



# LUND UNIVERSITY

## Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning

Frantzich, Håkan; Nilsson, Daniel

2003

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Frantzich, H., & Nilsson, D. (2003). *Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning*. (LUTVDG/TVBB--3126--SE; Vol. 3126). Fire Safety Engineering and Systems Safety.

*Total number of authors:*

2

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

# Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning

*Håkan Frantzich*

*Daniel Nilsson*

---

Department of Fire Safety Engineering  
Lund University, Sweden

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet

Report 3126, Lund 2003

Rapporten har finansierats av Brandforsk



# Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning

Håkan Frantzich  
Daniel Nilsson

Lund 2003

Rapporten har finansierats av Brandforsk

---

Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning

Håkan Frantzich, Daniel Nilsson

**Report 3126**

**ISSN: 1402-3504**

**ISRN: LUTVDG/TVBB--3126--SE**

Antal sidor: 75

Illustrationer och figurer: Håkan Frantzich och Daniel Nilsson

**Sökord:**

Utrymning, mänskligt beteende, vägledande markeringar, orienterbarhet, gånghastighet

**Keywords**

Evacuation, human behaviour, guidance signs, wayfinding, walking speed

**Abstract**

This report describes evacuation experiments, which were performed in a smoke filled tunnel. The tunnel was filled with artificial smoke and acetic acid was used to achieve irritation of the eyes and upper respiratory tract. In the experiments 46 persons walked through the tunnel one at a time, while they were filmed with infra red cameras. All participants answered a questionnaire and some were also interviewed. In the experiment different equipment was tested. The equipment included flashing lights at the emergency exits and directional guiding lights indicating the direction to an exit. In the report the relationship between walking speed and smoke density is presented and analysed. The participants' behaviour in the tunnel is also described and the important results from the questionnaires and interviews are presented. The report also includes a suggested alternative design of emergency exits.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2003.

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

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

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>

## Förord

Rapporten utgör avrapportering av Brandforsk projekt 208-021. Brandforsk är statens, försäkringsbranschens och industrins gemensamma organ för att initiera, bekosta och följa upp olika slag av brandforskning.

Projektet genomfördes under 2002-2003. Till projektet har det funnits en stödjande referensgrupp vilken är densamma som för alla projekt inom Brandforsks problemområde 2, Människans och organisationens roll och beteende. Referensgruppen har gett värdefulla synpunkter och råd kring genomförande och analys av arbetet.

För att kunna genomföra försöken har vi fått låna material från olika leverantörer och tillverkare. Vi är mycket tacksamma för detta och utan deras hjälp skulle det inte varit möjligt att genomföra försöken. Belysningsarmaturer och utrymningsskyltar har vi lånat av Eltek Fire & Safety i Linköping. Ljustråden har vi fått låna av Lystech i Trollhättan som också monterade utrustningen. Värmekameror i rökdykarhjälm har vi lånat av Helsingborgs brandförsvär, räddningsskolan i Revinge och av leverantören SOLO GB Scandinavia AB i Höllviken som också var med under försöken och såg till att dessa fungerade så bra som möjligt.

Vi vill dessutom tacka alla andra som hjälpte till under försöken och då speciellt de studenter som agerade försökspersoner.

Lund en solig dag i november 2003



## Sammanfattning

Följande rapport redovisar de utrymningsförsök som utfördes hösten 2002. Syftet med försöken var att undersöka om det var möjligt att finna ett förhållande mellan gånghastighet och röktäthet, samt att, om möjligt, verifiera data som tagits fram av Tadahisa Jin i Japan på 1970-talet. Dessutom skulle utrymnande personernas beteende studeras och möjligheten att förbättra utrymningssituationen genom att använda olika hjälpmedel undersökas.

I försöken användes en övningstunnel som finns på Räddningsverkets skola i Revinge strax utanför Lund. Tunneln är ca 37 meter lång, 5 meter bred och takhöjden är kring 2,6 meter. Tvärsnittet är rektangulärt. På en av tunnelväggarna finns utrymningssvägar, vilka leder till en utrymningstunnel som löper parallellt med övningstunneln.

Vid försöken placerades sex bilar i tunneln. Alla bilarna var placerade med samma körriktning, för att efterlikna en tunnel med separerade tunnelrör. Tunneln fylldes med konstgjord rök, men för att uppnå irritation i ögon, näsa och svalg blandades röken med ättiksyra. Röken var tät i försöken och sikten varierade mellan ca 0,5 och 2 meter. En rökdykare fanns hela tiden inne i tunneln. Rökdykarens uppgift var att hjälpa försökspersoner då de signalerade att de behövde hjälp och att filma försöken med en IR-kamera.

Totalt deltog 46 personer i försöken och det var främst studenter från Lunds tekniska högskola. Innan försöken inleddes var personerna samlade på ett ställe. Därifrån leddes de en i taget till ett rum, där de fick se en filmsekvens av en bilfärd genom en tunnel. Strax därefter försågs de med ögonbindel och leddes in i den rökfyllda tunneln. Inne i tunneln fick de instruktionen; ”Du har kört in i tunneln och stannat din bil. Det är rök i tunneln och du ska därför ta dig ut. Gör så som du hade gjort i en verklig situation.”. Därefter togs ögonbindeln av och försökspersonen var fri att på egen hand leta sig ut ur tunneln medan han filmades av rökdykaren. Samtliga försökspersoner fyllde i en enkät efter försöket och en del intervjuades om sina upplevelser.

Vid försöken användes både tänd och släckt allmänbelysning och dessutom olika kombinationer av tekniska installationer, såsom blinkande lampor vid nödutgång, rinnande ljus som indikerade riktning till nödutgång och markeringar i golvet till nödutgång. I samtliga försök användes genomlysta utrymningsskyltar, ca 38 cm x 13 cm vid nödutgångarna.

Med hjälp av videoinspelningarna har försökspersonernas gånghastigheter beräknats. Eftersom röktätheten i försöken var högre än i Jins försök, dvs sikten var sämre, gick det inte att direkt verifiera Jins resultat. Trenden från Jins försök var dock tydlig. Gånghastigheten i försöken avtar med ökande röktäthet, dvs med minskande sikt. Spridningen är dock stor, dvs om röktätheten är given är det svårt att säga med vilken hastighet en slumpmässigt utvald person kommer att förflytta sig. En närmre undersökning av gånghastigheterna visade att personerna förflyttade sig fortare då de följde väggen med ena handen och kunde på det viset orientera sig.

En av de absolut viktigaste slutsatserna som kan dras är att väggarna har stor betydelse vid utrymning. Majoriteten av försökspersonerna följde höger vägg i försöken och släppte ogärna taget om denna. Enligt de rekommendationer som ofta används vid utformning av vägtunnlar idag, krävs bara vägledande markering på den sida där nödutgångarna är belägna. Detta kan utgöra ett



problem om tunneln snabbt fylls med tät brandgas, eftersom de utrymmande som väljer att följa väggen utan markeringar riskerar att missa nödutgångarna på andra sidan. I rapporten presenteras ett förslag på utformning av tunnlar, vilket bygger på erfarenheter från försöken.

En annan viktig slutsats är att de utrymmande ofta kan ha svårigheter att förstå innebörden av avancerade tekniska installationer, t ex blinkande lampor och rinnande ljus. Dessa installationer kan främst användas till att fånga uppmärksamheten, men ofta krävs ett komplement i form av exempelvis en utrymningsskylt. De installationer som rekommenderas i tunnlar bör vara enkla för de utrymmande att förstå. Exempel på lämpliga installationer är skyltar med pilar eller pilar och markeringar som visar vägen till nödutgång.

## Summary

This report describes evacuation experiments that were performed in autumn of 2002. The purpose of the experiments was to investigate whether or not a relationship between walking speed and optical density could be found, and if possible to verify data that was produced by Tadahisa Jin in Japan in the 1970ties. In the experiments the behaviour of the evacuees was to be studied and the possibility of improving the evacuation situation, by using different evacuation information systems such as flashing lights at exits, was to be investigated.

A fire training tunnel, which is located at the Swedish Rescue Services Agency College in Revinge outside of Lund in Sweden, was used in the experiments. The tunnel is approximately 37 meters long, 5 meters wide and the distance from the floor to the ceiling is 2.6 meters. On one of the side walls there are emergency exits that lead to an evacuation tunnel, which runs parallel to the fire training tunnel.

Six cars were located in the tunnel. All cars were facing the same direction in order to resemble a road tunnel with two separated tunnel tubes, in which only one-way traffic is allowed. The tunnel was filled with artificial smoke, and acetic acid was mixed with the smoke to achieve irritation of the eyes, nose and upper respiratory tract. The smoke was dense, and the visibility varied between 0.5 and 2 meters. A fire fighter equipped with breathing apparatus was always present in the tunnel. His job was to help the participants when they signalled that they needed help, but he also filmed the experiments using an infra-red video camera.

A total of 46 persons participated in the experiments and they were mainly students from the Lund Institute of Technology. Before the experiment the participants were all gathered in one place. From that place they were escorted one at a time into a room where they were shown a short film sequence of a drive through a tunnel. Shortly thereafter they put on a blindfold and were escorted into the smoke filled tunnel. Before the blindfold was removed they were given the following instructions in Swedish; "You have driven into the tunnel and stopped your car. There is smoke in the tunnel and you shall therefore get out. Act as you would do in a real situation." After the instructions had been given the blindfold was removed and the participant was free to find his way out of the tunnel whilst being filmed by the fire fighter. All participants filled out a questionnaire after the experiment and some were also interviewed.

Different evacuation information systems were installed in the tunnel. The purpose of the study was to investigate the impact of different combinations of those installations. The combinations tested are presented below. Back-lit emergency exit signs, approx. 38 x 13 cm<sup>2</sup>, located above all exits were present in all the scenarios.

Scenario 1: normal tunnel lights

Scenario 2: normal tunnel lights and flashing lights

Scenario 3: normal tunnel lights, flashing lights and floor marking

Scenario 4: normal tunnel lights and directional guiding lights

Scenario 5: no tunnel lights and only directional guiding lights

The participants' walking speeds have been calculated using the video footage from the experiments. Because the smoke density was higher, i.e. the visibility was lower, in the experiments than in Jin's experiments it was only possible to verify Jin's data by comparing the decreasing velocity trend. The walking speed measured in the experiments decreased clearly with increasing smoke density, i.e., with decreasing visibility. However there is a great scatter in the data, i.e., if the smoke density is given it is hard to predict the walking speed for a person selected at random. A closer examination of the walking speed showed that the participants moved faster when they followed a wall.

One of the most important conclusions is that the walls are of great importance during evacuation. The majority of the participants followed the right hand wall in the experiments and were reluctant to let go of it. According to recommendations that are often used today when constructing road tunnels exit markings are only required on the wall where the emergency exits are located. This might cause problems when tunnels are rapidly filled with smoke, since the evacuees who follow the wall without markings may miss the exits located on the other side. In this report a suggestion of how tunnels can be constructed is presented. The suggestion is based on the conclusions from the experiments.

Another important conclusion is that the evacuees can have difficulty understanding the meaning of advanced evacuation information systems, such as flashing lights or directional guiding lights. These types of systems can be used mainly for getting their attention, but must often be complemented by familiar information such as exit signs. It is recommended that the systems used in tunnels should be easy for the evacuees to understand.

## Innehållsförteckning

1	Inledning.....	13
1.1	Bakgrund och problemdiskussion.....	13
1.2	Målsättning och syfte.....	16
1.3	Metod.....	16
1.4	Avgränsningar.....	17
2	Förutsättningar för genomförandet.....	19
2.1	Försökstunnel.....	19
2.2	Belysning och utrymningsmarkeringar.....	19
2.3	Rökalsstring.....	22
2.4	Ljud.....	23
2.5	Mätutrustning.....	23
2.5.1	Rök och belysning.....	23
2.5.2	Beteende.....	24
2.6	Försökspersoner.....	25
2.7	Informationsinsamling.....	26
2.8	Säkerhet.....	26
2.9	Genomförande.....	26
2.10	Försökskombinationer.....	28
3	Resultat och kommentarer.....	29
3.1	Allmänt.....	29
3.1.1	Försökspersoner.....	29
3.1.2	Tidigare erfarenhet.....	29
3.2	Beteende och gångväg.....	30
3.3	Gånghastigheter.....	33
3.3.1	Genomsnittlig gånghastighet.....	33
3.3.2	Betydelsen av allmänbelysning.....	37
3.3.3	Betydelsen av väggen som orienteringshjälp.....	39
3.3.4	Betydelsen av tidigare erfarenhet.....	42
3.4	Utrymningsskyltar.....	42
3.5	Blinkande lampor.....	44
3.6	Rinnande ljus.....	45
3.7	Golvmarkering.....	45
3.8	Hur uppfattade försökspersonerna vistelsen i tunneln?.....	45
3.8.1	Upplevda känslor.....	46

3.8.2	Fysiska obehag .....	47
3.8.3	Möjlighet att utrymma säkert .....	48
3.8.4	Skillnader med avseende på kön .....	49
3.8.5	Skillnader med avseende på exponeringstid .....	49
3.8.6	Bedömning av gångsträcka .....	49
3.9	Intervjuer .....	50
3.10	Resultat från scenarierna 6-8 .....	51
4	Diskussion .....	53
4.1	Gånghastighet genom tät rök .....	53
4.2	Utrymningsinstallationer och deras utformning .....	54
4.3	Metodologiska problem .....	57
4.4	Markovkedjor .....	58
5	Slutsatser .....	61
6	Fortsatt forskning .....	63
	Referenser .....	65
	Bilaga A. Ritningar .....	67
	Bilaga B. Enkät .....	69
	Bilaga D. Redovisning av den statistiska analysen till kapitel 3 .....	79

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund och problemdiskussion

Under de senaste åren har utvecklingen gått framåt när det gäller användandet av beräkningar för att verifiera utrymnings säkerhet. Det blir allt vanligare att ingenjörer försöker modellera ett utrymningsförlopp för att sedan kunna jämföra detta med en beräknad kritisk tid. För byggnader kan det vara förhållandevis enkelt att bestämma hur lång tid en utrymning får ta eftersom bl a Boverket ger vissa riktlinjer för vad som kan anses vara kritiska förhållanden vid utrymning, vilka tagits fram primärt med tanke på förutsättningarna för byggnader. Exempel på kriterier som används för att bestämma om byggnaders utrymnings säkerhet är tillfredsställande eller inte är lägsta nivå på brandgasskiktet, maximal temperatur och maximal strålning mot människor.

I tillägg till dessa kriterier finns det dessutom krav och rekommendationer för hur utrymningsvägar skall markeras med utrymnings skyltar och belysas med allmänbelysning och nödbelysning.

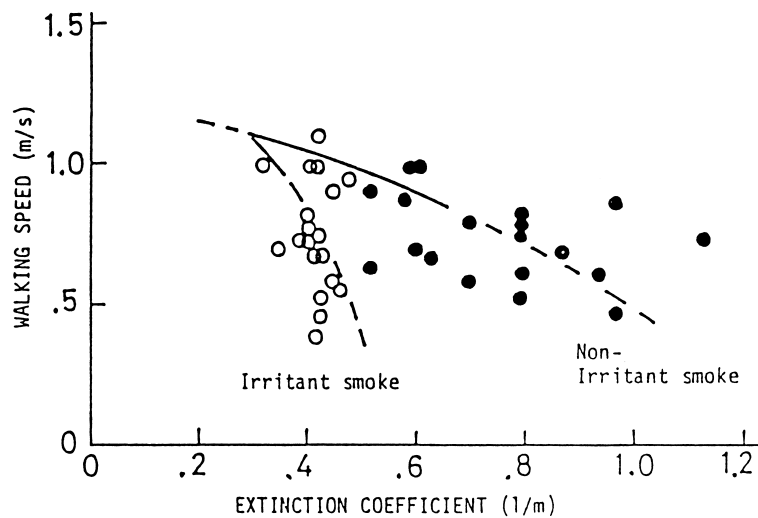
Vid andra tillämpningar, t ex riskvärdering av tunnlar och andra undermarksanläggningar, kan det förekomma att andra kriterier används. Det beror på att förloppen är mer utdragna och att branden genererar sådan miljö att de kriterier som redovisades ovan inte blir relevanta. Vid en tunnelbrand kommer brandgaser ganska snabbt att sprida sig tvärs över hela tunneltvärsnittet och då är det inte möjligt att bestämma en kritisk tid utifrån när brandgasskiktet når en viss lägsta nivå.

I stället kan man använda sig av kriterier som är kopplade till röktäthet dvs siktsträcka, toxicitet- och värmedos som den aktuella personen utsätts för. Sedan ett flertal år tillbaka finns det publicerade kriterier för exempelvis toxisk påverkan av olika produkter i brandgasen, Purser (1995). Sådana kriterier baseras på ett dosbegrepp där den exponerade dosen för några vanliga gaser som förekommer i brandgasen summeras. Modellen kallas i litteraturen ofta för Fractional Effective Dose (FED). På liknande sätt finns dosmodeller för värmeexponering pga strålning och förhöjd temperatur. Det ska också nämnas att uttrycken till FED-modellen även är förenade med en viss osäkerhet då de är baserade på ett begränsat antal försök och extrapolerade för att gälla för människor.

I FED-modellen ingår det dock inget som beskriver hur personen beter sig till följd av själva exponeringen utan det måste man ta hänsyn till i en utrymningsmodell som utnyttjar data från FED-modellen. Vanligen kan exempelvis en persons gånghastighet reduceras som en följd av att personen exponeras, då också i kombination med att sikten kanske är begränsad. Det kanske allra vanligaste sättet att modellera utrymningen på är i detta fall att förutsätta att personen är medveten fullt ut tills medvetslöshet inträffar. Däremot reduceras gånghastighet till följd av sikt nedsättning och bristande orienteringsförmåga.

För tunnelutrymning har detta angreppssätt använts i ett arbete om insatsmiljö för räddningstjänst i tunnlar, Bergqvist m fl (2001). I det fallet användes data som tagits fram i Japan under 1970-talet, Jin (1978). Materialet bygger på data som insamlats vid försök med ett ganska litet antal deltagare. Däremot har

resultaten fått en förhållandevis stor spridning och refereras ofta till som förhållandet mellan gånghastighet och röktäthet. Figur 1 visar de resultat som vanligen används vid utrymningsanalyser. Det har inte skett någon verifiering av dessa försök för att se om de är rimliga att använda.



Figur 1 Förhållandet mellan gånghastighet och röktäthet enligt Jin (1978).

Eftersom denna typ av information är väsentlig för att kunna göra en utrymningsanalys är det rimligt att verifierande försök genomförs.

Flertalet beräkningsanalyser som genomförs enligt ovan nämnda angreppssätt förutsätter att personer i övrigt går obehindrat. För flertalet komplexa miljöer som tunnlar, fartyg mm där brandgasen kan antas vara jämnt fördelad i utrymna, kommer hinder i vägen att försvåra en utrymning. För tunnlar kan det finnas bilar och andra fordon som hindrar vid en utrymning. Underlag som behandlar hur gånghastighet påverkas av sådana hinder är bristfällig och grova antaganden måste göras. Viss kunskap om hur personer rör sig i en brandgasfylld tunnel finns för vissa situationer såsom utrymning från tunnelbanetåg i en brandgasfylld tunnel, Frantzich (2000).

I de beräkningar av tunnelutrymning som genomförts i Bergqvist m fl (2001) visar det sig att siktsträckan är mycket kort för de brandscenarier som studerades. Siktsträckor i storleksordningen någon meter eller kortare uppträdde redan efter några minuter i den brandgasfyllda tunneln. I dessa fall var brandförloppet ganska omfattande och medvetet vald så att stor brandeffekt erhöles. Vid tunnelbränder är den typen av brand är inte ovanlig, vilket senare tids olyckor indikerar. Problemen som personer står inför är då, förutom minskad gånghastighet som tidigare redovisats, också att det kan vara svårt att lokalisera en utrymningsväg om en sådan finns i tunnels.

I Bergqvist m fl (2001) diskuteras kortfattat hur utrymningsvägar kan utformas för att vara möjliga att upptäcka i en tunnel där sikten är mycket begränsad. Utrymningsvägen utgörs då ofta av en tvärförbindelse till ett parallellt tunnelrör. Olika strategier finns dessutom bland tunneloperatörer för att upplysa om närvaron av en utrymningsväg. Figur 2 visar på ett exempel av utformning av dörr till en utrymningsväg. Däremot saknas det en utvärdering av hur olika utformningar påverkar personerna som utrymmer från en tunnel.



**Figur 2** Utformning av utrymningsväg i tunnel.

Det är klart att utrymningsvägen måste göras attraktiv för att den överhuvud taget ska användas, Benthorn & Frantzich (1996), och att belysa den är ett alternativ som kan övervägas. Frågor som också diskuterats är om utrymningsvägarna i en tunnel överhuvudtaget kommer att användas eftersom det dels kan vara svårt att hitta utrymningsvägen och dels att den kan uppfattas som mindre attraktiv jämfört med att fortsätta längs tunneln. Diskussionen om hur attraktiviteten påverkar valet av utrymningsväg påverkas delvis också av i vilken miljö utrymningen sker. Som nämnts kan ett val i en tunnel stå mellan en utrymningsväg till ett angränsande tunnelrör och att fortsätta i tunneln.

I andra situationer kan valet vara mer komplext eftersom valsituationen inte är lika tydlig. I en okänd byggnadsmiljö kan alternativet stå mellan en utrymningsväg och andra, men okända, möjligheter att ta sig ut. Det är inte helt uppenbart att den synliga utrymningsvägen väljs även om den är synlig och försedd med skyltar som indikerar utrymningsväg. Det kan finnas andra psykologiska aspekter som motiverar valet av den andra men ej synliga utrymningsvägen. Sådana kan exempelvis vara information om var personen ifråga kommer ifrån, dvs var personen gick in i byggnaden. Normala ingången till en byggnad eller lokal används i större grad som utrymningsväg jämfört med obekanta utrymningsvägar.

Valet av utrymningsväg i t ex en tunnel är alltså mycket tydligt kopplat till hur en person uppfattar sin situation och utifrån sina tidigare erfarenheter gör bedömningen av vad som är ett rimligt alternativ. I beteendevetenskapen finns flera modeller av hur personer agerar och en generell sådan presenteras av Wickens och Hollands (2000). De strukturerar handlandet i olika steg:

- uppfattning av en signal (sensory processing)
- varseblivning (perception)
- tolkning av intrycket (cognition and memory)
- handlande (response selection and execution).

Hela processen är dessutom återkommande med ett inslag av återkoppling (feed-back) från handlandet till uppfattandet av signalen. I Wickens och Hollands modell ingår fler steg som mer i detalj används för att beskriva de ingående delarna.



Det första steget innebär att en person på något sätt måste erhålla ett intryck via sinnesorganen. Det kan vara att höra en signal, se en symbol eller vara en kombination av flera intryck. I det andra steget ska intrycket bearbetas dvs personen ska tolka och avkoda informationen som tagits in. Tolkningen är knuten till personens tidigare erfarenhet och kunskap och innebär en reflektion av tidigare minnen. Steg tre innebär att intrycken ska knytas samman till en förståelse för vad som händer och det slutliga steget innebär att något handlande sker.

Ett väsentligt inslag i processen är den återkoppling som oundvikligen sker. I det sammanhanget diskuteras hur snabbt återkopplingen sker och just tidsaspekten är viktig. I en utrymningssituation i tät brandgas kan tidsfördröjningen i återkopplingen vara flera minuter vilket leder till osäkerhet hos personen.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att det finns brister i det befintliga underlaget för att kunna göra lite mer detaljerade analyser av ett utrymningsförlopp i t ex en tunnel. Analyser kännetecknas ofta av en kraftig inriktning mot beräkning av gångtider i brandgasfyllda miljöer. Brandgasen bidrar då till uppbyggnad av den toxiska dosen och reducerar gånghastigheten. Mindre vikt läggs vid hur personers beteenden styr agerandet vid en utrymningssituation.

Fördelningen är kanske inte helt oväntad och kan snarare sägas vara naturlig med tanke på möjligheterna att konkret använda känd kunskap vid en riskvärdering eller projektering. Det finns därför tydliga behov av att undersöka möjligheterna att bättre ta hänsyn till hur personer faktiskt beter sig i en brandgasfylld brandsituation. Dessutom är det underlag som faktiskt används idag förknippat med vissa osäkerheter och en minskning av dessa är nödvändig. Likaså är det viktigt att kunna belysa hur andra faktorer påverkar möjligheten att effektivt kunna utrymma t ex närvaron av hinder i den brandgasfyllda miljön, belysningsens effekt i den brandgasfyllda miljön, utformningen av utgångar till utrymningsvägar.

## 1.2 Målsättning och syfte

Målsättningen med projektet var att undersöka om befintliga data rörande gånghastighet i brandgasfylld miljö är korrekta. Detta undersöktes i form av en försöksserie där försökspersoner fick försöka utrymma genom en brandgasfylld miljö. Lokalisering av utrymningsvägen är en annan viktig aspekt som belystes. Olika utformningar av och nyttan med tekniska installationer för att identifiera en utrymningsväg i en brandgasfylld miljö undersöktes också.

Syftet var att genom dessa försök dels verifiera tidigare genomförda försök men också att undersöka inverkan av faktorer som påverkar t ex valet av utrymningsväg men vars inverkan inte tidigare fullt ut varit kända. Exempel på sådana faktorer är belysningsnivå, röktäthet, olika vägledande markeringar och närvaron av hinder.

## 1.3 Metod

I en serie försök fick ett antal försökspersoner individuellt försöka utrymma genom en rökfylld tunnel. Tunneln där försöken genomfördes är en övnings-tunnel som finns vid räddningsskolan i Revinge. För att efterlikna

brandgas användes en ofarlig konströk till vilken ättiksyra tillsattes för att efterlikna den irriterande effekten som riktig brandgas har på ögon och övriga slemhinnor. Försökspersonerna fick sedan individuellt passera genom tunneln med syfte att ta sig ur den simulerade situationen ”bilolycka i vägtunnel”. I försöket mättes gånghastighet under olika förhållanden t ex olika röktäthet. Försöken genomfördes med studenter vid Lunds tekniska högskola som försökspersoner. Studenterna var dock inskrivna på andra program än Brandingenjörsprogrammet och Riskhanteringsprogrammet.

Dessutom redovisas i rapporten bakgrunden till några av de försök som projektet avsåg att verifiera, främst försök genomförda av Dr Tadahisa Jin från 1970-talet.

Det som vidare undersöktes var hur beteendet vid val av utrymningsväg påverkas av närvaron av olika tekniska installationer för beslutsfattandet, främst vägledande markeringar och olika former av belysning. Denna del av försöken redovisas dock inte som ett beroende av röktätheten. Klart är dock att även beteendet kan påverkas av hur tät brandgasen är men eftersom röktätheten genomgående var hög och variationen i sikt inte så påtaglig bortses från detta. Detta är dock ett metodologiskt problem eftersom försökspersonernas gånghastighet relateras till just röktätheten. Det leder fram till en diskussion om validiteten i de slutsatser som baseras på personernas beteenden vilken förs i slutdiskussionen.

Vid samtliga försök fanns bilar utplacerade i tunneln för att så realistiskt som möjligt efterlikna miljön i en tunnel vid brand.

Alla försökspersoners rörelser i tunneln registrerades med värmekameror som kunde se genom röken. Ett flertal kameror användes för att få en tydlig beskrivning av händelseförloppet. Dessutom användes enkäter för att undersöka försökspersonernas subjektiva upplevelser av att förflytta sig i röken. Några av försökspersonerna intervjuades också för att komplettera övrig datainsamling.

### 1.4 Avgränsningar

Försök av den genomförda typen måste av praktiska skäl omgärdas av en rad avgränsningar. Alla försökspersoner som deltog i försöken var unga och friska studenter vid en teknisk högskola. Det betyder att generaliserbarheten gentemot allmänheten inte kan göras utan invändningar. Försökspersonerna hade dessutom anmält sig frivilligt. Sammantaget betyder det att försöksresultaten inte omfattar beteende och förmåga för personer som kan tänkas ha svårigheter med att utrymma genom tät brandgas.

Försöken begränsades också till att studera problemen under förutsättningen att tunneln är fylld med förhållandevis tät rök. Siktsträckan varierade från några meter till i det närmaste obefintlig sikt. Det betyder att förhållandena för försökspersonerna inte påverkades av beteenden som kan förväntas ske i samband med att inledningsvis konfronteras med annalkande brandgas. Problem som kan antas uppkomma i en verklig situation är att bilister är tveksamma till att lämna sina egna bilar för att de är rädda för att skapa trafiksvårigheter om de lämnar den eller den kan skadas.

Varje försöksperson vistades ensam i tunneln vilket gör att det var den enskilda personens beteenden som studerades. Inverkan av sociala kopplingar gentemot medtrafikanter i tunneln kunde därför inte undersökas.

## 2 Förutsättningar för genomförandet

### 2.1 Försökstunnel

Försöken genomfördes i en övningstunnel som finns på Räddningsskolan i Revinge strax utanför Lund. Tunneln är uppbyggd av transportcontainrar som är placerade efter varandra och i två parallella rader utan mellanväggar, se figur A1 i bilaga A. I centrumlinjen finns en pelarrad för att hålla upp konstruktionen. Längs ena långsidan finns en smalare gång som är förbunden med övningstunneln via två dörrar. Gången är också öppen mot det fria i båda mynningsarna. På ritningen i bilaga A är sidogången angiven som ”Utrymningstunnel”.

Övningstunneln är 36,75 m lång och 5,00 m bred. Tunneln lutar svagt nedåt från ingången vid västra sidan till en lågpunkt. Efter lågpunkten stiger tunneln igen till nivån vid markplanet. Lutningen är ca 2,5° i båda fallen. Höjden i tunneln var mellan ca 2,55 - 2,70 m. Både ingången och utgången utgörs av höga portar som kan öppnas med en fjärdedels tunnelbredd i taget. Dörrarna inne i tunneln som leder till sidogången är ca 0,9 m breda och skjuts åt sidan för att öppnas. Dörren närmast utgången är upphöjd med ca 0,3 m från golvet för att tunneln ska kunna fyllas med vatten utan att det rinner ut i sidogången. Dörren närmast ingångsportarna är i nivå med tunnelgolvet. Vid genomförandet var det svårt att öppna dörrarna men ingen av försökspersonerna behövde själva öppna någon dörr för att ta sig ut. Detta fick varje person hjälp med av rökdykaren som följde försökspersonen.

Vid försöken fanns sex bilar utplacerade i tunneln. Dessa skulle utgöra ett naturligt hinder som kan uppstå i samband med en utrymning av en vägtunnel. Alla bilarna var placerade med körriktningen åt öster, dvs med framdelarna riktade mot utgångsportarna, för att efterlikna situationen i en vägtunnel med ett parallellt tunnelrör med trafik i motsatta riktningen. Förbindelser mellan dessa tunnelrör finns då på vänstra sidan sett i bilarnas körriktning. Bilarna som användes var visserligen skrotade men var ändå i gott skick och kunde utifrån inte uppfattas som skadade. Bilarnas placering framgår av figur A2 i bilaga A. Bilarna placerades inledningsvis direkt an mot pelarraden. Motivet till det var att i så stor utsträckning som möjligt undvika att försökspersonerna skulle störas av pelarna i tunneln. När bilarna är placerade direkt mot pelarraden är det också möjligt att passera mellan bilen och tunneln yttervägg även om utrymmet är smalt, ca 0,6 m. I slutet av tunneln placerades två bilar direkt mot högra tunnelväggen som inte hade dörrar till sidogången. Anledningen till denna placering var att se hur personerna skulle lösa problemet med att hitta ny väg att gå vidare när det uppstår ett hinder.

### 2.2 Belysning och utrymningsmarkeringar

Tunneln försågs med fem takarmaturer som skulle ge en allmänbelysning i tunneln för de försök där belysningen var tänd. De fem armaturerna placerades ut på jämna avstånd och monterades i takhöjd längs den långsida som inte hade dörrar till sidogången, figur A3 i bilaga A. Armaturerna riktades snett nedåt mot centrumlinjen av tunneln och gav en jämn belysning i tunneln. Varje

armatur var försett med ett lysrör av typen Philips Master TL-D Super 80 58W/830. Belysningsnivån mättes vid de två dörrarna till sidogången och varierade mellan 2 lux till 21 lux från dörren i riktning mot motstående vägg där armaturerna monterats. Belysningsnivån avser situationen när belysningen var tänd men utan rök i tunneln.

När rök fanns i tunneln sjönk belysningsnivåerna till mellan 0 lux och 8 lux för samma positioner i tunneln. I de fall då tunnelbelysningen kompletterades med blinkande lampor vid nödutgångarna ökade nivåerna något till mellan 2 lux till 10 lux. Mätningen av belysningsnivåerna har gjorts så att variationerna i de enskilda mätpunkterna angetts som medelvärdet av flera mätningar. Klart kan dock konstateras att ljusnivåerna varit låga. Däremot uppfyllde de rekommendationen från Boverket som anger lägst 1 lux på sämst belysta stället.

För att markera utrymningsvägarna från tunneln fanns armaturer med utrymningsskyltar monterade, figur 3. Två sådana fanns monterade över de två dörrarna till sidogången, nödutgång 1 och 2. En tredje armatur med skylt fanns monterad på väggen mot sidogången mellan sista dörren till sidogången och porten vid tunnelmynningen. Vid den utrymningsskylten fanns ingen dörr men skylten hade ändå monterats för att symbolisera en möjlig utgång. Denna plats är märkt som Nödutgång 3 i figur 7. Meningen var att se om den utgången skulle väljas enbart utifrån skyltinformationen.

Armaturen som användes vid försöken var av fabrikatet Maxlux 26 från Eltek Fire & Safety. Armaturen har ett 11 W lysrör som genomlyser en utrymningsskylt av standardutförande. Skyltens storlek var ca 38 x 13 cm<sup>2</sup>. Armaturen lyser också nedåt genom en öppning i underkanten. I tunneln fanns också en annan typ av utrymningsskylt monterad. Det var en skylt av typen Ledlux 20 som där belysningen består av lysdioder som lyser upp en skylt av plexiglas. Den skylten användes dock inte vid något försök eftersom den syntes dåligt genom röken som användes.



**Figur 3** Utrymningsskyltar och blinklampor vid utgång till sidogång.

På båda sidorna av de två dörrarna till sidogången fanns två lampor monterade, figur 3. Dessa var kopplade till en anordning som gjorde att lamporna kunde blinka med en frekvens av ca 1 Hz med ungefär lika lång tid tända som släckta. Lamporna var placerade i höjd med dörrarnas ovankant och riktade ut från respektive dörr. Lampornas färg var orange.

I anslutning till den andra dörren till sidogången fanns två ljusslingor med så kallad rinnandeljusfunktion, figur 4. Slingorna bestod av små lampor som monterades efter varandra med ca 5 cm mellanrum. Lamporna var ganska små men gav ändå ett tydligt sken och en illusion av en rinnande effekt. Slingorna sträckte sig horisontellt ca 3,7 m ut från vardera sidan av dörren och var placerade på ca 1,2 m höjd från golvet. Riktningen på den rinnande illusionen var in mot dörren från båda sidorna.



**Figur 4** Ljusslang med rinnandeljuseffekt.

I vissa försök användes en golvmarkering för att illustrera var nödutgångarna var placerade. Markeringen bestod av en vit matta av glasfiberväv som sträckte sig ut från dörrarna. Mattan var ca 1,2 m bred och sträckte sig tvärs tunnelns bredd, figur A2 i bilaga A.

En ny typ av utrymningsmarkering, en så kallad ljustråd provades också i några försök. Denna markering kom dock till när försöken var planerade och försök gjordes bara med försökspersoner som redan varit med om ett försök tidigare. Ljustråden består av en plastslang som innehåller ett halvledande material. Detta material utsänder ett kontinuerligt ljus som kan användas för att visa vägen till en utrymningsväg. Ljustråden är ca 3 mm i diameter och ljuset är blågrönt i nyansen. Ljustråden placerades på ställen där tidigare försök visat att försökspersonerna gick, figur A4 i bilaga A. De två placeringarna provades dock inte samtidigt.

## 2.3 Rökalstring

Rökaggregaten var placerade utanför tunneln och ledde in röken till tunneln genom två utlopp. Dessa är placerade i vardera änden av tunneln i anslutning till mynningarna. Totalt användes två rökaggregat som producerade vit konströk i tillräcklig omfattning. Aggregaten styrdes så att en relativt jämn rökthet erhöles. För att uppnå den irriterade effekten av brandgas blandades ättika i röken. För att kunna blanda ättikan med röken i tunneln koktes ättikan i två kärl placerade på olika platser i tunneln. För att få en jämn omblandning av ättiksånga i röken placerades en fläkt i ena änden av tunneln, figur A2 i bilaga A. Fläkten blåste rök och ättiksånga i riktning mot försökspersonerna.

Koncentrationen av ättika varierade mellan 10 - 15 ppm. Nivån mättes regelbundet under försökens gång. Koncentrationen av ättika i röken var tillräckligt irriterande för andningsvägar och ögon utan att vara hälsovådlig. Kortidsgränsvärdet för ättika är enligt AFS 2000:3 10 ppm ( $25 \text{ mg/m}^3$ ). Kortidsgränsvärdet anger ett rekommenderat värde som utgörs av ett tidsvägt medelvärde för exponering under en referensperiod på 15 minuter.

## 2.4 Ljud

För att efterlikna ljudet av brandgasfläktar och brand fanns två högtalare, vilka kontinuerligt gav ett bakgrundsljud, monterade i tunneln. Ljudnivån uppskattades vara i storleksordningen 80-100 dB vilket motsvarar buller vid gatutrafik. Högtalarna var placerade ca 2 m från golvet på väggen mellan tunneln och sidogången. Första högtalaren var monterad ca 5 m in i tunneln och den andra ca 20 m in i tunneln sett från ingången.

## 2.5 Mätutrustning

### 2.5.1 Rök och belysning

För att kunna uppskatta siktsträckan fanns två mätare för mätning av röktäthet monterade i tunneln, figur A2 i bilaga A. Mätarna var placerade på ca 2,0 m höjd över golvet vid första och tredje bilen. Röktätheten mättes på en mätsträcka av 1,0 m. Figur 5 visar uppbyggnaden av röktäthetsmätaren. Röktätheten mättes genom att uppskatta absorptionen för den rök som fanns mellan en ljuskälla och en mottagare. Ljuskällan utgjordes av en 5 mW diodlaser som gav ett ljus med en våglängd på ca 670 nm (tydligt rött sken). Mottagaren utgjordes av en fotoresistor. Spänningen över ett motstånd kopplat parallellt över fotoresistorn mättes och jämfördes sedan med en referenssignal för fallet utan rök. Röktätheten, angiven i  $m^{-1}$ , kunde sedan bestämmas genom

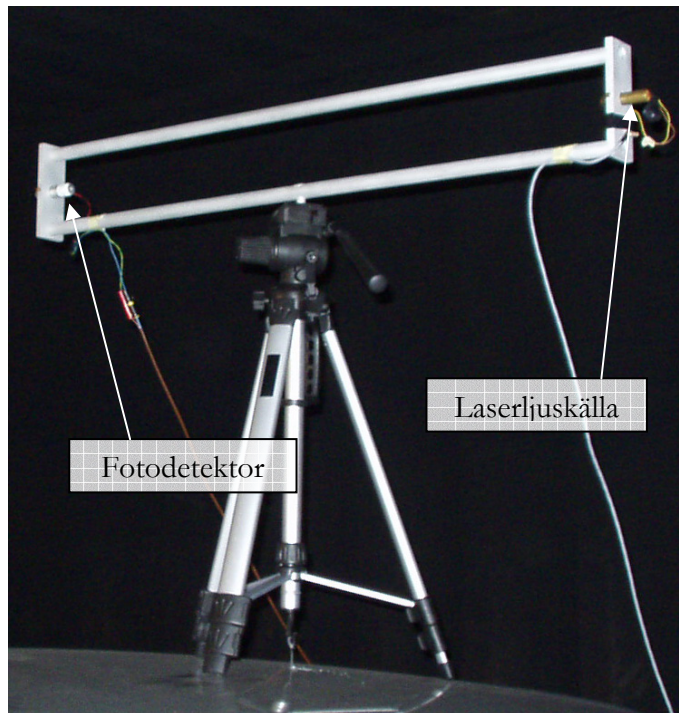
$$k = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I} \quad [1]$$

där  $I_0$  är referensnivån utan rök,  $I$  är den aktuella ljusintensiteten och  $L$  den aktuella mätsträckan. Röktäthet kan också anges i enheten Obscura (Ob) eller ekvivalent dB/m, men då ska ekvationen ändras så att  $\log_{10}$  används istället och att produkten ökas med en faktor 10. Detta sätt att ange röktäthet är visserligen vanligare i Europa men eftersom en jämförelse ska göras med Jins resultat så används det sätt som han använde även i denna rapport. Röktätheten, oavsett hur den beräknats, kan sedan användas för att uppskatta siktsträckan genom röken. Beräkningen av siktsträckan baseras på en rad försök där personer fått bedöma siktsträckan för olika röktäthet och observerade föremål. Siktsträckan är längre, för konstant röktäthet, om det observerade föremålet skickar ut ljus, exempelvis en lampa eller genomlyst utrymningsskylt, jämfört med om föremålet är belyst. Siktsträckan kan uppskattas som

$$Siktsträcka = \frac{2}{k} \quad [2]$$

för föremål som är belysta som exempelvis väggar, golv och andra föremål i tunneln. Det kan diskuteras om beräkningen av siktsträckan kan göras utifrån Jins resultat. Skillnaden mellan förutsättningarna är att Jin använde svart och mer realistisk brandgas i sina försök medan vit konströk användes i försöken redovisade i denna rapport. Försök (Frantzich & Nilsson, 2003) visar dock på att relationen enligt ekvation 2 gäller även för vit konströk och siktsträckan kan därför anses vara oberoende av vilken typ av rök som används.





**Figur 5** Ställning för mätning av röktäthet.

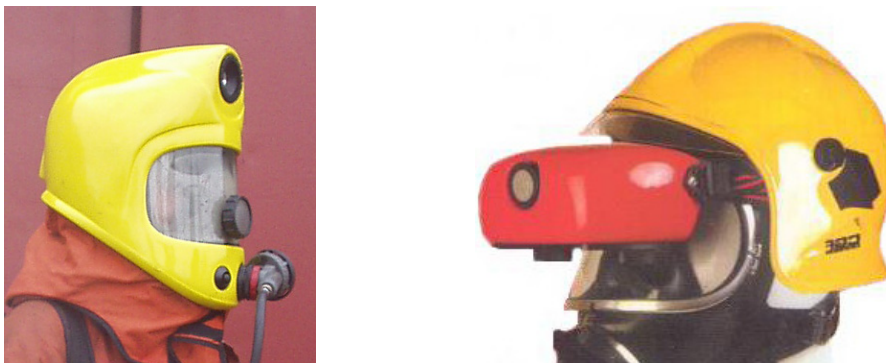
Koncentrationen av ättika i röken mättes med hjälp av Dräger-rör. Mätningar utfördes på flera platser i tunneln och ett medelvärde bestämdes för varje mätning. Mätningen gjordes enbart för att se till att koncentrationen inte översteg det rekommenderade värdet på 15 ppm som fastställdes innan försöken.

Ljusstyrkan i tunneln mättes med Elvos LM 1010 Luxmätare inställd på lägsta mätområdet.

### 2.5.2 Beteende

Varje försök dokumenterades med videokameror som placerades i tunneln. För att kunna se genom röken användes IR-kameror (känsliga för ljus i det infraröda området). Totalt användes fyra IR-kameror. Tre av kamerorna var monterade i rökdykarhjälmarna som är speciellt framtagna för att underlätta för rökdykare att orientera sig i rökfyllda miljöer. Den fjärde kameran var en fristående modell som också var speciellt framtagen för rökdykning. Den kameran kunde monteras framför rökdykarens andningsmask. Samtliga kameror var försedda med videoutgång så videosignalen kunde lagras på ett videoband. Hjälmarna som användes var av typen SOLO-Tic och den fristående kameran av typen SOLO-Vision, figur 6. En av kamerorna bars av en rökdykare som följde varje försöksperson inne i den rökfyllda tunneln. De övriga kamerorna var fast placerade i tunneln. I några av försöken fanns bara en kamera tillgänglig och den användes då av rökdykaren.

Videosignalerna från kamerorna registrerades digitalt med tid och kameranummer.



Figur 6 IR-kamera i SOLO-Tic-hjälm (vänster) och SOLO-Vision-kamera (höger) här monterad på hjälm.

## 2.6 Försökspersoner

Försökspersonerna rekryterades primärt bland studenter på Väg- och vattenprogrammet samt på Lantmäteri-programmet vid LTH. De studenter som deltog bedömdes inte ha brandkunskaper utöver vad som kan förväntas bland allmänheten. Bedömningen av de tidigare erfarenheterna ingick som fråga i den efterföljande enkäten. Studenterna anmälde sig frivilligt när de fått information om vad försöken gick ut på. Personer med andningssvårigheter, astmatiska besvär eller personer som hade svårigheter att vistas i trånga utrymmen uppmanades att inte anmäla sig. Personer som bar linser uppmanades att använda glasögon vid försöken eller att avstå att medverka. Totalt medverkade 46 försökspersoner vid försöken, tabell 1.

Tabell 1 Försökspersoner vid försöken

	Män	Kvinnor	Medelålder	Summa
Dag 1 (9 nov 2002)	20	11	22,1	31
Dag 2 (10 nov 2002)	10	5	21,8	15
Summa	30	16		

Förutom försökspersonerna provades de olika scenarierna i tunneln av personer som frivilligt kommit som åskådare. Dessa representerade främst tillverkare eller leverantörer av utrustning som användes vid försöken.

Före varje försök utrustades varje försöksperson med skyddskläder bestående av overall, handskar och hjälm. Försökspersonerna som inte var engagerade i försök satt och väntade i ett intilliggande tält. Försökspersoner som varit deltagit i försök hölls åtskilda från försökspersoner som ännu inte hade deltagit. Ingen av försökspersonerna hade före försöket sett övningstunneln så de hade därför ingen uppfattning om dess utseende, utrustning, längd od. Varje försöksperson deltog endast en gång i de försök som inledningsvis var tänkta att genomföras. Några extra försök genomfördes men då med försökspersoner som redan varit med om ett så kallat ordinarie försök. Dessa resultat redovisas separat i avsnitt 3.11.

Varje försöksperson fick en ersättning på 300 kronor samt en lunch. Försökspersonerna transporterades till försöksplatsen i en gemensam buss.

## 2.7 Informationsinsamling

IR-kameror användes vid försöken för att filma försökspersonerna i tunneln. Videoinspelningarna lagrades på dator, vilket gjorde det möjligt att följa försökspersonerna från flera kameravinklar samtidigt.

Efter försökspersonen kommit ut från tunneln fick han eller hon besvara en skriftlig enkät. Syftet med enkäten var att låta alla försökspersoner besvara identiska frågor om sina förutsättningar inför försöken och om sina upplevelser av själva försöket. Den enkät som användes finns redovisad i bilaga B.

Några av försökspersonerna intervjuades också efter genomfört försök för att komplettera informationen från enkäten och videoinspelningen. Vid intervjuerna fick försökspersonen se en inspelning av sin egen förflyttning i tunneln för att göra det möjligt att ytterligare kommentera sitt agerande. Intervjuerna styrdes inte av intervjuaren utan försökspersonen fick fritt berätta om beteendet och motivera sina val. Försökspersonen fick dock en inledande instruktion om att förklara beteendet och därefter talade de ganska allmänt om sina upplevelser.

## 2.8 Säkerhet

Målsättningen med försöken var att prova utrymning under realistiska förhållanden utan att utsätta någon försöksperson för någon nämnvärd riskökning. Det finns dock alltid risker för skador under försök som omfattar människor och riskerna skall i så fall minimeras. De personer som deltog i försöken anmälde sig frivilligt. Det betyder att de troligen redan från början var mindre benägna att skada sig då de gjort en bedömning att de skulle klara av påfrestningen då den var känd vid anmälningstillfället.

Vid genomförandet av försöken fanns en sjuksköterska närvarande som kunde ta hand om eventuella skador. En läkare fanns också anträffbar under försöken. Vidare följdes varje försöksperson i tunneln av en rökdykare med så kallad Revitoxmask. Försökspersonerna instruerades innan försöken att vinka till rökdykaren vid alltför stora svårigheter att vistas i tunneln. Rökdykaren kunde då placera Revitoxmasken över ansiktet på försökspersonen och leda ut denne från tunneln. Samtliga försökspersoner informerades om denna möjlighet precis innan försöken inleddes.

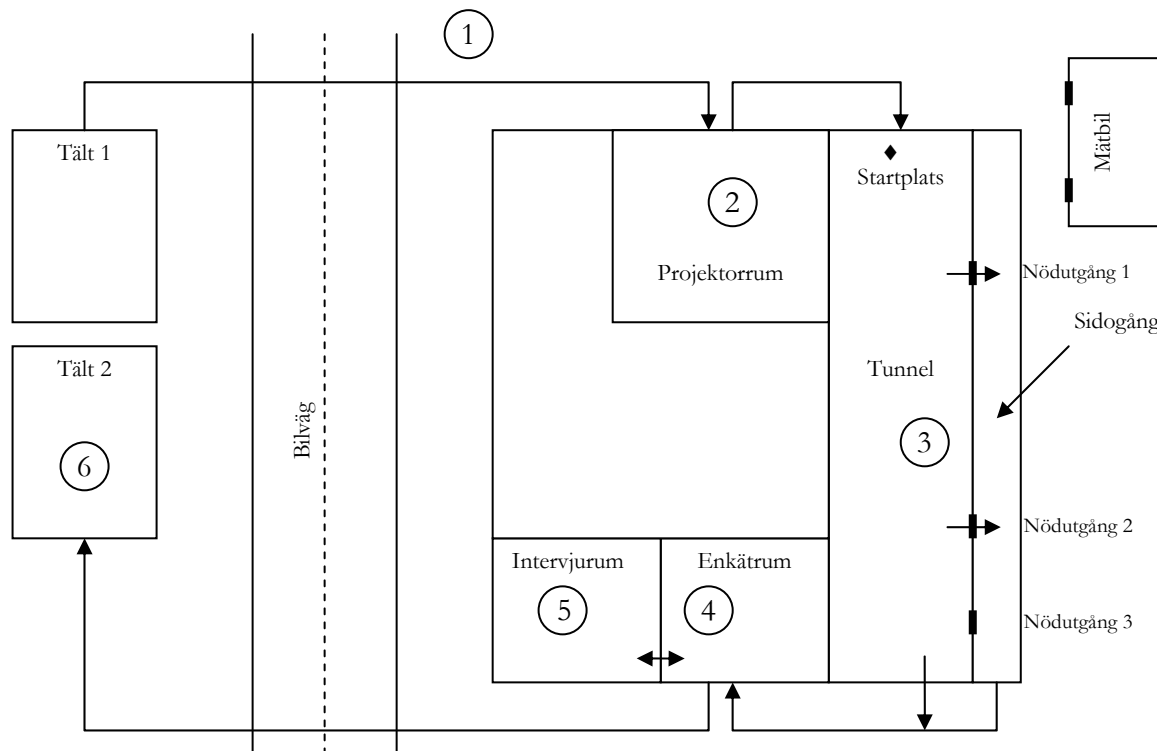
Sjuksköterskan kontrollerade varje försöksperson efter genomfört försök så att de inte hade några kvarstående besvär sedan de kommit ut ur tunneln. Samtliga försökspersoner kontaktades dessutom några veckor efter försöken genomfördes för att kontrollera att det inte inträffat några komplikationer.

## 2.9 Genomförande

Försöken genomfördes 9 och 10 november 2002. Väderförhållandena var växlande molnighet, ca 10°C och svaga vindar. Vindstyrkan var något högre under den första dagen, vilket innebar att röktätheten varierade något mer under den dagen.

Innan försöket genomfördes monterades alla utrymningsskyltar, belysningsarmaturer och mätutrustning i tunneln. Försökspersonerna samlades i ett intilliggande tält där de informerades om förutsättningarna för försöken

och vilka säkerhetsinstruktioner som gällde. Därefter fylldes tunneln med rök och ättiksyra. När rätt röktäthet och koncentration av ättiksyra uppmäts kunde försöken inledas. Följande försöksuppställning användes vid försöken.



**Figur 7** Försöksuppställning. Nödutgång 3 saknade förbindelse till sidogången och var endast illustrerad som utrymningsväg. Siffrorna anger försöksordningen.

Försöket inleddes med att en försöksperson fördes från tält 1 till projektorrummet. Där fick försökspersonen se en kort filmsekvens som visade en bilfärd genom en vägtunnel sedd från bilförarens position. Motivet till att visa filmen var att få försökspersonen att bättre sätta sig in i situationen att han eller hon är bilförare som råkat ut för en brand i en vägtunnel. Filmsekvensen var ca 30 sekunder. På filmen framgick det att det fanns utrymningsvägar på tunnelns vänstra sida. På högra sidan i tunneln som visades på filmen fanns också dörrar men de ledde in till en järnvägstunnel och var inte utmärkta som utrymningsvägar.

När försökspersonen sett filmen försågs han eller hon med en ögonbindel för att inte distraheras av omgivningen. Försökspersonen leddes till ingången av tunneln och placerades sedan i tunneln strax innanför ingångsportarna. Platsen är markerad i figur 7. Försökspersonen fick där en sista instruktion: ”Du har kört in i tunneln och stannat din bil. Det är rök i tunneln och du ska därför ta dig ut. Gör så som du skulle ha gjort i en verklig situation.” Därefter togs ögonbindeln bort och försökspersonen fick själv leta sig ut ur tunneln.

Försökspersonen kunde antingen komma ut genom någon av de dörrar som leder till sidogången eller genom porten vid tunnelns utgång i nedre delen av bilden i figur 7. Därifrån leddes försökspersonen till rummet där enkäten besvarades och eventuellt därefter vidare till rummet där intervjun genomfördes. Det är dock inte alla försökspersoner som intervjuades. Efter

intervjun var genomförd och enkäten besvarad leddes försökspersonen till tält 2. Därefter var försöket avslutat för den försökspersonen.

## 2.10 Försökskombinationer

Eftersom antalet försökspersoner begränsade antalet möjliga kombinationer av utrymningsskyltar, ljus mm valdes endast ett mindre antal av de kombinationer som ursprungligen var tilltänkta. De kombinationer som provades redovisas i tabell 2.

**Tabell 2**    **Kombinationer av utrymningsutrustning**

Utrustning i tunneln	Scenario							
	1	2	3	4	5	6 *)	7 *)	8 *)
Allmänbelysning	Ja	Ja	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej	Ja
Vägledande markeringar	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Blinkande lampor	Nej	Ja	Ja	Nej	Nej	Ja	Nej	Nej
Rinnande ljus	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja	Nej	Nej	Nej
Golvmarkering	Nej	Nej	Ja	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej
Ljustråd	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja

\*) Scenarierna 6, 7 och 8 kom till under försökens gång och genomfördes därför med försökspersoner som redan varit med om ett tidigare försök. Resultaten av dessa scenarier skall därför ses i ljuset av dessa annorlunda förutsättningar. Försöken redovisas därför separat i avsnitt 3.10.

Försöken genomfördes under två dagar. Vid dag 1 genomfördes försök enligt scenario 1, 2, 3, 4, 6 och 7. Under dag 2 provades scenarierna 1, 2, 5 och 8.

## 3 Resultat och kommentarer

### 3.1 Allmänt

#### 3.1.1 Försökspersoner

Totalt deltog 46 försökspersoner i tunnelförsöken. Av dessa gick en person av misstag genom tunneln utan att ögonbindeln togs av. Eftersom förutsättningarna var annorlunda i detta försök har det inte inkluderats i resultaten.

Vid ett av försöken skedde ett tekniskt missöde, vilket gjorde att videoinspelning av försöket inte var möjlig. I nedanstående resultat har därför också detta försök exkluderats i de resultat som bygger på videoinspelningarna från försöken. Däremot har den aktuella personens enkätsvar inkluderats i resultaten.

Det är rimligt att anta att de personer som anmäler sig till denna typ av försök själva anser sig vara väl rustade för att klara av försöken. Om man känner sig lite osäker på konsekvenserna kanske man väljer att inte medverka. Det innebär att det är troligt att försökspersonerna inte är helt jämförbara med allmänheten med deras förutsättningar att klara en liknande situation. Studenterna är dessutom förhållandevis unga och bör vara i bättre fysisk kondition än motsvarande genomsnittsperson. Dessutom var åldersvariationen liten. Det innebär att de prestationer som försökspersonerna utför bör vara gynnsamma och att en verklig situation kan visa sig innebära större svårigheter jämfört med resultaten i undersökningen.

I tabell 3 redovisas antalet försökspersoner som deltog i de olika försöksscenarierna. Ingen av försökspersonerna hade sett tunneln före försöken.

**Tabell 3** Antalet personer i varje scenario för de 45 försökspersoner som inkluderats i resultaten.

Scenario	Antal
1: allmänbelysning	15 <sup>a</sup>
2: allmänbelysning och blinkljus	7
3: allmänbelysning, blinkljus och golvmarkering	7
4: allmänbelysning och rinnande ljus	4
5: utan allmänbelysning med rinnande ljus	12
Totalt	45

a. En av dessa personer är inte inkluderad i de resultat som baseras på videoinspelningar från försöken

#### 3.1.2 Tidigare erfarenhet

I enkäten fick försökspersonerna svara på frågor om deras tidigare erfarenheter av tunnlar, bränder och brandövningar. Försökspersonerna verkar inte ha någon speciell kunskap om utrymning genom brandgas. Cirka hälften angav att de hade någon erfarenhet av brandsläckning eller brandövning. En person uppgav att den hade erfarenhet av utrymning i tunnel. En stor andel av

personerna, 84%, hade åkt genom en väg- och/eller järnvägstunnel på sista tiden. Av dessa (38 personer) hade hälften (19 personer) funderat något på tunnelsäkerheten.

Kunskapen om tekniska installationer som kan finnas i tunneln var inte så stor. Av de 43 personer som svarat på frågan uppgav 16 (36%) att de kände till att det finns hjälpmedel som kan användas i händelse av brand. Nödtelefon och handbrandsläckare är exempel på sådana installationer.

Ungefär 76% av försökspersonerna hade någon tidigare erfarenhet av brand, brandövning eller tunnlar. Av dessa personer hade flest deltagit i brandövning och provat på att släcka bränder under kontrollerade former, tabell 4. De flesta hade erhållit sin erfarenhet via skolan eller då de genomfört sin militär- eller civilplikt, tabell 5.

**Tabell 4 Tidigare erfarenhet.**

	Antal	Andel
Erfarenhet Utrymning från tunnlar	1	3%
Deltagit i brandövning	29	85%
Provat på att släcka brand under kontrollerade former	21	62%
Gått längre sträcka i vägtunnel	2	6%
Gått längre sträcka i järnvägstunnel	0	0%
Totalt	34	---

**Tabell 5 Tidigare erfarenhet.**

	Antal	Andel
Erhållit erfarenhet via skola	17	50%
militär- eller civilplikt	12	35%
annat	7	21%
Totalt	34	---

## 3.2 Beteende och gångväg

Vid försöken varierade den uppmätta röktätheten mellan cirka 2 och 7 m<sup>-1</sup>, vilket motsvarar en sikt på ungefär en halv meter till två meter. Röken var dock inte jämt fördelad och sikten varierade därför en del i olika avsnitt av tunneln.

När försökspersonerna släpptes in i tunneln och ögonbindeln togs av, stannade de först upp och tittade sig omkring innan de började röra sig framåt. Eftersom personerna släpptes in genom dörren på den högra sidan i tunneln, var det många som sökte sig till höger vägg. De följde därefter väggen genom att känna på den med en eller två händer, medan de rörde sig framåt. Detta beteende observerade även av Jin i hans undersökningar av gånghastigheten genom brandgas (Jin, 1976). Jin konstaterade att beteendet uppträdde då den optiska densiteten var hög, dvs då sikten var dålig, och han påpekade att beteendet var likt det beteende som uppträder då personer går i mörker.

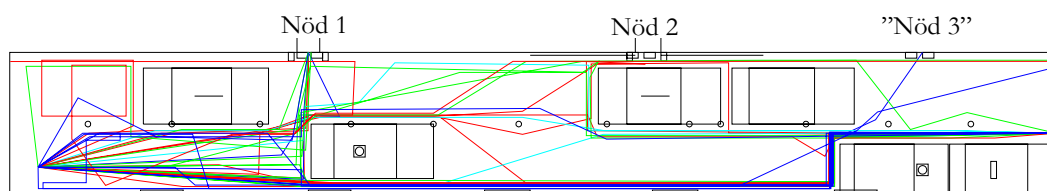
Med hjälp av det inspelade videomaterialet från försöken, registrerades den sträcka som försökspersonerna gick på olika sätt i tunneln. De olika sätt som personerna antogs kunna röra sig framåt på var genom att följa en vägg, följa en bil, gå mot en skylt eller gå på måfå i tunneln. När personerna gick på måfå rörde sig framåt utan följa något, t ex bilar eller tunnelväggen, medan de kände sig för med händerna. I några fall kände sig försökspersonerna även för med benen.

De personer som gick en stor andel av sträckan på måfå följde oftast bilar då detta var möjligt, men då de följt en bil och denna plötsligt tog slut, tvingades de att gå framåt och känna sig för tills de åter fann något att följa. Samtliga personers gångväg, dvs hur personerna gick i tunneln, visas i figur 8. I bilaga C redovisas personernas gångväg mer detaljerat i form av gångvägen för olika urval av personer.

Tabell 6 redovisar hur fördelningen av försökspersoner var på de olika utgångarna för respektive försök. I den efterföljande enkäten frågades försökspersonerna om de visste att det finns nödutgångar i vissa tunnlar. Frågan ställdes för att se om kunskapen om sådana påverkade försökspersonernas val. Någon sådan koppling kunde dock inte ses från enkätsvaren.

**Tabell 6. Antal personer som valde respektive utgång för de olika scenarierna. Nödutgång 3 var endast en illustration av en utgång och saknade dörr.**

Scenario	Ingång	Nödutgång 1	Nödutgång 2	Nödutgång 3	Tunnelmyrning	Summa
1	1	2	0	0	12	15
2	0	2	0	1	4	7
3	0	1	0	0	6	7
4	0	0	0	0	4	4
5	0	4	0	0	8	12
Summa	1	9	0	1	34	45



**Figur 8. Samtliga försökspersoners gångväg i tunneln.**

Det vanligaste sättet att gå genom tunneln var genom att följa en tunnelvägg, tabell 7. Totalt 66% av den sträcka som försökspersonerna gick i tunneln gick de längs en vägg. De personer som såg skyltar i tunneln, dvs både de som gick ut genom en nödutgång och de som gick vidare till tunnelmyrningen, gick generellt en större andel av sträckan på måfå än de som inte såg några skyltar.



Anledningen till att de såg skyltar är troligtvis att de inte i så stor utsträckning följde höger vägg, utan istället gick närmre mitten av tunneln. Att följa höger vägg var därför ibland förrädiskt i försöken eftersom det var svårt att se skyltarna på andra sidan. I tunneln fanns det inte någon skyltning på höger vägg, vilken informerade om att det fanns utgångar på motstående sida. I bilaga C visas försökspersonernas gångväg i tunneln uppdelat på de personer som såg och de som inte såg någon skylt. Skisserna över gångvägen i bilaga C visar att de som såg skylt gick en större andel av sträckan längs höger vägg än de som inte såg skylt. Motsvarande gäller för de personer som såg blinkljus och rinnande ljus. De personer som inte såg något av de två hjälpmedlen gick i genomsnitt en större andel av sträckan längs höger vägg.

**Tabell 7 Andelen av sträckan som försökspersonerna totalt gick på olika sätt i tunneln.**

		följa vägg	måfa	följa bil	mot skylt	totalt
		andel	andel	andel	andel	andel
Urval	samtliga fall	66%	18%	14%	2%	100%
	gick ut genom tunnelmynning	71%	15%	14%	0%	100%
	gick ut genom tunnelmynning & såg ej skylt	82%	10%	8%	0%	100%
	gick ut genom tunnelmynning & såg skylt	32%	32%	36%	0%	100%
	gick ut genom utgång 1 & såg skylt	25%	41%	14%	20%	100%

Totalt följde ungefär 80% av försökspersonerna en vägg någon längre sträcka i tunneln och av dessa var det cirka 37% som någon gång lämnade den vägg följde. En del av dessa återvände till väggen efter ett tag eller gick över till motstående sida. Den vanligaste orsaken till att personerna lämnade väggen var att de istället valde att gå längs en av bilarna, tabell 8. En annan anledning var att de gick mot en skylt.

**Tabell 8 Orsaken till att försökspersonerna släppte taget om väggen.**

		Antal	Andel
Orsak	Bil	8	62%
	Skylt	2	15%
	Ingen tydlig anledning	3	23%
	Totalt	13	100%

Studien av typiska beteenden i försöken avslöjade att försökspersonerna i stor utsträckning valde att följa väggarna i tunneln och att de ogärna släppte taget om dessa. För att de skulle lämna väggen krävdes vanligtvis att det fanns en bil att följa eller en utrymningsskylt att gå till. De personer som följde höger vägg

såg oftast inte skyltarna på vänster vägg och gick därför hela vägen till tunnelmynningen. Inverkan av skyltarna diskuteras vidare i avsnitt 3.4.

Resultaten från videoobservationerna angående den målmedvetna förflyttningen i tunneln stämmer också ganska väl med vad personerna sedan uppgav i enkäterna. I dessa angav ca 80 % att deras strategi från början var att just leta efter en dörr eller tunnelmynningen. Resten uppgav att de gick mest på måfå eller letade efter andra personer i t ex bilarna.

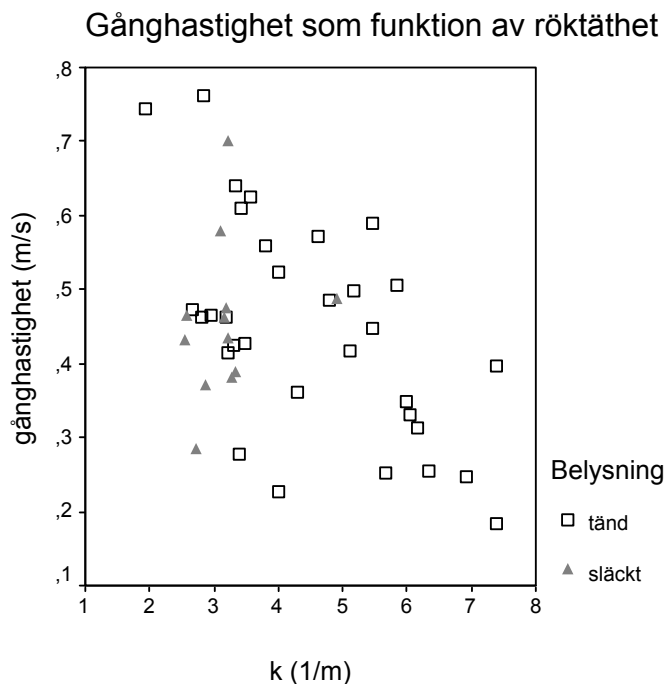
I enkäten frågades efter personernas inledande strategi för att ta sig ut. Flertalet uppgav att de sökte efter ljus eller symboler för att orientera sig. De uppgav också att strategin för att förflytta sig i tunneln var att ”leta efter dörr” eller ”leta efter tunnelmynning”. En klar majoritet (30 personer av 45) uppgav att de inte ändrade sin inledande strategi utan fortsatte som var tänkt från början. Av dem som valde att ändra strategi gick 12 till tunnelmynningen, två försökspersoner gick till nödutgång 1 och en person till nödutgång 3.

## 3.3 Gånghastigheter

### 3.3.1 Genomsnittlig gånghastighet

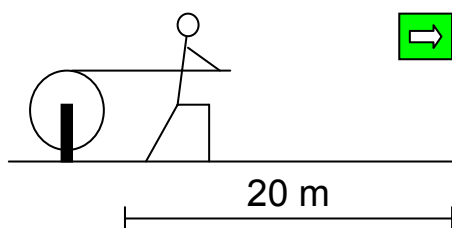
Försökspersonernas gånghastigheter uppskattades med hjälp av analys av videoupptagningarna från försöken. Vid analysen uppskattades den tillryggalagda sträckan, dvs den sträcka som försökspersonerna gick, med hjälp av mätningar i CAD-ritningar av tunneln. Hastigheten erhöles sedan genom att den uppmätta sträckan dividerades med den totala tid det tog för personerna att förflytta sig. Detta innebär att eventuella kortare stopp som försökspersonerna utförde i tunneln inkluderades vid beräkning av hastigheten. De enskilda försökspersonernas gånghastigheter varierade något i ett och samma försök, men de rapporterade hastigheterna är alla medelhastigheter. Även den rapporterade röktätheten,  $k$ , är ett medelvärde för varje enskilt försök.

De uppmätta gånghastigheterna i tunneln är mellan 0,2 och 0,9 m/s och avtar med ökande röktäthet, dvs med minskande sikt. Spridningen i hastighet är dock relativt stor, vilket till viss del kan förklaras av individuella skillnader mellan försökspersonernas gånghastigheter, figur 9.



**Figur 9** Gånghastighet som funktion av röktäthet. Med belysning avses allmänbelysning.

Ett utav syftena med försöken var att, om möjligt, verifiera de resultat som Jin tog fram på 70-talet (Jin, 1976). Jin utförde försök där han lät försökspersoner gå mot en nödutgångsskylt i en 20 meter lång brandgasfylld korridor, figur 10.



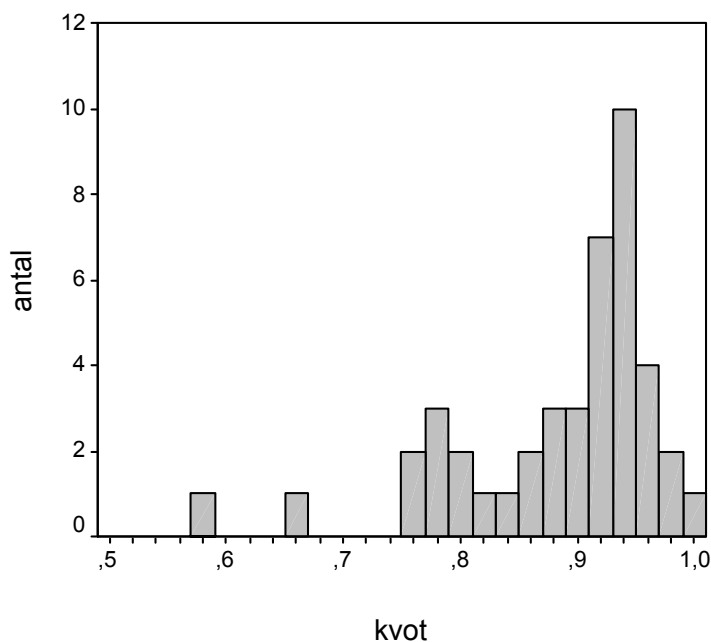
**Figur 10** En schematisk bild av den försöksupställning som Jin använde i sina försök.

Varje försöksperson höll i en plastklädd elkabel som var lindad på en trumma. Genom att mäta trummans rotationshastighet då personerna gick genom korridoren kunde sedan deras gånghastighet bestämmas. Sättet på vilket Jin mätte hastigheten skiljer sig i vissa avseenden från mätningarna av gånghastighet i tunneln. Jins mätmetod innebär att hänsyn inte togs till om försökspersonerna rörde sig i sidled, utan hastigheten mättes bara i korridorens längdriktning. Det är okänt i hur stor utsträckning personerna de facto förflyttade sig i sidled i korridoren i Jins försök, men hans mätmetod innebär att den uppmätta hastigheten i korridoren vid en viss röktäthet i teorin borde

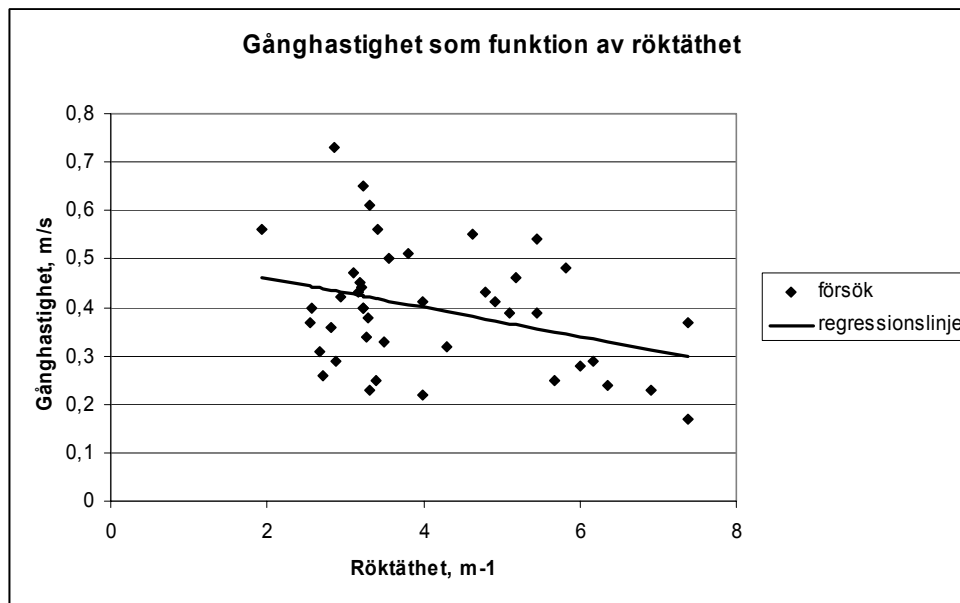
vara lika med eller lägre än motsvarande gånghastighet uppmätt i tunneln. Liksom i försöken i tunneln inkluderade Jin eventuella kortare stopp vid beräkning av gånghastigheten.

Det blir då en skillnad mellan hastigheten i Jins försök och den som redovisas i föreliggande försök. Jin beräknar en medelhastighet för hela sträckan mellan start och mål, definierad som bruttohastighet, medan rapportens hastighet är den verkliga, vilken också speglar de faktiska förflyttningarna. Kvoten mellan de två sätten att redovisa hastigheter på redovisas i figur 11. För att få en uppfattning om hur stor gånghastigheten längs en tunnels längdriktning är i genomsnitt ska gånghastigheten därför korrigeras med informationen i figur 11. Figur 12 visar förhållandet mellan bruttohastigheten och röktätheten för de aktuella försöken. Gångsträckan för respektive försöksperson är i denna figur mätt som kortaste avståndet mellan startplatsen och vald utgång.

Korrigeringen ska då kompensera för att en person inte rör sig helt effektivt i en tunnels längdriktning, vilket är ganska naturligt med tanke på den bristande informationen, dålig sikt och irriterande rök. Eftersom kvoten i figur 11 har en ganska stor spridning bör mer noggranna studier göras för att bestämma gångeffektiviteten. I det föreliggande materialet är medelvärdet för kvoten lika med 0,88 och standardavvikelse lika med 0,09.



**Figur 11** Fördelningen för kvoten mellan gånghastigheten och den gånghastigheten som definieras under figur 12.

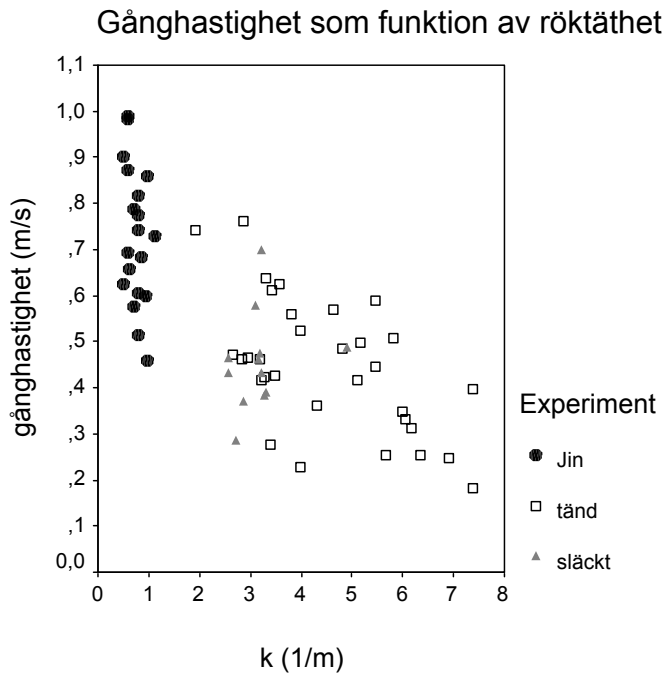


**Figur 12. Gånghastighet som funktion av röktäthet. Gånghastigheten är definierad som kvoten mellan kortaste avståndet mellan startplats och vald utgång och vistelsetiden i tunneln för respektive försöksperson.**

I sina försök använde Jin två olika typer av brandgaser, vilka var olika irriterande. För att producera mycket irriterande vita brandgaser användes brinnande träribbstaplar, med små mellanrum mellan de ingående träbitarna, och för att producera mindre irriterande svarta brandgaser användes brinnande fotogen. Den rök som användes i försöken i tunneln var visserligen vit, men graden av irritation var måttlig. Detta gör en jämförelse med Jins värden för den minst irriterande, men mörkare, brandgaserna anses mest relevant (kallad non-irritant smoke i figur 1). Figur 1 visar gånghastigheten som funktion av röktätheten från både Jins försök med mindre irriterande brandgaser och försöken i tunneln, figur 13. I figuren kan ses att röktätheten var lägre i Jins försök, vilket försvårar en jämförelse. Jins värden på gånghastigheten är väl koncentrerade kring röktätheten  $0,8 \text{ m}^{-1}$ , medan värdena från försöken i tunneln sträcker sig från ca 2 till  $8 \text{ m}^{-1}$ .

Ytterligare en faktor som försvårar en jämförelse är att Jin använde brandgaser i sina försök, medan bara konstgjord rök med tillsats av ättiksyra användes i tunnelförsöken. Det är svårt att avgöra i vilken utsträckning personerna i Jins försök påverkats av t ex narkotiska gaser eller om t ex ökad nervositet på grund av kraftig branddoft kan ha påverkat gånghastigheten.

I figur 13 kan ses att Jins uppmätta gånghastigheter i genomsnitt är något högre än de hastigheter som uppmättes i tunnelförsöken. Detta är förväntat eftersom röktätheten var lägre, dvs sikten var bättre, i de försök som Jin genomförde. I de båda försöken är spridningen stor, vilket kan vara orsakat av stora naturliga variationer mellan personers gånghastigheter. I denna rapport har, på grund av de tidigare beskrivna olikheterna mellan försöken, ingen mer ingående jämförelse mellan Jins resultat och resultaten från tunnelförsöken genomförts.



**Figur 13** Gånghastighet som funktion av röktäthet. ”Jin” betecknar hastigheter uppmätta i Jins försök med den minst irriterande brandgasen. Tänd och släckt betecknar hastigheter uppmätta i försök i tunneln med tänd respektive släckt allmänbelysning.

### 3.3.2 Betydelsen av allmänbelysning

I tunneln utfördes försök med både tänd och släckt allmänbelysning. En intressant fråga är om det går att påvisa någon skillnad för gånghastigheten som funktion av röktätheten vid olika belysningsnivå. För att kunna besvara denna frågeställning krävdes en mer ingående studie av datamaterialet.

Till att börja med behandlades bara resultaten från försöken med släckt belysning. Gånghastigheten antogs bero linjärt av röktätheten och en linjär regressionsanalys utfördes enligt modellen

$$gånghastighet = \alpha + \beta \cdot röktäthet + \varepsilon \quad [3]$$

där  $\alpha$  och  $\beta$  är konstanter och  $\varepsilon$  antas vara ett normalfördelat fel med väntevärdet noll. Termen  $\varepsilon$  används för att beskriva den variation i gånghastighet som inte kan förklaras av resten av ekvationen, i detta fall av variation i röktäthet. Det betyder att det högst troligt finns ytterligare faktorer som också påverkar gånghastigheten förutom röktätheten. En fullständig redovisning av regressionsanalysen finns i bilaga D.

När en linjär regressionsanalys utförs för mätdata enligt modellen erhålls skattningar av konstanterna  $\alpha$  och  $\beta$ . Skattningarna är normalfördelade, eftersom  $\varepsilon$  antas vara ett normalfördelat fel, och regressionsanalysen ger medelvärdena och standardavvikelseerna för skattningarna av  $\alpha$  och  $\beta$ .

För att det ska gå att säga att gånghastigheten beror av röktätheten enligt ekvationen ovan måste  $\beta$  vara skild från noll. Detta testas lämpligen genom att ett signifikanstest med nollhypotesen  $H_0: \beta=0$  genomförs.

Signifikanstestet utförs genom att ett konfidensintervall bildas för skattningen av  $\beta$ . Om det bildade konfidensintervallet inte täcker noll sägs hypotesen vara motbevisad och röktätheten har då en signifikant inverkan på gånghastigheten på vald signifikansnivå. Detta kan även uttryckas som att  $\beta$  är skilt från noll på vald konfidensnivå. Ett motbevis av nollhypotesen enligt ovan innebär alltså att det är troligt att  $\beta$  är skilt från noll, dvs att det är troligt att gånghastigheten beror av röktätheten enligt modellen. I denna rapport har genomgående konfidensgraden 95% använts, vilket motsvarar en signifikansnivå på 5%.

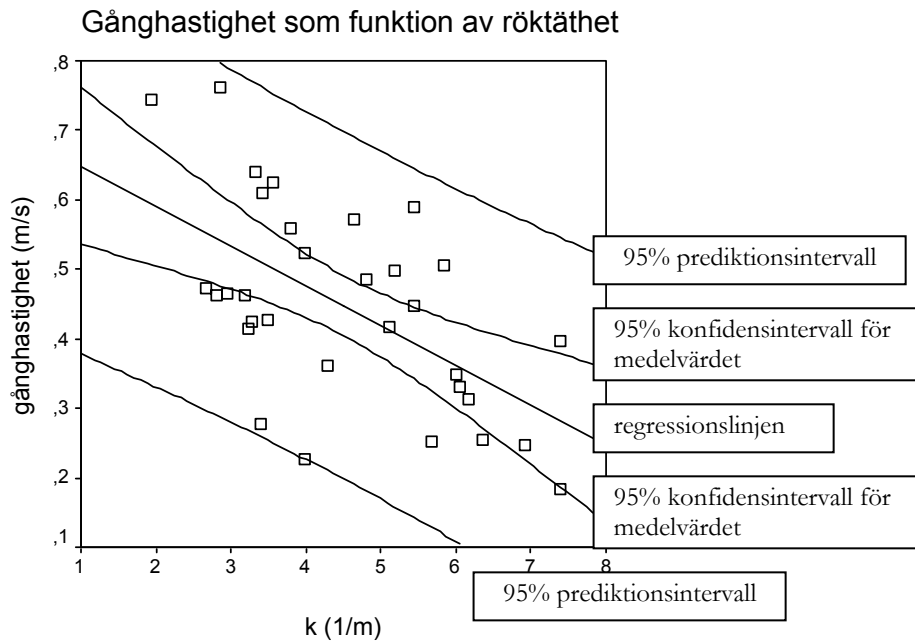
Om konfidensintervallet för skattningen av  $\beta$  däremot inte täcker noll går nollhypotesen inte att motbevisa. Detta behöver dock inte innebära att gånghastigheten inte beror av röktätheten, men däremot går det inte att visa att så är fallet.

Enligt den linjära regressionsanalys som genomfördes för de försök där belysningen var *släckt* gick det inte att visa att  $\beta$  är skilt från noll, dvs att gånghastigheten beror av röktätheten, på nivån 5%. Det finns flera tänkbara förklaringar till detta. En möjlig förklaring är att antalet datapunkter är för litet, vilket medför att standardavvikelsen blir stor. Det är dock även möjligt att gånghastigheten främst beror av det begränsade ljuset och att den dåliga sikten är av underordnad betydelse. Dessutom bör det påpekas att samtliga datapunkter är samlade nära ett värde på röktätheten för de försök där belysningen var släckt, vilket gör att resultaten som erhålls genom linjär regressionsanalys blir osäkra.

Slutsatsen av regressionsanalysen blir att det utifrån data från försöken inte går att visa hur belysningsnivån påverkar gånghastigheten, utan att detta kräver att ytterligare försök genomförs. På grund av de stora osäkerheterna kommer de försök där belysningen var släckt inte att behandlas ytterligare i detta avsnitt.

Även för resultaten från försöken där belysningen var *tänd* utfördes en linjär regressionsanalys enligt modellen i ekvation 3. Enligt analysen är  $\beta$  signifikant skild från noll på nivån 5%, vilket antyder att röktätheten enligt modellen har signifikant inverkan på gånghastigheten. I figur 14 är regressionslinjen inritad tillsammans med ett 95% konfidensintervall för medelvärdet och ett 95% prediktionsintervall. I diagrammet kan det ses att prediktionsintervallet täcker ett relativt stort område på varje sida om regressionslinjen.

Betydelsen av prediktionsintervallet illustreras lättast med ett enkelt exempel. Om röktätheten är  $4 \text{ m}^{-1}$  kommer gånghastigheten för en slumpvis utvald person ur populationen att ligga mellan ca 0,2 och 0,7 m/s med sannolikheten 95%, vilket är ett stort intervall. En möjlig förklaring till den stora spridningen kan vara att det finns stora naturliga skillnader mellan försökspersonernas gånghastigheter. Det är exempelvis troligt att individuella skillnader, tex personernas längd, kan påverka gånghastigheten. I denna rapport har ingen analys av inverkan av individuella skillnader genomförts.



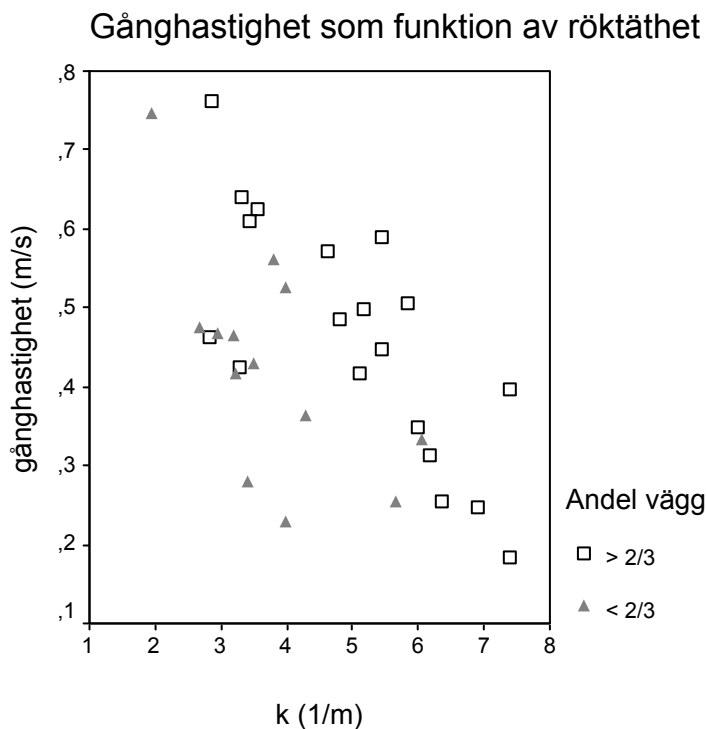
**Figur 14** Gånghastighet som funktion av röktäthet för tunnelförsöken med tänd allmänbelysning.

### 3.3.3 Betydelsen av väggen som orienteringshjälp

Ytterligare en möjlig förklaring till det stora prediktionsintervallet för fallen med tänd allmänbelysning i tunneln kan vara att gånghastigheten även beror av hur försökspersonerna förflyttar sig i tunnel. Det är tänkbart att gånghastigheten exempelvis påverkas av om personerna kryper eller går upprätt samt om de följer väggen, följer bilarna eller går framåt genom röken utan att följa något. En av de faktorer som kan tänkas ha stor inverkan på hastigheten är om försökspersonerna följer väggen eller inte. Troligtvis är det möjligt att förflytta sig med högre hastighet genom brandgasen då man följer en vägg.

Denna teori förstärks av resultaten i figur 15 nedan, vilken visar gånghastigheten som funktion av röktätheten för de försökspersoner som gick mer än två tredjedelar respektive mindre än två tredjedelar av sträckan i tunneln längs någon tunnelvägg. Förutsättningarna för punkterna i figuren är att allmänbelysningen i tunneln är tänd vilket var fallet för 32 försökspersoner. Figuren antyder att gånghastigheten är lägre för den grupp som gick mindre än två tredjedelar av sträckan längs tunnelväggen.





**Figur 15** Gånghastighet som funktion av röktäthet för de försökspersoner som gick mer än två tredjedelar respektive mindre än två tredjedelar av sträckan längs tunnelväggen. Allmänbelysningen var tänd.

För att undersöka om gånghastigheten påverkas av om försökspersonerna följde väggen eller inte utfördes en linjär regressionsanalys enligt modellen

$$gånghastighet = \alpha + \beta_1 \cdot röktäthet + \beta_2 \cdot andel\ vägg + \varepsilon \quad [4]$$

där  $\alpha$ ,  $\beta_1$  och  $\beta_2$  är konstanter och  $\varepsilon$  antas vara ett normalfördelat fel med väntevärdet noll, se vidare bilaga D. Andel vägg är den andel av sträckan som varje enskild försöksperson gick längs någon tunnelvägg.

Enligt den linjära regressionsanalysen är både  $\beta_1$  och  $\beta_2$  skilda från noll på nivån 5%, vilket antyder att både röktätheten och andelen av sträckan som personerna följer någon tunnelvägg har en signifikant inverkan på gånghastigheten enligt modellen.

Den uppställda modellen innebär att gånghastigheten antas ändras med röktätheten på samma sätt oberoende av om försökspersonerna följer väggen eller inte. I en mer realistisk modell hade röktäthetens påverkan på gånghastigheten antagits vara olika då personerna följde väggen och då de inte gjorde det. Ovanstående enkla modell har dock visat att det är troligt att gånghastigheten även påverkas av om personerna följer väggen eller inte.

Enligt modellen är konstanten  $\beta_2$  positiv, vilket innebär att gånghastigheten var högre för de försökspersoner som följde tunnelväggen. En jämförelse mellan de korrigerade determinationskoefficienterna visar att modellen ovan, där

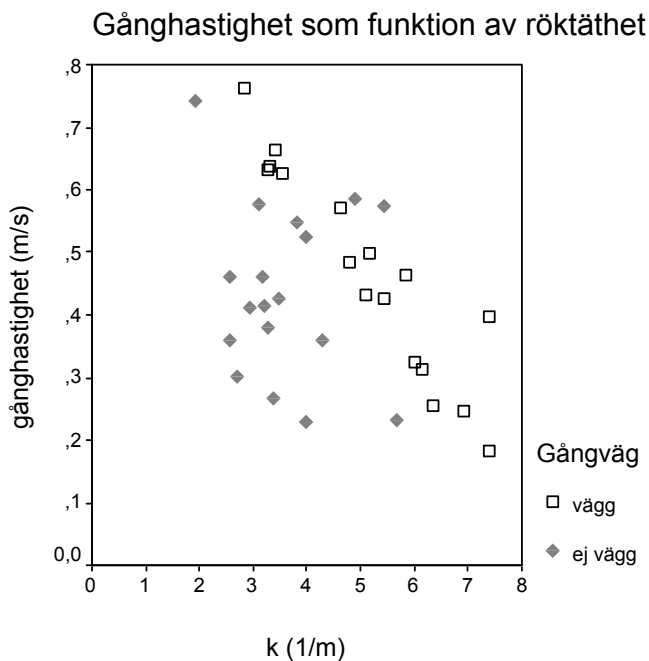
gångshastigheten antas bero av både röktätheten och andelen vägg, är en bättre regressionsanpassning till datapunkterna än den tidigare beskrivna modellen, där gångshastigheten antogs bero enbart av röktätheten, bilaga D.

För att undersöka förhållandet mellan gångshastigheten och röktätheten ytterligare, beräknades först försökspersonernas gångshastighet då de gick längs med tunnelväggen. Endast försök med tänd allmänbelysning ingår i den fortsatta analysen i detta avsnitt. Vid beräkningarna räknades endast hastigheten ut för de personer som följde väggen i minst 15 meter. Främsta anledningen till att hastigheten inte beräknades för de personer som följde en vägg en kortare sträcka än 15 meter var för att minska effekten av mätfel.

I nästa steg beräknades försökspersonernas gångshastigheter då de inte följde väggen. Vid beräkningarna räknades hastigheten enbart ut för de personer som inte följde väggen i minst 10 meter. Att ”inte följa väggen” betyder i detta sammanhang att försökspersonerna till exempel följde bilar, gick på måfå eller gick mot en utrymningsskylt. Anledningen till att 10 meter valdes istället för 15, var för att de flesta av personerna ”inte följde väggen” bara kortare sträckor. I en del fall gick personerna på måfå tills de kom till nödutgång 1, genom vilken de gick ut. Eftersom dessa personer gick i medeltal mellan 13 och 14 meter, hade få gångshastigheter kunnat beräknas för dem om det kortaste avståndet 15 meter hade tillämpats.

I figur 16 kan det ses att gångshastigheten då försökspersonerna följde väggen avtar i det närmaste linjärt med röktätheten. Dessutom är hastigheten längs väggen högre, vilket stämmer med tidigare dragna slutsatser. Gångshastigheten då personerna inte följde väggen är mer utspridd och inget tydligt linjärt samband framgår ur figuren. Det är utifrån denna studie svårt att avgöra vad spridningen beror på.

En möjlig förklaring kan vara att ”att inte följa vägg” består av många olika sätt att förflytta sig i tunneln, t ex att följa bilar att gå på måfå eller att följa skylt. Var och en av dessa kan vara förknippade med en egen specifik gångshastighet som funktion av röktätheten. Det är dock även tänkbart att den individuella spridningen är större då väggen inte följs. Viktigt att påpeka är också att valet av 10 meter som den kortaste sträckan gör att effekten av mätfel blir större för gångshastigheten då personerna inte följde väggen.



**Figur 16** Gånghastigheten som funktion av röktätheten då försökspersonerna följde väggen och då de inte följde väggen.

### 3.3.4 Betydelsen av tidigare erfarenhet

Det kunde inte heller konstateras någon signifikant skillnad i gånghastighet beroende på tidigare erfarenhet. Personer med tidigare erfarenhet bedömdes vara de som uppgivit att de hade någon typ av tidigare erfarenhet av brand, brandövning eller tunnlar.

## 3.4 Utrymningsskyltar

I samtliga försök var genomlysta utrymningsskyltar placerade ovanför nödutgångarna på vänster sida i tunneln, se avsnitt 2.2. Totalt angav 38% av försökspersonerna att de hade sett en eller flera skyltar i tunneln, tabell 9. I de försök där belysningen var släckt var andelen som såg någon skylt större än i de försök där belysningen var tänd. Trots att sikten var något bättre i försöken med släckt belysning, anses det troligt att skillnaden främst berodde på att skyltarna var lättare att se då det var nedsläckt.

**Tabell 9** Antalet personer som såg någon skylt fördelat på försök med släckt och tänd allmänbelysning.

			Såg du några skyltar?		Totalt
			Ja	Nej	
Allmän- belysning	tänd	Antal	9	24	33
		Procent	27%	73%	100%
	släckt	Antal	8	4	12
		Procent	67%	33%	100%
Totalt		Antal	17	28	45
		Procent	38%	62%	100%

Av de 28 personerna som inte såg någon skylt gick enbart tre personer en sådan väg att de skulle ha haft en möjlighet att se någon skylt. Resten gick utmed tunnelns högra vägg och bör därför inte heller ha haft en möjlighet att se skyltarna, figur C4 i bilaga C. Därför är det ganska positivt att 17 personer faktiskt såg en skylt utav de 20 som hade möjligheten.

Utav de 17 försökspersoner som såg någon skylt valde sju, dvs 43%, att inte gå ut genom en nödutgång, utan fortsatte istället mot tunnelmynningen. I enkäten angav sex av dessa sju personer anledningen till att de inte hade gått ut genom någon nödutgång, tabell 10. Den vanligaste anledningen var att de inte trodde att skylten ingick i försöket eller att de inte trodde att de fick gå ut genom nödutgången.

Innan försöket fick dock samtliga personer informationen att de precis lämnat sin bil och stod i den brandgasfyllda tunneln, vilket följdes av uppmaningen att de skulle agera så som de hade gjort i den situationen. Försökspersonerna erhöll inte någon information om vad de fick lov att göra eller hur det såg ut i tunneln. I ett av försöken skedde ett kortare strömavbrott, vilket gjorde att skyltarna slocknade. Den aktuella försökspersonen valde därför att inte gå mot skylten.

**Tabell 10** Anledningen, som försökspersonerna angav i enkäten, till att de valde att inte gå ut genom nödutgången även om de såg skylten.

		Antal	Procent
Angiven anledning	Trodde inte att skylten ingick i försöket	2	29%
	Trodde inte att man skulle gå ut genom nödutgången	2	29%
	Tänkte inte på skyltarna	1	14%
	Skyltarna slocknade (Strömavbrott)	1	14%
	Ingen angiven anledning	1	14%
	Totalt	7	100%

De personer som såg skylten men valde att inte gå mot någon nödutgång uppvisade ett beteende som antydde att de tvekade. Fem av de sju personerna tittade t ex tillbaka mot skylten två eller fler gånger medan de avlägsnade sig från den. En del av ovanstående nämnda personer stannade dessutom upp eller saktade ner märkbart medan de tittade på skylten.

De resterande tio av de 17 personerna som såg någon skylt gick ut genom nödutgång 1 eller nödutgång 3. De reagerade mycket snabbt då de fått syn på skylten och började omgående gå mot denna. När de gick mot nödutgången tittade de upp mot skylten med jämna mellanrum och när de nått fram tittade

de ofta upp ytterligare en gång. Anledningen till att de tittade upp mot skylten var troligtvis för att göra det lättare att hålla rätt kurs då de gick genom röken och för att bekräfta för sig själva att de kommit rätt. När personerna nådde nödutgången kände de med händerna över dörren för att hitta någon öppningsanordning. De dörrar som fanns vid nödutgångarna var alla skjuldörrar som var ganska tröga att öppna. Samtliga försökspersoner hade svårigheter att öppna dörrarna, vilket verkar ha berott främst på att det inte framgick hur de skulle öppnas. I försöket hjälpte därför rökdykaren till med att öppna dörrarna.

I den enkäten fick försökspersonerna uppskatta i vad mån de hade nytta av skyltarna. På den 11-gradiga skalan blev medelvärdet 6,4 och standardavvikelsen 3,4. Av de 17 försökspersoner som såg någon skylt var det tio som bedömde nyttan med denna.

### 3.5 Blinkande lampor

Totalt deltog 14 försökspersoner i försök där blinkande lampor hade placerats vid nödutgångarna. Totalt sex personer angav att de sett blinkande lampor då de gått genom tunneln. Av dessa sex personer gick hälften förbi lamporna och vidare till tunnelmynningen, medan resten gick ut genom nödutgång 1.

I enkäten fick personerna ange hur de uppfattat det blinkande ljuset. Två personer, som båda gick genom hela tunneln, skrev att de inte hade tänkt på ljuset utan bara fortsatt. Tre personer, varav två gick ut genom nödutgång 1 och en genom tunnelmynningen, förknippade blinkandet med säkerhet och/eller utgång. Bara en försöksperson angav att han förknippat det blinkande ljuset med att man inte skulle gå dit eller med osäkerhet, men han valde trots detta att gå ut genom nödutgång 1. Det var i alla fall fler som associerade de blinkande lamporna till säkerhet än osäkerhet.

De tre personer som valde att gå ut genom nödutgång såg nödutgångsskylten som var placerad ovanför dörren, medan ingen av de tre som gick till tunnelmynningen gjorde det. Detta antyder att det krävdes en kombination av skylt och blinkande ljus för att personerna skulle välja att gå ut genom nödutgången. Troligt är att det blinkande ljuset hjälpte till att fånga uppmärksamheten, men att det krävdes ytterligare information i form av en skylt, vars innebörd var lätt för personerna att tolka.

I försöken användes bara lamporna som blinkande med orange ljus. Det har visats att vissa färger har en väl etablerad symbolisk innebörd (Wickens & Hollands, 2000), och ofta förknippas t ex färgen rött med fara eller stopp medan grönt förknippas med säkerhet eller kör. Det kan därför vara lämpligt att utreda valet av färg på blinkljuset. I de utförda försöken var det en av sex personer som förknippade ljuset med fara, men det är svårt att dra några slutsatser utifrån detta eftersom antalet personer som såg blinkljus var begränsat.

De blinkande lamporna var de som bedömdes vara mest nyttiga för beslutsfattandet i tunneln. På den 11-gradiga skalan blev medelvärdet 8,3 och standardavvikelsen 2,3 vilket är ett högt betyg. Totalt var det 14 försökspersoner (inte bara de som exponerades för dessa) som bedömde nyttan med de blinkande lamporna.

### 3.6 Rinnande ljus

Totalt 16 personer deltog i försök där rinnande ljus hade placerats på ömse sidor om nödutgång 2. Av dessa var det sex försökspersoner som såg det rinnande ljuset, varav fyra även såg en utrymningsskylt, men ingen valde att gå ut genom nödutgång 2. Majoriteten av personerna angav att de förknippat ljuset med säkerhet och övriga hade inte tänkt på det.

Syftet med det rinnande ljuset var att underlätta för försökspersonerna att hitta nödutgången genom att fånga deras uppmärksamhet och genom att ge dem information om riktningen till närmsta utgång. En möjlig förklaring till att det rinnande ljuset inte hade avsedd verkan kan vara att rörelsen in mot dörren inte var tillräckligt tydlig. Dessutom var sikten ganska begränsad i försöken, vilket gjorde att lamporna blev synliga först när försökspersonen kommit nära. Rörelsen i ljuset framgick dock tydligast på avstånd på 4 till 5 meter från ljusslangen. Ytterligare en förklaring kan vara att försökspersonerna inte kände till vad det rinnande ljuset innebar. Det är troligt att fler hade valt att gå ut genom nödutgången om det hade varit allmänt känt att det rinnande ljuset ledde till närmsta utgång.

Den bedömda nyttan med det rinnande ljuset är också svårt att bedöma eftersom bara tre försökspersoner angav sin skattning av nyttan. Medelvärdet av dessa tre försökspersoners bedömning var 5,7.

### 3.7 Golvmarkering

Golvmarkeringar användes tillsammans med blinkande lampor vid två av nödutgångarna i totalt sju försök. I enkäten ombads försökspersonerna att ange om de hade uppmärksammat någon annan teknisk installation, förutom skyltar och blinkande lampor, som kunde hjälpa dem att hitta ut. Ingen av personerna kryssade i att de sett något installation som påminde om golvmarkeringen. Närmare studie av videomaterialet kunde heller inte påvisa att någon sett markeringen. En förklaring till att golvmarkeringen fungerade dåligt kan vara att den var vit och därför syntes dåligt genom den ljusa röken.

Eftersom ingen av försökspersonerna uppgav att de såg någon golvmarkering görs ingen uppskattning av den i enkäten redovisade bedömda nyttan. I enkäten har visserligen åtta försökspersoner bedömt egenskapen ”Färgmarkering”, flertalet dock med graderingen noll. Men troligen har dessa personer graderat något annat som de uppfattat som annan färgmarkering eftersom bedömningen är gjord även av försökspersoner som inte exponerades för de utlagda golvmarkeringarna.

### 3.8 Hur uppfattade försökspersonerna vistelsen i tunneln?

En intressant fråga är hur de deltagande personerna upplevde sin situation i tunneln. Tyckte de t ex att det var svårt att orientera sig? Upplevde de stresskänslor och fysiska obehag? I enkäten ombads personerna att gradera hur mycket av en viss känsla de upplevde i tunneln och graderingen skedde enligt en elvgradig skala från 0 till 10, figur 17. Förutom känslorna osäkerhet, stress och rädsla, ombads personerna även att bedöma sina orienteringsproblem och fysiska obehag, i form av illamående och sveda i ögonen, enligt samma

elvagradiga skala. Variationen är genomgående ganska stor men samtliga anger att de i någon grad påverkades av försökets utformning.

Vilka känslor kände du under utrymningen (markera med kryss)														
40.	Osäkerhet	Ingen	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Stor
			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

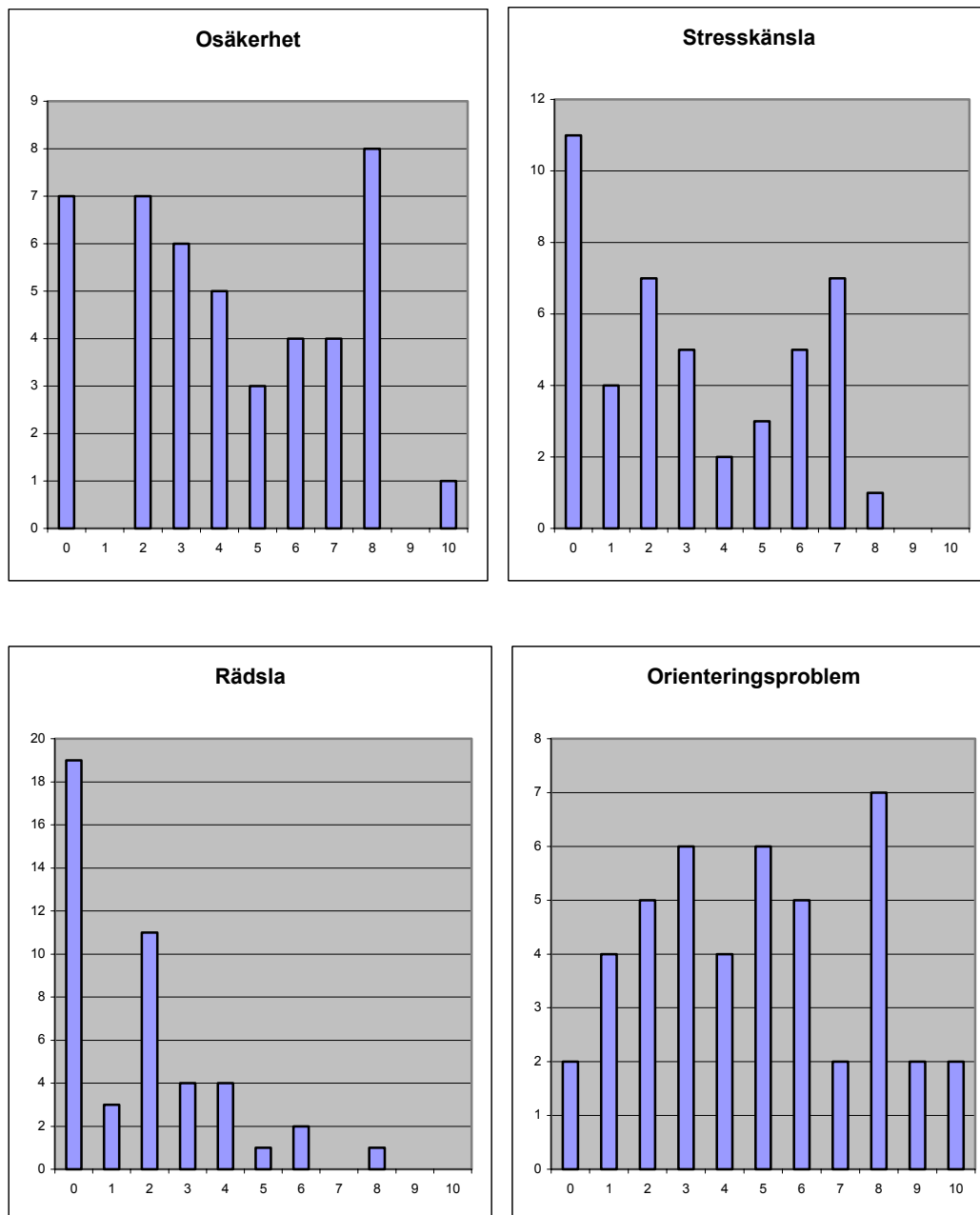
Figur 17 Exempel på fråga från enkäten.

### 3.8.1 Upplevda känslor

I figur 18 visas försökspersonernas bedömningar av sin osäkerhet, sina stresskänslor, sin rädsla och sina orienteringsproblem. I figurerna anger den vertikala axeln antalet försökspersoner som bedömt sina upplevelser utifrån den 11-gradiga skalan på den horisontella axeln. Från figuren kan det ses att fördelningen för osäkerhet och stresskänslor ligger förskjutet längre åt höger, dvs mot högre värden, än fördelning för känslan rädsla. Detta antyder att personerna inte kände sig rädda i lika stor utsträckning, utan mest kände av osäkerhet och stress under försöken. Fördelningen för försökspersonernas bedömningar av sina orienteringsproblem är relativt jämt fördelad över hela den elvgradiga skalan.

Utifrån försökspersonernas bedömningar undersöktes korrelationen mellan de olika känslorna och mellan känslorna och orienteringsproblemen.

Undersökningen resulterade i låg korrelation, dvs låga korrelationskoefficienter. En förklaring till det dåliga resultatet kan vara att en för bred skala användes vid bedömningarna av känslorna i enkäten. Dessutom kan det ha varit svårt för personerna att avgöra vad t ex en åtta i rädsla innebar och för olika personer kan dessutom en åtta ha inneburit olika grad av rädsla. För att möjliggöra en närmre analys av försökspersoners känslor hade det varit lämpligt att utforma en skala med färre alternativ. Dessutom måste alternativen vara bättre definierade så att försökspersonerna lättare förstår innebörden av dem.



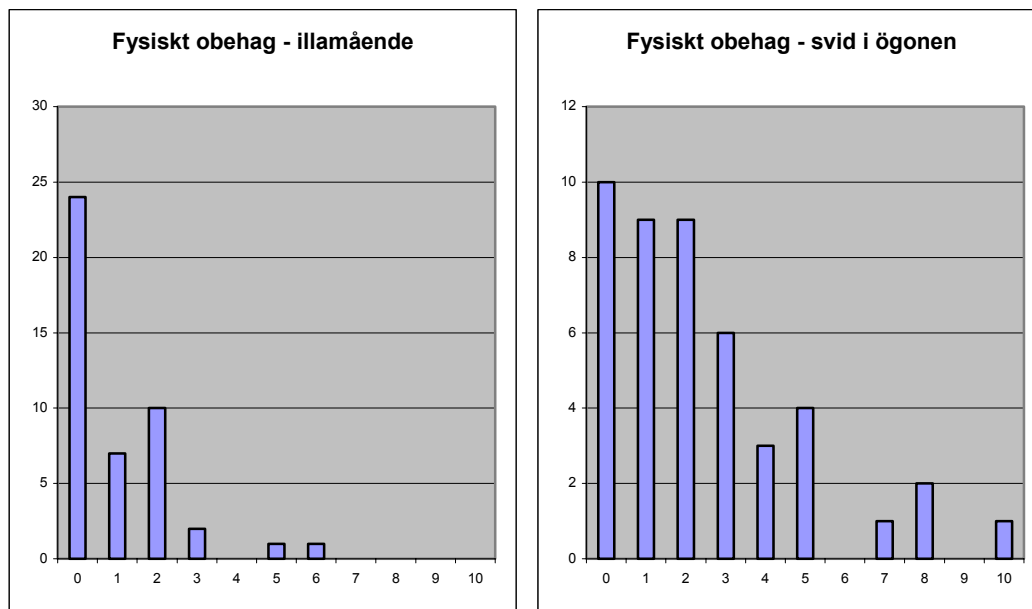
**Figur 18** Försökspersonernas skattningar av sin osäkerhet, stress, rädsla och sina orienteringsproblem. Vertikala axeln anger antal personer och den horisontella axeln utgör bedömningen på den 11-gradiga skalan.

### 3.8.2 Fysiska obehag

Försökspersonernas skattningar av det fysiska obehag de upplevde i tunneln visas i figur 19. De fysiska obehagen i form av illamående var generellt små, medan betydligt fler personer kände att det sved i ögonen. Det var just irritationen i ögonen som försökte uppnås genom att koka ättiksyra på två ställen i tunneln. Användning av ättiksyran i försöket fungerade mycket bra och metoden rekommenderas för framtida försök. Ättiksyran framkallade lagom mycket ögonirritation, samtidigt som övriga konsekvenser av användningen var minimala. Enda nackdelen var att all utrustning måste



rengöras efter försöken, för att undvika korrosion. Vid försöken uppmättes som mest en koncentration på 15 ppm, vilket verkar ha varit en lämplig koncentration med avseende på ögonirritation. Värdet 10 ppm motsvarar det Korttidsvärde för ättiksyra, dvs den rekommenderade tidsvägda medelkoncentration som en person får utsättas för i maximalt 15 minuter, är dock 10 ppm (AFS, 2000).

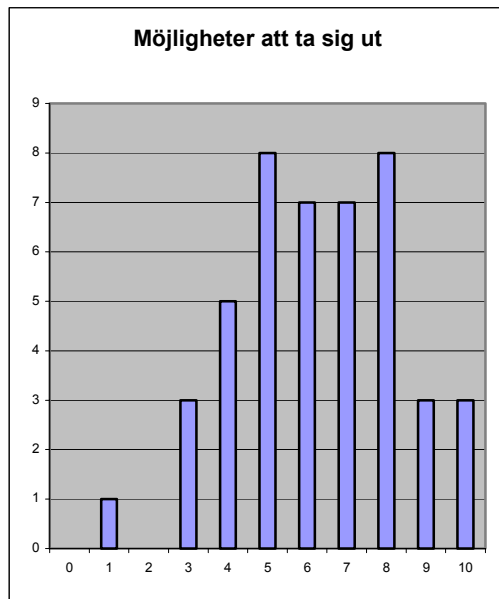


**Figur 19** Försökspersonernas skattningar av sina fysiska obehag i form av illamående och sveda i ögonen. Vertikala axeln anger antal personer och den horisontella axeln utgör bedömningen på den 11-gradiga skalan.

### 3.8.3 Möjlighet att utrymma säkert

I enkäten ombads försökspersonerna även att bedöma sina möjligheter att ta sig ut ur tunneln om det varit en verklig brand. Bedömningen skedde enligt samma elvagrada skala där 0 motsvarade mycket små och 10 motsvarade mycket stora möjligheter. Försökspersonernas svar visas i figur 20.

Tyngdpunkten för fördelningen i figuren ligger i den övre halvan av skalan, vilket verkar antyda att försökspersonerna var optimistiska angående sina möjligheter att ta sig ut. Det har tidigare visats att personer ofta underskattar faror, dvs underskattar sin sårbarhet (Fischhoff, 1975 och Slovic & Fischhoff, 1982).



Figur 20 Försökspersonernas skattningar av sina möjligheter att ta sig ut.

### 3.8.4 Skillnader med avseende på kön

Vid en jämförelse mellan hur män respektive kvinnor uppfattade sin situation i form av ökad stress, obehag mm är skillnaderna ganska små. Endast för 'Fysiskt obehag - svid i ögonen' finns det en skillnad i uppskattningen som är signifikant. För de övriga bedömningarna är skillnaderna mellan könen så små att de lika gärna kan bestå av slumpmässiga skillnader. Hypotestestet genomfördes på 5 %-nivån.

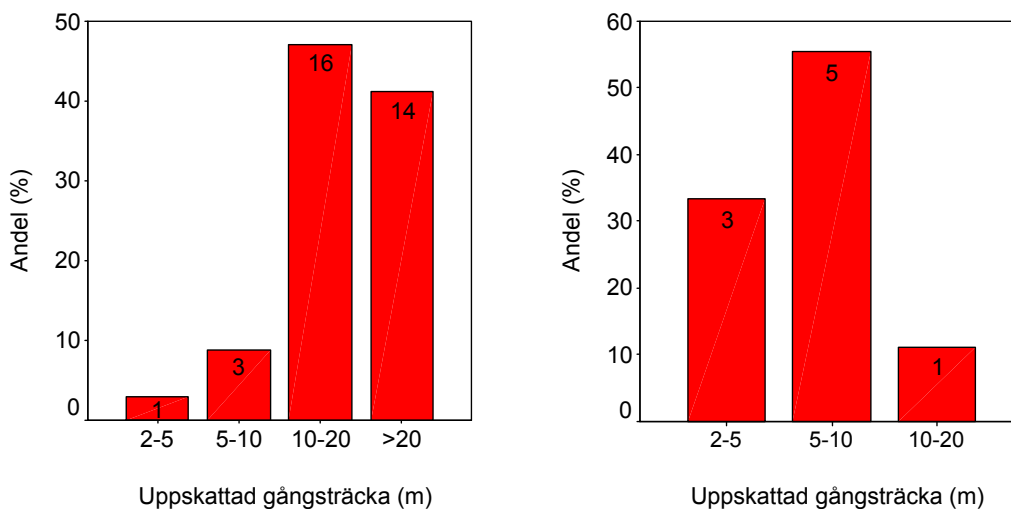
### 3.8.5 Skillnader med avseende på exponeringstid

Det kunde inte heller konstateras något beroende mellan försökspersonernas bedömning av stressnivå, orienteringsproblem, rädsla, osäkerhet, fysiskt obehag och den tid som försökspersonen vistades i tunneln. Det skulle kunna finnas en relation att stressen, osäkerheten mm ökade ju längre exponeringstiden var. Detta kunde dock inte beläggas. Det fanns heller ingen tydlig koppling mellan försökspersonernas bedömning av sin möjlighet att ta sig ut och exponeringstiden.

### 3.8.6 Bedömning av gångsträcka

En intressant fråga är hur försökspersonernas uppfattning av tunneln stämmer med hur det verkligen såg ut. I enkäten ombads försökspersonerna att uppskatta den sträcka de gått i tunneln innan de kom ut genom en dörr. För de personer som gick hela vägen genom tunneln till mynningen angav flest, 47%, att de gått mellan 10 och 20 meter. Ett fåtal, 12%, sade att de gått 2 till 5 eller 5 till 10 meter och resterande andel, 41%, sade att de gått mer än 20 meter i tunneln, figur 21. En studie av videomaterialet visade att den kortaste sträcka som någon av de ovanstående personerna gått i tunneln var 35 meter och att genomsnittlig gångsträcka var 38 meter. Detta antyder att försökspersonerna tenderade att underskatta den sträcka de gått i tunneln. Tendensen är även märkbar för de personer som gick till nödutgång 1, men i detta fall är den inte lika markant. Dessa personer gick i medeltal mellan 13 till 14 meter innan de

kom ut genom en dörr, men bara en person av nio angav att han gått mellan 10 och 20 meter.



**Figur 21** Uppskattad gångsträcka för de försökspersoner som gick ut genom tunnelmynningen (vänster) och nödutgång 1 (höger). Siffrorna i staplarna anger antalet personer.

I enkäten fick försökspersonerna ange om de sett andra installationer, förutom blinkande lampor och skyltar, som kunde ha hjälpt dem att hitta ut. Ungefär 13% fyllde i att de sett eller känt räcken i tunneln, trots att räcken inte användes i något av försöken. Dessutom angav 20% att de sett ljusstrålar, vilket inte heller användes i något av försöken. Det är oklart varför personerna såg eller kände installationer som inte fanns i tunneln. De ljusstrålarna som försökspersonerna sett kan eventuellt ha varit ljuset från lampor eller glipor i dörrarna, men vad som kan ha uppfattats som räcken är svårt att avgöra.

### 3.9 Intervjuer

De försök som genomfördes på söndagen den 10 november kompletterades samtliga med intervjuer av de deltagande försökspersonerna. Totalt intervjuades 14 personer och de deltog i försöksscenerna 1, 2, 3 och 8 (avsnitt 2.10). De slutsatser som kunde dras utifrån intervjumaterialet stämmer bra med tidigare dragna slutsatser, vilka baserats på videoinspelningarna och enkätsvaren.

I intervjuerna framkom att majoriteten av försökspersonerna hade sökt upp en vägg, för att lättare kunna orientera sig i tunneln. De personer som fått kontakt med väggen släppte dessutom ogärna taget om denna. Ungefär hälften av de intervjuade gick framåt i tunneln utan att aktivt leta efter någon utgång eller öppning. De förutsatte istället att de skulle komma till någon lämplig skylt, utgång eller liknande om de bara fortsatte att gå.

De personer som följde väggen letade ofta efter en utgång genom att känna sig för med händerna. Dessutom räknade de med att de snarare skulle känna en dörr än att de skulle se ljuset från en skylt eller blinkande lampor. Flera av personer uppmärksammade dock ljus, men satte inte det i samband med säkerhet eller utgång. De valde hellre att fortsätta att följa väggen än att gå mot

ljuset. Ljus uppfattades både som hot eller brand och som trygghet eller utgång.

Få personer hade hört ljud i tunneln. Ljud verkar ha förknippats med något avskräckande och personerna gick hellre från ljudet än mot det.

### 3.10 Resultat från scenarierna 6-8

Eftersom det totala antalet försökspersoner var begränsat genomfördes scenarierna 6-8 med personer som redan varit med om ett försök. Detta gjordes även för att undersöka om det fanns någon inlärningseffekt efter att ha varit med om ett tidigare försök. Ett annat skäl var att prova lystråden för att se om den kunde underlätta för försökspersonerna att hitta ut genom tunneln. Eftersom försökspersonerna tidigare varit med om ett försök redovisas resultaten från dessa extra försök separat och ingår därför inte i den tidigare redovisningen. Det är helt olika förutsättningar mellan de båda angreppssätten. Försökspersoner som valdes ut till scenarierna sex till åtta hade inte i sina tidigare försök varit exponerade för liknande förutsättningarna som i dessa försök. De hade exempelvis inte deltagit i försök med blinkande lampor.

Scenario sex genomfördes eftersom det var så få personer som valde att gå till nödutgångarna när de blinkande lamporna var tända. I de ordinarie försöken genomfördes försöken med blinkande lampor tillsammans med tänd allmänbelysning. Därför genomfördes åtta nya försök med blinkande lampor och släckt allmänbelysning. Samtliga försökspersoner gick i detta fall direkt till den första nödutgången utan att överväga att fortsätta genom hela tunneln. De blinkande lamporna var nu mycket tydligt synliga genom röken.

Den lysande lystråden provades både med och utan allmänbelysningen tänd. I båda fallen genomfördes tre försök med olika försökspersoner. I två fall, ett för vardera med och utan allmänbelysningen tänd, framgick det att försökspersonen hade nytta av tråden. I övriga verkade försökspersonerna inte ha så stor nytta av tråden eftersom de tittade åt andra håll och försökte orientera sig med händerna i första hand. I det fall där försökspersonen följde tråden och allmänbelysningen var släckt upptäckte försökspersonen tråden nästan i slutet av tunneln. Försökspersonen valde då att följa tråden men gick åt fel håll dvs åt det håll som personen kom ifrån. Personen gick alltså hela vägen tillbaka igen genom tunneln. Detta kan bero på att tråden inte ger någon information om vilket håll som är bästa att gå.

När det gäller minneseffekten av att ha passerat genom tunneln en gång kunde någon sådan inte noteras. Försökspersonerna i scenario sex gick visserligen direkt till nödutgången vilket skulle indikera att personerna visste vart de skulle gå. Försökspersonerna i scenario sju och åtta hade inte de tydliga blinkljusen att följa och uppträdde mer likt som under de ordinarie försöken ett till fem. Detta skulle då indikera att försökspersonerna inte på förhand visste hur de skulle gå eller vilken utgång de borde välja. Det är därför möjligt att de faktiska förhållandena i tunneln mer påverkar försökspersonernas beteende än det faktum att de redan varit med om ett försök i en liknande miljö. Men antalet försökspersoner är alltför litet för att några sådana slutsatser ska kunna dras. Tabell 11 sammanfattar resultaten av scenario 6-8.

**Tabell 11. Antal personer som valde respektive utgång för de olika scenarierna. Nödutgång 3 var endast en illustration av en utgång och saknade dörr.**

Scenario	Ingång	Nödutgång 1	Nödutgång 2	Nödutgång 3	Tunnelmynning	Summa
6	0	8	0	0	0	8
7	0	2	0	0	1	3
8	0	1	0	0	2	3
Summa	0	11	0	0	3	14

## 4 Diskussion

### 4.1 Gånghastighet genom tät rök

Försöken visade att gånghastigheten minskade med ökande röktäthet, dvs med minskande sikt. Detta var också utgångspunkten i den hypotes som formulerades. Spridningen i resultaten var dock väldigt stor, vilket delvis kan förklaras av individuella skillnader mellan försökspersonerna. Det är också troligt att andra faktorer såsom vald gångväg påverkar hastigheten och att bättre förhållanden mellan gånghastighet och röktäthet erhålls ju fler faktorer som isoleras. Enligt denna teori hade det exempelvis varit möjligt att med stor noggrannhet ange förhållandet mellan gånghastighet och röktäthet då personen följer väggen givet vissa personegenskaper, såsom längd och kön. Denna typ av samband kan visserligen ge bra överensstämmelse, men är svåra att använda vid beräkning av utrymningstider. De kräver ju kunskap om den undersökta populationens individuella egenskaper och dessutom om samtliga personers vägval.

Det som slutanvändaren, dvs en projekterande eller kontrollerande ingenjör, vill ha är samband som generellt kan användas för utrymmande personer. I rapporten har några sådana samband redovisats men dessa är förknippade med en ganska stor osäkerhet. Även den så kallade bruttohastigheten är förenad med stora osäkerheter, figur 12. Bruttohastigheten är den genomsnittshastighet som erhålls då det raka avståndet mellan ingången och vald utgång relateras till tiden i tunneln.

Ett av syftena med försöken var att verifiera de resultat som presenterats av Jin (1979). Eftersom det var svårt att kontrollera mängden rök i tunneln var röktätheten i försöken högre än i Jins försök, dvs sikten var sämre. Det gör att resultaten inte ligger inom samma röktäthetsområde och en direkt jämförelse kan då inte göras. Det som däremot kan konstateras är att relationen mellan de resultat som Jin presenterar och de som är ett resultat av försöken inte står i konflikt med varandra. Trenden mellan Jins data och de föreliggande är tydlig. Det som dock är mest slående är den stora osäkerhet som finns i båda undersökningsgrupperna. Detta är ett problem som inte diskuteras i Jin (1979) men som är tydligt utifrån projektets resultat. Hanteringen av denna osäkerhet bör göras i samband med praktisk tillämpning. Ett sätt att hantera osäkerheten är att genomgående välja gånghastigheter som är konservativa, dvs låga när utrymningstider ska beräknas. I annat fall kan osäkerheten ingå explicit i en osäkerhetsanalys.

En annan faktor som bör beaktas vid t ex utrymningsberäkningar i tunnlar eller andra situationer där de utrymmande går en längre sträcka är att personer vänjer sig vid underlaget och förhållandena. Det innebär att gånghastigheten ökar efter ett tag då personerna blir mer bekanta med miljön. Detta har tidigare konstaterats vid ett utrymningsförsök i Stockholms tunnelbana (Frantzich, 2000) där personer gick på ett underlag av grov makadam. Nära tunnelbanetåget var gånghastigheten mellan 1,0-1,4 m/s och ca 130 m längre bort i tunneln mellan 1,0-1,8 m/s. I det aktuella försöket var nödbelysningen tänd men resultatet visar på en tillvänjningseffekt. Denna bör också finnas vid utrymning i tät brandgas eller mörker.

I försöken i tunnelbanan undersöktes också gånghastigheten i mörker. Den varierade mellan 0,5-1,0 m/s vilket är högre jämfört med resultaten som redovisas efter försöken i denna rapport. Skillnaden kan bero på egenskaperna i röken, den i tunnelbaneförsöken lägre röktätheten, annorlunda gångsträcka och det faktum att försökspersonerna gick individuellt. I tunnelbanan fanns heller inga hinder i form av bilar som störde förflyttningen.

## 4.2 Utrymningsinstallationer och deras utformning

I enkäten tillfrågades försökspersonerna hur de tyckte att en installation eller ett hjälpmedel skulle vara utformat för att underlätta för dem vid en utrymning, tabell 12. Syftet med detta var mest för att få en uppfattning om försökspersonernas åsikter när de precis hade genomfört en utrymning. Redovisningen finns därför inte presenterad under föregående kapitel då den inte har någon direkt koppling till övriga resultat.

Förutom att beskriva typen av installation ombads de också att beskriva vilka egenskaper hos hjälpmedlen som de ansåg var viktiga. Frågan resulterade i många förslag på installationer som försökspersonerna ansåg var lämpliga och dessa kan sammanfattas i sju grupper:

- Vanliga lampor i tunneln
- Blinkande lampor vid nödutgångarna
- Rinnande ljus, ljusslang eller ljuslist som leder till nödutgång
- Skyltar med pilar och avståndsangivelser till nödutgångar eller pilar och markeringar som leder till nödutgång
- Räcke eller ledstång
- Ljud vid nödutgångarna som gör dem lättare att hitta
- Övrigt

Gruppen övrigt innefattar många olika förslag på installationer som endast föreslogs av en eller ett fåtal personer. Exempel på förslag som innefattas av övrigt är ljuslist eller lampor placerade på väggen runt nödutgångarna och vanliga utrymningsskyltar ovanför nödutgångarna.

**Tabell 12** Antal och andel av försökspersonerna som föreslog olika tekniska installationer.

		Antal	Andel
Föreslaget hjälpmedel	Vanliga lampor	9	20%
	Blinkande ljus	4	9%
	Rinnande ljus, ljusslang eller ljuslist	6	13%
	Skyltar med pilar och avståndsangivelser eller pilar och markeringar	13	29%
	Räcke eller ledstång	8	18%
	Ljud vid utgångarna	3	7%
	Övrigt	13	29%
	Total <sup>a</sup>	35	78%

<sup>a</sup>. Anger antalet och andelen personer som föreslog något hjälpmedel

Den installation som föreslogs flest gånger var skyltar med pilar och avståndsangivelser till nödutgångar eller pilar och markeringar som leder till nödutgång. I tunnelförsöken användes skyltar ovanför utrymningsvägarna i samtliga fall och en matta med pilar på i några försök, men i övrigt saknades denna typ av installation. Vid nybyggnad och förbättring av vägtunnlar i Sverige tillämpas den allmänna tekniska beskrivningen Tunnel 99 (Tunnel 99, 1999). Enligt denna skrift krävs vägledande belysning, vilken ska leda trafikanterna till närmsta tunnelmynning eller utrymningsväg vid brandgasutveckling i tunneln. Belysningen ska kopplas på vid brandlarm, men ska även gå att aktivera manuellt. Kravet enligt Tunnel 99 är att den vägledande belysningen ska finnas på den sida där utrymningsvägarna är belägna.

I enkäten angav några av försökspersonerna hur de tyckte att hjälpmedlen borde placeras, tabell 13. Det vanligaste förslaget var att de skulle placeras lågt, dvs på marken eller långt ner på väggen, eller i ögonhöjd. En del av personerna påpekade att de tyckte att det var svårt att se skyltarna ovanför dörrarna.

**Tabell 13** Antal och andel av försökspersonerna som föreslog olika placering av tekniska installationer.

		Antal	Andel
Placering	På marken	9	20%
	I ögonhöjd	5	11%
	Långt nere på väggen	3	7%
	I taket	1	2%
	Total <sup>a</sup>	14	31%

<sup>a</sup>. Anger antalet och andelen personer som föreslog någon placering

Det sista påpekanget som framfördes av många försökspersoner var att hjälpmedlen måste vara tydliga. Totalt 10 personer, dvs 22%, påpekade betydelsen av hjälpmedlens tydlighet i enkäten.

Ett av de främsta kraven på ett hjälpmedel är att det ska vara lätt att upptäcka och att det ska framträda tydligt. Tydlighet innebär i detta fall inte bara att t ex skyltar och andra installationer ska vara stora och i färg, utan innebär även att de ska vara korrekt placerade. Av försökspersonerna var det totalt 22% som



framhävde tydligheten som en viktig egenskap och dessutom föreslog 31% lämplig placering av hjälpmedlen. De placeringar som föreslogs mest var antingen i ögonhöjd, långt ner på väggen eller på marken. Vid utformning av tunnlar kan det därför vara lämpligt att ta hänsyn till detta och placera hjälpmedlen på de höjder som föreslogs i enkäten. Detta utförs dock redan idag och i Tunnel 99 står det t ex att den vägledande belysningen ska placeras på höjden 0,5 till 1 meter ovanför vägbanan.

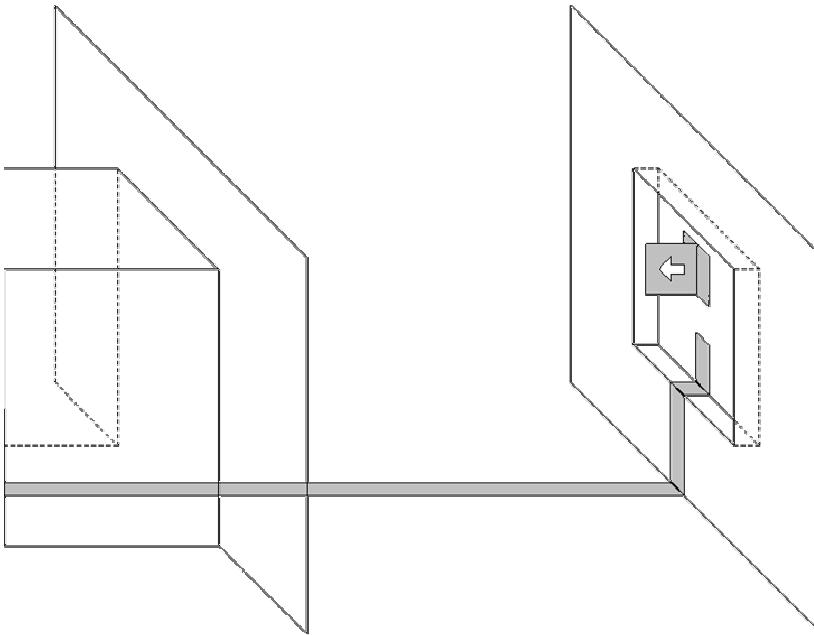
För att en teknisk installation ska ha avsedd verkan krävs inte bara att den är lätt att upptäcka och att den framträder tydligt, utan även att personerna kan tolka den information som de erhåller. Ett exempel på ett hjälpmedel som inte uppfyllde detta krav var det rinnande ljus som användes i tunnelförsöken. Denna installation upptäcktes av totalt sex personer, men ingen av dessa valde att gå ut genom den aktuella utgången. En möjlig förklaring till detta kan vara att de inte förstod innebörden av det rinnande ljuset, dvs att de inte förstod att de hade kommit till en utgång om de hade följt blinkningarna. Det bör tilläggas att rörelsen inte framgick särskilt tydligt då hjälpmedlet sågs på nära håll, vilket även kan vara en bidragande orsak till det dåliga utfallet (avsnitt 3.6).

Vid utrymning är det alltså, enligt ovanstående resonemang, viktigt att de utrymmande förstår innebörden av den information som hjälpmedlet förmedlar. Ett möjligt angreppssätt är att utforma hjälpmedlen utifrån försökspersonernas förslag. I enkäten var det vanligaste förslaget skyltar med pilar och avståndsmarkeringar eller pilar och markeringar. Dessa installationer kännetecknas av att de är lätta att förstå utan att de behöver någon närmare förklaring eller eftertanke. De flesta personer vet t ex att en pil innebär en riktning mot något. Hjälpmedlen kan alltså utformas huvudsakligen med pilar, vilket hade underlättat förståelsen.

I de fall då andra tekniska installationer ska användas bör det noga övervägas om innebörden av den förmedlade informationen klart framgår för de utrymmande. I vissa fall kan det vara möjligt att förse de utrymmande med information om hjälpmedlen innan de börjar utrymma. Detta kan exempelvis ske genom information i talade utrymningsmeddelande. På detta sätt kan utrymmande personer i en tågtunnel, via tågets interna högtalarsystem, informeras om att det finns blinkande lampor vid nödutgångarna, redan innan tågdörrarna öppnas. Det är troligt att denna typ av information hade förbättrat utfallet. I tunnelförsöken gick hälften av de personer som sett det blinkande ljuset vidare utan att gå mot nödutgång. Anledningen anses vara att de inte kände till innebörden av det blinkande ljuset (avsnitt 3.5). Om dessa personer hade fått information om att det blinkande ljuset kunde visa dem vägen till en nödutgång, är det troligt att en större andel hade gått ut genom en nödutgång.

De försökspersoner som följde en tunnelvägg i försöken förflyttade de sig fortare, vilket är en fördel vid utrymning. För att underlätta förflyttning längs tunnelväggen rekommenderas att räcken eller handledare installeras. Ett alternativ kan vara att ha räcken på högern sidan som bryts av då det finns nödutgångar på andra sida. Avbrottet kan vara utformat som en urgröpning i väggen vilken skulle illustrera del av en dörr, figur 22. Av trafiksäkerhetsskäl kan det i vägtunnlar vara olämpligt om urgröpningen går hela vägen ner till vägbanan. I detta fall är det viktigt att det finns skyltar som tydligt markerar vägen till nödutgång. Ytterligare ett förslag är att rita linjer eller pilar i marken, vilka kan följas till nödutgången på andra sidan, figur 22. Ovanstående

utformning bygger på erfarenheter från försöken men bör provas innan den appliceras i full skala.



Figur 22. Förslag till utformning av området kring en utrymningsväg.

### 4.3 Metodologiska problem

När försök genomförs med personer som ska observeras eller uppge sina subjektiva värderingar kommer frågan om resultatens validitet och reliabilitet upp. Med validiteten avses om de resultat som erhålls är resultat av det som avses mätas. Med reliabilitet avses istället den säkerhet i prediktionen av det som mäts. Det är uppenbart att såväl validitet som reliabilitet är subjektiva mått i den föreliggande undersökningen. Det finns inte någon möjlighet att förkasta resultaten på grund av för dålig nivå på dessa variabler.

Möjligen kan validiteten för tolkningen av försökspersonernas bedömning av sin egen upplevelse diskuteras. Bedömningen av försökspersonernas upplevelse är gjord utan att ta hänsyn till att röktätheten varierade mellan de olika försöken. Istället har det antagits att röken är 'mycket tät' i de fall då beteendet och upplevelsena diskuteras. I redovisningen av gånghastigheten har dock röktätheten varit en kontrollerad variabel mot vilken gånghastigheten uppskattats. Det kan då hävdas att validiteten för resultatet av gånghastighet är högre men det behöver heller inte vara korrekt eftersom det finns ytterligare variabler som ändras mellan försöken, t ex koncentrationen av ättika i röken.

Detta är problem som alltid uppkommer i samband med fysiska försök, det går inte att kontrollera alla variabler utan en viss sällning måste göras. I den aktuella undersökningen gjordes redan tidigt bedömningen att bara gånghastigheten skulle relateras till röktätheten medan försökspersonernas bedömningar skulle vara oberoende av den faktiska röktätheten. Detta val gjordes med tanke på att röktätheten i samtliga försök var mycket hög och att de subjektiva skillnaderna skulle vara små även om röktätheten beaktades. Det

är också en fråga om hur de subjektiva bedömningarna som försökspersonerna gjorde skulle kunna sättas i relation till variation i t ex röktäthet.

Reliabiliteten i de erhållna resultaten är i stort beroende på antalet observationer. När försök med frivilliga försökspersoner ska göras är det då ofta en fråga om hur många personer som det finns resurser att ta med i undersökningen. I den aktuella undersökningen gjordes en sådan avvägning mellan antalet försökskombinationer och det befintliga antalet försökspersoner.

En av de metoder som användes var insamling av data med enkäter. Att använda enkäter är också förenat med vissa osäkerheter. Dels är kvaliteten på det insamlade materialet beroende på hur enkäten är utformad men också av hur enskilda försökspersoner uppfattar en given fråga. Det finns alltså även i enkätmaterialet en osäkerhet i hur väl dessa resultat speglar verkliga förhållanden. För att minska osäkerheten (i princip samma sak som att öka reliabiliteten) kompletterades enkäterna med intervjuer för några försökspersoner. Av praktiska skäl kunde inte samtliga försökspersoner intervjuas. En jämförelse mellan enkätsvar och intervjusvar visar dock att enkäterna har en god skattning av försökspersonernas åsikter och erfarenheter från försöken.

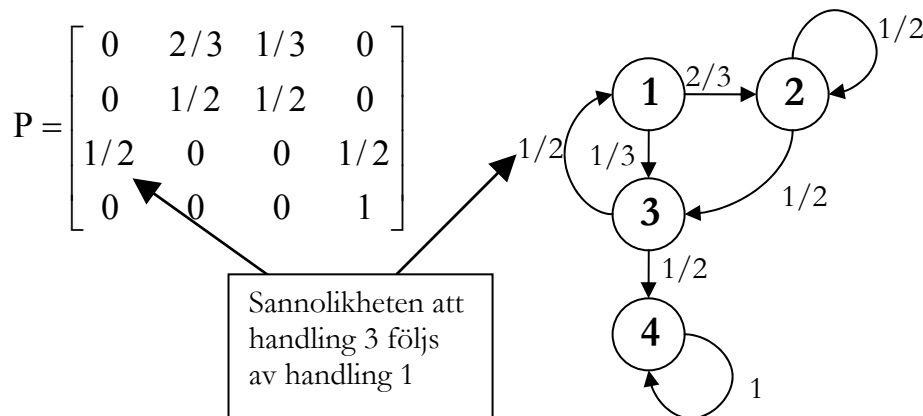
En diskussion som måste också föras angående försök där människor är inblandade är om försöken och exponeringen på försökspersonerna är motiverade utifrån ett etiskt perspektiv. Den eventuella kränkningen av försökspersonens integritet måste vägas mot nyttan med försöken. För den sakens skull finns det en möjlighet att få försöksplanen granskad av en forskningsetikskommitté som finns vid de flesta universitet i landet. Men redan innan en sådan kopplas in måste etiska överväganden göras. Det som var det stora problemet med föreliggande försöksserie var försökspersonernas exponering för ättiksyra och hanteringen av den dokumentation av försökspersonerna beteende som finns på videofilmerna.

Hanteringen av filmerna är inget större problem utan det kan ske på ett tryggande sätt. Däremot är ättiksyraexponeringen mer kontroversiell. De nivåer som det var frågan om i försöken ligger dock på värden som är nära gränsvärdena för avsevärt längre exponering men de förorsakar ändå obehag och kan vara skadliga för känsliga personer. Av den anledningen måste ytterligare skyddsåtgärder vidtas, t ex sjukvårdsutbildad personal närvarande och speciella instruktioner till den rökdykare som följde försökspersonen i tunneln, vilket också gjordes i försöket.

## 4.4 Markovkedjor

En del av projektet bestod i att studera försökspersonernas beteende i tunneln. Delar av detta arbete gick ut på att hitta en metod som kunde användas till att kvantifiera beteende och kartlägga typiska beteendemönster. Den metod som till en början verkade mest lovande gick ut på att beskriva beteendet med diskreta Markovkedjor. Tanken var att försökspersonernas beteenden skulle studeras och brytas ner i mindre handlingar. Exempel på typiska handlingar är att följa väggen, att se/observera utrymningsskylt och att gå mot utrymningsskylt. När beteendet brutits ned i en sekvens av handlingar skulle de så kallade övergångssannolikheterna beräknas. Dessa beskriver sannolikheten att en viss handling följs av annan handling, t ex sannolikheten att ”att

se/observera utrymningsskylt” följs av ”att gå mot utrymningsskylt”. Med hjälp av sannolikheterna skulle sedan en övergångsmatrix konstrueras. Matrisen beskriver alltså hur ofta en viss handling följs av en annan handling. Slutligen skulle en modellgraf för den erhållna Markovkedjan, dvs försökspersonernas beteende i tunneln, kunna skapas, figur 23. Modellgrafen hade kunnat ge en översiktlig grafisk illustration av beteendet i tunnel, vilken hade kunnat användas till att dra slutsatser om typiska beteendemönster.



**Figur 23** Ett exempel på en övergångsmatrix och en modellgraf för ett beteende som kan delas in i fyra olika handlingar (1, 2, 3 och 4). Modellgrafen kan användas till att upptäcka typiska beteendemönster.

Ett av kraven som måste uppfyllas för att beteendet ska kunna beskrivas med en Markovkedja är att framtiden bara beror av nuet och inte av det förflutna. Sannolikheten att handling 3 i figuren ovan följs av handling 4 ska alltså vara oberoende av om handlingen före var handling 1 eller handling 2. Vid studie av beteendet i tunnelförsöken uppmärksammades att en vissa handling inte bara berodde av nuvarande handling utan även av närmast föregående. Ett exempel var att beteendet då försökspersonerna stötte på en bil var olika beroende på om de hade följt väggen eller gått på måfå. Det är dock troligt att delar av beteendet i tunneln kan beskrivas med Markovkedjor, men någon vidare undersökning av detta har inte genomförts. Även om det visade sig att Markovkedjor inte var det optimala verktyget för att beskriva beteendet i de aktuella försöken, kan metoden komma att användas i framtida beteendestudier. Det anses troligt att metoden kan komma att bli speciellt värdefull för beskrivning av det initiala beteendet vid en brand. Liknande metoder har tillämpats av bland annat Canter m fl för att kartlägga just det initiala beteendet vid brand eller brandlarm (Canter m fl, 1980)



## 5 Slutsatser

Gånghastigheten genom tät brandgas är klart beroende på sikten genom brandgasen. Den hypotes som inledningsvis formulerades vara att gånghastigheten skulle sjunka med ökande röktäthet. Detta hade tidigare visats av Jin för röktäthet upp till ca  $1 \text{ m}^{-1}$ . Tendensen med minskande gånghastighet för ytterligare ökande röktäthet kunde konstateras men det är ganska stor spridning i resultaten. Det finns försökspersoner som går förhållandevis fort även om sikten är dålig. Detta har också konstaterats i andra undersökningar med förflyttning i mörker, Frantzich (2000). En slumpmässigt vald person kan ha en gånghastighet på mellan 0 och 0,6 m/s utifrån den statistiska analysen gällande för verkligt tät brandgas ( $k = 8 \text{ m}^{-1}$ ). För att minska denna osäkerhet behöver fler försök genomföras.

Resultaten visar vidare på betydelsen av väggarna vid utrymning ur tunnlar. Ofta är väggen något säkert och greppbart som de utrymmande ogärna släpper taget om. Detta kan vara ett problem om fel vägg följs, dvs den vägg som inte har några nödutgångar, eftersom tät rök kan göra att nödutgångar på andra sidan inte uppmärksammas. Detta inträffade i några försök där personer som följde höger vägg gick hela vägen till tunnelmynningen, utan att se någon av de utrymningsskyltar som fanns på vänstersidan. En möjlig lösning på detta problem kan vara att utforma tunnlar så att nödutgångarna är lätta att hitta, men hur kan en sådan utformning se ut?

En möjlighet kan vara att använda olika typer av tekniska installationer för att göra personerna uppmärksamma på nödutgångarna. I försöken användes exempelvis blinkande lampor och rinnande ljus.

Av de personer som såg nödutgångsskyltar i försöken var det knappt hälften som valde att inte gå ut genom någon nödutgång, utan fortsatte istället till tunnelmynningen. Den vanligaste angivna anledningen var att de inte trodde att det var tillåtet eller att de inte trodde att skyltarna ingick i försöket. Detta är anmärkningsvärt eftersom försökspersonerna inte fick några instruktioner om vad som var tillåtet eller hur det såg ut i tunneln. Personerna som såg en skylt och inte gick ut genom en nödutgång uppvisade ett beteende som antydde att de tvekade. Alla tittade på skylten två eller flera gånger och många av personerna stannade upp eller saktade ner märkbart.

En möjlig förklaring till att en stor andel valde att inte gå ut genom en nödutgång kan vara att personer ogärna använder okända utgångar vid utrymning (SFPE, 2002). De utrymmande tenderar ofta att välja utgångar som de känner till. I fallet med tunnlar vet alla att det alltid finns en utgång i slutet av tunneln, men de har däremot sämre kunskap om vart nödutgångarna leder. Vid brand i tunnel är det oftast en fördel att gå ut genom en nödutgång om detta är möjligt och det är därför viktigt att nödutgångarna används av de utrymmande. Frågan som uppstår är återigen, hur ska nödutgångarna utformas så att väljs i högre utsträckning?

I de genomförda försöken framgår det att det finns en variation mellan olika installationers effektivitet. Det blinkande ljuset vid nödutgångarna var den installation som hade bäst effekt för att få personer att välja den utgången. Det rinnande ljuset visade sig ha mycket dålig effekt. Av de personer som såg det

detta var det ingen som valde att gå ut genom nödutgången som försetts med den installationen.

För att försökspersonerna skulle gå ut genom en nödutgång krävdes dock en kombination av blinkande lampor och utrymningsskylt. Detta antyder att det blinkande ljuset främsta uppgift var att fånga uppmärksamheten, men att det krävdes en skylt för att personerna skulle förstå att det fanns en nödutgång där. Det blinkande ljuset var alltså något obekant som personerna inte nödvändigtvis förknippade med utgång. Även det blinkande ljuset i kombination med en utrymningsskylt verkar ha haft positiv inverkan på personernas vägval, så var det ingen garanti för att de skulle välja att gå ut genom en nödutgång. Detta kan ha berott på den färg (orange) som de blinkande ljusen hade. I de flesta fall uppmärksammades inte det blinkande ljuset på vänster vägg av de personer som följde höger vägg.

I enkäten fick försökspersonerna själva föreslå hjälpmedel som de ansåg vara lämpliga att använda i tunnlar. Den överlägset mest föreslagna typen av hjälpmedel var skyltar med pilar och avståndsmarkeringar eller pilar och markeringar till nödutgångar. Denna typ av installationer kännetecknas av att de är lätta att förstå och kräver små förkunskaper. En pil förknippas naturligt med en riktning till något och är lättare att tolka än rinnande ljus eller blinkande lampor.

Från intervjuerna framgick vidare att många personer sökte efter nödutgångar genom att känna sig för på väggen snarare än att leta efter skyltar. Nödutgångar förknippades ofta med urgröpningar eller ett hål i väggen. En möjlig utformning av utrymningsvägar i tunnlar kan därför vara att göra en urgröpfung i väggen på höger vägg mitt emot nödutgångar på vänster vägg, och att där markera riktning till nödutgång med hjälp av pilar. Urgröptionen hade då fångat personernas uppmärksamhet, medan pilarna hade visat dem vägen till nödutgången.

När de utrymmande följde en tunnelvägg i försöken förflyttade de sig fortare, vilket är en fördel vid utrymning. För att underlätta förflyttning längs tunnelväggen rekommenderas att räcken eller handledare installeras. Ett alternativ till metoden med urgröpningar i väggarna kan vara att ha räcken på högernsida som bryts av då det finns nödutgångar på andra sida. Även i detta fall är det viktigt att det finns skyltar som tydligt markerar vägen till nödutgång.

Slutligen bör det också påpekas att de resultat som framkommit i rapporten inte nödvändigtvis måste vara förknippade med utrymning av tunnlar. Förhållandet mellan gånghastighet och röktäthet gäller nästan oavsett för vilken annan lokal som helst. Detsamma bör rimligen också gälla för hur olika former av utrymningsskyltar och andra installationer uppfattas av personer som utrymmer. Vissa av de beteenden som observerades t ex att följa med handen längs en vägg för att orientera sig kan också vara troliga vid brand i byggnad men därmed inte sagt att alla resultat kan överföras till en annan verksamhet. Det är dock verksamheten med dess personer och deras inbördes relationer som till största delen kommer att kontrollera vilka typiska beteenden som kan förväntas vid en utrymning.

## 6 Fortsatt forskning

Ett av de viktigare resultaten i tunnelförsöken var att försökspersonerna ogärna släppte taget om den vägg de följde. Utifrån detta resultat föreslogs en utformning av nödutgångar som hade kunnat användas i tunnlar, se avsnitt 4.2. Förslaget byggde på att det skulle finnas urgröpningar i väggen mitt emot nödutgångarna på motstående vägg och skyltar med pilar och markeringar i marken, vilka visade vägen till nödutgången. Denna utformning har dock inte testats eller utvärderats. Ett förslag på fortsatt forskning är därför att testa utformningen i ett fullskaligt försök med irriterande brandgas. Syftet med försöket hade då varit att se om utformningen gör det lättare att hitta nödutgångarna i tunneln och om fler personer går ut genom nödutgångar när utformningen används.

I försöken leddes försökspersonerna in i en tunnel som redan var rökfylld. Det beteende som undersöktes var alltså beteendet då personerna gick genom rök. Något som däremot inte inkluderades i undersökningen var beteendet i det initiala skedet av branden, dvs från det att branden inträffar tills tunneln är brandgasfylld. Vad krävs exempelvis för att personerna ska lämna sin bil? Hur tät måste brandgasen vara för att personerna ska ta situationen på allvar och börja utrymma? Ett möjligt sätt att få svar på dessa frågor kan vara att utföra försök i en verklig tunnel. För att kunna genomföra denna typ av försök krävs fullskaliga utrymningar med i praktiken oinformerade försökspersoner. Ett alternativt angreppssätt är att simulera en liknande miljö med så kallad virtuell verklighet. I en sådan miljö kan realistiska scenarier spelas upp utan att riskera att skada försökspersoner.

Det är också tydligt att de som utrymmer behöver information om vad de ska göra. Det naturliga beteendet är att söka efter sådan information. Tidigare har det diskuterats hur skyltar och pilar kan utformas för att underlätta beslutsfattandet. Men det finns fler system för information som t ex talade meddelanden och ljudfyrrar som ska kunna lotsa personer mot rätt utgång. Det finns lite forskning som visar på nyttan med dessa system i en praktisk situation. Det finns grundforskning på området men den tillämpade forskningen är ganska sparsam. Fortsatta försök bör därför inledas som dokumenterar dessa ljudsystems inverkan på utrymningssituationen.



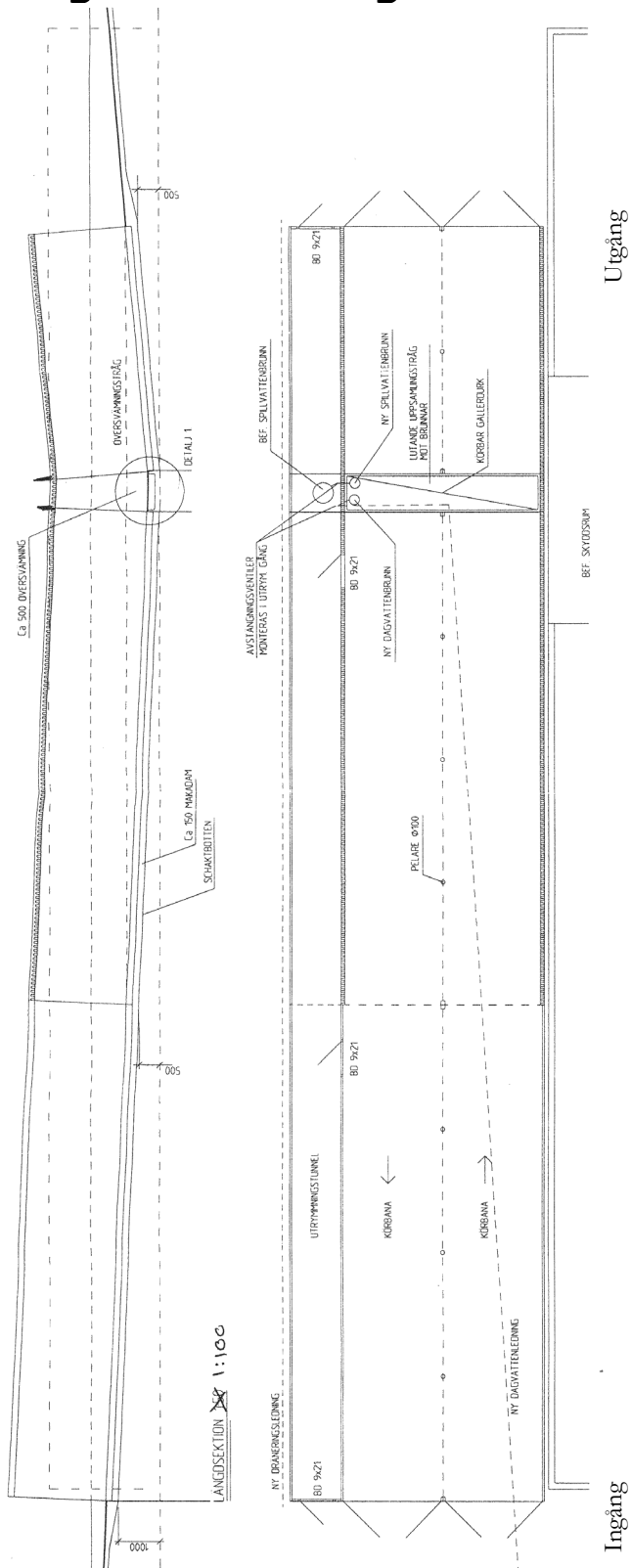


## Referenser

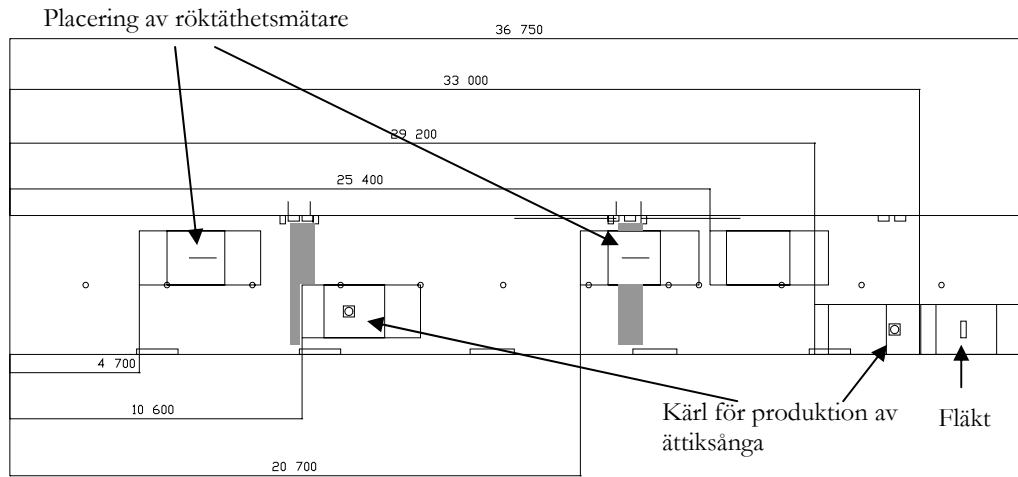
- AFS 2000:3 Hygieniska gränsvärden och åtgärder mot luftföroreningar. Arbetsmiljöverket, Solna, 2000.
- Benthorn L., Frantzich H., Fire alarm in a public building: How do people evaluate information and choose evacuation exit? Report 3082, Brandteknik, LTH, Lund, 1996.
- Bergqvist A., Frantzich H., Hasselrot K., Ingason H., Räddningsinsatser vid tunnebränder - probleminventering och miljöbeskrivning vid brand i en spårtunnel. SRV Rapport P21-391/01, Statens räddningsverk, Karlstad, 2001.
- Bowerman B.L., O'Connell R.T. Linear statistical models: an applied approach. 2<sup>nd</sup> ed. PWS-KENT Publ. Company, Boston, 1990.
- Canter D., Breaux J., Sime J. Domestic, Multiple Occupancy, and Hospital Fires. Fires and Human Behaviour. Ed. David Canter, John Wiley & Sons, Chichester, 1980.
- Fischhoff B. Hindsight-foresight: The effect of outcome knowledge on judgement under uncertainty. J of Experimental Psychology: Human Perception and performance, Vol 1, pp 288-299, 1975.
- Frantzich H., En modell för dimensionering av förbindelser för utrymning utifrån funktionsbaserade krav. Report 1011, Brandteknik, LTH, Lund, 1994.
- Frantzich H., Utrymning av tunnelbanetåg. SRV Rapport P21-339/00, Statens räddningsverk, Karlstad, 2000.
- Frantzich H., Tid för utrymning vid brand. SRV Rapport P21-365/01, Statens räddningsverk, Karlstad, 2001.
- Frantzich H, Nilsson D. Empirical study on the visibility through artificial smoke. Inskickad till tidskrift för ev publicering. 2003.
- Hygieniska gränsvärden och åtgärder mot luftföroreningar, Arbetskyddsstyrelsen, Solna, 2000
- Jin T., Visibility through fire smoke. J of Fire & Flammability, Vol 9, pp135-155, 1978.
- Purser D., Toxicity assessment of combustion products. The SFPE Handbook in fire protection engineering, 2nd ed., NFPA, Quincy, 1995.
- Slovic P, Fischhoff B, Lichtenstein S. Facts versus fears: Understanding perceived risks. In Kahneman P, Slovic B and Tversky (Eds.) Judgement under uncertainty: Heuristics and biases. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- SFPE Engineering Guide to Human Behavior in Fire. Society of Fire Protection Engineers, Bethesda, 2002.
- Tunnel 99, Allmän teknisk beskrivning för vägtunnlar. Publ. 1999:139, Vägverket, Borlänge, 1999.
- Wickens C. D., Hollands J. G., Engineering psychology and human performance. 3<sup>rd</sup> ed. Prentice Hall, New Jersey, 2000.



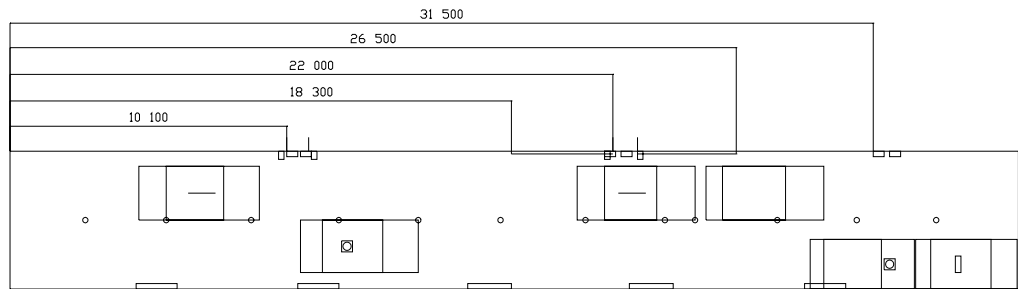
# Bilaga A. Ritningar.



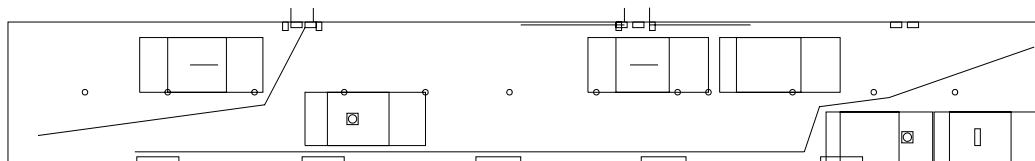
**Figur A1.** Ritning över försökstunneln. Längdsektion och plan. Figuren är inte skalenlig. Tunneln är 36,75 m lång och 5,00 m bred.



**Figur A2.** Planritning med bilar. Grå markering visar platser för golvmärkningen beskriven i avsnitt 3.8.



**Figur A3.** Planritning med utrymningsskyltar och ljusslinga. De fem små rektanglarna i bildens underkant illustrerar placeringen av armaturer för allmänbelysning.



**Figur A4.** Placering av ljustrådar.

# Bilaga B. Enkät

## Utrymningsförsök i tät rök.

(Enkäten visas i komprimerat skick)

Skriv gärna till dina egna synpunkter på frågorna. Dina svar kommer i all redovisning av försöken att behandlas så att de inte kan spåras till dig.

Försöksperson: \_\_\_\_\_

Namn: \_\_\_\_\_

### Frågor att besvaras före försöket.

1. Har du åkt genom någon tunnel (väg eller järnväg) på sista tiden?

- Ja, vägtunnel
- Ja, järnvägstunnel
- Ja, både väg och järnvägstunnel
- Nej. Gå direkt till fråga 3.

2. Funderade du då något på tunnelsäkerhet?

- Ja. Kommentera gärna ditt svar:
- Nej

3. Vad skulle du göra om du råkade ut för en brand i en tunnel? Beskriv eventuella skillnader mellan väg och järnvägstunnel.

- Ja, jag tror att jag skulle:
- Vet inte. Gå direkt till fråga 5.

4. På vilket sätt har du fått reda på vad du ska göra vid en brand i en tunnel?

Beskriv:

5. Känner du till att det finns utrymningsvägar från längre tunnlar, t ex i tunneln under Öresund. En utrymningsväg kan leda ut till det fria eller till annan tunnel?

- Ja
- Nej

6. Vet du hur långt du som mest måste gå för att komma till en sådan säker utrymningsväg?

- 5-10 m
- 10-50 m
- 50-100 m
- 100-200 m
- mer än 200 m
- vet inte

7. Vet du om det finns andra hjälpmedel som du kan ha nytta av i samband med en brand i en tunnel.

- Ja, det finns...
- Nej, det vet jag inte.

8. Har du varit med om någon brandutrymning (inte bara i tunnlar) som varit på riktigt?

- Ja. Beskriv i vilket sammanhang:
- Nej

9. Har du någon erfarenhet av följande:

- Utrymning från tunnlar
- Deltagit i brandövning
- Provat att släcka bränder under kontrollerade former
- Gått längre sträcka i en vägtunnel
- Gått längre sträcka i en järnvägstunnel

Beskriv i vilket sammanhang

### Frågor att besvaras efter försöket.

Försöksperson: \_\_\_\_\_

10. Hur skulle du beskriva graden av realism i försöket i jämförelse med hur du tror (eller vet) att miljön är vid en riktig brand?

Har inget  
med riktig  
brandmiljö  
att göra

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1

Mycket  
verklighets-  
nära

- Enkelt
- Svårt

11. Om detta hade varit på riktigt, vad tror du om dina möjligheter att ta dig ut? Markera med ett kryss.

17. Efter ett tag
- Efterhand enklare
  - Efterhand svårare

Mycket små

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1

Mycket  
stora

18. Vad fick dig att välja den utgång du valde? (andra mynningen eller nödutgång).

12. Vilka var dina första tankar när du stod innanför dörrarna och när du skulle förflytta dig? Beskriv.

- Det var den första jag hittade
- Jag visste att den fanns
- Tillfällighet
- Annat, nämligen:

13. Vad var det för tecken eller signaler du letade efter när du gick genom röken?

Hur långt kunde du se genom röken när du gick där?

- Ljud
- Symboler
- Ljus
- Värme
- Lukt
- Annat, nämligen:

19. Såg du dina händer framför dig?

- Ja
- Nej

14. Vad hade du för förflyttningsstrategi? Ange det du tänkte först.

20. Såg du dina fötter?

- Ja
- Nej

- Gick på måfå
- Letade efter en dörr
- Letade efter tunnelmynningen
- Letade efter någon annan person att fråga
- Annat, nämligen:

21. Såg du längre än så?

- Ja
- Nej

15. Ändrade du strategi någon gång (eller flera gånger) under utrymningen?

22. Kan du ange hur många meter du såg i röken: \_\_\_\_\_ m?

- Ja. Beskriv varför och vilken den nya strategin blev?
- Nej

23. Hur långt tror du att du gått innan du kom ut genom en dörr?

- mindre än 2 m
- 2-5 m
- 5-10 m
- 10-20 m
- mer än 20 m

Hur upplevde du din möjlighet att förflytta dig i röken?

24. Såg du några skyltar (som på bilden) som visade vart du skulle gå?

16. Generellt

- Ja
- Nej. Gå direkt till fråga 27.



25. Hur många skyltar såg du?

26. Var såg du dem?

27. Såg du några blinkande lampor?

- Ja.
- Nej. Gå direkt till fråga 31.

28. När under förloppet såg du dem?

- Redan från början
- Efter ett tag

29. Såg du dem före eller efter du bestämt dig vilken väg du skulle ta dig ut genom?

- Såg lamporna innan jag bestämde mig
- Hade bestämt mig för väg innan jag såg lamporna

30. Vilka associationer fick du när du såg de blinkande lamporna?

- Säkerhet
- Osäkerhet
- Utgång
- Gå inte dit
- Annat, nämligen:

31. Såg du några andra installationer som kunde hjälpa dig att hitta ut

- Vanliga lampor
- Ljusstrålar
- Rinnande ljus
- Ljud
- Färgmarkering
- Skyltar
- Räckan
- Annat, nämligen:



Hur skulle du vilja beskriva nyttan du hade av de olika installationerna? Hade du någon hjälp av dessa (dvs fick de dig att känna dig säkrare eller ”jag gör rätt” etc).

	Typ av installation	Nytta med installationen			
32.	Blinkande lampor	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor	<input type="checkbox"/> Vet inte <input type="checkbox"/> Såg inga
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
33.	Skyltar	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor	<input type="checkbox"/> Vet inte <input type="checkbox"/> Såg inga
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
34.	Vanliga lampor	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor	<input type="checkbox"/> Vet inte <input type="checkbox"/> Såg inga
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
35.	Ljusstrålar	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor	<input type="checkbox"/> Vet inte <input type="checkbox"/> Såg inga
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
36.	Rinnande ljus	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor	<input type="checkbox"/> Vet inte <input type="checkbox"/> Såg inget
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
37.	Färgmarkeringar	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor	<input type="checkbox"/> Vet inte <input type="checkbox"/> Såg inga
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
38.	Räcken	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor	<input type="checkbox"/> Vet inte <input type="checkbox"/> Kände inga
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		

39. Hur tycker du att en installation/hjälpmiddel ska vara utformat för att det ska underlätta för dig vid en utrymning? Kan du beskriva vilka egenskaper det är som är viktiga?

Vilka känslor kände du under utrymningen (markera med kryss)

40.	Osäkerhet	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
41.	Stresskänsla	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
42.	Rädsla	Ingen	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stor
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
43.	Orienteringsproblem	Inga	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stora
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
44.	Fysiskt obehag - illamående	Inget	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stort
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	
45.	Fysiskt obehag - svid i ögonen	Inget	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Stort
			<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	

46. Vad anser du om att genomföra denna typ av försök där du som försöksperson exponeras för en förhållandevis realistisk brandmiljö?

- Bra
- Inte bra

Motivera gärna:

47. Kände du dig orolig för att du själv skulle komma till skada under försöket?

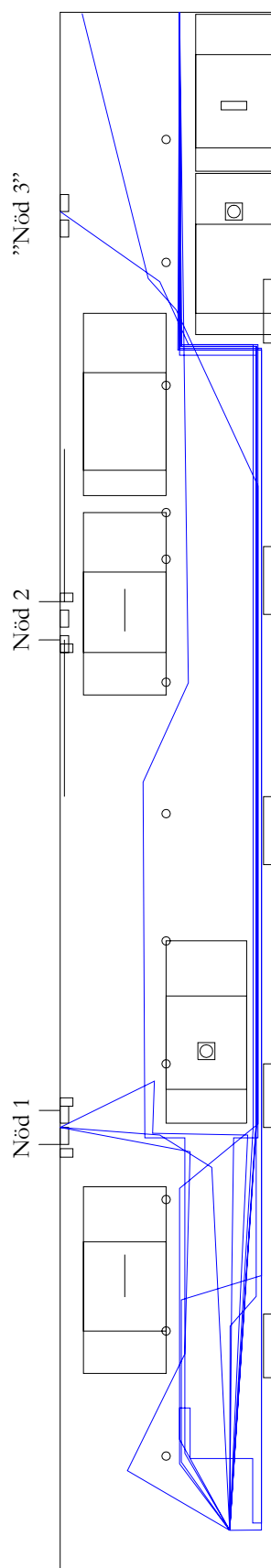
Nej, inte  
alls

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ja, väldigt mycket
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

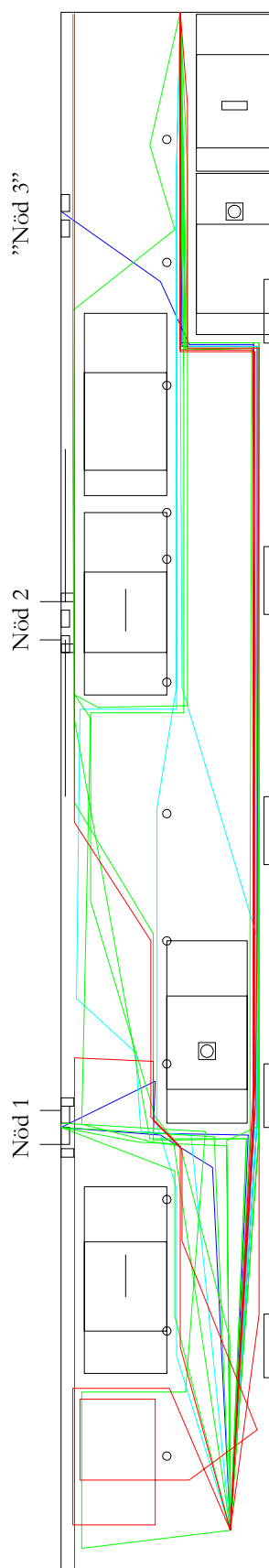
48. Är det något annat du vill kommentera eller ge dina synpunkter på? Skriv på baksidan om utrymmet här inte räcker till.



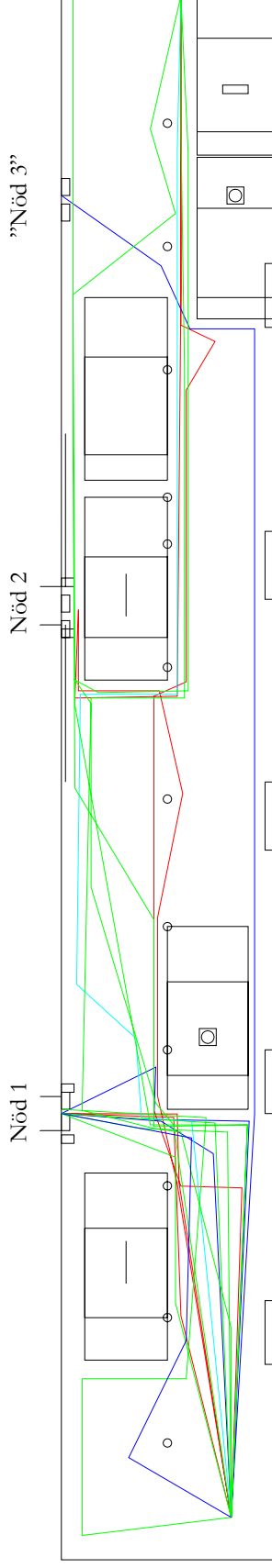
# Bilaga C. Beskrivning av försökspersoners gångvägar.



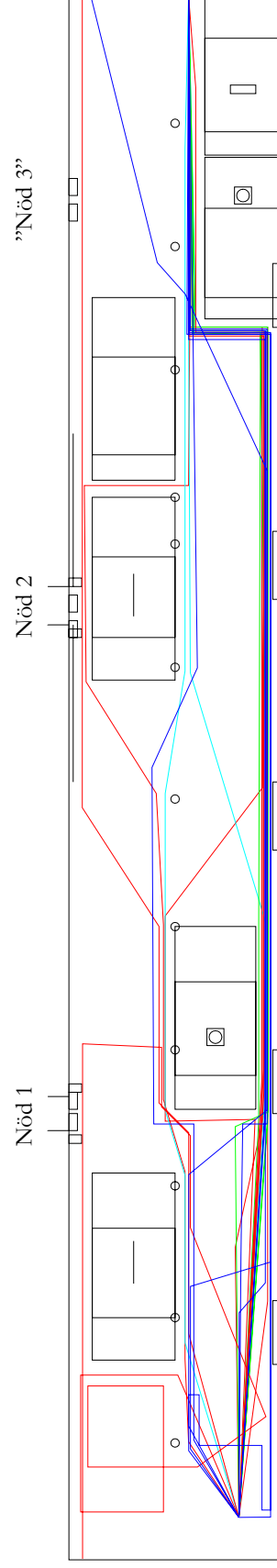
Figur C1. Gångväg för personer i försök med blinkande lampor



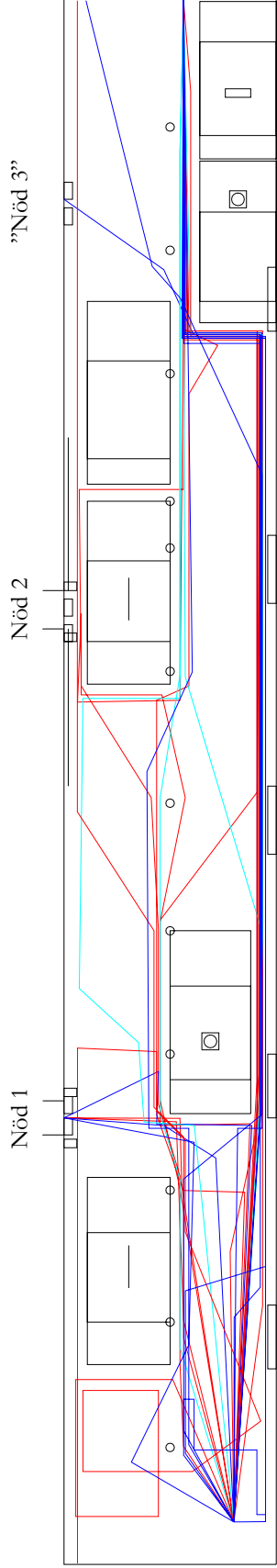
Figur C2. Gångväg för personer i försök utan blinkande lampor



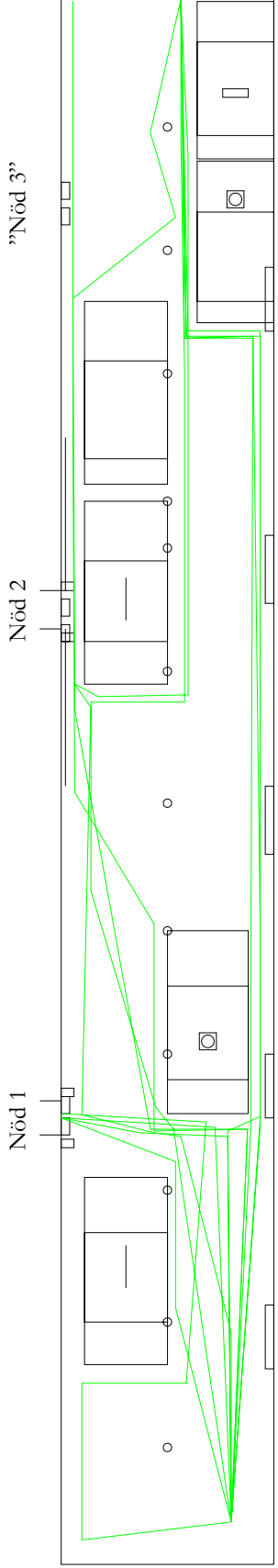
Figur C3. Gångväg för personer som uppgett att de sett en utrymningsskylt



Figur C4. Gångväg för personer som inte uppgett att de sett en utrymningsskylt



Figur C5. Gångväg för personer i försök med tänd allmänbelysning



Figur C6. Gångväg för personer i försök med släckt allmänbelysning



## Bilaga D. Redovisning av den statistiska analysen till kapitel 3.

I följande bilaga redovisas resultaten från de tre linjära regressionsanalyser som behandlas i avsnitt 3.3.2 och 3.3.3. Analysen har utförts med hjälp av datorprogrammet SPSS 11.5 for Windows.

### Allmänt om regressionsanalys

Vid multipel linjär regression antas den beroende variabeln,  $y$ , bero linjärt av de  $n$  oberoende variabler,  $x_1, \dots, x_n$ . Vid analysen används följande linjära regressionsmodell

$$y_i = \mu_i + \varepsilon_i = \alpha + \beta_1 \cdot x_{i1} + \beta_2 \cdot x_{i2} + \dots + \beta_n \cdot x_{in} + \varepsilon_i$$

I modellen är  $\mu_i$  medelvärdet för den beroende variabeln när de oberoende variablerna antar värdena  $x_{i1}, \dots, x_{in}$ .  $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_n$  är konstanter som relaterar  $\mu_i$  till  $x_{i1}, \dots, x_{in}$  och  $\varepsilon_i$  är ett normalfördelat fel med väntevärdet 0. Det normalfördelade felet beskriver den effekten som andra faktorer, vilka inte tas med i analysen, har på den oberoende variabeln.

Med hjälp av datorprogrammet SPSS kan skattningar för konstanterna  $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_n$  räknas ut enligt minsta kvadratmetoden. Skattningarna ges som medelvärden och standardavvikelser, vilket gör det möjligt att bilda konfidensintervall för skattningarna. För att en oberoende variabel, exempelvis  $x_1$ , ska ha signifikant inverkan på den beroende variabeln krävs att skattningen av motsvarande konstant, dvs  $\beta_1$ , är skild från noll på vald signifikansnivå. I denna rapport har signifikansnivån 5% använts genomgående.

### Gånghastighet mot släckt allmänbelysning (avsnitt 3.3.2)

I avsnitt 3.3.2 utfördes en linjär regressionsanalys för att undersöka om det kunde påvisas att gånghastigheten påverkades av röktätheten då belysningen var släckt i experimenten. Totalt fanns det 12 observationer av gånghastighet och röktäthet. Följande modell användes vid regressionsanalysen

$$\text{gånghastighet} = \alpha + \beta_1 \cdot \text{röktäthet} + \varepsilon \quad [3]$$

I modellen är röktätheten given i enheten  $m^{-1}$  och är beräknad som medelvärdet av de två uppmätta röktätheterna i tunneln och för hela exponeringstiden i tunneln för respektive försöksperson. Gånghastigheten är given i enheten  $m/s$ .

Resultaten från regressionsanalysen i SPSS redovisas i tabellen nedan (tabell D1). I tabellen kan det ses att  $\beta$ , dvs konstanten framför röktätheten, inte är skild från noll på nivån 5% (värdet 0 ligger inom 95%-intervallet). Detta innebär att det inte går att visa att röktätheten har signifikant inverkan på gånghastigheten på nivån 5% då belysningen är släckt. Eftersom signifikans inte kan visas utförs ingen närmre analys.



**Tabell D1 Resultat från regressionsanalysen som utfördes med släckt allmänbelysning i tunneln.**

**Koefficienter<sup>a</sup>**

	Värden på koefficienter		95% konfidensintervall	
	Medelvärde	Standard-avvikelse	Nedre gräns	Övre gräns
konstant (alfa)	,330	,173	-,055	,715
röktäthet (beta 1)	,039	,054	-,081	,158

a. Beroende variabel: Gånghastighet

**Gånghastighet mot tänd allmänbelysning och med hänsyn taget till hur personen förflyttade sig (avsnitt 3.3.2 och 3.3.3)**

Även gånghastighetens beroende av röktätheten med tänd allmänbelysning undersöktes statistiskt. Totalt 32 observationer analyserades och två olika regressionsanalyser utfördes. I den första analysen användes modellen

$$gånghastighet = \alpha + \beta_1 \cdot röktäthet + \varepsilon \quad [3]$$

som är identisk med den som användes i analysen med släckt allmänbelysning. Denna modell kallas modell 1. Röktätheten är given i enheten  $m^{-1}$  och är beräknad som medelvärdet av de två uppmätta röktätheterna i tunneln och för hela exponeringstiden i tunneln för respektive försöksperson. Gånghastigheten är given i enheten m/s.

I den andra linjära regressionsanalysen användes följande modell

$$gånghastighet = \alpha + \beta_1 \cdot röktäthet + \beta_2 \cdot andel vägg + \varepsilon \quad [4]$$

Denna modell kallas modell 2. Röktätheten given i enheten  $m^{-1}$  och är beräknad som medelvärdet av de två uppmätta röktätheterna i tunneln och för hela exponeringstiden i tunneln för respektive försöksperson. Gånghastigheten är given i enheten m/s. Andel vägg är den andel av sträckan som försökspersonerna gick längs med väggen då de förflyttade sig genom tunneln och gånghastigheten är given i enheten m/s.

Resultaten från regressionsanalysen i SPSS redovisas i tabellen nedan (tabell D2). I tabellen kan det ses att  $\beta_1$ , dvs konstanten framför röktätheten, är skild från noll på nivån 5% i modell 1 (värdet 0 ligger utanför 95%-intervallet). Röktätheten har alltså en signifikant inverkan på gånghastigheten då belysningen är tänd enligt modellen.

I tabellen kan det också ses att både  $\beta_1$  och  $\beta_2$  är skilda från noll på nivån 5% i modell 2. Detta innebär att både röktätheten och andelen vägg har en signifikant inverkan på gånghastigheten på denna nivå.

**Tabell D2 Resultat från regressionsanalysen som utfördes med tänd allmänbelysning i tunneln.**

**Koefficienter<sup>a</sup>**

Modell		Värden på koefficienter		95% konfidensintervall	
		Medelvärde	Standardavvikelse	Nedre gräns	Övre gräns
1	konstant (alfa)	,706	,069	,565	,847
	röktäthet (beta 1)	-,057	,015	-,087	-,028
2	konstant (alfa)	,692	,064	,560	,823
	röktäthet (beta 1)	-,073	,015	-,104	-,043
	andel vägg (beta 2)	,139	,057	,023	,256

a. Beroende variabel: Gånghastighet

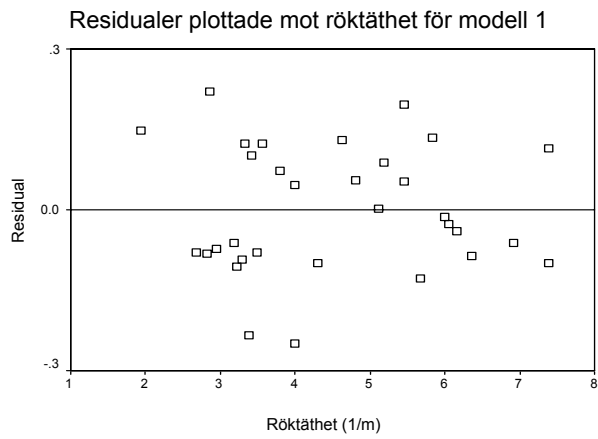
För att undersöka vilken av modellerna som bäst förklarar förändringen i gånghastighet kan det justerade determinationskoefficienterna, justerat  $R^2$ , för modell 1 och 2 jämföras (tabell D3). Det högre värdet för modell 2 antyder att den är en bättre regressionsanpassning till datapunkterna än modell 1. Mer information om justerade determinationskoefficienter kan finnas i exempelvis Bowerman och O'Connel (1990).

**Tabell D3 R,  $R^2$  och justerat  $R^2$  (justerad determinationskoefficient) för modell 1 och 2.**

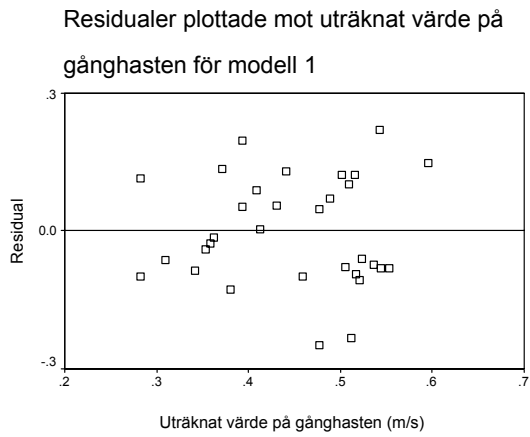
**Sammanfattning**

Modell	R	$R^2$	Justerat $R^2$
1	,585	,342	,320
2	,674	,454	,416

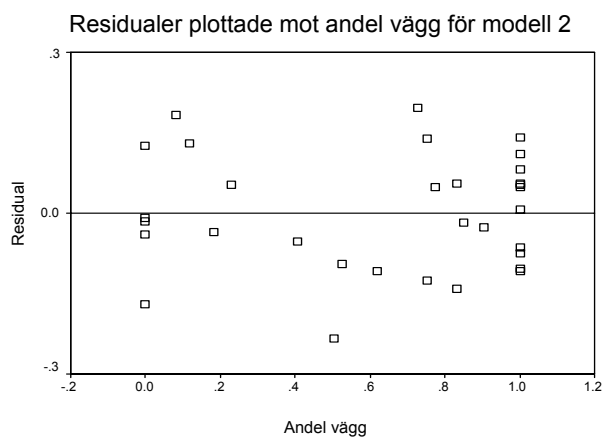
I figurerna nedan kan det ses att residualerna är jämnt utspridda kring den horisontella axeln för både modell 1 och 2 (figur D1, figur D2, figur D3, figur D4, figur D5). Grafernas utseende antyder att de antaganden som är förknippade med den linjära regressionsanalysen är giltiga. I graferna har residualerna plottats som funktion av de oberoende variabelerna och som funktion av det uträknade värdet på gånghastigheten. Det uträknade värdet på gånghastigheten är det värde som erhålls då värdena på de oberoende variabelerna sätts in i den framtagna linjära ekvationen.



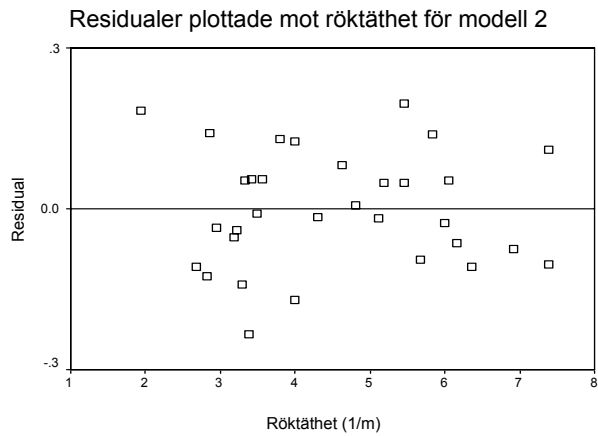
**Figur D1** Residualerna plottade mot röktätheten för modell 1.



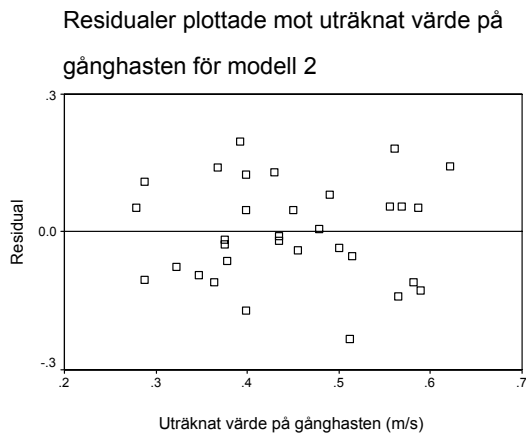
**Figur D2** Residualerna plottade mot uträknat värde på gånghastigheten för modell 1.



**Figur D3** Residualerna plottade mot andel vägg för modell 2.



**Figur D4** Residualerna plottade mot röktätheten för modell 2.



**Figur D5** Residualerna plottade mot uträknat värde på gånghastigheten för modell 2.