik som går i tunneln, vilket till exempel kan anges i antal tågkilometer per år

Ett fiktivt exempel på en tunnel och dess trafik beräknas nedan vilket kan användas som stöd för ett resonemang kring kostnad-nytta av den säkerhetshöjande åtgärden. I den fiktiva fallstudien antas följande fakta råda gällande tunnelns utformning och trafik.

- Tunneln antas vara 10 km lång
- 40 000 tåg antas passera tunneln per år

Beräkningarna nedan utförs på Brand 1 och Brand 2 och behandlar således endast bränder på 15 MW. För större bränder riskerar samtliga passagerare att omkomma både då utrymning sker via rälsnivå och då utrymning sker via upphöjda utrymningsgångvägar vilket medför att den säkerhetshöjande åtgärden inte ökar effekten tillräckligt på egen hand utan att det krävs ytterligare åtgärder för att en säker utrymning ska kunna ske.

$$\begin{aligned} \text{Frekvens för att olycka inträffar} &= 2,80 \times 10^{-10} \times \text{tunnelns längd i km} \times \text{antal tåg per år} \\ &= 2,80 \times 10^{-10} \times 10 \times 40\,000 = 1,12 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Förväntad kostnad för förlorade liv då utrymning ur tunneln sker via rälsnivå i händelse av brand 1 och brand 2.

$$\begin{aligned} E(\text{Kostnad förlorade liv med gångvägar i rälsnivå}) &= \text{Frekvens} \times \text{Konsekvens} \\ &= 1,12 \times 10^{-4} \times 178,4 = 0,012 \text{ Mkr/år} \end{aligned}$$

Förväntad kostnad för förlorade liv då utrymning ur tunneln sker via upphöjda utrymningsgångvägar i händelse av gångvägar 1 och Brand 2.

$$E(\text{Kostnad förlorade liv med upphöjda gångvägar}) = \text{Frekvens} \times \text{Konsekvens} \\ = 1,12 \times 10^{-4} \times 0 = 0 \text{ Mkr/år}$$

Den totala nyttan av antalet räddade liv då utrymning sker via upphöjda gångvägar istället för via rälsnivå.

$$\text{Effekt} = 0,012 - 0 = 0,012 \text{ Mkr/år}$$

Nuvärdet av effekten i form av nytta beräknas fram med diskonteringsräntan 4 % både vid en livslängd på 100 respektive 50 år.

$$\text{Nuvärdet} = \sum_{t=0}^{100} \frac{12000_t}{(1 + 0,04)^t} = 0,31 \text{ MSEK}$$

$$\text{Nuvärdet} = \sum_{t=0}^{50} \frac{12000_t}{(1 + 0,04)^t} = 0,27 \text{ MSEK}$$

Resultatet från den fiktiva fallstudien visar tydligt att effekterna av en säkerhetshöjande åtgärd i form av upphöjda utrymningsgångvägar är positiv.

Nuvärdet av effekten kan dock tyckas vara relativt lågt. Anledningen till det låga nuvärdet är att sannolikheten av att en sådan olycka inträffar är oerhört låg.

Dock är införandet av säkerhetsåtgärden, upphöjda gångvägar, närmast att betrakta som oändlig lönsam då kostnaderna för investeringen är rejält negativ. I det fiktiva exemplet innebär grundinvesteringen i säkerhetsåtgärden en besparing i byggnations- och materialkostnader på cirka 230 Mkr (10 km x 23 Mkr).