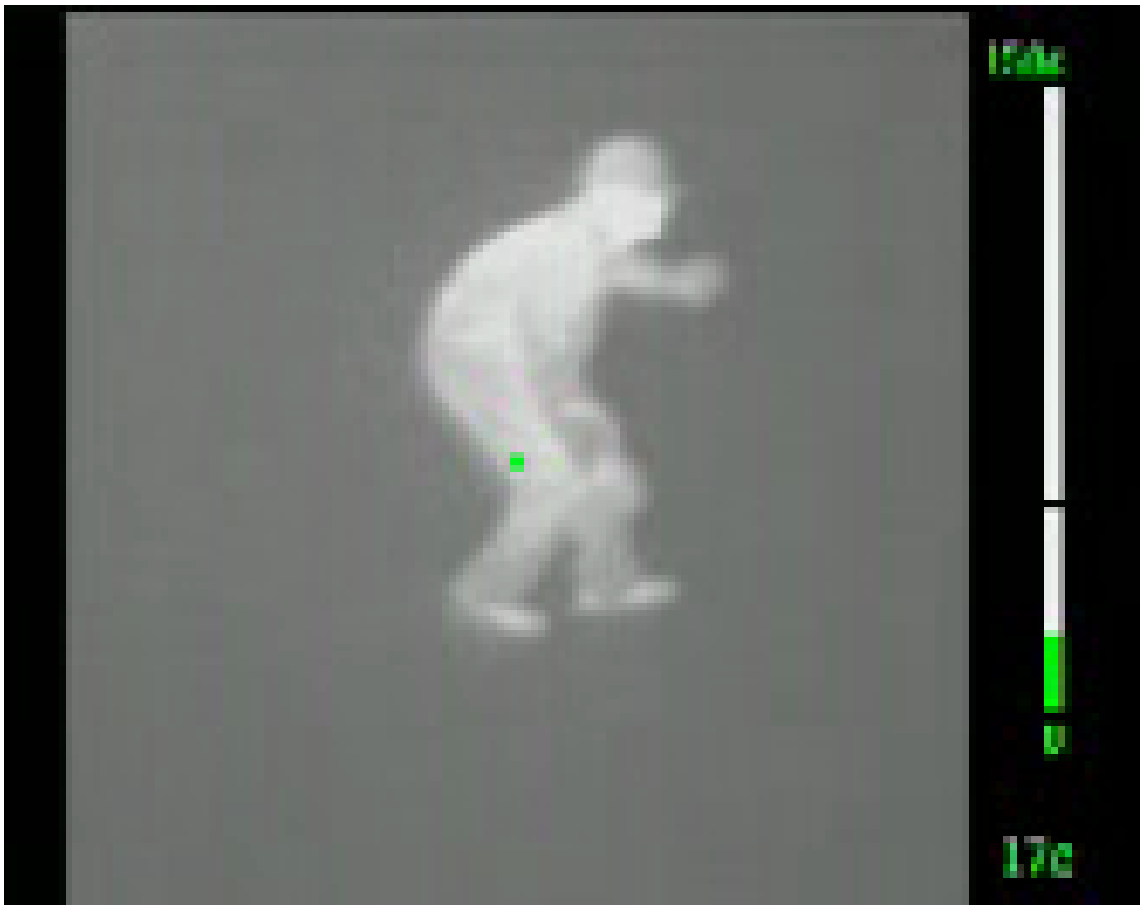
Människors gånghastighet i rök: Förslag till representation vid brandteknisk projektering

Karl Fridolf, Daniel Nilsson, Håkan Frantzich, Enrico Ronchi, Silvia Arias

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut



SP Rapport 2016:81

Människors gånghastighet i rök: Förslag till representation vid brandteknisk projektering

Karl Fridolf, Daniel Nilsson (LTH), Håkan Frantzich (LTH), Enrico Ronchi (LTH), Silvia Arias (LTH)

Abstract

There is limited information about the behavior and movement of people in case of fire evacuation in smoke-filled environments, and there is limited guidance on how peoples' walking speed in smoke can and should be represented in the fire safety design process. In this report, a literature review within this area, and a subsequent recommendation on how to represent walking speed in both smoke-free and smoke-filled environments is presented. The recommendation includes three different methods to represent the peoples' walking speed in a life safety verification, depending on how the treatment of uncertainties is done on an overall level within the analysis. Finally, in the end of the report, a direction for future research in order to reduce the current uncertainties is presented.

Nyckelord: Utrymning, gånghastighet, rök, tillämpning, verifiering, beräkning, modellering, rekommendation, osäkerhetshantering.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2016:81
ISBN 978-91-88349-70-5
ISSN 0284-5172
Borås 2016

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Innehållsförteckning

Sammanfattning **9**

Summary **11**

1 Inledning **13**
1.1 Bakgrund 13
1.2 Syfte och mål 18
1.3 Avgränsningar/Begränsningar 19
1.3.1 Konstgjord rök 19
1.3.2 Påverkansfaktorer 19
1.3.3 Miljö 19
1.3.4 Andra personer 20

2 Metod **21**
2.1 Fas 1: Littersökning och analys 21
2.2 Fas 2: Sammanställning av information och framtagande av kvantitativ rekommendation 22
2.3 Fas 3: Dokumentation och kvalitetskontroll 22

3 Resultat **23**
3.1 Kvalitativa resultat 23
3.2 Kvantitativa resultat 27
3.2.1 Jin [14], [33], [34] 27
3.2.2 Jin och Yamada [16], [46] 27
3.2.3 Jensen [43], [44] 28
3.2.4 Tanaka et al. [47] 29
3.2.5 Janse et al. [41] 30
3.2.6 Frantzich och Nilsson [23] 30
3.2.7 Akizuki et al. [21] 31
3.2.8 Fridolf et al. [27], [35]–[37] 32
3.2.9 Fridolf et al. [26], [38] 32
3.2.10 Seike et al. [48] 33
3.3 Sammanfattning 33

4 Analys **35**
4.1 Transformation från dämpningskoefficient till siktsträcka 36
4.2 Tolkning av datamängden 37
4.3 Ytterligare bearbetning av datamängden 38
4.4 Hantering av osäkerheter 40
4.5 Rekommendation om hur människors gånghastighet kan representeras i den praktiska tillämpningen 41
4.5.1 Metod 1: Representationen sker på samma sätt för samtliga individer 43
4.5.2 Metod 2: Representationen sker på nästan samma sätt för samtliga individer 44
4.5.3 Metod 3: Representationen sker individuellt 45

5 Diskussion och slutsatser **47**
5.1 Framtida forskning 48
5.2 Slutsatser 49

6 Referenser **51**

7 Bilaga 1: Dämpningskoefficient och beräkning av siktsträcka **55**

8 Bilaga 2: Sammanställning av studier **57**
8.1 Jin [14], [33], [34] 57

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

8.2	Jin [15]	58
8.3	Boyce [40]	59
8.4	Jin och Yamada [16], [46]	60
8.5	Jensen [43], [44]	61
8.6	Paulsen [28], [45]	62
8.7	Jin och Yamada [55] och Jin [34]	63
8.8	Tanaka, Imaizumi, Takahashi, Komai och Isei [47]	64
8.9	Janse, van de Leur och van Oerlo [41]	65
8.10	Heskestad och Schmidt-Pedersen [18] och Heskestad [19]	66
8.11	Frantzich [24]	67
8.12	Wright, Cook och Webber [20]	68
8.13	Frantzich och Nilsson [23]	69
8.14	Boer och Withington [42]	70
8.15	Akizuki, Yamao och Tanaka [21]	71
8.16	Rinne et al. [56], [57]	72
8.17	Fridolf [35], Fridolf, Ronchi, Nilsson och Frantzich [27], Fridolf, Andrée, Nilsson och Frantzich [36] och Fridolf [37]	73
8.18	Fridolf och Frantzich [26] och Fridolf, Frantzich, Ronchi och Nilsson [38]	74
8.19	Fuji, Sano och Ohmiya [39]	75
8.20	Seike, Kawabata och Hasegawa [48]	75
8.21	Publikationer som inte inkluderades	76
9	**Bilaga 3: Bedömningsmall**	**79**
10	**Bilaga 4: Alternativ metod för att beskriva och representera människors gånghastighet i rök**	**83**
10.1	Alternativ metod 1: Representationen sker på samma sätt för samtliga individer	84
10.2	Alternativ metod 2: Representationen sker individuellt	85

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Förord

I händelse av en brand i en tunnel, oavsett om den inträffar i en väg- eller järnvägstunnel, är det inte osannolikt att människor kommer att behöva utrymma genom rök. Scenariot ingår därför också oftast som en del av den övergripande riskbedömning som vanligen genomförs i samband med projekteringen, utformningen och verifieringen av en tunnel. Kunskap om människors förflyttning i rökfyllda miljöer är då en förutsättning för en tillförlitlig och valid analys, i synnerhet kunskap om människors förflyttningshastighet. Dessvärre är sådan kunskap bristfällig, och därtill saknades det vid upprättande av denna rapport vägledning om hur den kunskap som finns kan och bör tillämpas praktiskt till exempel vid brandteknisk projektering. Det föranledde den förstudie, vars resultat presenteras i denna rapport.

Förstudien har letts av Karl Fridolf, verksam hos WSP Sverige AB, men som när förstudien inleddes var anställd på SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. I projektgruppen har även Daniel Nilsson, Håkan Frantzich, Enrico Ronchi och Silvia Arias ingått, vilka samtliga är verksamma vid Avdelningen för brandteknik vid Lunds tekniska högskola. Förstudien har finansierats av Trafikverkets fjärde FoI-portfölj om robust och tillförlitlig infrastruktur. Författarna till denna rapport vill därför tacka FoI-portföljens ledamöter i allmänhet, och ordförande Jan Ekström i synnerhet. Därtill vill författarna tacka Henric Modig som agerat Trafikverkets handläggare. I sammanhanget vill författarna också klargöra att de slutsatser och rekommendationer som uttrycks i denna rapport är författarnas och speglar inte nödvändigtvis Trafikverkets uppfattning.

Malmö, november 2016

Karl Fridolf
Teknologie doktor i brandteknik
Projektledare

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Sammanfattning

Det råder idag en brist på kunskap om hur människor beter och förflyttar sig vid utrymning i rökfyllda miljöer. Vidare finns endast begränsad vägledning om hur existerande data om människors gånghastighet kan och bör användas vid praktisk tillämpning, till exempel vid brandskyddsteknisk projektering. Tillsammans skapar detta osäkerheter i projekteringen, utformningen och verifieringen av brand- och personsäkerheten i olika typer av byggnadsverk i allmänhet, och på grund av de generellt långa avstånden mellan utrymningsvägarna i väg- och järnvägstunnlar i synnerhet.

Med anledning av rådande brist på kunskap och vägledning om hur människors gånghastighet ska representeras i personsäkerhetsanalyser inleddes i november år 2015 en förstudie åt Trafikverket. Syftet var att inventera, undersöka och redogöra för aktuellt forskningsläge om människors förflyttning vid utrymning i rökfyllda miljöer och målen var att sammanfatta det aktuella kunskapsläget, klargöra hur det kan användas i den praktiska tillämpningen samt att föreslå en inriktning för framtida forskning. Arbetet utfördes i tre faser. Den första fasen utgjordes av en litteratursökning och analys. Därefter sammanställdes informationen och en kvantitativ rekommendation utarbetades. Avslutningsvis dokumenterades arbetet i denna rapport.

Genomgången av det aktuella forskningsläget visar att det finns stora osäkerheter kopplade till människors förflyttning i rök. En källa till osäkerhet är bland annat den uppenbara bristen på genomförda studier och data om människors gånghastighet i rök. Trots bristen på kunskap har likväl en rekommendation för att representera människors gånghastighet i rök presenterats, vilken hanterar en del av de föreliggande osäkerheterna. Därtill medger rekommendationen en möjlighet att explicit i den praktiska tillämpningen ytterligare hantera de föreliggande osäkerheterna baserat på hur osäkerhetshanteringen sker på en övergripande nivå.

Den framtagna rekommendationen kan sägas skilja sig på några viktiga punkter från de metoder som idag vanligen används vid brandteknisk projektering. Bland annat baseras representationen på ett samband som beskriver människors gånghastighet som en funktion av den rådande siktsträckan istället för dämpningskoefficienten. Den praktiska betydelsen av ställningstagandet är att människors gånghastighet i rökfria miljöer kommer att representeras av en snabbare hastighet i miljöer som är försedda med en kontinuerlig belysning än miljöer som inte är det, något som också ligger i linje med den genomgångna forskningen. Implicit ökar alltså incitamenten att förse till exempel väg- och järnvägstunnlar med en kontinuerlig belysning eftersom att det ”belönas” i den kvantitativa personsäkerhetsverifieringen som genomförs inom ramen för den brandtekniska projekteringen.

Rekommendationen innebär att om representationen av människors gånghastighet sker på samma sätt för samtliga individer i en beräkning, det vill säga om det antas att alla individer går lika fort, rekommenderas att gånghastigheten för siktsträckor > 3 meter representeras av en gånghastighet som täcker in drygt 90 % av osäkerheten förknippad med människors gånghastighet i rökfri miljö, närmare bestämt 1 m/s. För siktsträckor lägre än detta föreslås gånghastigheten representeras av en relativ minskning av gånghastigheten i rökfri miljö med 0,34 m/s per meter siktsträcka, dock till lägst 0,2 m/s. En alternativ metod för att i större utsträckning beakta föreliggande osäkerheter, utan att för den delen representera varje individs gånghastighet individuellt, är att dela upp representationen i till exempel tre kategorier: medel, långsam och extra långsam. Alla individer inom respektive kategori går då lika fort men det går att differentiera hastigheten för populationen i tre steg. Gånghastigheten i rökfri miljö representeras då av ett representativt medelvärde för kategori medel, och lägre hastigheter för övriga kategorier. Representationen i rökfylld miljö rekommenderas sedan ske på samma sätt

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

som för det fall då representationen sker på samma sätt för samtliga individer. I det fall rekommendationen istället sker individuellt, det vill säga om det antas att alla individer går med en individuell gånghastighet som sammantaget beaktar den kända osäkerheten för gånghastigheten, rekommenderas gånghastigheten i rökfri miljö representeras av ett randomiserat värde från en normalfördelningskurva som beskriver människors gånghastighet i rökfri miljö, och reduktionen i rökfylld miljö rekommenderas sedan ske på samma sätt som med övriga metoder.

Avslutningsvis konstateras att det finnas ett stort behov av ny forskning inom området. Behovet av nya empiriska försök inom siktintervallet 0-3 meter framstår som särskilt stort. Anledningen är att det inte är känt hur enskilda individer anpassar sin förflyttning till den rökfyllda miljön. Kunskapen finns snarare på gruppnivå men detta behöver förbättras för att nå en representativ modellering av förloppet. I dessa studier bör enskilda försökspersoners gånghastighet dokumenteras för flera olika siktsträckor, och därutöver i rökfri miljö. Framtida forskning borde även försöka kvantifiera olika påverkansfaktorer på människors beteende i allmänhet, och gånghastighet i synnerhet. Det kan till exempel handla om hur tekniska hjälpmedel, såsom handledare och belysning, påverkar människors gånghastighet i rökfyllda miljöer. Andra förslag presenteras också i denna rapport.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Summary

Today, there is limited knowledge about the behavior and movement of people in case of fire evacuation in smoke-filled environments. In addition, there is limited guidance on how the existing data on peoples' walking speed can and should be used during practical application, for example in the fire safety design process. Altogether, this creates uncertainties in the planning, design and fire and life safety verification of building works in general, and, due to the generally long distances between emergency exits, of road and rail tunnels in particular.

Due to the limited knowledge and guidance on how to represent peoples' walking speed in smoke in life safety verifications, a research project was initiated by the Swedish Transport Administration in 2015. The purpose was to make an inventory of, investigate and describe the current knowledge base about movement of people during fire evacuation in smoke-filled environments. Furthermore, the goal was to summarize the current knowledge base, describe how it can be used during practical application, and to recommend a direction for future research. The work was executed in three separate phases. In phase 1, a literature review and analysis was performed. Thereafter, the information was summarized, processed and a quantitative recommendation to be used during practical application was formed. Finally, the work was documented in this technical report.

The literature review and analysis revealed large uncertainties associated with the description of peoples' movement in smoke. One reason to this is the limited number of available research studies on the topic, and the subsequent lack of data in this area. However, despite the limited information, a recommendation on how to represent walking speed in smoke is presented in this report, which deals with some of the uncertainties related to the limited information and data on walking speed in smoke. More specifically, the recommendation makes it possible to explicitly deal with the existing uncertainties, depending on how the treatement of uncertainties is done on an overall level in the analysis.

In comparison with the methods that today are typically used to represent peoples' walking speed in smoke during practical application, the developed recommendation can be said to deviate in some important aspects. Among other things, the recommendation is based on a correlation that describes walking speed as a function of visibility, rather than the extinction coefficient. The practical consequence of this is that peoples' walking speed in smoke-filled environments will be represented by a higher speed in environments that are equipped with a continuous light source compared to environments that are not, which is in line with current research findings. Implicitly, this means that the incitaments to provide, for example, road and rail tunnels with continuous light sources is increased, as the designer is "rewarded" for this in his or her quantitative life safety verification of the design.

Specifically, the recommendation is that if the representation of peoples' walking speed in smoke is done using the same approach for all individuals in a calculation, i.e., if all individuals are assumed to walk with the same speed, the walking speed in areas where the visibility is > 3 meters should be represented with a speed that includes approximately 90 % of the uncertainty associated with peoples' walking speed, more specifically 1 m/s. In areas with lower visibility, the recommendation is that the speed is represented by a relative reduction of 0.34 m/s per meter visibility, however, not lower than 0.2 m/s.

An alternative method to represent the walking speed in smoke, which to a greater extent considers the uncertainties without representing each individual's speed with an individual speed, is to divide the representation in three different walking speed

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

categories: mean, slow, and extra slow. All individuals within a certain category is assumed to walk with the same speed, but it is possible to differentiate the speeds between different sub populations in the analysis. In this approach, the walking speed in areas where the visibility is > 3 meters is represented by a representative average speed for category mean, and lower speeds for the other categories. The representation in areas with lower visibility is recommended to be done as in the approach in which all individuals are assumed to walk with the same speed (see above).

Finally, a third method is to represent peoples' walking speed individually. Practically, this means that all individuals' walking speed in both smoke-free and smoke-filled environments is represented by an individual speed, which altogether is based on the known uncertainty related to the walking speed in general. The recommendation is that the speed in areas where the visibility is > 3 meters is represented by a randomized value retrieved from a normal distrubition describing peoples' walking speed in smoke-free environments, and, furthermore, that the walking speed in areas with lowever visibility is represented by a relative reduction as described for the other two methods.

Finally, it is concluded that there is a great need for future research about the movement of people during fire evacuation. Particularly, new empirical studies with people within the visibility interval 0-3 meter is identified as necessary. The reason for this is that it is yet not known how single individuals adapt their individual speed to different visibility levels. The current knowledge only describes what happens on a general level, i.e., that individuals exposed to a low visibility level tend to walk slower than other individuals exposed to a higher visibility level. In these new empirical studies, it is suggested that single individual's walking speed is documented for several different visibility levels in smoke, and, additionaly, when no smoke at all is present. It is also recommended that future research attempt to quantify the effect of other parameters and variables than visibility itself, both in relation to the behavior of people as well as their walking speed. Examples of such parameters and variables are different technical installations, such as hand rails and light installations, and how they affect the movement of people in smoke filled environments. Other suggestions are also presented in this report.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

1 Inledning

Det råder idag en brist på kunskap om hur människor beter och förflyttar sig vid utrymning i rökfyllda miljöer. Vidare finns endast begränsad vägledning om hur existerande data om människors gånghastighet kan och bör användas vid praktisk tillämpning, till exempel vid brandskyddsteknisk projektering. Tillsammans skapar detta osäkerheter i projekteringen, utformningen och verifieringen av brand- och personsäkerheten i olika typer av byggnadsverk i allmänhet, och på grund av de generellt långa avstånden mellan utrymningsvägarna i väg- och järnvägstunnlar i synnerhet. Osäkerheterna riskerar att fortplanta sig vidare till underlagen för beslut om brand- och utrymningstekniska lösningar och installationer, vilket kan leda till kostnadsineffektiva investeringar till följd av överdrivet konservativa antaganden i genomförda personsäkerhetsanalyser. Det kan även leda till tunnlar med lägre säkerhet än avsett.

Med anledning av rådande brist på kunskap och vägledning om hur människors gånghastighet ska representeras i personsäkerhetsanalyser inleddes i november år 2015 en förstudie åt Trafikverket. Förstudien avsåg att redogöra för aktuellt forskningsläge om människors gånghastighet i rök, klargöra hur denna information kan och bör användas i praktiska tillämpningar, samt ge förslag på hur framtida forskning bör genomföras för att minska rådande osäkerheter. Resultatet av förstudien redovisas i denna rapport.

1.1 Bakgrund

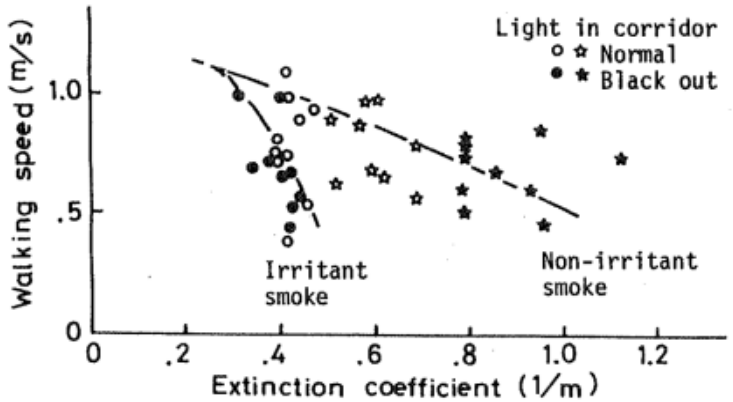
Under de senaste decennierna har de bestämmelser som reglerar ett byggnadsverks brandskydd utvecklats från att vara preskriptiva till att bli mer funktionsbaserade, såväl nationellt som internationellt. Från att tidigare i stor utsträckning ha föreskrivit och reglerat ett byggnadsverks utformning utan att ange den förväntade säkerhetsnivån är bestämmelserna idag, åtminstone i sin grundutformning, i större utsträckning formulerade på ett sådant sätt att målsättningar och kvantifierade funktionskrav (det vill säga skyddsnivån) framgår. Vidare tillåter dagens bestämmelser alla lösningar som uppfyller funktionskraven, vilket innebär att byggherrar och brandskyddsprojektörer idag är mer fria än tidigare att välja dimensioneringsmetod, material, komponenter, med mera, för att påvisa att målen med bestämmelserna uppfylls.

Den successiva övergången från preskriptiva till mer funktionsbaserade bestämmelser har medfört en världsomspännande utveckling av metoder och tekniker för att projektera, utforma och verifiera byggnadsverks brandskydd [1], [2]. Vid projekteringen av komplexa undermarksanläggningar, dit de flesta väg- och järnvägstunnlar räknas, används till exempel idag ofta en metod som innebär att brandsäkerhetsnivån verifieras med hjälp av strukturerade riskanalysmetoder, vilket i de flesta fall innebär att ett antal representativa brandscenarier identifieras, analyseras med hjälp av avancerade beräkningar och utvärderas [3]. Normalt ingår då för varje scenario, i enlighet med den så kallade tidslinjemodellen, en analys av människors möjlighet att lämna byggnadsverket utan att utsättas för kritiska förhållanden [4]. I praktiken innebär det att tiden som krävs för att människor ska kunna ta sig till en säker plats (det vill säga den totala utrymningstiden, vilken ofta förkortas RSET efter engelskans *Required Safe Escape Time*) jämförs med tiden till dess att gränsvärden kopplade till siktbarhet, värmestrålning, temperatur eller gaskoncentration överskrids (det vill säga tiden till kritiska förhållanden, vilken ofta förkortas ASET efter engelskans *Available Safe Escape Time*). ASET och RSET kan då beräknas mer eller mindre oberoende av varandra, det vill säga i separata beräkningar eller simuleringar. Analysen kan också genomföras genom tillämpningen av en mer avancerad teknik som innebär att den ackumulerade nivån av toxiska brandgaser i kroppen jämförs med de doser som krävs för medvetslöshet eller död enligt det så kallade fraktionsdoskonceptet [5], [6].

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

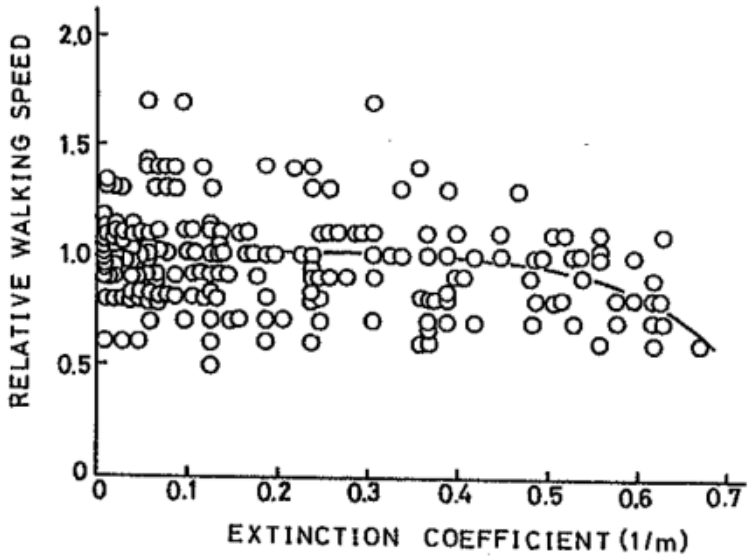
Oberoende av vilken teknik som används för att bedöma människors möjlighet att lämna ett byggnadsverk är kunskap om människors förflyttning en förutsättning för analysen. I synnerhet är det viktigt att känna till med vilken hastighet människor förflyttar sig för att kunna göra trovärdiga och tillförlitliga uppskattningar av RSET. Mot denna bakgrund har forskning om människors gånghastighet i olika byggnadsverk bedrivits under lång tid, se till exempel sammanställningarna av Fahy och Proulx [7] samt Gwynne och Boyce [8]. Dock har majoriteten av den empiriska datainsamlingen inriktats mot förflyttning under ”normala” förhållanden, det vill säga i vardagssituationer, och nästan uteslutande genomförts i rökfria miljöer. En anledning till det är att utrymning i de flesta förutsatts ske i förhållandevis rökfria miljöer. Forskning om människors beteende i bränder har dock påvisat att många individer utrymmer genom rök [9], [10], och att beteendet i den typen av miljö dessutom skiljer sig från när sikten är god. Bryan [9] kunde till exempel påvisa att hela 62,7 % av individerna i hans stora studie hade utrymt i rök, av vilka endast 29,2 % av någon anledning hade valt att vända tillbaka på grund av röken. På liknande sätt kunde Wood [10] påvisa att 59,6 % av individerna i hans undersökning hade utrymt i rök, av vilka endast 26 % av någon anledning hade valt att vända tillbaka på grund av röken. Dessa konstateranden har dessutom även bekräftats i senare studier av bland annat Proulx och Fahy [11]. Trots det är alltså tillgången till information om människors förflyttning vid utrymning i rökfyllda miljöer mycket begränsad. Ett annat problem är att av de få studier som faktiskt studerat frågan, är det ännu färre som försökt kvantifiera sambandet mellan människors gånghastighet och siktsträcka, det vill säga röktäthet. Samtidigt förväntas projektörer av undermarksanläggningar i Sverige idag verifiera personsäkerheten just för scenarier i vilka människor antas utrymma i rök [3], [12], [13].

En av de få studier som trots allt försökt kvantifiera sambandet mellan människors gånghastighet och siktsträcka, och som idag sannolikt är en av de mest citerade och använda referenserna både i forskningssammanhang och vid praktisk tillämpning av förflyttning i rök, genomfördes på 70-talet i Japan [14]. Försöken har senare verifierats av samma forskare i liknande experiment [15], [16]. Enligt författarna av dessa studier finns en korrelation mellan människors gånghastighet och siktsträcka i rökfyllda miljöer, vilket i korthet innebär att människors gånghastighet minskar med minskande siktsträcka. Korrelationen är dock svag, vilket exemplifieras av *Figur 1*, *Figur 2* och *Figur 3* som redovisar en delmängd av resultaten från tre olika studier. Enligt vad som kan ses i figurerna är datapunkterna relativt spridda inom respektive intervall, även om en nedåtgående trend möjligen kan noteras i *Figur 1* och *Figur 3*. Variationen i relation till medelvärdet är alltså inte försumbar och den nedåtgående trenden representeras av ett mycket begränsat antal datapunkter.

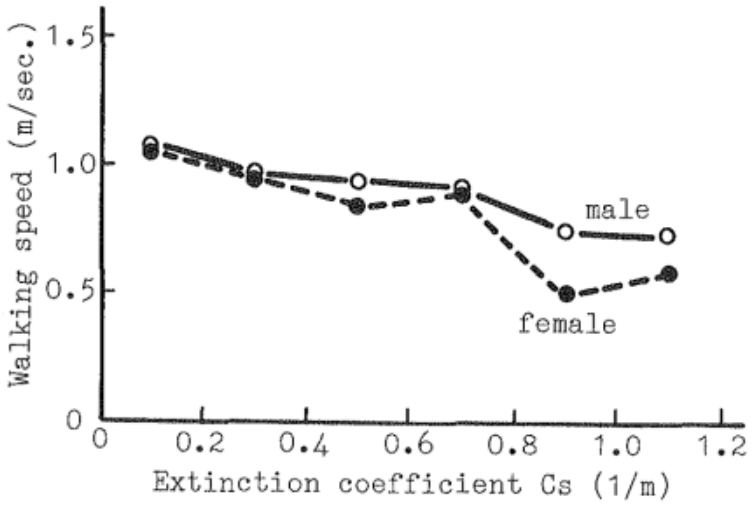


Figur 1. Beskrivning av försökspersonernas gånghastighet som funktion av dämpningskoefficienten i Jin [14].

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 2. Beskrivning av försökspersonernas gånghastighet som funktion av dämpningskoefficienten i Jin [15].



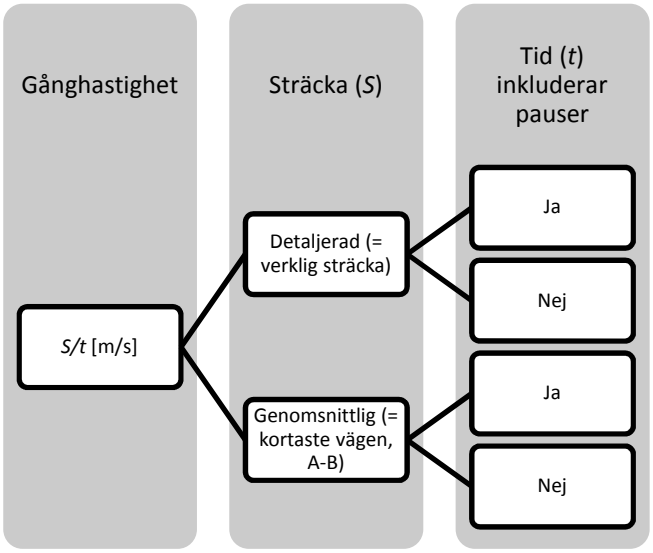
Figur 3. Beskrivning av försökspersonernas gånghastighet som funktion av dämpningskoefficienten i Jin och Yamada [16].

I figurerna redovisas siktsträckan i form av en så kallad dämpningskoefficient med enheten m^{-1} (även kallad optisk densitet per meter). Storheten har utvecklats med anledning av behovet att kunna mäta och beräkna siktsträckor i rök, och baseras på hur mycket en ljusstråle dämpas per längdenhet när den passerar genom brandgaser [17]. För mer information om detta och hur förhållandet mellan dämpningskoefficienten och siktsträckan i rök kan uttryckas, se Bilaga 1: Dämpningskoefficient och beräkning av siktsträcka.

En grundläggande fråga är naturligtvis *varför* datamängden i *Figur 1*, *Figur 2* och *Figur 3* ser ut som den gör. En följdfråga är också *vad* det egentligen är som påverkar människors gånghastighet i rökfyllda miljöer. I sammanhanget är det då logiskt att börja med att definiera termen gånghastighet vid utrymning, inte minst eftersom att människors gånghastighet i rök kan uttryckas och definieras på olika sätt. I grund och botten definieras begreppet som den sträcka en individ förflyttat sig dividerat med den tid det tog individen att förflytta sig den sträckan, det vill säga som S/t (där S symboliserar ett avståndsintervall och t det tidsintervall som det tar en individ att förflytta sig S). De olika

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

termerna kan dock uttryckas olika beroende på vad som inkluderas i beräkningen av gånghastigheten. I vissa fall kan den tillryggalagda sträckan uttryckas detaljerat, det vill säga i exakt antal förflyttade meter, i andra fall som den kortaste vägen mellan två punkter A och B. Det kan också vara så att tiden antingen uttrycks med eller utan beaktande av eventuella pauser som individen gör under utrymningen. Dessa olika alternativ illustreras i Figur 4. Det kan konstateras att det inte finns ett alternativ som är mer rätt eller fel än något annat, däremot kan ett alternativ lämpa sig bättre för en tillämpning och ett annat i en annan tillämpning.



Figur 4. Olika sätt att representera gånghastighet.

Sannolikt är det så att flera faktorer påverkar människors gånghastighet i rök, oavsett hur gånghastigheten definieras. Faktum är att dessa faktorer sannolikt påverkar mer än bara gånghastigheten, och i en diskussion om människors förflyttning i rök är det nödvändigt att åtminstone vara medveten om andra förflyttningsrelaterade aspekter. Exempelvis kan är det troligt att rökens egenskaper, det vill säga om den är mörk eller ljus, varm eller kall, irriterande eller inte, och så vidare, påverkar bland annat både den utrymmandes gånghastighet och förflyttningsmönster. Rökens påverkan på en individs gånghastighet kan således vara både direkt och indirekt, där det med det senare menas att en individ som irriteras mycket av röken i en rökfylld miljö kanske förflyttar sig i ett icke-optimalt rörelsemönster. Ett exempel på de påverkansfaktorer som kan tänkas ha betydelse för de olika delarna av människors förflyttning i rökfyllda miljöer redovisas i Tabell 1 (vilken påverkan de faktiskt har presenteras senare i denna rapport, se nedan).

Tabell 1. Innebörden av begreppet ”människors förflyttning” och faktorer som bedöms ha påverkan på människors förflyttning.

		Påverkansfaktorer						
		Rökens egenskaper	Lokal-kännedom	Fysiska hinder	Belysning	Information (synlig, hörbar, taktil, m m)	Närvaro av andra, relationer, m m	Personliga egenskaper
Förflyttning	Hastighet							
	Förflyttningsmönster							
	Pauser							
	Externt beteende, d v s mot andra							
	Internt beteende, d v s det som påverkar ens egna beslut							

Orsaken till den relativt stora variation som kan ses *Figur 1*, *Figur 2* och *Figur 3* är med andra ord sannolikt beroende på flera olika påverkansfaktorer och kan sannolikt inte enbart förklaras med en nedsatt siktsträcka. Exempelvis kan personliga egenskaper, såsom att människor i allmänhet rör sig olika snabbt, kanske också påverka

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

gånghastigheten i rök, liksom lokalkännedom, fysiska hinder, belysning, information och närvaron av andra. I forskningssammanhang spelar naturligtvis också den valda forskningsmetoden och datainsamlingstekniken roll på resultatet. En försöksperson som till exempel är helt införstådd med en studies syfte och mål agerar sannolikt annorlunda än en annan person som är ovetande. Utöver hur försökspersonernas gånghastighet påverkades av den nedsatta siktsträckan redovisas tyvärr endast i mycket begränsad omfattning hur samspelet ser ut mellan de olika påverkansfaktorerna och förflyttningsaspekterna i Jin och Yamadas [14]–[16] studier, och behovet av verifierande studier är därför stort.

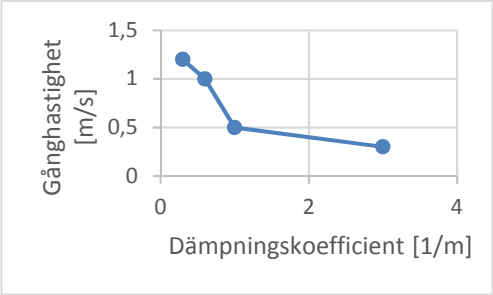
Trots att de japanska studierna inkluderade relativt få försökspersoner, och trots att de genomfördes för närmare 25-40 år sedan, är det få studier som på senare tid som försökt verifiera resultaten. Ett antal laboratorieförsök har dock genomförts i liknande uppställningar som de tidiga japanska studierna, det vill säga i korridorer [18]–[22]. Vidare har andra laboratorieförsök genomförts i större delar av vanliga byggnader eller i väg- och järnvägstunnlar [23]–[28]. Resultaten varierar dock mellan de olika försöken, och dessutom finns det skillnader i försökens upplägg, genomförande och dokumentation som innebär att det inte är helt okomplicerat att jämföra dem med varandra i syfte att skapa en mer generaliserbar beskrivning av människors förflyttning vid utrymning i rökfyllda miljöer. Skillnaderna relaterar bland annat till ovan nämnda påverkansfaktorer, såsom typen av miljö som försöken genomfördes i, typen av rök som användes, hur lång sträcka som försökspersonerna gick, om det fanns fysiska hinder på vägen och vilken information försökspersonerna fick på förhand. Grundläggande parametrar som försökspersonernas gånghastighet eller rådande siktsträckor kan därutöver ha uppmätts och dokumenterats med olika metoder eller tekniker. Ett exempel är att våglängden på det ljus som vanligen används för att uppskatta siktsträcka i rök påverkar hur stor andel av ljuset som blockeras för samma röktyp [17], [29] vilket leder till att bestämningen av siktsträcka och röktäthet kan variera med typen av mätutrustning som använts vid försöken.

Bristen på empirisk data, svårigheten att jämföra olika studier och inte minst osäkerheten kring huruvida de genomförda studierna är representativa för en utrymningssituation i riktig brandrök riskerar att leda till en oönskad propagering av osäkerheter i personsäkerhetsanalyser. Det är ett problem som bland annat uppmärksammats av utvecklare av utrymningsmodeller, det vill säga datorprogram som kan användas för att modellera utrymningsförlopp, som därför explicit uttryckt önskemål om forskningsinsatser inom området. Även projekterande ingenjörer vittnar om de svårigheter som är förknippade med att representera människors gånghastighet i rök. För att hantera den föreliggande osäkerheten antas därför ofta grova samband avseende människors gånghastighet i rök för olika siktsträckor. En vanlig variant är till exempel att begränsa gånghastigheten till en maxnivå, såsom 1,2 m/s, i rökfri miljö, och att reducera gånghastigheten enligt *Tabell 2*, *Figur 5* och *Figur 6*. Tillvägagångssättet har till exempel tillämpats vid projekteringen av Varbergstunneln, Västlänken samt utbyggnaden av Stockholms nya tunnelbana [30].

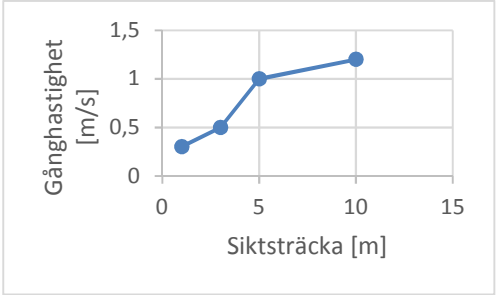
Tabell 2. Beskrivning av sambandet mellan människors maximala gånghastighet och siktsträcka såsom det tillämpats vid projekteringen av flera större svenska infrastrukturprojekt.

Dämpningskoefficient [m^{-1}]	**Siktsträcka [m]**	**Gånghastighet [m/s]**
0,3	10	1,2
0,6	5	1,0
1	3	0,5
3	1	0,3

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 5. Grafisk beskrivning av sambandet mellan människors maximala gånghastighet och dämpningskoefficienten såsom det tillämpats i tidigare svenska tunnelprojekt.



Figur 6. Grafisk beskrivning av sambandet mellan människors maximala gånghastighet och siktsträckan såsom det tillämpats i tidigare svenska tunnelprojekt.

Utöver bristen på existerande data om hur snabbt människor förflyttar sig vid utrymning i rökfyllda miljöer saknas idag alltså också kunskap och erfarenhet om/av hur den existerande datamängden rent praktiskt ska användas, representeras och beskrivas i beräkningar av RSET [31]. Representationen i beräkningsmodeller sker idag ofta genom att anta att människors gånghastighet vid olika siktsträckor kan representeras som en fraktion av en så kallad opåverkad gånghastighet i rökfri miljö. Den vetenskapliga bakgrunden för ett sådant antagande är dock inte självklar. Problemet med antagandet är att underlaget för sambanden är de ovan presenterade studierna, vilka möjligen indikerar att *en viss* person som exponeras för mycket dålig sikt generellt rör sig långsammare än *en annan* person som exponeras för bättre sikt. Den grundläggande datamängden säger alltså ingenting om hur en och samma persons gånghastighet vid utrymning förändras som en funktion av siktnedsättningen.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att vetenskaplig data om hur människor förflyttar sig vid utrymning i rökfyllda miljöer, liksom vägledning om hur den existerande datamängden kan och bör användas i den praktiska tillämpningen, till stora delar saknas. Konsekvensen är en avsaknad av tillförlitliga och valida samband för prediktering av människors gånghastighet i rök, något som fortplantar sig i beräknings- och modelleringssammanhang av RSET och därmed projekteringen, utformningen och verifieringen av byggnadsverks brandskydd i allmänhet, och undermarksanläggningar såsom väg- och järnvägstunnlar i synnerhet. Det senare motiveras dels av svårigheten att ventilera ut brandgaser i den här typen av anläggningar, dels av att människor i vanliga byggnader ofta har möjligheten att välja alternativa vägar ut som inte nödvändigtvis är rökfyllda [32]. Den logiska följden är att beslut om tekniska byten, avstånd mellan utrymningsvägar, med mera, fattas med osäkra beslutsunderlag. Osäkerheten gör också att grova och konservativa antaganden inte sällan används för att ta höjd för föreliggande osäkerheter. Det riskerar att leda till kostsamma lösningar och således ökade kostnader för stora och samhällsviktiga infrastrukturprojekt.

1.2 Syfte och mål

Med anledning av föreliggande kunskapsbrist och rådande osäkerheter om människors gånghastighet i rök har syftet med den genomförda förstudien varit att inventera, undersöka och redogöra för aktuellt forskningsläge om människors förflyttning vid utrymning i rökfyllda miljöer. Målsättningen har varit att:

1. Presentera de studier som idag finns att tillgå om människors gånghastighet i rök, samt vilka resultat de genererat.
2. Klargöra hur den information som idag finns tillgänglig kan användas i den praktiska tillämpningen, närmare bestämt att föreslå en eller flera metoder för hur

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

människors gånghastighet i rök kan och bör representeras i den brandtekniska projekteringen.
3. Föreslå en inriktning för framtida forskning och upplägg av studier för att minska föreliggande osäkerheter vid beskrivningen av människors gånghastighet i rök.

1.3 Avgränsningar/Begränsningar

Liksom all forskning präglas den här förstudien av ett antal avgränsningar och begränsningar. De diskuteras i korthet under respektive rubrik nedan.

1.3.1 Konstgjord rök

En begränsning med den forskning som bedrivits om människors gånghastighet i rök är att den nästan uteslutande genomförts i rökfyllda miljöer med konstgjord rök. Den typen av rök består i de flesta fall av små vätskedroppar som sprids i en luftvolym och kan liknas vid vanlig dimma. Färgen är oftast vit eller ljus och röken är inte heller irriterande för de personer som vistas i den. I vissa försök har en irriterande effekt försökt uppnås, till exempel genom att koka ättiksprit och blanda denna med röken. Effekten har i förekommande fall dock varit begränsad, och miljön har inte varit särskilt irriterande. I denna förstudie har även de fåtal studier som genomförts i riktig brandrök inkluderats, men resultaten från dessa har endast behandlats kvalitativt och som ett tillägg till övriga studier som genomförts i konstgjord rök. Den kvantitativa rekommendationen som presenteras är uteslutande baserad på försök i miljöer med konstgjord rök, vilket beror på svårigheter att jämföra studierna som genomförts i miljöer med riktig brandrök med de som genomförts i miljöer med konstgjord rök. Dessa svårigheter relaterar både till rent metodologiska aspekter, till exempel dokumentationen av rådande sikt i försöken, och till tolkningen av resultaten. I det senare fallet är det till exempel svårt att avgöra om det är irritationen av ögon, näsa och hals som begränsar en individs gånghastighet, eller om det är siktnedsättningen. Eftersom att rekommendationen som presenteras i denna rapport är framtagen för att prediktera människors förflyttning vid utrymning i verkliga bränder förs en separat diskussion i slutet av rapporten om hur denna osäkerhet hanterats.

1.3.2 Påverkansfaktorer

Enligt vad som nämnts i inledningen till rapporten påverkar fler faktorer än bara den rådande siktsträckan människors gånghastighet i rök, se *Tabell 1*. Dessutom har de olika påverkansfaktorerna även betydelse andra förflyttningsrelaterade aspekter än hastigheten, till exempel människors beteende gentemot andra, beslutsfattande, med mera. Primärt fokus för denna förstudie har dock varit människors gånghastighet i rökfyllda miljöer vid olika siktsträckor, och hur denna information kan användas vid praktiskt tillämpning för att kvantitativt representera människors gånghastighet i rök. Kvalitativa aspekter har, i den mån det varit möjligt och i de fall det ansetts relevant för förstudien, inkluderats och sammanställts. Sammanställningen kan dock inte betraktas som fullständig, utan istället som ett begränsat tillägg.

1.3.3 Miljö

En stor del av den forskning som genomförts i syfte att studera människors beteende och gånghastighet i rök har genomförts antingen i enkla försöksuppställningar, till exempel raka korridorer, eller i tunnelliknande miljöer. Inte osannolikt beror det på att det är i just dessa miljöer, det vill säga i anläggningar som ligger under mark, som det föreligger störst svårigheter att ventilera ut brandgaser i händelse av en brand. Likväl innebär det att de resultat som presenteras inom ramen för denna rapport i viss utsträckning påverkas av avgränsningen. De slutsatser och de rekommendationer som presenteras i rapporten är med andra ord i huvudsak begränsade till att gälla för utrymningsförlopp i tunnlar.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

1.3.4 Andra personer

De resultat och de rekommendationer som presenteras i denna rapport baseras i huvudsak på genomförda empiriska studier i vilka enskilda försökspersoner individuellt fått utrymma en viss sträcka i en rökfylld miljö. Kunskapsläget är mycket begränsat vad gäller grupputrymning i samma typ av miljö. I den här rapporten presenteras slutsatser och en kvantitativ rekommendation om hur människors gånghastighet kan och bör representeras i rök. I den tas dock ingen hänsyn till hur reduktionen kommer att se ut vid till exempel höga persontätheter, eller för den delen vilken oberoende variabel som kommer att påverka människors gånghastighet först, eller i vilken utsträckning.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

2 Metod

Arbetet i den genomförda förstudien kan delas in i tre olika faser:

1. Litteratursökning och analys
2. Sammanställning av information och framtagande av kvantitativ rekommendation(er)
3. Dokumentation och kvalitetskontroll

De olika faserna beskrivs därför sammanfattat under respektive rubrik nedan.

2.1 Fas 1: Littersökning och analys

Den första fasen av förstudien relaterade till det första projektmålet, närmare bestämt att redogöra för de publikationer och empiriska försök som vid tidpunkten fanns att tillgå om människors gånghastighet i rök. Motivet till litteratursökningen och den följande analysen var primärt att den skulle utgöra en grundlig inventering av de experiment som finns redovisade inom det aktuella området. Underlaget, det vill säga resultatet av fas 1, kunde på så sätt utgöra grunden till det efterföljande arbetet med att omsätta kunskapen till en rekommendation vid praktisk tillämpning samt framtida forskning.

Inledningsvis definierades människors förflyttning i utrymningssammanhang, och vilka faktorer som påverkar denna. Därefter påbörjades litteratursökningen och analysen. Sökningar genomfördes i flera olika vetenskapliga databaser och publikationer till vetenskapliga konferenser baserat på ett antal nyckelord förknippade med människors förflyttning i rök. Därtill utnyttjades projektdeltagarnas tidigare kännedom om litteratur inom området. De artiklar som ansågs kunna utgöra underlag för utvecklingen av en metod för hur människors gånghastighet i rök kan och bör representeras vid brandteknisk projektering valdes därefter ut för närmare granskning. Samtliga dessa lästes i sin helhet, och i de fall publikationerna efter genomläsningen fortfarande ansågs kunna bidra som underlag till förstudiens rekommendationer sammanfattades de med:

1. Cirka en sidas löptext om publikationens/studiens syfte och mål, försökspersoner, försöksgeometri, genomförande, analys samt resultat. Dessa löptexter redovisas i Bilaga 2: Sammanställning av studier som en allmän introduktion till respektive studie och för ökad spårbarhet.
2. En kvalitativ beskrivning av publikationen/studien som upprättades baserat på en bedömningsmall (se Bilaga 3: Bedömningsmall, Tabell 5). Beskrivningen kan i sammanhanget betraktas som mer detaljerad än löptexten i punkt 1, och genomfördes dels för att säkerställa att samtliga ingående publikationer analyserades på ett konsekvent sätt (oberoende av vilken författare som ansvarade för analysen), dels för att de olika publikationerna/studierna enklare skulle kunna jämföras med varandra i det efterföljande analysarbetet.
3. I tillämpliga fall, en kvantitativ sammanställning av, i huvudsak, ingående försökspersonernas gånghastighet och rådande siktförhållanden.

I de fall resultatpresentationen i en viss publikation var begränsad, till exempel där datapunkter endast redovisats övergripande, kontaktades i flera fall författaren/författarna av publikationen i hopp om att de skulle vilja dela med sig av det data som publikationen baserats på.

Det ska noteras att även om majoriteten av de inkluderade publikationerna avhandlade genomförda empiriska försök, det vill säga försök med människor i rökfyllda miljöer, så fanns det undantag. De utgjordes bland annat av andras litteraturgenomgångar, fallstudier, och så vidare, som inte explicit studerat människors gånghastighet som en funktion av röktäthet/siktsträcka. I de fall dessa studier ingick i arbetet var syftet i huvudsak att bidra med kvalitativa aspekter som kunde komplettera de kvantitativa resultaten från de empiriska försöken.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

2.2 Fas 2: Sammanställning av information och framtagande av kvantitativ rekommendation

Den andra fasen av förstudien relaterade till det andra projektmålet, och handlade om att med stöd i den genomförda litteraturgenomgången klargöra hur det tillgängliga underlaget kan användas vid praktisk brandteknisk projektering. Inledningsvis diskuterades och identifierades nyckelparametrar som bedömdes vara centrala i en kvantitativ rekommendation för att representera människors gånghastighet i rök. Det handlade bland annat om att identifiera vilken typ av gånghastighet (se *Figur 4*) som är lämpligast att basera en sådan rekommendation på, liksom hur andra påverkansfaktorer än reducerad siktsträcka skulle kunna tillämpas i en sådan rekommendation. Därtill analyserades skillnader mellan de olika empiriska underlagen, till exempel rörande tillämpade forskningsmetoder och datainsamlingstekniker, och hur dessa parametrar skulle kunna beaktas i den framtagna rekommendationen. I samband med detta fattades bland annat ett projektgemensamt beslut om att basera den kvantitativa rekommendationen endast på de studier mellan vilka:

1. Den tillämpade vetenskapliga metoden överensstämde
2. Tekniken för att samla in och dokumentera data överensstämde
3. Försöksmiljön var något sånär lik

På grund av ett begränsat dataunderlag fattades också ett projektgemensamt beslut om att endast basera den kvantitativa rekommendationen på nedsatt siktsträcka. I praktiken betyder det att andra oberoende faktorer som inte osannolikt har ett förklaringsvärde i en sådan modell slopades, till exempel rökens irritationsgrad, orienterande beteende, beslutsfattande och demografiska skillnader. Motivet till det beslutet var att dataunderlaget inte medgav ett inkluderande av dessa variabler. Osäkerheterna i en rekommendation som hade inkluderat dem bedömdes helt enkelt bli för stora.

På grundval av de inkluderade studierna genomfördes avslutningsvis ett omfattade dataanalysarbete i syfte att utröna vid vilken siktsträcka människors gånghastighet i rök kan tänkas reduceras. Därtill inventerades olika metoder som skulle kunna användas för att representera gånghastighetsreduktionen. Avgörande för slutgiltigt beslut om representationsmetod var att den på ett enkelt sätt skulle kunna användas vid praktisk brandteknisk projektering, oberoende av huruvida den variation som finns i ett aktuellt scenario representeras deterministiskt eller probabilistiskt. Det föregående, det vill säga att metoden i sig skulle vara enkel att tillämpa i praktiken, var också ett explicit önskemål från finansiären till den här rapporten.

2.3 Fas 3: Dokumentation och kvalitetskontroll

Den tredje och avslutande fasen av förstudien bestod i huvudsak av att dokumentera det utförda arbetet i denna rapport. I arbetet ingick att även dokumentera ett förslag till inriktning för framtida forskning och uppläggning av framtida studier i syfte att minska identifierade kunskapsluckor och osäkerheter. Innan publiceringen granskades rapportens förutsättningar och redovisade lösningar dels internt inom projektgruppen, i huvudsak av teknologie doktor Håkan Frantzich, dels externt av en representant inom Trafikverket, närmare bestämt Henric Modig.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

3 Resultat

I detta kapitel redovisas resultatet av den inledande litteratursökningen. Resultatet presenteras såsom det presenterats i de ursprungliga publikationerna, det vill säga obearbetat. För varje publikation som ansetts bidra med kunskap om människors gånghastighet i rök, och/eller som bedömts kunna ingå i den rekommendation som presenteras i nästa kapitel, finns en separat sammanfattning tillgänglig i Bilaga 2: Sammanställning av studier.

Presentationen nedan är uppdelad i en kvalitativ del och en kvantitativ del. I den kvalitativa delen redovisas de påverkansfaktorer som i det studerade materialet kunnat konstateras ha en påverkan på en eller flera av i TABELL introducerade förflyttningsaspekter. För den kvantitativa resultatpresentationen presenteras det tillgängliga datamaterialet i respektive studie i ett diagram.

3.1 Kvalitativa resultat

Enligt vad som nämnts ovan har kvalitativa aspekter rörande människors förflyttning i rökfyllda miljöer sammanställts i den mån det varit möjligt och i de fall det ansetts relevant för denna förstudie. I tolkningen av resultatet nedan är det viktigt att komma ihåg att informationen uteslutande är hämtad från publikationer med någon form av koppling till förflyttning i mörka eller rökfyllda miljöer. Givet förstudiens avgränsning ligger också, som kan ses i *Tabell 3*, tonvikten på de delar som rör faktorer som påverkar människors gånghastighet. Det ska noteras att det finns mer och fördjupad information om andra påverkansfaktorers betydelse för människors förflyttning vid utrymning i andra publikationer. Därtill bör noteras att resultaten nedan huvudsak är tillämpbart på en utrymningssituation i en rökfylld (eller liknande) miljö med nedsatt siktsträcka. Det är inte nödvändigtvis så att samma slutsatser och resultat gäller för människors utrymning i rökfria miljöer. Exempelvis kan nämnas att taktil information, till exempel en handledare, har större betydelse för människors orientering och förflyttning i en rökfylld miljö än i en rökfri. Avslutningsvis ska det noteras att slutsatserna som redovisas i Tabell 3 inte nödvändigtvis är generella slutsatser som gäller i samtliga fall, utan slutsatser som författarna av respektive publikation dragit baserat på resultaten i sina studier.

Redovisningen av resultaten sker i *Tabell 3* i form av sammanfattade kommentarer. De publikationer som använts som referens för påståendet ingår som en referens. För fördjupad information hänvisas läsningen i första hand till Bilaga 2: Sammanställning av studier, och i andra hand till källan.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Tabell 3. Sammanfattning av vilka påverkansfaktorer som konstaterats påverka olika förflyttningsaspekter.

		Påverkansfaktorer						
		Rökens egenskaper	Lokal-kännedom	Fysiska hinder	Belysning	Information (synlig, hörbar, taktil, m m)	Närvaro av andra, relationer, m m	Personliga egenskaper
Förflyttning	Hastighet	Människors förflyttnings-hastighet är lägre i rökfyllda miljöer än i rökfria, oavsett om röken är irriterande eller icke-irriterande [14], [21], [23], [26], [27], [33]–[39]. Förflyttnings-hastigheten i miljöer med mycket rök är jämförbar med förflyttnings-hastigheten i totalt mörker (utan rök) [14], [33], [34].	Lokalkännedom har marginell betydelse på gånghastigheten i mörka (rökfria) lokaler [40]. Förflyttnings-hastigheten verkar dock påverkas i positiv riktning av en längre exponering i miljön, till exempel vid längre förflyttning i tunnel [24].	Ett ojämnt underlag eller en lutning motsvarande 10% påverkar inte människors gånghastighet i rökfyllda miljöer [27], [35]–[37].	Variationer i belysningsnivå påverkar inte människors förflyttnings-hastighet i rökfyllda miljöer [14], [33], [34], åtminstone inte över 3 lux; mellan 0,3-3 lux har ett svagt linjärt positivt samband påvisats [21]. Belysningens förekomst är viktigare än styrkan på ljuset [18], [19], [24]. Människors förflyttnings-hastighet avtar med belysningsnivån [24]. Förflyttnings-hastigheten börjar påverkas negativt vid belysningsnivåer under 1 lux i rökfria miljöer [40]. Takmonterade armaturer renderar lägre gånghastigheter i rökfyllda miljöer än om armaturerna	Människors gånghastighet i rökfyllda miljöer påverkas sannolikt i stor utsträckning av väggarnas utformning; skillnader i utformningen har möjligen större betydelse än skillnader i röktätheten när siktsträckan alltjämt är dålig [14], [33], [34].	Närvaron av andra (upp till fyra personer) har marginell betydelse på förflyttnings-hastighet i mörka (rökfria) lokaler [40]. Vid utrymning av många människor i en tunnelmiljö påverkar långsamt-gående övrigas förflyttnings-hastighet [24].	Ålder har ingen betydelse för människors förflyttnings-hastighet i rökfyllda miljöer [41]. Ålder har marginell betydelse för människors förflyttnings-hastighet i mörka (rökfria) lokaler [40].

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

		Påverkansfaktorer						
		Rökens egenskaper	Lokal-kännedom	Fysiska hinder	Belysning	Information (synlig, hörbar, taktil, m m)	Närvaro av andra, relationer, m m	Personliga egenskaper
					sitter på väggen [20].			
	För-flyttnings-mönster	I rök rör sig människor långsamt och försiktigt, inte sällan med armar och händer utsträckta framför sig som skydd, för att identifiera hinder framför dem och/eller för att använda väggen som vägledning [27], [35]–[37], [42].	Lokalkännedom har marginell betydelse på förflyttnings-mönster i mörka (rökfria) lokaler [40].		Människors förflyttnings-mönster börjar påverkas negativt vid belysningsnivåer under 1 lux i rökfria miljöer [40]. Allmänbelysning kan vara ett hinder vid utrymning i rökfyllda miljöer då den riskerar att försämra sikten i rök samt att minska synbarheten av utrymningsteknisk a installationer [43], [44]. Belysningens förekomst är viktigare än styrkan på ljuset [25]. Belysning har i viss utsträckning konstaterats ha betydelse för förflyttningen i rökfyllda miljöer. Nivån på belysningen är dock av sekundär betydelse. Det viktigaste är att det åtminstone finns något (till exempel	Människor tenderar att följa en vägg vid utrymning i rökfyllda miljöer [14], [23], [26], [27], [33]–[38]. Efterlysande markeringar i marken, belysning, handledare och akustisk information är exempel på särskilt bra hjälpmedel vid utrymning i rökfyllda miljöer [18], [19], [28], [43]–[45]. Vid utrymning i rök används gärna väggen för att underlätta förflyttningen [14], [26], [27], [33]–[38]. Handledare är effektivt i det avseendet att det erbjuder något att följa i en rökfylld miljö [43], [44]. Akustisk och taktil information är ett bra alternativ till visuell information vid utrymning i rök [18], [19], [26], [27], [35]–	Närvaron av andra (upp till fyra personer) har marginell betydelse på förflyttnings-mönster i mörka (rökfria) lokaler [40].	Ålder har marginell betydelse på förflyttnings-mönster i mörka (rökfria) lokaler [40].

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

		Påverkansfaktorer						
		Rökens egenskaper	Lokal-kännedom	Fysiska hinder	Belysning	Information (synlig, hörbar, taktil, m m)	Närvaro av andra, relationer, m m	Personliga egenskaper
					ljuspunkter) att kunna orientera sig efter [18], [24], [43], [44].	[37], [43], [44].		
	Pauser							
	Externt beteende, d v s mot andra							
	Internt beteende, d v s det som påverkar ens egna beslut	Människors kognitiva förmåga försämras av röktäthet i allmänhet och värmestrålning i synnerhet [16], [46].						Personer med god kunskap om brand/ utrymning samt män reagerar i större utsträckning fysiologiskt på exponeringen av rök, till skillnad från oerfarna och kvinnor som reagerar psykologiskt [15], [16], [46].

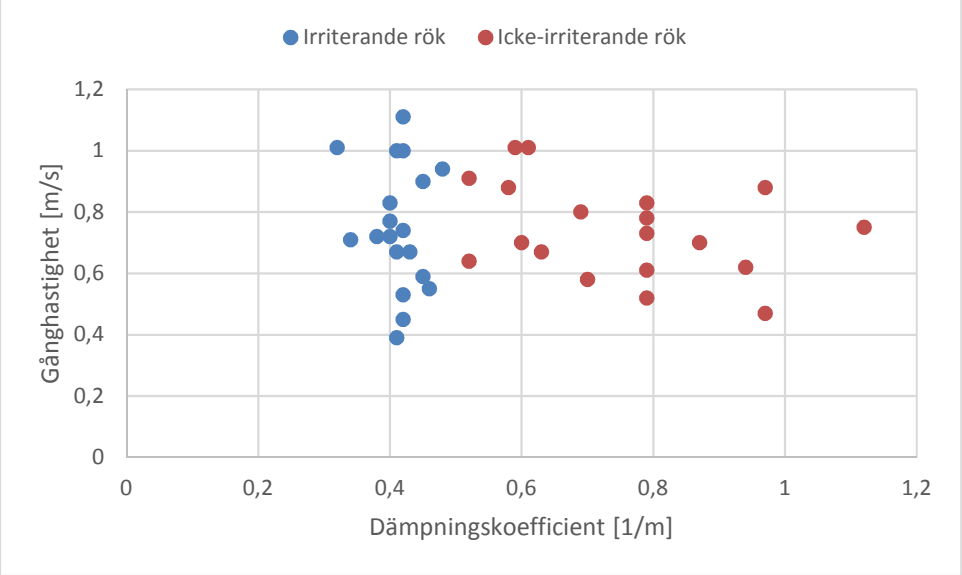
© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

3.2 Kvantitativa resultat

De publikationer i det studerade materialet som explicit presenterat människors gånghastighet som en funktion av siktnedsättningen, antingen som en dämpningskoefficient eller som en siktsträcka, redovisas var för sig nedan. Precis som för de kvalitativa resultaten ovan redovisas materialet i detta kapitel obearbetat. Redovisningen sker i diagram som kompletteras med en kort kommentar om försöket.

3.2.1 Jin [14], [33], [34]

I försöket som redovisas av Jin [14], [33], [34] fick tio försökspersoner, samtliga män, utrymma en 20 meter lång korridor som under försöket fylldes dels med irriterande rök framställd av förbränning av träribbstaplar, dels en icke-irriterande rök framställd genom förbränning av fotogen. Resultatet redovisas i *Figur 7* som individuella mätvärden per utrymning fördelat på respektive röktyp. Den gånghastighet som redovisas är den genomsnittliga inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.

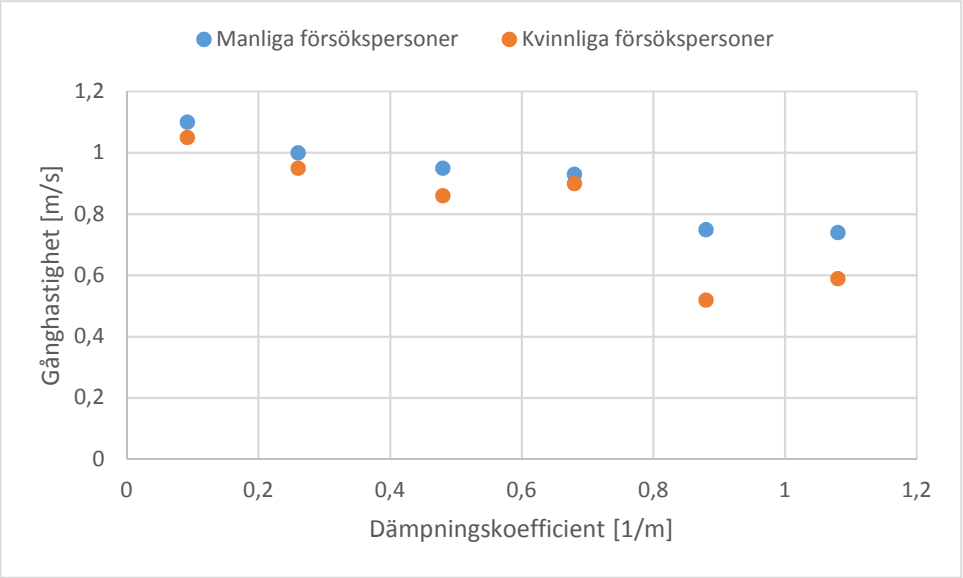


Figur 7. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Jins försök [14], [33], [34].

3.2.2 Jin och Yamada [16], [46]

I försöket som presenteras av Jin och Yamada [16], [46] utrymde totalt 31 vuxna försökspersoner (14 män, 17 kvinnor) en rökfylld korridor som var 11 meter lång och 1,2 meter bred. Försökspersonerna deltog individuellt i försöket och inför varje utrymning fylldes korridoren med vit rök som genererats genom glödförbränning av spån från japanskt cederträ. Resultatet redovisas i *Figur 8* som gruppmedelvärden för olika dämpningskoefficienter. Den gånghastighet som redovisas är den genomsnittliga inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



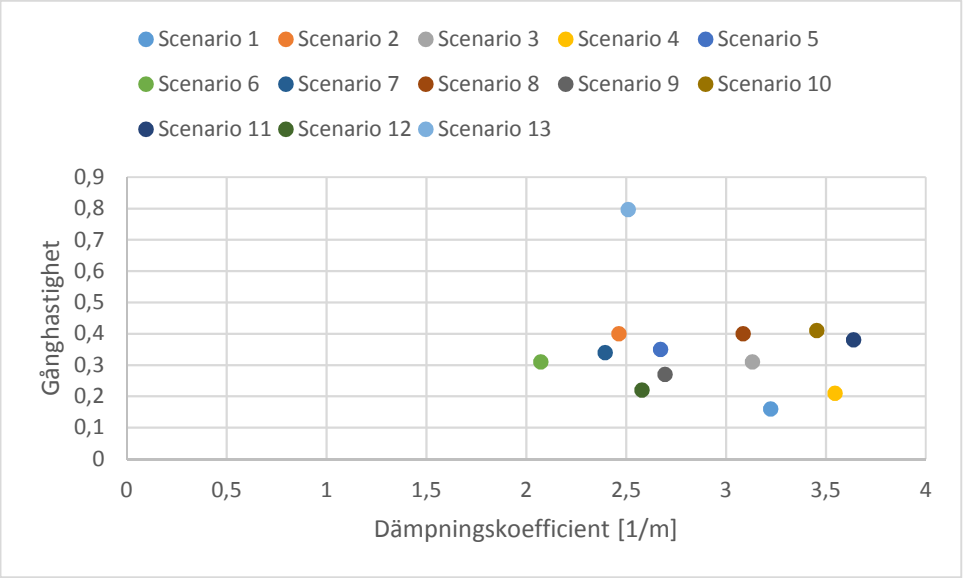
Figur 8. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på gruppnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Jin och Yamadas försök [16], [46].

3.2.3 Jensen [43], [44]

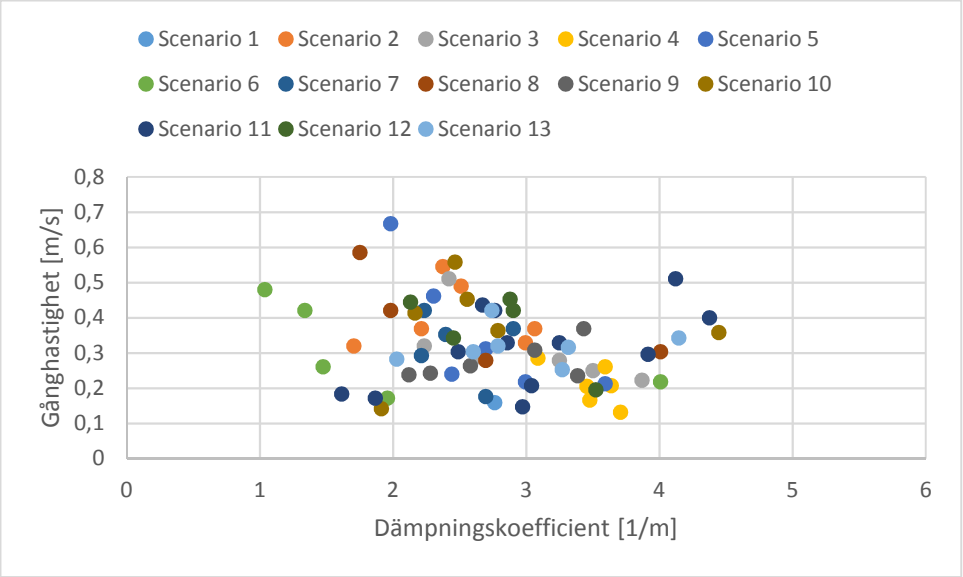
I försöket som genomfördes och presenteras av Jensen [43], [44] deltog totalt 84 försökspersoner som individuellt deltog en gång var i ett av totalt 13 olika utrymningsscenarier. Försöket genomfördes i en särskild försöksanläggning i tre plan som kan liknas vid mitten av en passagerarfärja eller ett hotell. Förflyttning skedde alltså även i trappor. I försöket användes två olika typer av rök varav den ena benämns som icke-irriterande och den andra som irriterande. Det framgår inte vad denna rök bestod av eller hur den producerades, däremot att de försökspersoner som ingick i scenarier med irriterande rök gjorde det med skyddande andningsutrustning. Resultatet från försöket redovisas för respektive scenario som gruppmedelvärden i *Figur 9*, och som individuella mätvärden i *Figur 10*. I samtliga fall är det redovisade resultatet baserat på den genomsnittliga gånghastigheten, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*. En kortfattad förklaring av respektive scenario framgår nedan:

- Scenario 1: Referensscenario utan belysning och vägledande system. Icke-irriterande rök.
- Scenario 2: Referensscenario med vanliga genomlysta utrymningsskyltar i taknivå utmed försöksområdet och ovan utgång. Icke-irriterande rök.
- Scenario 3: Som scenario 2, dock med elektriskt matad lyslinje i marknivå på båda sidor av utrymningsvägen.
- Scenario 4: Endast en efterlysande linje i centrum av gångbanan. I linjen fanns vägledande pilar liksom avståndsmarkeringar. Icke-irriterande rök.
- Scenario 5: Identiskt med scenario 4, dock med irriterande rök.
- Scenario 6: Som scenario 5, dock med efterlysande linje på båda väggar i golvnivå istället för i mitten av golvet.
- Scenario 7: Som scenario 2, dock med elektriskt matad lyslinje i marknivå på båda sidor av utrymningsvägen och med icke-irriterande rök..
- Scenario 8: Distinkta efterlysande golvlister i utvalda punkter i övergång golv/vägg (ej lång linje), både vita och gröna och med pil- och avståndsmarkeringar. Irriterande rök.
- Scenario 9: Handledare utmed båda väggar inklusive någon form av taktila hakar och efterlysande material. Irriterande rök.
- Scenario 10: Som scenario 9, dock med distinkta efterlysande lister i handledarens underkant.
- Scenario 11: Som scenario 9 dock med distinkta efterlysande lister i handledarens underkant och med icke-irriterande rök.
- Scenario 12: Som scenario 9, dock med icke-irriterande rök.
- Scenario 13: Som scenario 9/12, dock även med efterlysande markering som golvlist. Irriterande rök.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 9. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på gruppnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Jensens försök [43], [44].

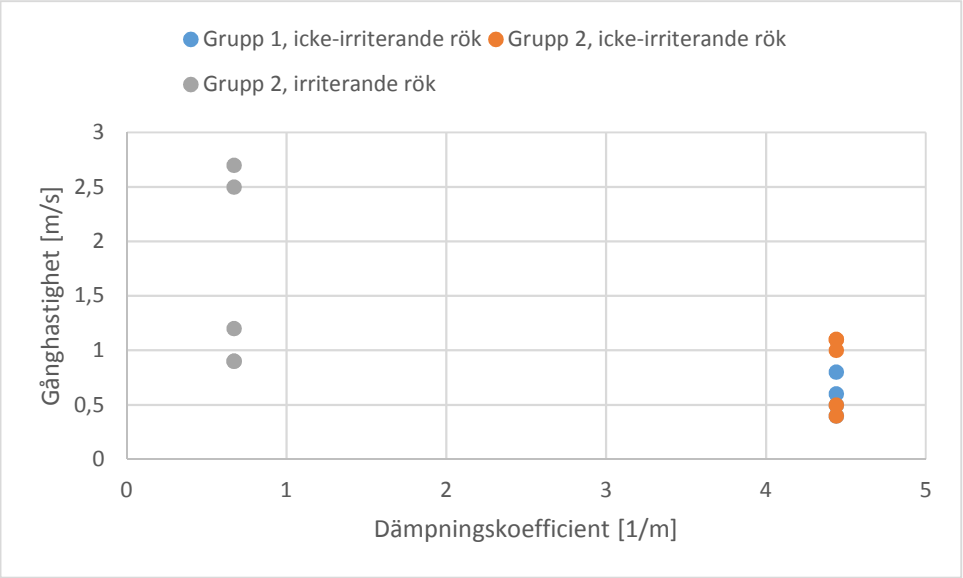


Figur 10. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Jensens försök [43], [44].

3.2.4 Tanaka et al. [47]

I försöket som presenteras av Tanaka et al. [47] utrymde åtta eller nio försökspersoner (dokumentationen är inte fullständig) en korridor som var drygt 20 meter lång. Försökspersonerna delades in i två grupper, varav den ena bestående av fyra personer utrymde korridoren totalt två gånger; först en gång med icke-irriterande rök sedan en gång i rökfri miljö. I den andra gruppen ingick fem personer som utrymde korridoren totalt tre gånger; en gång utan rök, därefter en gång med icke-irriterande rök och avslutningsvis en gång med irriterande rök. Resultatet från försöket redovisas för respektive scenario som individuella medelvärden i *Figur 11*. Det redovisade resultatet är baserat på den genomsnittliga gånghastigheten, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.

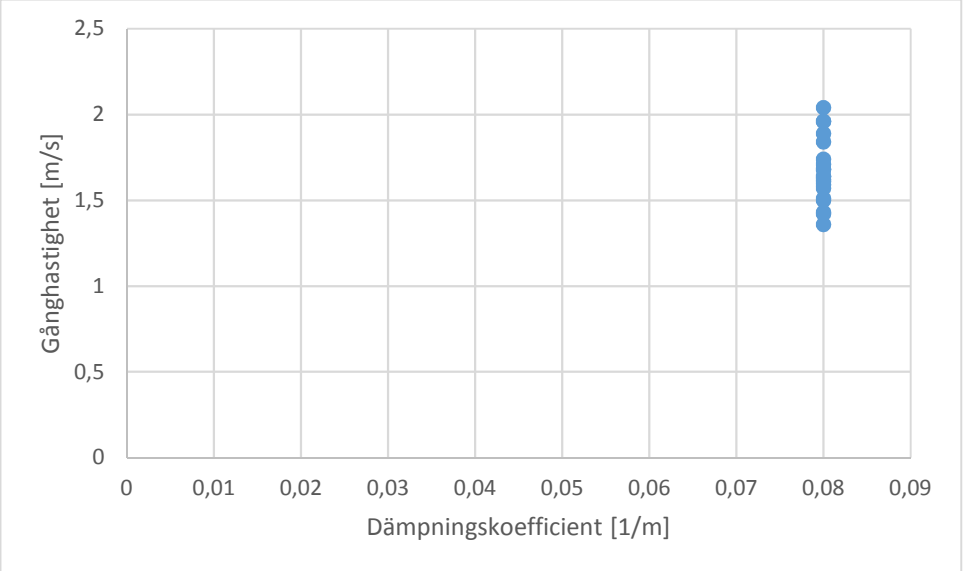
© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 11. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Tanaka et al.:s försök [47].

3.2.5 Janse et al. [41]

I det försök som redovisas av Janse et al. [41] fick 20 försökspersoner (9 män, 11 kvinnor) utrymma en 10 meter lång korridor vid tre olika scenarier. Det som varierades var typen av rök; i scenario 1 användes rök som genererats vid glödbrand i trä, i scenario 2 användes rök som genererats av brand i bomull och i scenario 3 användes rök som genererats vid brand i polyuretan. Resultatet från försöket redovisas för respektive scenario som individuella mätvärden i *Figur 12*. Det bör noteras att dessa medelvärden är en genomsnittlig gånghastighet som beräknats baserat på respektive försökspersons tre olika försök, det vill säga som ett medelvärde av tre utrymningar. Resultatet i *Figur 12* är den genomsnittliga gånghastigheten, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.



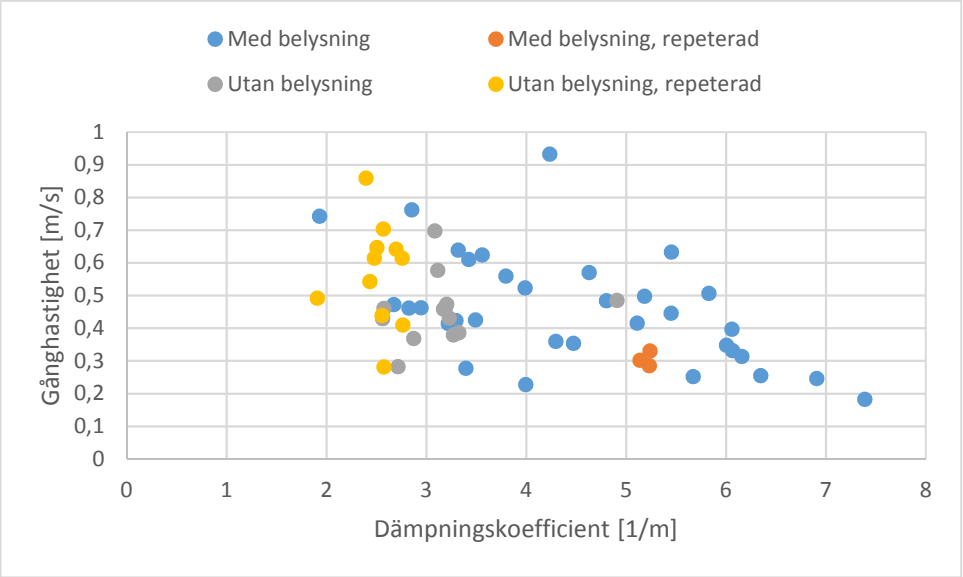
Figur 12. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Janse et al.:s försök [41].

3.2.6 Frantzich och Nilsson [23]

I försöket som genomfördes och presenteras av Frantzich och Nilsson [23] utrymde 46 försökspersoner en vägtunnelliknande miljö motsvarande en sträcka på knappt 40 meter. Under försöken var vägtunneln fylld med konstgjord rök som dessutom kompletterades med förångad

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

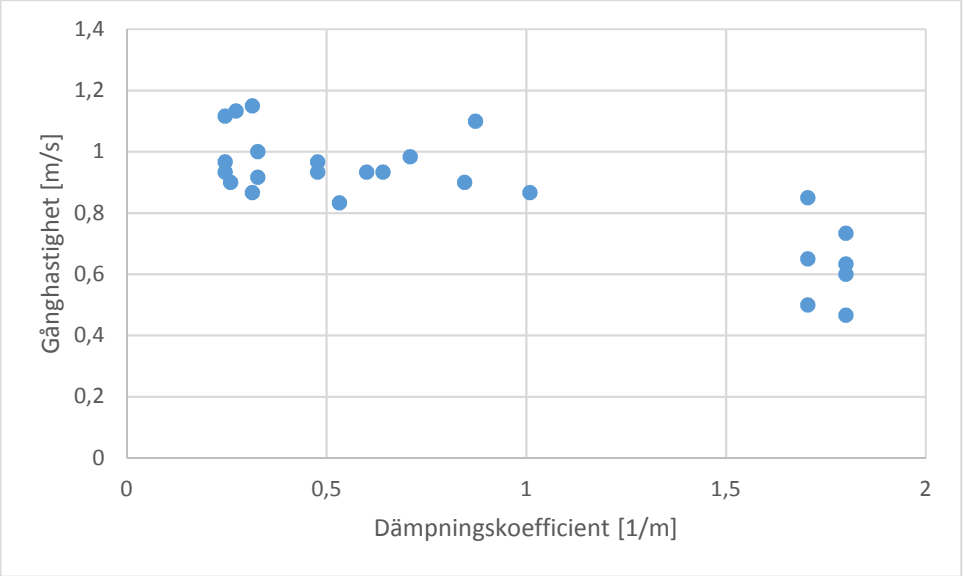
ättiksprit. I huvudsak två scenarier studerades; med eller utan belysning i vägtunneln. Resultatet från försöket redovisas som individuella mätvärden i *Figur 13* för respektive scenario. Det mindre antal försökspersoner som repeterade försöket redovisas i en egen kategori. Resultatet i *Figur 13* är den genomsnittliga gånghastigheten, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.



Figur 13. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Frantzich och Nilssons försök [23].

3.2.7 Akizuki et al. [21]

I försöket som beskrivs av Akizuki et al. [21] deltog 60 försökspersoner som utrymde en knappt 30 meter lång rökfylld korridor. Försökspersonerna fick utrymma under flera olika scenarier där både belysningsstyrkan och röktätheten varierade, och i *Figur 14* redovisas de individuella gånghastigheterna för scenariot i rök med 1 lux belysningsstyrka. Resultatet i *Figur 14* är den genomsnittliga gånghastigheten, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.

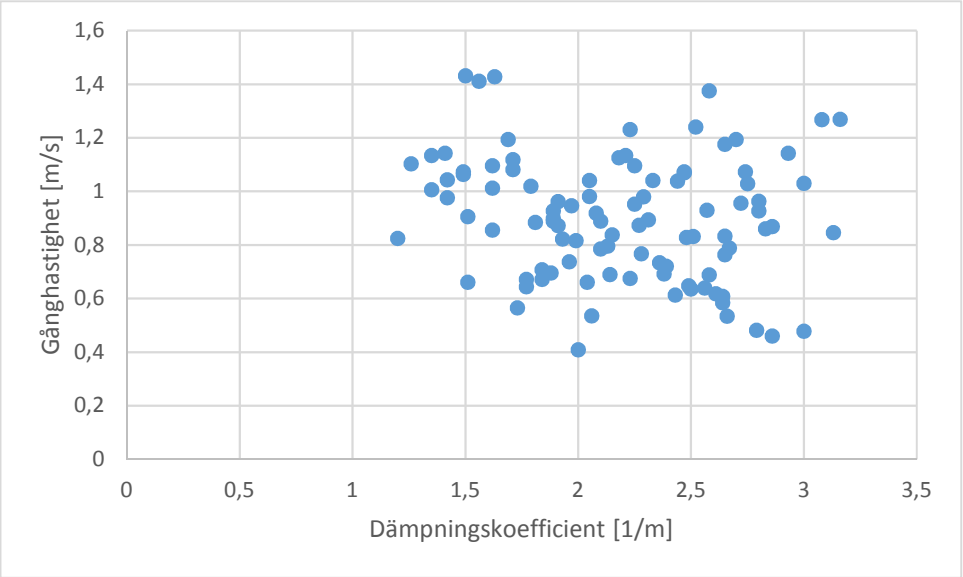


Figur 14. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Akizuki et al.:s försök [21].

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

3.2.8 Fridolf et al. [27], [35]–[37]

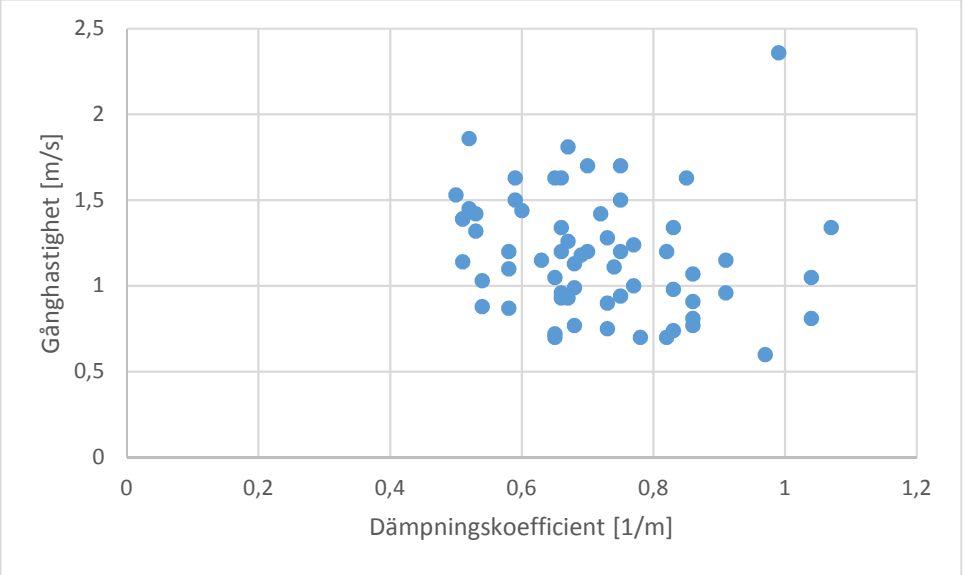
I försöket som presenteras och genomfördes av Fridolf et al. [27], [35]–[37] utrymde totalt 100 försökspersoner (56 män, 44 kvinnor) en cirka 200 meter lång sträcka i en järnvägstunnelliknande miljö. Under försöket var vägtunneln fylld med konstgjord rök som dessutom kompletterades med förångad ättiksprit. Försökspersonernas individuella gånghastighet redovisas i *Figur 15*. Redovisningen sker som den genomsnittliga gånghastigheten för respektive individ, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.



Figur 15. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Fridolf et al.:s försök [27], [35]–[37].

3.2.9 Fridolf et al. [26], [38]

I försöket som presenteras och genomfördes av Fridolf et al. [26], [38] utrymde totalt 66 försökspersoner en cirka 120 meter lång sträcka i en vägtunnel. Under försöket var tunneln fylld med konstgjord rök. Försökspersonernas individuella gånghastighet redovisas i *Figur 16*. Redovisningen sker som den genomsnittliga gånghastigheten för respektive individ, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.

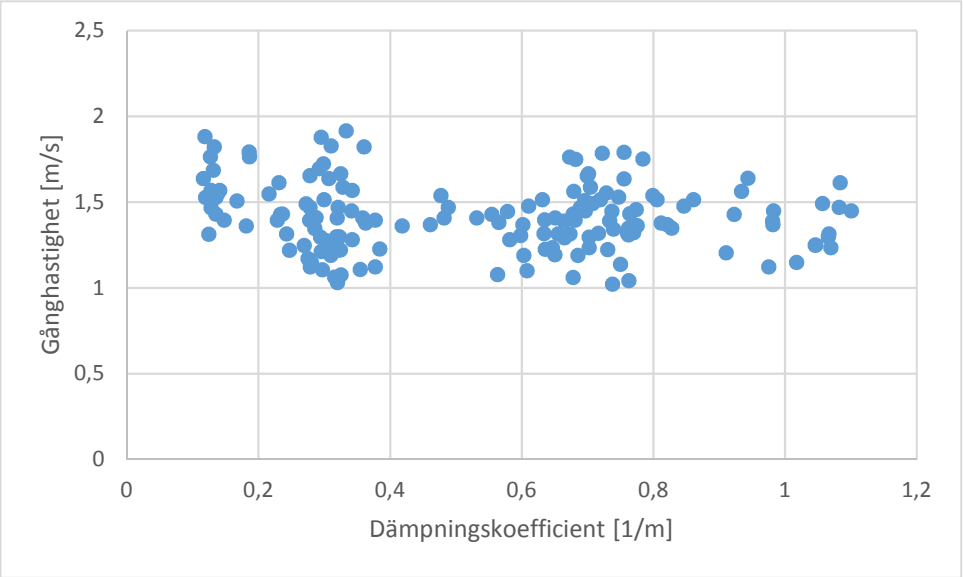


Figur 16. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Fridolf et al.:s försök [26], [38].

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

3.2.10 Seike et al. [48]

I ett försök som beskrivs av Seike et al. [48] deltog 164 försökspersoner som fick utrymma en cirka 700 meter lång tunnel. Tunneln var rökfylld med konstgjord rök under försöket, och försökspersonernas gånghastighet uppskattades i delar av den 700 meter långa tunneln i tre olika scenarier med varierande röktäthet. Försökspersonernas individuella gånghastighet redovisas i *Figur 17*. Redovisningen sker som den genomsnittliga gånghastigheten för respektive individ, inklusive pauser, såsom den definierats i *Figur 4*.

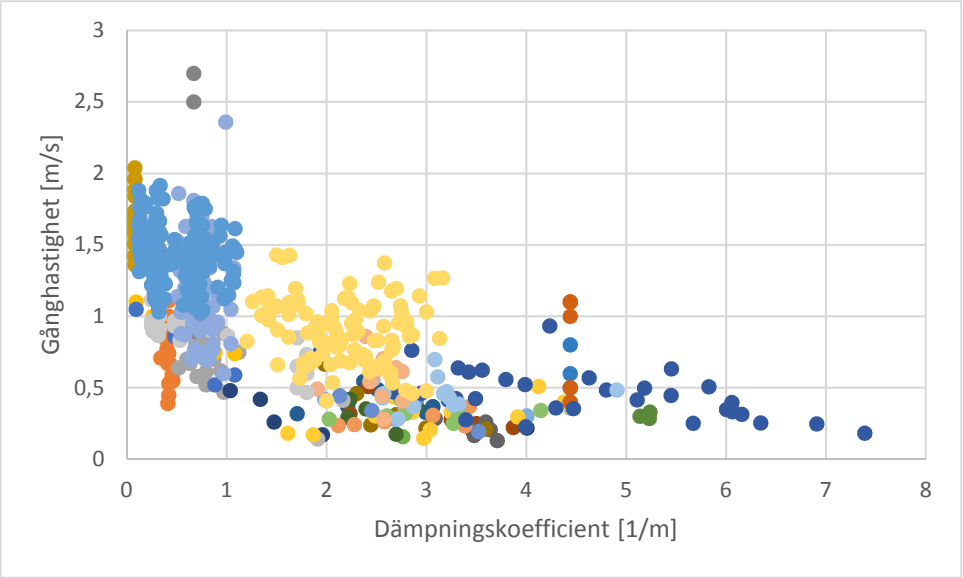


Figur 17. Försökspersonernas genomsnittliga gånghastighet på individnivå presenterad som en funktion av den uppmätta dämpningskoefficienten i Seike et al.:s försök [48].

3.3 Sammanfattning

Ovan har det kvantitativa bidraget från de publikationer som studerats inom ramen för denna förstudie presenterats obearbetat. Det ska noteras att det finns stora skillnader mellan flera av försöken, vilka bland annat härrör till den vetenskapliga metod som tillämpats, tekniken som använts för att samla in data, miljön som försökspersonerna förflyttat sig i, om de gjort så i grupp eller inte. Enligt vad som framgår av nästa kapitel är det därför svårt att kombinera dem hursomhelst med målet att åstadkomma en generell beskrivning av hur människors gånghastighet reduceras i rök. Med det konstaterat redovisas i *Figur 18* ändå samtliga ovan presenterade datapunkter. Av utrymmesskäl kan inte en förklaringstext som beskriver de olika datapunkterna inkluderas utan de måste spåras för hand i materialet ovan.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB



Figur 18. Samtliga ovan redovisade resultat i ett och samma diagram.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

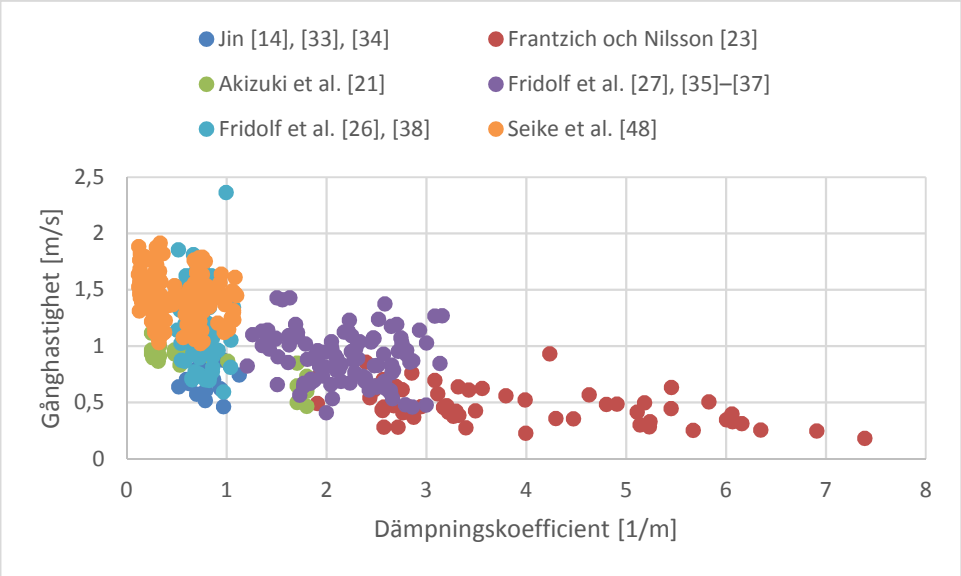
4 Analys

En fördjupad analys av det presenterade materialet i föregående kapitel är nödvändig innan en rekommendation om hur den tillgängliga datamängden (eller delar av den) bör användas vid praktisk tillämpning kan tas fram. Till att börja med är det då relevant att studera huruvida det empiriska dataunderlaget är möjligt att kombinera. Om två eller fler studier ska kunna kombineras i syfte att möjliggöra för mer generella slutsatser än vad respektive studie enskilt kan bidra med bör till exempel:

1. Den tillämpade vetenskapliga metoden överensstämma
2. Tekniken för att samla in och dokumentera data överensstämma
3. Försöksmiljön vara snarlik

Därutöver måste respektive studie naturligtvis uppfylla en viss vetenskaplig lägstanivå. Det anses dock samtliga ovan inkluderade studier göra eftersom att en första gallring skedde i samband med förstudiens första fas (mer om detta nedan, se Bilaga 2: Sammanställning av studier).
Baserat på resonemanget ovan valdes datamaterialet från följande studier ut i avsikt att utgöra underlag till den rekommendation som presenteras senare i detta kapitel (även sammanställda i *Figur 19*).

- Jin [14], [33], [34]: Endast den datamängd som samlats in i miljön med icke-irriterande rök
- Frantzich och Nilsson [23]: Samtliga ovan redovisade datapunkter
- Akizuki et al. [21]: Samtliga ovan redovisade datapunkter
- Fridolf et al. [27], [35]–[37]: Samtliga ovan redovisade datapunkter
- Fridolf et al. [26], [38]: Samtliga ovan redovisade datapunkter
- Seike et al. [48]: Samtliga ovan redovisade datapunkter



Figur 19. Urval av datamaterial som rekommendationen i denna rapport är baserad på.

Urvalet baseras alltså endast på datapunkter som samlats in i miljöer med konstgjord alternativt icke-irriterande rök. Skälet är att av de få studier som undersökt människors förflyttning i rökfyllda miljöer med irriterande rök är det endast en som bedöms som relevant (den som presenterats av Jin [14], [33], [34]). Att då inkludera de datapunkter som samlats in i en irriterande rökfylld miljö skulle dock avvika från ovan stipulerade urvalskriterier. Konsekvensen av detta beslut, samt hur den osäkerhet som introduceras i den rekommendation som presenteras i denna förstudie, diskuteras nedan.

Skälet till att Jensens [43], [44] omfattande datamängd exkluderats beror primärt på att försöksmiljön avviker från övriga studiers. Samtliga studier i urvalet ovan har genomförts i en rökfylld korridors- eller tunnelliknande miljö. Jensens [43], [44] resultat är däremot framtagna i en byggnadsliknande

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

miljö som är tre våningar hög. Det senare innebär att de utrymmande förflyttat sig både på horisontellt underlag samt i trappor. Dessutom var ett av de huvudsakliga syftena i Jensens [43], [44] försök att studera och dokumentera hur människor fattar sina beslut om vägval vid olika typer av tekniska hjälpmedel. Utmed försöksområdet fanns därför flera punkter vid vilka den utrymmande kunde gå åt två håll. Den uppskattade gånghastigheten baseras på det kortaste avståndet mellan start- och slutpositionen i försöket, men med tanke på antalet platser där försökspersonerna kunde gå ”åt fel håll” råder det en stor osäkerhet kring huruvida resultatet är jämförbart med det i ovan utvalda studier.

Den typ av gånghastighet som uppmätts i studierna i urvalet ovan är en individuell, genomsnittlig gånghastighet som inkluderar pauser, se *Figur 4*. I något undantagsfall finns även en detaljerad sträcka utan pauser att tillgå, men att använda en genomsnittlig gånghastighet inklusive pauser som underlag för en rekommendation om hur datamängden ska hanteras i den praktiska tillämpningen anses mest lämpligt. Det beror bland annat på att det sättet att representera människors gånghastighet i rök alltid kommer att rendera den lägsta hastigheten i förhållande till övriga tre alternativ. Ett annat skäl att de pauser som människor bevisligen tar vid utrymning i rökfyllda miljöer implicit bakas in i begreppet gånghastighet. Det bedöms som fördelaktigt då dagens hand- och datorberäkningsmodeller för utrymning endast i undantagsfall inkluderar den typen av beteendeaspekter. Det är likväl nödvändigt att vara medveten om detta både i tolkningen och användandet av datamängden.

4.1 Transformation från dämpningskoefficient till siktsträcka

Hittills har det redovisade materialet om hur fort människor förflyttar sig i rök presenterats som en funktion av dämpningskoefficienten. Enligt vad som nämnts ovan är detta en storhet som utvecklats med anledning av behovet att praktiskt kunna mäta och uppskatta rökens täthet, till exempel i samband med brandprovningar av olika byggprodukter. Det bedöms dock som osannolikt att människor som utrymmer i en rökfylld miljö anpassar sin hastighet efter dämpningskoefficienten, vars storhet är både besvärlig att härleda och att förstå. Det förefaller troligare att människor faktiskt anpassar sin hastighet utefter vad de kan se i den rökfyllda miljön, oavsett om det är ett ljusemitterande eller reflekterande föremål. Just huruvida föremålet är ljusemitterande eller reflekterande har dock betydelse för den upplevda siktsträckan i en rökfylld miljö. Exempelvis kan en lampa ses på ett längre avstånd än en reflekterande utrymningsskylt i en rökfylld korridor. Däremot är det en aspekt som inte framgår av den uppmätta dämpningskoefficienten, eftersom att den är samma i båda fallen. För att öka förståelsen för hur människors gånghastighet påverkas av olika röktätheter framstår det därför som lämpligare att betrakta, analysera och diskutera människors gånghastighet i relation till den rådande siktsträckan, istället för den rådande dämpningskoefficienten.

Med resonemanget i föregående stycke, och eftersom att samtliga studier som inkluderats i urvalet ovan har redovisat försökspersonernas gånghastighet som en funktion av dämpningskoefficienten, måste en transformation av den senare storheten göras. Det görs dock med olika matematiska operationer beroende på om det är siktsträckan till ett ljusemitterande föremål eller till ett reflekterande föremål som ska uppskattas. Baserat på innehållet i de inkluderade artiklarna görs tolkningen att försökspersonerna i samtliga fall utom ett orienterat sig efter reflekterande föremål. Undantaget är försöket som genomfördes av Fridolf et al. [27], [35]–[37], i vilket försökspersonerna istället i stor utsträckning bedöms ha orienterat sig efter de lampor som monterats cirka en meter ovan marken var åttonde meter på båda sidorna av tunneln. För transformationen innebär det rent praktiskt att dämpningskoefficienten räknats om till en siktsträcka med följande ekvationer (se Bilaga 1: Dämpningskoefficient och beräkning av siktsträcka för en närmare beskrivning):

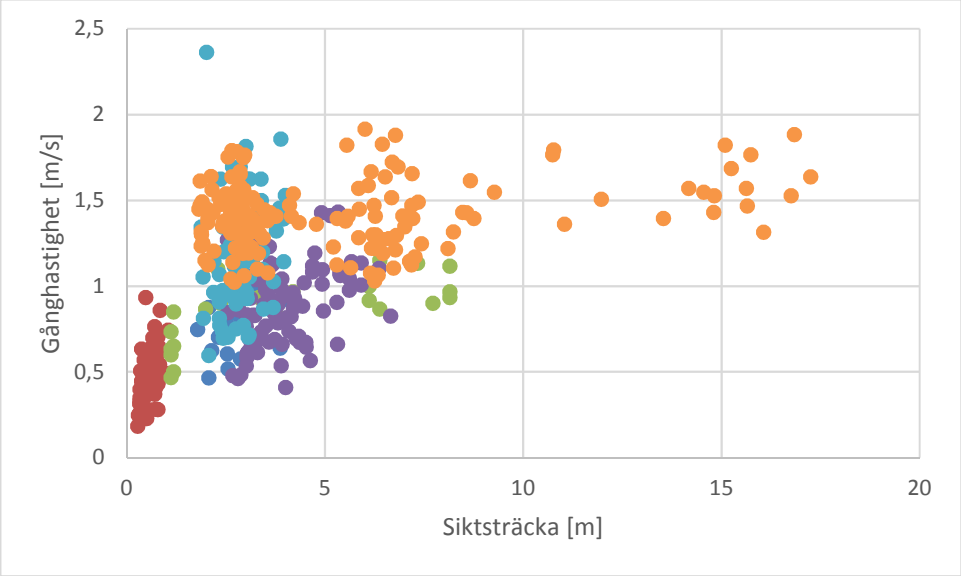
1. $V = \frac{8}{C_s}$ för studien som presenteras av Fridolf et al. [27], [35]–[37]
2. $V = \frac{2}{C_s}$ för övriga inkluderade studier

Motivet till valet av konstanten 8 för ljusemitterande föremål är att det representerar det avrundade medelvärdet mellan 5-10, vilket är de min- och maximala värden som används i nedan presenterat samband för att approximativt översätta en dämpningskoefficient till en siktsträcka till ljusemitterande

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

föremål. För reflekterande föremål valdes konstanten 2, vilket är det minimala värdet i sambandet. Valet gjordes i enlighet med den rekommendation som ges i SFPE-handboken [49] där det framgår att det minimala värdet i sambandet kan användas för att uppskatta siktsträckan till bland annat väggar, golv, dörrar, trappor, med mera i till exempel undermarksanläggningar eller långa korridorer.

Konsekvensen som transformationen får för ovan redovisade datamängd presenteras i *Figur 20*. Som kan ses skiljer sig utseendet en del från när gånghastigheten redovisas som en funktion av dämpningskoefficienten. Gånghastigheten ser till exempel ut att korrelera positivt med ökad siktsträcka, vilket också förefaller vara rimligt. Med andra ord, vid bra siktförhållanden rör sig människor i allmänhet fortare än vid dåliga siktförhållanden. Däremot kvarstår den problematik som introducerades i inledningen till denna rapport, nämligen att det av datamängden i *Figur 20* fortfarande bara kan antydas att en viss försöksperson som exponerats för en miljö med mycket dålig sikt generellt sett rör sig långsammare än en annan person som exponerats för en miljö med en något bättre sikt.



Figur 20. Samma datamängd som redovisades i Figur 19, men istället redovisad som en funktion av siktsträckan.

4.2 Tolkning av datamängden

Sammanfattningsvis kan konstateras att människors gånghastighet i rök påverkas av flera faktorer, varav nedsatt siktsträcka är en sådan faktor. Möjligen är det så att en persons gånghastighet i rökfri miljö har betydelse för hur snabbt samma person rör sig i en rökfylld miljö när sikten är nedsatt. Den studie som genomfördes i Norra Länken visade till exempel att människor som i allmänhet rör sig relativt snabbt i rökfri miljö tenderar att reducera sin gånghastighet i rök på motsvarande sätt som de som rör sig långsamt i rökrfri miljö [26], [38]. Ingen entydig slutsats kan dock dras baserat på det aktuella forskningsläget som redovisas ovan. En slutsats som däremot med säkerhet kan dras baserat på annan forskning är att olika människor förflyttar sig olika fort i rökfria miljöer. Det kan uttryckas som att det finns en osäkerhet förknippad med människors gånghastighet i rökfri miljö, och i brandtekniska sammanhang kan denna representeras antingen deterministiskt eller probabilistiskt.

En grundläggande fråga är då hur en enskild individs gånghastighet ska representeras när denne befinner sig i en rökfylld miljö. Enligt vad som kan ses i *Figur 20*, och som nämnts ovan, kan det konstateras att gånghastigheten generellt sett minskar med minskad siktsträcka. Datamängden medger dock inte att någon slutsats kan dras om hur en viss individ minskar sin gånghastighet som en funktion av den rådande siktsträckan i en rökfylld miljö. Det skulle till exempel kunna antas att vissa individer är mer känsliga än andra för rök, vilket skulle kunna innebära att de sänker sin gånghastighet mer vid en viss siktsträcka än andra. På samma sätt skulle det kunna antas att andra, mindre känsliga individer,

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

knappt reducerar sin gånghastighet alls, inte ens vid väldigt låga siktsträckor. Därtill skulle reduktionen, som nämnts ovan, även kunna påverkas av individens gånghastighet i rökfri miljö.

Bristen på kunskap och de stora osäkerheterna kan tolkas som att det i dagsläget inte är möjligt att utveckla en specifik rekommendation för hur människors gånghastighet i rök kan och bör representeras i personsäkerhetsverifieringar som görs med hjälp av beräkningar. Det behöver dock inte nödvändigtvis vara ett avgörande problem. Skälet är att det inte är nödvändigt att känna till exakt hur enskilda individers gånghastighet i rök påverkas av en viss siktnedsättning. Ett sådant samband som beskriver gånghastigheten som en funktion av siktsträckan för enskilda individer hade naturligtvis varit önskvärt eftersom att det hade ökat förklaringsgraden om hur olika personer anpassar sin hastighet efter rådande förhållanden. Men givet föreliggande osäkerheter såväl i rökfria som rökfyllda miljöer kan olika metoder utvecklas och användas för att beskriva hur en enskild individ påverkas av nedsatt sikt. Det slutgiltiga valet i den praktiska tillämpningen bör sedan göras bland annat baserat på hur osäkerheterna valts att hanteras på en övergripande nivå i personsäkerhetsverifieringen (se nedan för en separat diskussion om detta).

I följande avsnitt presenteras den rekommendation som bedömts bäst lämpad för att representera människors gånghastighet i rök vid brandteknisk projektering, liksom bearbetningen av datamängden som krävts för att härleda den. Avgörande vid framtagandet av rekommendationen är antagandet om den siktnivå vid vilken en enskild individ kan antas börja reducera sin gånghastighet. Denna nivå bestämdes till tre meter baserat på:

1. Den genomförda litteraturstudien.
2. En omfattande bearbetning av datamängden som presenterats i *Figur 20*.
3. Ett antal enklare försök vid Lunds tekniska högskola vid vilka vissa av författarna till denna rapport ingick. Under försöken undersöktes vilken bromssträcka som behövdes för att en person inte skulle kollidera med ett stillastående hinder när personen rörde sig med en normal gånghastighet (cirka 1,3-1,4 m/s).

Antagandet innebär alltså att en individs gånghastighet i rök inte bedöms påverkas om siktsträckan i överstiger tre meter. Analogt får antagandet konsekvensen att en enskild individs gånghastighet kan representeras som ohindrad ner till en siktsträcka motsvarande tre meter, till exempel baserat på Fruins [50] forskning. Det motsvarar en genomsnittlig gånghastighet motsvarande cirka 1,35 m/s.

En annan avgörande fråga för utformningen av rekommendationen är vid vilken siktnivå en enskild individs lägsta gånghastighet kan antas inträda, och därtill vad hastigheten ska vara vid denna siktnivå. Enligt vad som beskrivits ovan skulle denna situation kunna liknas vid förflyttning i totalt mörker, och gånghastigheten skulle då kunna ansättas till cirka 0,2 m/s i enlighet med vad som redovisats i den genomgångna litteraturen. Denna information har utnyttjats på sådant sätt i nedanstående rekommendation att en enskilds individ aldrig kan representeras som lägre än 0,2 m/s. Siktnivån vid vilken denna gånghastighet inträder kommer dock att bero på vilken metod som används för att representera föreliggande osäkerheter, se nedan.

4.3 Ytterligare bearbetning av datamängden

Eftersom att det grundläggande antagandet i nedan rekommendation är att en individs gånghastighet i rök inte påverkas vid siktsträckor över tre meter är det endast den datamängd som presenteras i *Figur 21* relevant att beakta och att basera rekommendationen för att representera människors gånghastighet i rök på. I figuren redovisas dels datamaterialet från de utvalda studierna som faller inom siktnivåintervallet $0 \leq$ siktsträcka ≤ 3 meter, dels en regressionslinje som genererats med en linjär regressionsanalys av datamaterialet. Den streckade linje som omgärdar regressionslinjen representerar regressionslinjens konfidensintervall (konfidensgrad 95 %).

Förutsatt ett antagande om att datamängden som presenteras i *Figur 21* är representativ för människor i allmänhet kan sambandet sägas beskriva ett medelvärde av människors genomsnittliga gånghastighet

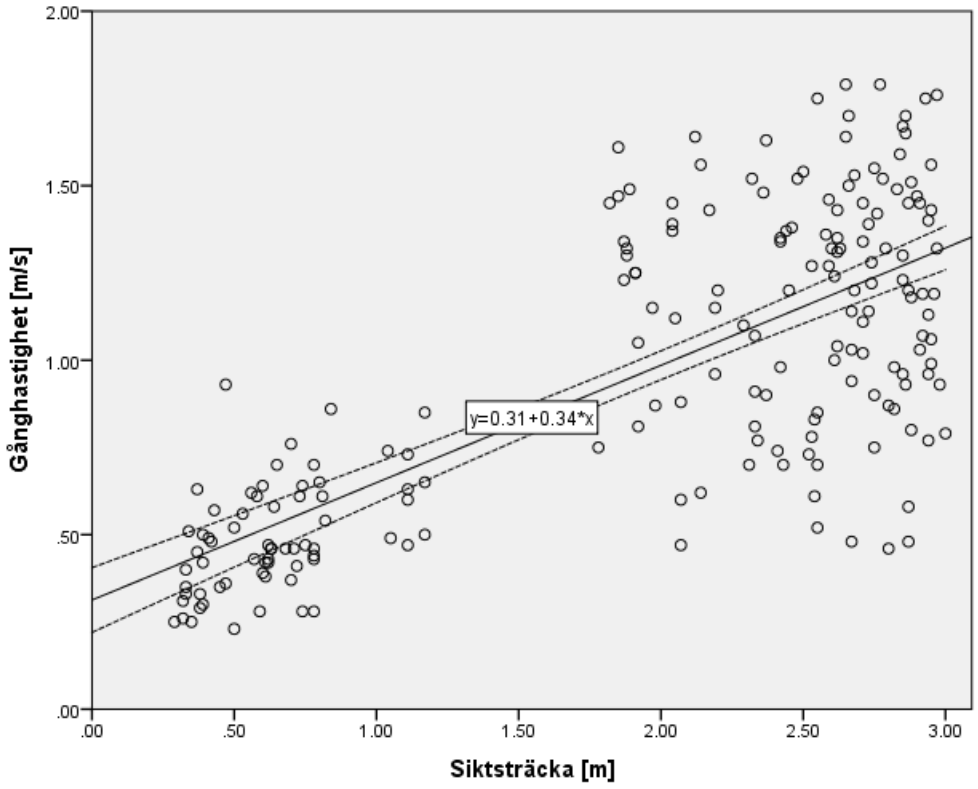
© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

vid olika siktsträckor. Det bör noteras att det inte nödvändigtvis är samma sak som en enskild individs gånghastighet vid motsvarande siktsträckor (om detta kan ingen slutsats dras, som konstaterats ovan). Sambandet kan beskrivas med följande ekvation (där *v* är medelgånghastigheten [m/s] och *s* siktsträckan [m]):

$$v = 0{,}34 \cdot s + 0{,}31$$

Regressionslinjens så kallade R^2-värde uppgår i detta fall till 0,54, vilket i praktiken kan tolkas som att 54 % av variationen i genomsnittlig gånghastighet förklaras av den oberoende variabeln siktsträcka. De respektive koefficienternas nedre och övre konfidensintervall (95 % konfidensgrad), i den ordning de står i ekvationen, är 0,22 och 0,41 respektive 0,29 och 0,38.

I sammanhanget är två punkter särskilt intressanta att studera i *Figur 21*, vilka även kan beräknas med ovan ekvation. Den ena är den lägsta genomsnittliga gånghastigheten, vilken teoretiskt ges av *s = 0* meter, motsvarande 0,31 m/s. Sambandet innebär alltså i teorin att den lägsta genomsnittliga gånghastigheten, i medeltal, uppgår till 0,31 m/s. I andra änden av intervallet, det vill säga vid *s = 3* meter, kan den genomsnittliga gånghastigheten, i medeltal, beräknas till 1,33 meter, vilket är mycket nära människors genomsnittliga gånghastighet som Fruin [50] redovisar för rökfri miljö. Det antyder att siktnivågränsen motsvarande tre meter är rimlig i sammanhanget, och att övergången mellan de två zonerna framstår som lämpligt vald.

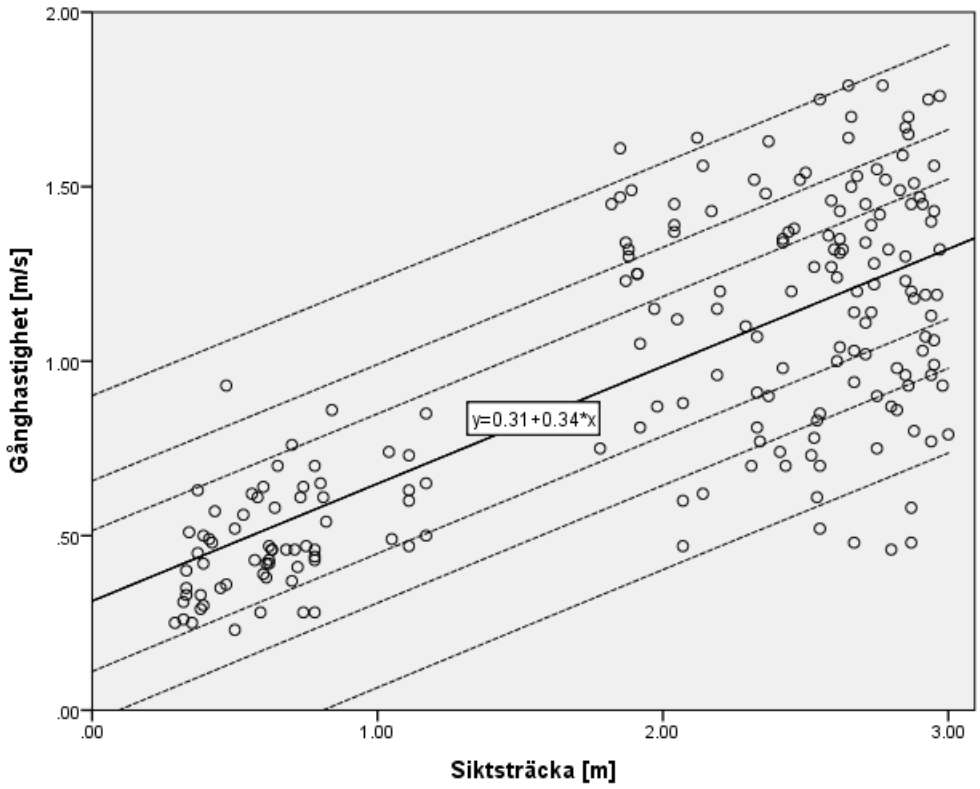


Figur 21. Datamaterialet från de utvalda studierna som faller inom siktnivåintervallet 0 ≤ siktsträcka ≤ 3 meter samt den linjära regressionslinje och dess konfidensintervall som beskriver sambandet mellan genomsnittlig gånghastighet och siktsträcka.

Regressionslinjens konfidensintervall i *Figur 21* kan i sammanhanget sägas beskriva det intervall inom vilket medelvärdet av människors genomsnittliga gånghastighet (med 95 % säkerhet) hade uppmätts om nya försök, identiska med de som redan genomförts, arrangerats. Att prediktera medelvärdet av människors genomsnittliga gånghastighet för en viss siktsträcka är dock inte detsamma som att prediktera en enskild individs genomsnittliga gånghastighet vid motsvarande siktsträcka då det senare

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

är förknippat med en större osäkerhet. Denna osäkerhet kan illustreras med så kallade prognosintervall, vilka redovisas för 50 %, 75 % samt 95 % konfidensgrad i *Figur 22*.



Figur 22. Datamaterialet från de utvalda studierna som faller inom siktnivåintervallet 0 ≤ siktsträcka ≤ 3 meter samt den linjära regressionslinje och dess prognosintervall (50 %, 75 % och 95 %) som beskriver sambandet mellan genomsnittlig gånghastighet och siktsträcka.

4.4 Hantering av osäkerheter

Brandteknisk dimensionering handlar om att hitta en lösning på ett problem som givet de osäkerheter som finns i problemet innebär att lösningen kan godtas. Dimensionering inkluderar alltså hantering av osäkerheter, antingen implicit eller explicit. Den osäkerhet som är förknippad med människors gånghastighet, både i rökfria miljöer och i rökfyllda miljöer, måste hanteras så att den variation som finns i det aktuella scenariot som ska representeras i en beräkning också inkluderas vid valet av indata. Principiellt kan det ske på två sätt; genom val av ett deterministiskt (enskilt) och konservativt värde eller i form av en probabilistisk (statistisk) fördelning av den aktuella variabeln. Oavsett val beskrivs resultatet vanligen deterministiskt, även i det fall indatat till beräkningen definierats probabilistiskt. För att kunna redovisa slutresultatet probabilistiskt är det dock en förutsättning att indatat till beräkningen också definierats på samma sätt.

Eftersom människors gånghastighet varierar inom populationen uppstår frågan om vilken gånghastighet som ska väljas för att vara representativ för det eller de scenarier som studeras inom ramen för personsäkerhetsverifieringen och som samtidigt beaktar de osäkerheter som finns. Utgångspunkten antas vara att det scenario som studeras med rimligt hög tillförlitlighet ska täcka in de utrymningssituationer som vid ett verkligt tillfälle kan tänkas uppstå. Valet av strategi inför beräkningen blir då viktigt och i princip kan två olika angreppssätt användas:

1. Strategi 1: Beräkningen baseras på en enskild individ med en given gånghastighet
2. Strategi 2: Beräkningen baseras på en grupp av individer med olika gånghastigheter

I fallet då beräkningen baseras på en grupp av individer får det antas att gruppens gånghastighet fördelas på ett sådant sätt som kan anses vara representativt för den grupp av individer som

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

personsäkerhetsverifieringen avser. Konsekvensen av ett sådant val är att osäkerheten kopplad till människors gånghastighet explicit beaktas genom valet av indata då variationen mellan långsamma och snabba individer inkluderas i beräkningen. I fallet då beräkningen istället baseras på en enskild individ (eller en grupp av individer med identiska egenskaper) måste osäkerheten kopplad till människors gånghastighet väljas på ett konservativt sätt, det vill säga med utgångspunkt i en för populationen långsam individ. Osäkerheten hanteras då istället implicit genom att individer som i verkligheten går snabbare alltid kommer att ha gynnsammare förutsättningar än det som antagits i beräkningen.

Strategin att utgå från en enskild individ kommer alltid att vara mer ogynnsam eftersom att den utgår från mer konservativa förutsättningar. Fördelen däremot är att beräkningen i många fall kan underlättas. Oavsett valet av strategi kan ett enskilt värde, till exempel en total utrymningstid, presenteras. Därutöver kan valet av strategi 2 möjliggöra för en resultatpresentation i form av en statistisk fördelning.

I en utrymningsberäkning som inkluderar flera individer kommer sannolikt den sista individens utrymningstid att vara relativt oberoende av valet av strategi. Däremot kommer övriga individers beräknade utrymningstider att variera. Om beräkningen baseras på en grupp av individer med olika gånghastigheter förefaller det naturligt att fler individer hinner utrymma innan den långsammaste än i fallet då alla individer antas röra sig med samma gånghastighet. I detta fall spelar det också stor roll var den långsammaste individen rent fysiskt antas vara placerad i beräkningen eftersom att den kan påverka var köbildningar och personflödesbegränsningar kommer att uppstå. Att i en beräkning utgå från en grupp av individer med olika gånghastigheter anses vara det bättre alternativet eftersom att det på ett bättre sätt representerar en verklig situation.

Både strategi 1 och 2 kan användas oavsett vilken övergripande dimensioneringsstrategi som valts, det vill säga om personsäkerhetsverifieringen ingår i en scenarioanalys eller en kvantitativ riskanalys. I scenarioanalysen baseras de dimensionerande förutsättningarna på representativa och konservativa värden. Det är dock inte rimligt att i scenarioanalysen välja all indata som enstaka och konservativa värden eftersom att resultatet då riskerar att bli överdrivet konservativt. Av den anledningen torde individernas gånghastigheter kunna ansättas utifrån en statistisk fördelning av förväntade värden i enlighet med vad som diskuterats ovan.

Sammanfattningsvis dras slutsatsen att ett rimligt förfarande i personsäkerhetsverifieringar med hjälp av beräkningar, i vilka många individer antas ingå, är att basera valet av indata om människors gånghastighet på en fördelning som beskriver gånghastighetens variation. På så vis beaktas den förknippade osäkerheten till variabeln explicit. Om antalet individer antas vara litet är valet av strategi av mindre betydelse, och beräkningen kan baseras på enskild individs gånghastighet som är samma för alla. Samma principiella val kan, som konstaterats ovan, göras även i det fall många individer antas ingå i utrymningsscenariot. Fördelen är att beräkningen blir något enklare, men nackdelen att resultatet blir konservativt. I rekommendationen som presenteras nedan redovisas olika metoder att representera människors gånghastighet i rök, givet de olika grader av osäkerhetshantering som nämnts i detta avsnitt.

4.5 Rekommendation om hur människors gånghastighet kan representeras i den praktiska tillämpningen

Den rekommendation som här presenteras för att representera människors gånghastighet i rök beror på hur explicit osäkerheter hanteras i analysen. Tre olika metoder presenteras. De beskriver hur människors gånghastighet såväl i rökfri som rökfylld miljö kan och bör representeras vid brandteknisk projektering. Skillnaden mellan metoderna kan beskrivas bestå i kvaliteten i beräkningen som ska genomföras. Att tillämpa metod 1 bedöms i jämförelse med metod 3 vara enklare, men leder sannolikt också till ett mer konservativt beräkningsresultat i form av längre utrymningstider. På samma sätt bedöms metod 3 leda till både kortare utrymningstider och en detaljerad beskrivning av det

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

utrymningsförlopp som ska beskrivas i analysen. Däremot medför metod 3 sannolikt längre analystider.

Trots att ingen slutsats har kunnat dras om hur enskilda individer reducerar sin gånghastighet som en funktion av den rådande siktsträckan i en rökfylld miljö rekommenderas reduktionen i samtliga tre metoder ske linjärt i förhållande till respektive individs gånghastighet i rökfri miljö, närmare bestämt parallellt med den regressionslinje som redovisats i *Figur 21* och *Figur 22*. Implicit innebär det att representationen av människors gånghastighet i rök, oavsett metod, kommer att vara beroende av gånghastigheten i rökfri miljö. Med andra ord, en individ som antas röra sig snabbare än en annan individ i rökfri miljö kommer alltid att antas göra det även i en rökfylld miljö. Motivet till detta är att inga andra representationsalternativ bedömts vara mer korrekta i kombination med att de rekommenderade metoderna är förhållandevis lätta att tillämpa i praktiska sammanhang. Därtill antyder resultaten från den studie som genomfördes av Fridolf et al. [26], [38] att reduktionen av människors gånghastighet i rök sker på liknande sett, oavsett om de i rökfri miljö rör sig snabbt eller långsamt. En alternativ metod för att beskriva och representera människors gånghastighet i rök redovisas dock i Bilaga 4: Alternativ metod för att beskriva och representera människors gånghastighet i rök. Den bedöms vara lika tillämplig som den som redovisas i detta avsnitt, men däremot något mer besvärlig att tillämpa i praktiken.

Rent principiellt kan gånghastighetsreduktionen som beskrivs nedan, oavsett metod, betraktas som en fraktionsreduktion av gånghastigheten. Det vill säga att en individs gånghastighet vid en viss siktsträcka kan beskrivas som en fraktion av dennes ohindrade gånghastighet i rökfri miljö. Samtidigt kan konstateras att fraktionen av den ohindrade gånghastigheten för en viss siktsträcka inte kommer att vara densamma för två individer med olika gånghastigheter i rökfri miljö. Därmed kan representationen beskrivas som en blandning av en absolut och en fraktionell reduktion; den är absolut i det avseendet att gånghastighetsreduktionen per meter siktsträcka är lika stor för samtliga individer, och den är fraktionell i det avseendet att gånghastigheten för en viss siktsträcka är beroende av den ohindrade gånghastigheten i rökfri miljö.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

4.5.1 Metod 1: Representationen sker på samma sätt för samtliga individer

I den första metoden kan representationen av människors gånghastighet göras på samma sätt för samtliga individer som ingår i analysen. Det möjliggörs genom att föreliggande osäkerheter hanteras implicit genom val av konservativa värden. Som nämnts ovan är utgångspunkten för metod 1, liksom övriga metoder, att representationen av människors gånghastighet i rök baseras på den regressionslinje som presenterats i *Figur 21* och *Figur 22*. Det innebär närmare bestämt att gånghastighetsreduktionen i rök med siktsträckor mindre än eller lika med tre meter beskrivs som linjärt avtagande med en lutning parallell med regressionslinjens.

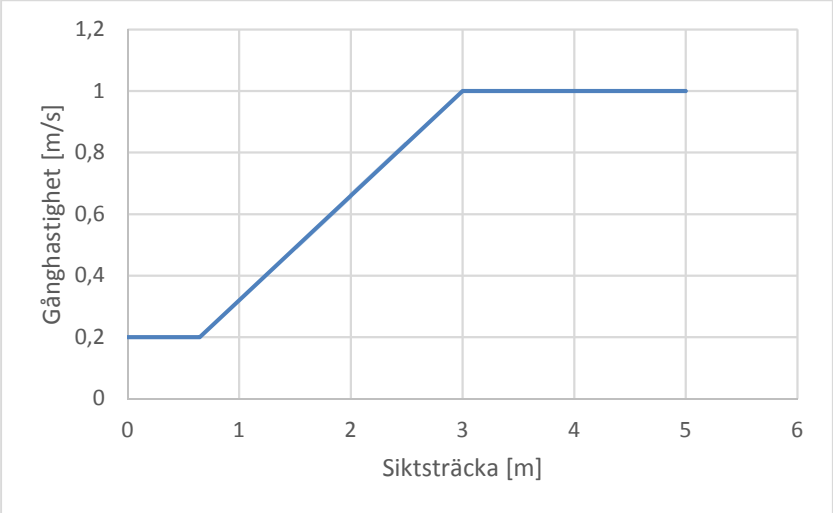
Praktiskt innebär metod 1 att människors gånghastighet i rök kan bestämmas enligt följande princip:

- Gånghastigheten i rökfri miljö, det vill säga vid siktsträckor > 3 meter, representeras av det medelvärde för människors gånghastighet som redovisats av Fruin [50], minus cirka 1,5 standardavvikelser. Det motsvarar ungefär 1 m/s, och innebär att drygt 90 % av osäkerheten förknippad med människors gånghastighet, enligt den aktuella undersökningen, i rökfri miljö täcks in. Med andra ord är det endast cirka 10 % av en population motsvarande den i Fruins [50] undersökning som kan förväntas förflytta sig långsammare i rökfri miljö.
- Gånghastigheten i rökfylld miljö, det vill säga vid siktsträckor $0 \leq$ siktsträcka ≤ 3 meter, representeras av en relativ minskning av gånghastigheten i rökfri miljö med 0,34 m/s per meter siktsträcka, dock till lägst 0,2 m/s.

Sambandet som beskriver människors gånghastighet i såväl rökfri som rökfylld miljö kan då beskrivas med följande ekvation (där v är individens gånghastighet [m/s] och s siktsträckan [m]):

$$v = \min(1; \max(0{,}2; 1 - 0{,}34 * (3 - s)))$$

Konsekvensen av denna rekommendation illustreras grafiskt i *Figur 23*. Det bör noteras att representationen mellan $0 \leq$ siktsträcka ≤ 3 i det här fallet är snarlik den beskrivning som ges av den nedre kurvan i prognosintervallet med 75 % konfidensgrad i *Figur 22*. På ungefär samma sätt som representationen i rökfri miljö beaktas alltså osäkerheten i rökfylld miljö genom att cirka 90 % av människors prognostiserade gånghastighet täcks in.



Figur 23. Rekommenderad representation av människors gånghastighet i rök då representationen sker på samma sätt för samtliga individer.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

4.5.2 Metod 2: Representationen sker på nästan samma sätt för samtliga individer

En alternativ metod för att i större utsträckning beakta föreliggande osäkerheter, utan att för den delen representera varje individs gånghastighet individuellt, är att dela upp representationen i till exempel tre kategorier: medel, långsam och extra långsam. Metoden är avsedd att bättre spegla verkliga förhållanden och inte utgöra en lika konservativ utgångspunkt för en analys som metod 1. Den förutsätter dock att ett antaganden måste göras om hur stor andel respektive kategori ska utgöra i analysen, något som kan variera från verifiering till verifiering. I detta avsnitt beskrivs därför endast praktiskt hur gånghastigheten rekommenderas beskrivas för respektive kategori av människor. Som kan ses är metod 2, med undantag för de specifika värdena, identisk med metod 1.

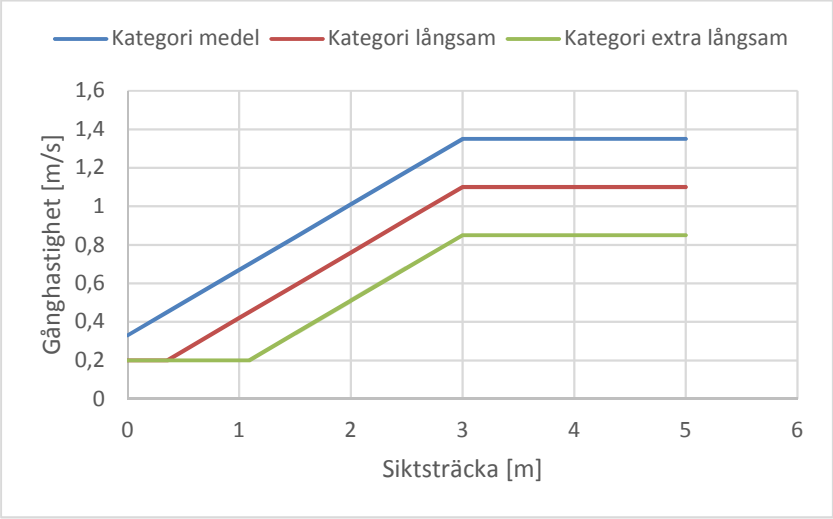
Praktiskt innebär metod 2 att människors gånghastighet i rök kan bestämmas enligt följande princip:

- Gånghastigheten i rökfri miljö, det vill säga vid siktsträckor > 3 meter, representeras av:
  - Kategori medel: det medelvärde för människors gånghastighet som redovisats av Fruin [50], vilket motsvarar 1,35 m/s (cirka 50 % av personerna i undersökningen går snabbare än denna hastighet)
  - Kategori långsam: det medelvärde för människors gånghastighet som redovisats av Fruin [50], minus en standardavvikelse, vilket motsvarar 1,35 – 0,25 = 1,10 m/s (cirka 85 % av personerna i undersökningen går snabbare än denna hastighet)
  - Kategori extra långsam: det medelvärde för människors gånghastighet som redovisats av Fruin [50], minus två standardavvikelser, vilket motsvarar 1,35 – 2* 0,25 = 0,85 m/s (cirka 97,5 % av personerna i undersökningen går snabbare än denna hastighet).
- Gånghastigheten i rökfylld miljö, det vill säga vid siktsträckor 0 ≤ siktsträcka ≤ 3 meter, representeras av en relativ minskning av gånghastigheten i rökfri miljö med 0,34 m/s per meter siktsträcka, dock till lägst 0,2 m/s.

Sambandet som beskriver människors gånghastighet i såväl rökfri som rökfylld miljö kan då beskrivas med följande ekvation (där *v* är individens gånghastighet [m/s] och *s* siktsträckan [m]):

- Kategori medel: $v = \min(1{,}35; \max(0{,}2; 1{,}35 - 0{,}34 * (3 - s)))$
- Kategori långsam: $v = \min(1{,}1; \max(0{,}2; 1{,}1 - 0{,}34 * (3 - s)))$
- Kategori extra långsam: $v = \min(0{,}85; \max(0{,}2; 0{,}85 - 0{,}34 * (3 - s)))$

Konsekvensen av denna rekommendation illustreras grafiskt i *Figur 24*.



Figur 24. Rekommenderad representation av människors gånghastighet i rök då representationen sker på samma sätt för tre kategorier av samtliga individer.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

4.5.3 Metod 3: Representationen sker individuellt

Med metod 1 och 2 föreslås representationen av samtliga individers gånghastighet ske antingen baserat på en, eller tre, linjer. Det oaktat hur många människors gånghastighet som ska representeras. Representationen sker alltså på ett sådant sätt att osäkerheten som är förknippad med människors gånghastighet implicit beaktas genom mer eller mindre konservativa val. Osäkerheten kan även beaktas explicit genom att variationen mellan långsamma och snabba individer inkluderas i beräkningen, vilket utgör metod 3. Denna metod är tänkt att återge en populations förflyttningsegenskaper så realistiskt som möjligt utan att explicit utgå från ett konservativt antagande. Utgångspunkten är att människors gånghastighet i rökfri miljö randomiseras för respektive individ, vilken sedan avtar linjärt precis som i metod 1 och 2.

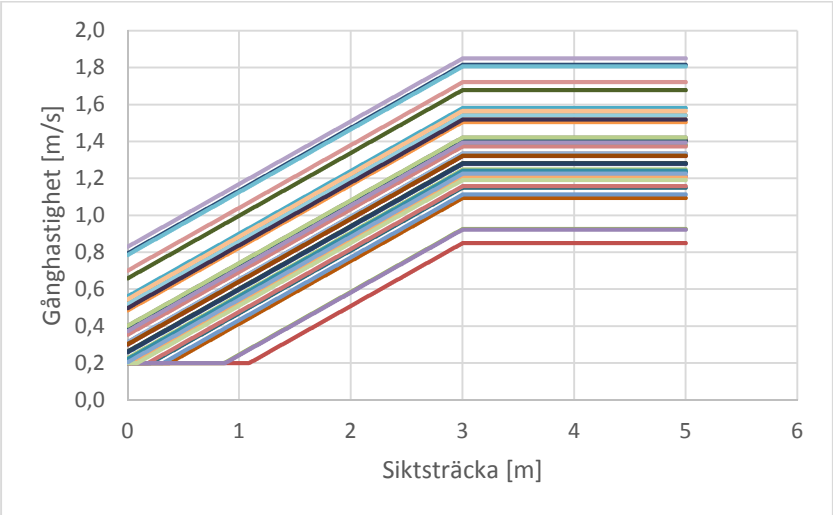
Praktiskt innebär metod 3 att människors gånghastighet i rök kan bestämmas enligt följande princip:

- Respektive individs gånghastighet i rökfri miljö, det vill säga vid siktsträckor > 3 meter, representeras av ett randomiserat värde från en normalfördelningskurva med väntevärde 1,35 m/s och standardavvikelse 0,25 m/s (baserat på Fruin [50]) med minimi- och maximigränserna 0,85 respektive 1,85 m/s.
- Respektive individs gånghastighet i rökfylld miljö, det vill säga vid siktsträckor $0 \leq$ siktsträcka ≤ 3 meter, representeras av en relativ minskning av dennes gånghastighet i rökfri miljö med 0,34 m/s per meter siktsträcka, dock till lägst 0,2 m/s.

Sambandet som beskriver människors gånghastighet i såväl rökfri som rökfylld miljö kan då beskrivas med följande ekvation (där $v_{rökfri}$ är individens gånghastighet i rökfri miljö [m/s] och s siktsträckan [m]):

$$v = \min(v_{rökfri}; \max\left(0{,}2; v_{rökfri} - 0{,}34 * (3 - s)\right))$$

Konsekvensen av denna rekommendation illustreras grafiskt i *Figur 25*. För att kunna visa på hur osäkerhetshanteringen fortplantar sig när metod 3 tillämpas har totalt 40 olika linjer inkluderats.



Figur 25. Exempel på hur representationen av människors gånghastighet i rök kan se ut när representationen sker individuellt.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

5 Diskussion och slutsatser

I denna rapport har en omfattande litteraturgenomgång av det aktuella forskningsläget om människors förflyttning vid utrymning i rökfyllda miljöer presenterats. Genomgången av det aktuella forskningsläget visar att många av de osäkerheter som nämndes i inledningen till denna rapport fortfarande föreligger. En källa till osäkerhet är bland annat den uppenbara bristen på genomförda studier och data om människors gånghastighet i rök. I sammanhanget ska då nämnas att kontakt även tagits med andra forskare inom området som genomfört studier, men att de dessvärre inte velat dela med sig av resultaten från dessa, såvida de inte redan publicerats.

Trots bristen på kunskap om hur enskilda individers gånghastighet i rök påverkas av en viss siktnedsättning har likväl en rekommendation för att representera människors gånghastighet i rök presenterats, vilken hanterar en del av de föreliggande osäkerheterna. Därtill medger rekommendationen en möjlighet att explicit i den praktiska tillämpningen ytterligare hantera de föreliggande osäkerheterna baserat på hur osäkerhetshanteringen sker på en övergripande nivå inom ramen för analysarbetet. Den framtagna rekommendationen kan sägas skilja sig på några viktiga punkter från de angreppssätt som idag vanligen används vid brandteknisk projektering. Bland annat baseras representationen på ett samband som beskriver människors gånghastighet som en funktion av den rådande siktsträckan istället för dämpningskoefficienten. Det är för att det framstår det som troligare att människor faktiskt anpassar sin hastighet utefter vad de kan se i den rökfyllda miljön, oavsett om det är ett ljusemitterande eller reflekterande föremål. Den praktiska betydelsen av ställningstagandet är att människors gånghastighet i rökfria miljöer kommer att representeras av en snabbare hastighet i miljöer som är försedda med en kontinuerlig belysning än miljöer som inte är det, något som också ligger i linje med den genomgångna forskningen. Implicit ökar alltså incitamenten att förse till exempel väg- och järnvägstunnlar med en kontinuerlig belysning eftersom att det ”belönas” i den kvantitativa personsäkerhetsverifieringen som genomförs inom ramen för den brandtekniska projekteringen.

Den föreslagna rekommendationen för att representera människors gånghastighet i rök baseras på den genomförda litteraturgenomgången. Däremot har endast ett urval av de inkluderade studierna ingått som underlag till den. Skälet är att det inte bedömts som möjligt att kombinera samtliga studier bland annat på grund av skillnader i studiernas upplägg, genomförande och dokumentation. De studier som ingått som underlag har dock bedömts ha flera gemensamma nämnare som gör dem jämförbara, bland annat relaterat till tillämpade vetenskapliga metoder, datainsamlingstekniker och miljöer som datamängden samlats in i. I sammanhanget bör det dock noteras att dessa miljöer i huvudsak utgjorts av enkla korridorer och tunnelmiljöer, det vill säga i miljöer där beslut om vägval, med mera, är mycket begränsade. Att tillämpa den rekommendation som föreslås i denna rapport för att representera människors gånghastighet i rökfyllda byggnadsmiljöer, där utrymmande personer måste fatta omfattande vägvalsbeslut, framstår därför inte som särskilt lämpligt. Sannolikt är människors gånghastighet lägre i dessa miljöer när de är rökfyllda, vilket också framgått av den genomgångna litteraturen (se till exempel försöket som beskrivs av Jensen et al. [43], [44]).

I utvecklingen av rekommendationen för att representera människors gånghastighet i rök har ett principiellt ställningstagande tagits om hur respektive individs gånghastighet ska antas variera med siktsträckan. Enligt vad som nämndes i bakgrunden till denna rapport är det inte ovanligt att olika beräkningsmodeller idag antar att människors gånghastighet vid olika siktsträckor kan beräknas som en fraktion av en ohindrad gånghastighet. Trots att ingen slutsats har kunnat dras om hur enskilda individer reducerar sin gånghastighet som en funktion av den rådande siktsträckan i en rökfylld miljö rekommenderas reduktionen i den föreslagna rekommendationen ske linjärt i förhållande till respektive individs gånghastighet i rökfri miljö. Implicit innebär det att representationen av människors gånghastighet i rök kommer att antas vara beroende av gånghastigheten i rökfri miljö. Principiellt kan gånghastighetsreduktionen då betraktas som en fraktionsreduktion av gånghastigheten. Det vill säga att en individs gånghastighet vid en viss siktsträcka kan beskrivas som en fraktion av dennes ohindrade gånghastighet i rökfri miljö. Samtidigt kan konstateras att fraktionen av den ohindrade gånghastigheten för en viss siktsträcka inte kommer att vara densamma för två individer

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

med olika gånghastigheter i rökfri miljö. Därmed kan representationen beskrivas som en blandning av en absolut och en fraktionell reduktion; den är absolut i det avseendet att gånghastighetsreduktionen per meter siktsträcka är lika stor för samtliga individer, och den är fraktionell i det avseendet att gånghastigheten för en viss siktsträcka är beroende av den ohindrade gånghastigheten i rökfri miljö. Motivet till valet är bland annat att inga andra representationsalternativ bedömts vara mer korrekta i kombination med att rekommendationen är förhållandevis lätt att tillämpa i praktiska sammanhang. Det ska också noteras att gånghastigheten i den föreslagna rekommendationen representeras som en individuell, genomsnittlig gånghastighet som inkluderar pauser. Det innebär att den datamängd som använts som underlag för sambandet är baserad på mätdata i vilken människors gånghastighet uppmätts på den kortaste vägen mellan två punkter A och B i ett försök, inklusive pauser. Implicit är alltså den tid människor stannar vid utrymning i rökfyllda miljöer, till exempel för att fatta ett beslut, inbakade i gånghastighetsbegreppet såsom det tillämpas i metoden. Detta bedöms som fördelaktigt då dagens hand- och datorberäkningsmodeller för utrymning endast i undantagsfall inkluderar den typen av beteendeaspekter på egen hand.

En uppenbar brist med den framtagna rekommendationen är att den är baserad på data från försök som genomförts i miljöer med icke-irriterande rök. En grundläggande fråga är alltså hur tillämplig den är i sammanhang där människors gånghastighet i riktiga brandutsatta miljöer ska uppskattas. Problemet är att resultaten i genomgångna litteraturen inte svarar på detta. Jin [14], [33], [34] är egentligen den enda som exponerat försökspersoner för irriterande rök samtidigt som deras gånghastighet dokumenterats, och den slutsats som kan dras baserat på hans försök är att den uppmätta gånghastigheten är ungefär likvärdig för de fall försökspersonerna utsattes för irriterande rök som för icke-irriterande rök. Tydligt är dock att spridningen, det vill säga variationen, mellan olika människors gånghastighet är stor.

För att bedöma tillämpligheten av den föreslagna rekommendationen kan, som komplement till tidigare genomförda studier, en jämförelse göras mot inträffade bränder. Ett sådant exempel utgörs av branden i Gudvangatunneln i Norge år 2013, i vilken en brand inträffade i en lastbil med omfattande rökspridning som följd [51]. Vittnesmål från både utrymmande och räddningstjänstens personal gör gällande att sikten var väldigt dålig, och att siktsträckan på vissa platser varierade mellan 0-2 meter. Samtidigt visar olycksutredningen att de utrymmande, som i vissa fall utrymt i mellan 30 till 90 minuter, gjort det med en genomsnittlig gånghastighet motsvarande 5 km/h, alltså 1,4 m/s. Det rapporteras till exempel om en familj bestående av två vuxna och ett 10 år gammalt barn som utrymt en sträcka motsvarande cirka 8 km på 90 minuter. Visserligen är uppgifter från inträffade bränder ofta är förknippade med stora osäkerheter, i synnerhet när det kommer till tidsbedömning av när olika händelser inträffat. Likväl tyder information från olycksutredningen av branden i Gudvangatunneln i Norge år 2013 dels på att människor möjligen rör sig fortare än vad som tidigare vanligen antagits inom ramen för brandtekniska personsäkerhetsverifieringar, dels på att det samband som ligger till grund för metoden som föreslås i denna rapport är tillämpbar, även för fall med riktig brandrök. Återigen är det viktigt att poängtera att det i huvudsak gäller för tunnelmiljöer. En förklaring till de relativt höga gånghastigheterna som observerades i Gudvangatunneln skulle till exempel kunna vara att de irriterande effekterna av brandgaserna begränsades till följd av den stora luftvolym över vilka de blandades ut samt den aktuella brandeffekten. Det är till exempel troligare att en brand i ett mindre utrymme, såsom en lägenhet, i större utsträckning än i en tunnel irriterar en människas ögon, näsa och hals på grund av att brandgaserna sprids över en mycket begränsad luftvolym.

5.1 Framtida forskning

Enligt vad som nämndes ovan illustrerar genomgången av det aktuella forskningsläget att många av de osäkerheter som nämndes i inledningen till denna rapport fortfarande föreligger, inte minst på grund av bristen på genomförda studier om människors gånghastighet i rök. Därtill har de empiriska försök som genomförts i princip uteslutande endast undersökt hur snabbt en individ, inte flera, rör sig vid en viss siktsträcka. Baserat på underlaget går det alltså bara att dra generella slutsatser om att en viss person som exponeras för mycket dålig sikt generellt rör sig långsammare än en annan person som exponeras för en bättre siktsträcka. Framtida forskning inom området borde därför inkludera empiriska studier i vilka försökspersonerna exponeras för flera olika siktsträckor samtidigt som deras beteende

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

och förflyttning dokumenteras. Lämpligen genomförs sådana studier i siktsträckintervall motsvarande det som använts som underlag för den kvantitative rekommendationen i denna handling, det vill säga mellan 0-3 meters sikt. Därtill bör samma försökspersoners gånghastighet även dokumenteras i rökfri miljö. Dataunderlaget från sådana empiriska undersökningar skulle då kunna svara på huruvida människors gånghastighet i rök lämpligen representeras som en fraktion av en ohindrad gånghastighet, eller absolut. Därtill skulle dataunderlaget kunna användas för att dra säkrare slutsatser om vid vilken siktsträcka människor börjar reducera sin gånghastighet samt huruvida detta sker vid olika siktsträckor för olika personer, till exempel på grund av ålder, mörkerseende, funktionsnedsättning, etcetera.

Ett annat område som framtida forskning borde inriktas mot är att kvantifieringen av olika påverkansfaktorer på människors beteende i allmänhet, och gånghastighet i synnerhet. En svaghet med den rekommendation som presenteras inom ramen för denna rapport är till exempel att den baseras på data från försök i miljöer med konstgjord, icke-irriterande rök. Även om jämförelsen med en tidigare inträffad tunnelbrand tyder på att den trots allt är tillämpbar så måste försök genomföras för att effekten av irriterande brandgaser ska kunna kvantifieras. Forskningsetiska principer gör det dock etiskt ohållbart att genomföra den typen av forskning, eftersom att de deltagande försökspersonerna skulle exponeras för potentiellt skadliga miljöer. En första inventerande studie skulle därför kunna genomföras för att undersöka vad som rent praktiskt går att genomföra inom ramen för gällande forskningsetiska ramverk.

Andra påverkansfaktorer som kan tänkas påverka människors gånghastighet, men där forskning idag saknas, är olika tekniska hjälpmedel, såsom handledare och belysning. Baserat på genomgången av kunskapsläget är det tydligt att sådana installationer har en positiv effekt på utrymningsförloppet. Problemet är att den idag endast går att uttrycka kvalitativt, vilket också gör det svårt att räkna med den i en kvantitativ personsäkerhetsverifiering. Hur mycket snabbare går det till exempel om människor har en handledare de kan följa till en utrymningsväg, istället för en grov tunnelvägg?

I genomgången av kunskapsläget är det också uppenbart att nästan inga studier försökt utröna hur människors förflyttning påverkas av andra människor i rökfyllda miljöer. Det är välkänt att människors gånghastighet i rökfri miljö i mycket stor utsträckning påverkas av den så kallade persontätheten [52], vilket vanligen uttrycks som antalet personer per ytenhet. Tidigare genomförda studier har till exempel visat på att människors gånghastighet i rökfri miljö är förhållandevis konstant till dess att tätheten överstiger ca 0,5 personer/m^2. Därefter avtar den med ökande persontäthet, vilket är en följd av att personerna får svårare att röra sig ohindrat. Hur detta samband ser ut i rökfyllda miljöer är idag okänt, men situationen är likväl sannolik att uppstå i till exempel personsäkerhetsverifieringar som görs i för spårtunnlar där ett stort antal personer kan antas utrymma ett tåg på en gångbana med begränsad bredd. Framtida forskning borde därför titta närmare på vad som dimensionerar vad i en rökfylld miljö, och vilken oberoende variabel som har störst påverkan på människors gånghastighet.

Enligt vad som nämnts på ett par platser i den här rapporten är mycket av materialet i huvudsak tillämpbart för förhållandevis enkla miljöer, såsom korridorer och tunnlar. Med det avses miljöer som en utrymmande personer relativt lätt bekantar sig med, och där begränsad tid måste läggas på att ta beslut om vägval med mera, därmed inte sagt att utrymning i den här typen av miljöer i övrigt är okomplicerad eller lätt. Ett annat område för framtida forskning är därför att titta närmare på de eventuella skillnader som är aktuella vid utrymning i byggnader med flera vägval, möbler, trapphus, etcetera.

5.2 Slutsatser

Syftet med den här förstudien har varit att inventera, undersöka och redogöra för aktuellt forskningsläge om människors förflyttning vid utrymning i rökfyllda miljöer. För att uppfylla syftet har en omfattande litteraturgenomgång av det aktuella kunskapsläget genomförts, vilken har redovisats i denna rapport både med avseende på kvalitativa och kvantitativa aspekter. Genomgången har även

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

legat till grund för en kvantitativ rekommendation om hur människors gånghastighet kan och bör representeras i rökfyllda miljöer.

Slutsatsen är alltså att det trots föreliggande osäkerheter är möjligt att representera människors gånghastighet genom att på olika sätt i den brandtekniska projekteringen beakta dessa osäkerheter. Om till exempel representationen av människors gånghastighet sker på samma sätt för samtliga individer i en beräkning rekommenderas att gånghastigheten för siktsträckor > 3 meter representeras av en gånghastighet som täcker in drygt 90 % av osäkerheten förknippad med människors gånghastighet i rökfri miljö, närmare bestämt 1 m/s. Med andra ord är det endast cirka 10 % som kan förväntas förflytta sig långsammare. För siktsträckor lägre än detta föreslås gånghastigheten representeras av en relativ minskning av gånghastigheten i rökfri miljö med 0,34 m/s per meter siktsträcka, dock till lägst 0,2 m/s. En alternativ metod för att i större utsträckning beakta föreliggande osäkerheter, utan att för den delen representera varje individs gånghastighet individuellt, är att dela upp representationen i till exempel tre kategorier: medel, långsam och extra långsam. Gånghastigheten i rökfri miljö representeras då av ett representativt medelvärde för kategori medel, och lägre hastigheter för övriga kategorier. Representationen i rökfylld miljö rekommenderas sedan ske på samma sätt som för det fall då representationen sker på samma sätt för samtliga individer. I det fall rekommendationen istället sker individuellt rekommenderas gånghastigheten i rökfri miljö representeras av ett randomiserat värde från en normalfördelningskurva som beskriver människors gånghastighet i rökfri miljö, och reduktionen i rökfylld miljö rekommenderas sedan ske på samma sätt som med övriga metoder.

Utöver den kvantitativa rekommendationen har en inriktning för framtida forskning och uppläggning av studier föreslagits för att minska de föreliggande osäkerheterna förknippade med beskrivningen av människors gånghastighet i rök. Särskilt angeläget framstår behovet av att genomföra nya empiriska studier i vilka försökspersoner exponeras för flera olika siktsträckor samtidigt som deras beteende och förflyttning dokumenteras. Dataunderlaget från sådana empiriska undersökningar skulle då kunna svara på huruvida människors gånghastighet i rök lämpligen representeras som en fraktion av en ohindrad gånghastighet, eller absolut.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

6 Referenser

[1] B. J. Meacham, “The Evolution of Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods,” National Institute of Standards and Tehcnology, Gaithersburg, USA, Report, 1996.

[2] B. J. Meacham and R. L. P. Custer, “Performance-Based Fire Safety Engineering: an Introduction of Basic Concepts,” *J. Fire Prot. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 35–53, 1995.

[3] Banverket, “Personsäkerhet i järnvägstunnlar: Handbok för analys och värdering av personsäkerhet i järnvägstunnlar,” Banverket, Borlänge, Report, 2007.

[4] G. Proulx, “Evacuation Time,” in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fourth., P. J. DiNenno, Ed. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008, pp. 3–372.

[5] D. Purser, “Hazards from toxicity and heat in fires.” Hartford Environmental Research, Hartford, 2009.

[6] D. Purser, “Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat,” in *The SFPE Hanbook of Fire Protection Engineering*, 4th ed., P. J. DiNenno, Ed. Quincy: National Fire Protection Association, 2008.

[7] R. Fahy and G. Proulx, “Toward creating a database on delay times to start evacuation and walking speeds for use in evacuation modeling,” in *Second International Symposium on Human Behaviour in Fire*, London: Interscience communications, 2001, pp. 175–183.

[8] S. M. V Gwynne and K. E. Boyce, “Engineering Data,” in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, vol. III, M. J. Hurley, Ed. London: Springer, 2016.

[9] J. Bryan, “Smoke as a Determinant of Human Behaviour in Fire Situations.” University of Maryland, College Park, 1977.

[10] P. G. Wood, “The Behaviour of People in Fires.” Fire Research Station, 1972.

[11] G. Proulx and R. F. Fahy, “Human Behavior and Evacuation Movement in Smoke,” *ASHRAE Trans.*, vol. 14, pp. 159–165, 2008.

[12] Trafikverket, “TRVR Tunnel 11: Trafikverkets tekniska råd Tunnel,” Trafikverket, Borlänge, Report, 2011.

[13] Trafikverket, “TRVK Tunnel 11: Trafikverkets tekniska krav Tunnel,” Trafikverket, Borlänge, Report, 2011.

[14] T. Jin, “Visibility through Fire Smoke,” *J. Fire Flammabl.*, vol. 9, no. 2, pp. 135–155, 1978.

[15] T. Jin, “Studies of Emotional Instability in Smoke from Fires,” *J. Fire Flammabl.*, vol. 12, pp. 130–142, 1981.

[16] T. Jin and T. Yamada, “Experimental Study of Human Behavior in Smoke Filled Corridors,” *Fire Saf. Sci.*, vol. 2, pp. 511–519, 1989.

[17] D. Nilsson and G. Holmstedt, “Kompendium i Aktiva system - Detektion,” Lunds universitet, Lund, Report, 2008.

[18] A. W. Heskestad and K. Schmidt Pedersen, “Escape Through Smoke: Assessment of Human Behaviour and Performance of Wayguidance Systems,” *the First International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Ulster, pp. 631–638, 1998.

[19] A. W. Heskestad, “Performance in Smoke of Wayguidance Systems,” *Fire Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 375–381, 1999.

[20] M. Wright, G. Cook, and G. Webber, “The Effects of Smoke on People’s Walking Speeds Using Overhead Lighting and Wayduidance Provision,” *second International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Ulster, pp. 275–284, 2001.

[21] Y. Akizuki, K. Yamao, and T. Tanaka, “Experimental Study On Walking Speed In Escape Route Considering Luminous Condition, Smoke Density And Evacuee’s Visual Acuity,” *seventh Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. International Association for Fire Safety Science, Hong Kong, 2007.

[22] H. Xie, L. Filippidis, E. Galea, D. Blackshields, and P. Lawrence, “Experimental study of the effectiveness of emergency signage,” in *fourth International*

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Symposium on Human Behaviour in Fire, 2009, pp. 289–300.
[23] H. Frantzich and D. Nilsson, “Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning,” Lunds universitet, Lund, Report, 2003.
[24] H. Frantzich, “Utrymning av tunnelbanetåg: Experimentell utvärdering av möjligheten att utrymma i spårtunnel,” Statens räddningsverk, Karlstad, Report, 2000.
[25] H. Frantzich and D. Nilsson, “Evacuation Experiments in a Smoke Filled Tunnel,” in *Third International Symposium on Human Behaviour in Fire*, London: Interscience communications, 2004, pp. 229–238.
[26] K. Fridolf and H. Frantzich, “Test av vägledande system i en tunnel,” Lunds universitet, Lund, Report, 2015.
[27] K. Fridolf, E. Ronchi, D. Nilsson, and H. Frantzich, “Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels,” *Fire Saf. J.*, vol. 59, pp. 8–21, 2013.
[28] T. Paulsen, “The Effect of Escape Route Lnforemation on Mobility and Way Finding Under Smoke Logged Conditions,” *Fire Saf. Sci.*, vol. 4, pp. 693–704, 1994.
[29] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
[30] FUT, “Anvisning för utrymningsberäkningar i spårtunnel (1352-P11-47-00001, rev A),” Stockholm, 2016.
[31] E. Ronchi, P. Colonna, S. Gwynne, and D. Purser, “Representation of the Impact of Smoke on Agent Walking Speeds in Evacuation Models,” *Fire Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 411–431, 2013.
[32] D. Purser and J. McAllister, “Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat,” in *The SFPE Hanbook of Fire Protection Engineering*, Springer, 2016, pp. 2308–2428.
[33] T. Jin, “Visibility through Fire Smoke.” Report of Fire Research Institute of Japan, pp. 12–18, 1976.
[34] T. Jin, “Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke,” *Fire Saf. Sci.*, vol. 5, pp. 3–21, 1997.
[35] K. Fridolf, “Evacuation of a Smoke Filled Tunnel: Human Behaviour, Movement Speed and Exit Choice,” Lund University, Lund, Report, 2013.
[36] K. Fridolf, K. Andrée, D. Nilsson, and H. Frantzich, “The impact of smoke on walking speed,” *Fire Mater.*, vol. 38, no. 7, pp. 744–759, 2014.
[37] K. Fridolf, “Rail Tunnel Evacuation,” PhD Thesis, Lund University, Lund, 2015.
[38] K. Fridolf, H. Frantzich, E. Ronchi, and D. Nilsson, “The relationship between obstructed and unobstructed walking speed: Results from an evacuation experiment in a smoke filled tunnel,” *6th International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Interscience Communications Ltd, Cambridge, UK, pp. 537–548, 2015.
[39] K. Fujii, T. Sano, and Y. Ohmiya, “Effect of Emergency Sign and Illumination on Walking Speed in Smoke-Filled Corridor,” in *6th International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 2015, pp. 561–571.
[40] P. R. Boyce, “Movement under emergency lighting: the effect of illuminance,” *Light. Res. Technol.*, vol. 17, no. 2, pp. 51–71, 1985.
[41] E. W. Janse, P. H. E. van de Leur, and N. J. van Oerlo, “Evacuation from smoke filled corridors,” *the First International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Ulster, pp. 639–648, 1998.
[42] L. C. Boer and D. J. Withingtong, “Auditory guidance in a smoke-filled tunnel,” *Ergonomics*, vol. 47, no. 10, pp. 1131–1140, 2004.
[43] G. Jensen, “Römming i röyk: Fullskala test av ledesystemer, personlig röykvern og atferd,” IGP AS, Trondheim, Report, 1993.
[44] G. Jensen, “Evacuating in Smoke: Full Scale Tests on Emergency Egress Information Systems and Human Behaviour in Smoky Conditions,” IGP AS, Trondheim, Norway, Report, 1993.
[45] T. Paulsen, “Eksperimentell utprövning av evakueringssystemer,” SINTEF

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Sikkerhet og pålitelighet, Trondheim, Report, 1993.
[46] T. Jin and T. Yamada, “Experimental Study on Human Emotional Instability in Smoke Filled Corridor: Part 2,” *J. Fire Sci.*, vol. 8, pp. 124–134, 1990.
[47] A. Tanaka, H. Imaizumi, S. Takahashi, T. Komai, and T. Isei, “Evacuation from Underground Opening Space to Surface: Effect of Smoke,” *Seventh International Fire Science and Engineering Conference*. Interscience Communications Ltd., Cambridge, UK, pp. 753–762, 1996.
[48] M. Seike, N. Kawabata, and M. Hasegawa, “Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 53, pp. 61–67, 2016.
[49] T. Jin, “Visibility and Human Behavior in Fire Smoke,” in *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fourth., P. J. DiNenno, Ed. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2008.
[50] J. Fruin, *Pedestrian planning and design*. New York: Metropolitan association of urban designers and environmental planners, 1971.
[51] AIBN, “Report on Fire in a Heavy Goods Vehicle in the Gudvanga Tunnel on the E16 Road in Aurland on 5 August 2013,” Lilleström, 2015.
[52] S. Gwynne and E. Rosenbaum, “Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement,” in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 5th ed., M. Hurley, Ed. Society of Fire Protection Engineers, 2016, pp. 2115–2151.
[53] G. Y. Jeon, J. Y. Kim, W. H. Hong, and G. Augenbroe, “Evacuation performance of individuals in different visibility conditions,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 5, pp. 1094–1103, 2011.
[54] J. Nersveen, “A Method of Calculating Visibility in Smoke,” IGP AS, Trondheim, Norway, Report, 1994.
[55] T. Jin and T. Yamada, “Experimental Study On Effect Of Escape Guidance In Fire Smoke By Travelling Flashing Of Light Sources,” in *fourth International Symposium on Fire Safety Science, IAFSS 2008*, 1994, pp. 705–714.
[56] T. Rinne, T. Kling, P. Grönberg, and T. Korhonen, *Mitoittavat tilanteet tulipalon aikaisessa poistumisessa Kokeellinen tutkimus*. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2012.
[57] T. Rinne, T. Korhonen, and P. Grönberg, “Bottlenecks in Evacuation Design Considering Both Structural and Human Behavioural Aspects: An Experimental Study,” in *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, U. Weidmann, U. Kirsch, and M. Schreckenberg, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 179–187.
[58] R. Y. Guo, H. J. Huang, and S. C. Wong, “Route choice in pedestrian evacuation under conditions of good and zero visibility: Experimental and simulation results,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 46, no. 6, pp. 669–686, 2012.
[59] M. Isobe, D. Helbing, and T. Nagatani, “Experiment, theory, and simulation of the evacuation of a room without visibility,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 69, no. 6 2, pp. 1–10, 2004.
[60] R. A. Kady and J. Davis, “The effect of occupant characteristics on crawling speed in evacuation,” *Fire Saf. J.*, vol. 44, no. 4, pp. 451–457, 2009.
[61] R. Nagai, M. Fukamachi, and T. Nagatani, “Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 367, pp. 449–460, 2006.
[62] G.-Y. Jeon and W.-H. Hong, “An experimental study on how phosphorescent guidance equipment influences on evacuation in impaired visibility,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 6, pp. 934–942, Nov. 2009.
[63] H. Xie, “Investigation into the Interaction of People with Signage Systems and its implementation within Evacuation Models.” University of Greenwich, 2011.
[64] T. Jin and T. Yamada, “Irritating effects of fire smoke on visibility,” *Fire Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 79–90, 1985.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

7 Bilaga 1: Dämpningskoefficient och beräkning av siktsträcka

Det finns olika metoder för att beräkna dämpningskoefficienten, men vanligen används följande ekvation som baseras på den naturliga logaritmen (där C_s [m^{-1}] är dämpningskoefficienten, D [m] är avståndet som ljuset färdas, I är ljusets intensitet på efter att det passerat brandgaserna och I_0 är ljusets intensitet vid ljuskällan) [49]:

$$C_s = -\left(\frac{1}{D}\right) \cdot ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Kopplingen mellan dämpningskoefficient och siktsträcka innebär att siktsträckan V [m] approximativt kan uppskattas som [49]:

$$V = \frac{2}{C_s} \sim \frac{4}{C_s} \text{ till reflekterande föremål, och}$$
$$V = \frac{5}{C_s} \sim \frac{10}{C_s} \text{ till ljusemitterande föremål.}$$

Det matematiska sambandet innebär således en negativ korrelation mellan dämpningskoefficienten och siktsträckan, det vill säga att siktsträckan minskar med ökad dämpningskoefficient. Dämpningskoefficient kan dock även beräknas med andra metoder. I Europa användes till exempel tidigare en definition som baserades på tiologaritmen som bas istället för den naturliga logaritmen. Dämpningskoefficienten uttrycks då med enheten dB/m som även brukar kallas Obscura (Ob). Som Nilsson och Holmstedt [17] konstaterar kan de olika metoderna att beskriva dämpningskoefficienten på leda till viss förvirring. Genom att utnyttja matematiska logaritmregler går det dock att visa hur dämpningskoefficienten uttryckt i en viss enhet går att uttrycka i en annan enhet.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

8 Bilaga 2: Sammanställning av studier

I det här avsnittet presenteras sammanfattningarna av de granskade publikationerna om människors förflyttning i rökfyllda miljöer som inkluderats i förstudien. Varje försök/studie sammanfattas under en egen rubrik, och i de fall flera publikationer avhandlat samma försök/studie anges samtliga referenser. Innehållet i varje text inkluderar en kort introducerande beskrivning av studien innehållandes information om bland annat syftet med studien, eventuella försökspersoner och i vilken miljö den utfördes (om det var ett försök med människor som försökspersoner), vilka förhållanden som rådde i den miljön i allmänhet under försöket, hur försöket gick till, vilka datainsamlingstekniker som användes och hur resultatet från studien presenterats. Till varje studie finns även en matris som beskriver studien utifrån ett antal viktiga parametrar, vilka definierades i förstudiens första fas (se Bilaga 3: Bedömningsmall). Matriserna redovisas av praktiska skäl dock i ett separat kalkylblad.

Det bör noteras att endast de publikationer som bedömts tillföra något till förstudien inkluderats nedan. Ett antal ytterligare publikationer studerades under förstudiens första fas men avfärdades antingen på grund av att de inte ansågs relevanta för förstudien, eller på grund av rent vetenskapsmetodologiska grunder (en lista på dessa studier presenteras i slutet av denna bilaga, se *Tabell 4*). Exempel på vetenskapliga grunder är tillämpandet av en olämplig forskningsmetod, det vill säga det rent praktiska tillvägagångssättet för att studera ett problem. Ett annat exempel är tillämpandet av en olämplig datainsamlingsteknik, det vill säga tekniken för att samla in information om ett problem. Tillämpandet av olämpliga forskningsmetoder eller datainsamlingstekniker kan få stora konsekvenser för en studies validitet och tillförlitlighet, och det resultat som presenteras från en sådan studie bör betraktas med stor försiktighet.

Ett praktiskt exempel på en typ av studie som efter en inledande genomläsning inte inkluderats inom ramen för denna förstudie är empiriska försök som genomförts i uppställningar där forskare försökt att simulera en rökfyllda miljö med hjälp av filter eller glasögon som placeras framför ögonen. I ett sådant fall har till exempel en typ av mask som bara släpper igenom en viss andel av omgivningsljuset använts [53]. Ansvariga forskare gör i den studien ett försök att uppskatta vad en dämpning av ljusintensiteten orsakad av filtret motsvarar i termer av en dämpningskoefficient eller siktsträcka. Problemet är dock att det ur ett beteende och förflyttningsperspektiv föreligger en skillnad i hur människor upplever ett filter framför ögonen och en rökfylld miljö. Principiellt kan en rökfylld miljö liknas vid en situation med många filter placerade mer jämna mellanrum mellan försökspersonen och det objekt som försökspersonen observerar. Om objektet till exempel finns nära försökspersonen kan det liknas vid att det är få filter mellan försökspersonen och objektet. Är avståndet däremot långt kan det liknas vid att det är många filter mellan försökspersonen och objektet. Dämpningen av ljuset är därför inte samma för objekt placerade på olika avstånd, vilket är just det antagande som görs om en rökfylld miljö ersätts med ett filter eller par glasögon framför ögonen. Därmed bedöms metoden inte som tillämpbar om människors gånghastighet i rök ska undersökas, primärt för att den sannolikt ger upphov till stora felkällor i resultatpresentationen.

8.1 Jin [14], [33], [34]

I en serie publikationer beskrivs ett av de mest citerade försöken som handlar om människors förflyttning i rökfyllda miljöer, nämligen ett försök som genomfördes på 1970-talet i Japan. Det övergripande syftet uppges ha varit att identifiera ett acceptanskriterium avseende siktsträcka, något som på den tiden inte existerade. Detta uppnås implicit genom att dels studera på vilket avstånd en utrymningsskylt blir synbar för utrymmande individer vid olika röktätheter, men också genom att studera när röken blir så tät att dessa individers gånghastighet påverkas. Totalt ingick tio försökspersoner i försöket, samtliga män, vars ålder varierade mellan 23 till 37 år. Någon ytterligare information om dessa tio försökspersoner finns ej att tillgå.

Försöket genomfördes i en 20 m lång korridor, som under försöket fylldes med två olika typer av rök. Dels användes en rök som framställts genom förbränning av träribbstaplar, dels användes en rök som framställts genom förbränning av fotogen. Det framgår även att belysningsnivån varierats i två lägen. I det ena fallet ska endast en utrymningsskylt i slutet av tunneln varit belyst och i det andra fallet ska

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

korridoren varit upplyst i sin helhet. Däremot saknas en beskrivning av rådande belysningsnivåer under försöket, liksom hur typen av rök och belysningsnivåerna kombinerats. Det mest sannolika är att samtliga fyra scenarier ingått i studien.

Försökspersonerna deltog individuellt i försöket, och instruerades att gå från den ena änden i korridoren till den andra samtidigt som de angav när de kunde se den installerade utrymningsskylten i slutet av tunneln. Under förflyttningen höll de i en kabel som monterats runt ett stort hjul. Med hjälp av information om hjulets rotationshastighet kunde alltså försökspersonernas gånghastighet utvärderas. Under försöket utvärderades röktätheten med hjälp av två så kallade röktäthetsmätare bestående av någon form av ljusinstallation. Det förklaras att dämpningen av ljuset i den ena mättes över ett avstånd på fyra meter, och över ett avstånd på en meter i den andra. I båda fallen anges att mätningen skett 1,5 meter över marken och att de två röktäthetsmätarna placerats på ”lämpligt horisontellt” avstånd från varandra.

Beskrivningen av hur många gånger respektive försöksperson deltog i försöket är inte fullständig, inte heller hur analysen av såväl gånghastigheter som röktätheter skedde. I en grovkornig figur som redovisas i publikationerna, och som även reproducerats på andra håll [49], uppgår antalet datapunkter till 38 st. Det skulle kunna innebära att varje försöksperson deltog totalt fyra gånger, det vill säga en gång per scenario, men slutsatsen bör betraktas som högst osäker. Resultatet avseende gånghastigheter presenteras hursomhelst på individnivå, där respektive individs gånghastighet går att utläsa som en funktion av den rådande dämpningskoefficienten. Sammanfattningsvis konstateras att de redovisade gånghastigheterna då varierat mellan 0,3-1 m/s över dämpningskoefficientintervallet ca 0,3-1,2 m^{-1}. Gånghastigheterna antas vara beräknade som den kortaste sträckan mellan start och slut dividerat med den totala tiden det tog respektive försöksperson att röra sig mellan dessa punkter, det vill säga inkluderat eventuella pauser. Därutöver dras följande slutsatser baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- I publikationerna antyds en tydlig trend mellan gånghastighet och röktäthet, det vill säga siktsträcka. Det bör dock uppmärksammas att trenden är framtagen för ett mycket kort siktintervall.
- Författarna jämför förflyttning i dålig sikt med att röra sig i fullständigt mörker (med gånghastigheter varierandes mellan 0,3-0,7 m/s), och refererar till en annan (ej inkluderad) studie som undersökt detta fenomen.
- Avseende de två olika belysningsnivåerna som testades anger författarna att inga större skillnader kunde observeras. De skillnader i gånghastighet som konstaterades anges istället ha berott på typen av rök.
- I försöket utnyttjades i många fall korridorens väggar under förflyttningen på så sätt att försökspersonernas händer följde korridorens väggar. Författarna drar därmed slutsatsen att gånghastigheten i stor utsträckning kommer att bero på väggens utseende/formation, och hur respektive individ utnyttjar den, snarare än skillnader i röktätheten (när sikten är allmänt dålig).

8.2 Jin [15]

Hur människor påverkas av rök har inte bara analyserats med avseende på gånghastighet, utan också med avseende på emotionell stabilitet och kognitiv förmåga. Ett av de första försöken av den senare typen syftade till att undersöka hur människor reagerade emotionellt när de satt i ett försöksrum som sakta fylldes med rök. Totalt deltog 49 försökspersoner i detta försök, varav en 24 personer bestod av manliga forskare vid *Fire Research Institute* i Tokyo och övriga 25 bestod av människor som rekryterats från allmänheten, i huvudsak hemmafruar i Japan. Det kan dock noteras att det i den senare gruppen ingick totalt fyra barn i åldern 10-11 år.

Försöket genomfördes i ett särskilt rum med dimensionerna 4 x 5 m (b x d) utan fönster. Ljusnivån var ca 30 lux i början av varje försök, som då gradvis började fyllas med rök som genererades genom förbränning av träflisor i en särskild ugn. Röktätheten uppges ha ökat med ca 0,1 m^{-1} per minut, och

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

röken spreds jämnt i rummet med hjälp av en fläkt. Försöken gick till som så att en försöksperson (samtliga deltog individuellt) placerade sig sittandes vid ett bord längst in i rummet. På bordet fanns en särskild mätutrustning i metall med ett antal hål med avtagande storlek, en så kallad stadighetsmätare. Försökspersonen skulle under försöket passa en penna i dessa hål, och om han eller hon råkade vidröra hålets kanter så noterades detta som ett utslag. Antalet utslag räknades och användes i studien som ett mått på den emotionella stabiliteten vid olika nivåer på röktätheten. De här testerna genomfördes i cykler om ca 30 sekunder, varefter försökspersonen var tvungen att ställa sig upp, gå ca fem meter till motstående vägg, trycka på en knapp, och sedan återvända till bordet för att upprepa proceduren. Den totala sträckan som tillryggalades var alltså ca 10 m, och under denna transportsträcka dokumenterades även försökspersonens gånghastighet. Ingenstans framgår det dock hur många gånger respektive försöksperson upprepade promenaden.

Information om hur studien dokumenterats och analyserats är inte fullständig, men det framgår att observationer av respektive försökspersons förflyttning kompletterats med intervjuer av utvalda försökspersoner efter genomfört försök. Det framgår att ett ”försök” gjorts att uppskatta hur försökspersonernas gånghastighet påverkades av olika nivåer på dämpningskoefficienten, och i en figur redovisas en massa datapunkter angivna som en relativ gånghastighet plottad som funktionen av rådande dämpningskoefficient. Dessvärre ges ingen ytterligare beskrivning av innehållet i figuren, och det framgår alltså inte om flera punkter i diagrammet kan tillhöra en och samma individ. Jin [15] påstår sig utläsa en reduktion av gånghastigheten i takt med ökande dämpningskoefficient, men någon sådan trend är svår att se. Möjligen minskar antalet outliers, det vill säga mätpunkter med särskilt höga gånghastigheter, för de högre nivåerna på dämpningskoefficienten. Av denna anledning rekommenderas resultaten i första hand användas kvalitativt. I övrigt dras följande slutsatser baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- Fyra barn ingick i studien, men avseende emotionell stabilitet (mätt i form av hjärtfrekvens och antal kontakter med den så kallade stadighetsmätaren) skiljde sig inte deras resultat från de vuxnas.
- Vid dämpningskoefficientnivån 0,15 m^{-1} anges att majoriteten av försökspersonerna började känna ett obehag, och därför rekommenderas detta som ett acceptanskriterium avseende siktsträcka för personer som saknar lokalkännedom.
- Jin [15] hävdar att forskarna som deltog i studien i huvudsak reagerade fysiologiskt på röken, medan försökspersonerna från allmänheten reagerade psykologiskt på röken. En liknande slutsats har dragits i ett annat försök av Jin och Yamada [16], [46].
- Jin [15] påstår sig se en signifikant restriktion i försökspersonernas gånghastighet vid nivån 0,5 m^{-1}, och rekommenderar därför detta som ett acceptanskriterium avseende siktsträcka för personer med god lokalkännedom.

8.3 Boyce [40]

I artikeln redovisas ett väldokumenterat försök med människor som fått utrymma en kontorslokal med så kallat öppet kontorslandskap. Syftet uppges ha varit att identifiera en lämplig lägstanivå avseende belysningsstyrka som samtidigt säkerställer att utrymning kan genomföras både snabbt och säkert. Vid tiden hade nämligen olika forskare dragit olika slutsatser avseende detta, vidare föreskrevs en förhållandevis låg nivå i det brittiska regelverket (0,2 lux). Boyce [40] ville helt enkelt reda ut om denna nivå var tillräcklig. Totalt ingick 96 försökspersoner i studien, varav 60 av dessa deltog i en huvudsaklig del om förflyttning vid olika belysningsnivåer med 12 försökspersoner per belysningsnivå. Därefter genomfördes tre repeterande försök med särskilda populationer för en av dessa belysningsnivåer i syfte att undersöka eventuella skillnader mellan resultaten i den huvudsakliga delen, och de som de särskilda populationerna presterade. Utöver 12 försökspersoner som rekryterats just eftersom att de hade kännedom om lokalen var miljön okänd för övriga försökspersoner innan försöket. Någon detaljerad beskrivning av försökspersonernas sammansättning ges inte, utöver att de var ”of working age”.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Försöket genomfördes i ett öppet, inrett kontorslandskap som mätte 30 x 16 m^2. Skrivbord, stolar, papperskorgar, mm fanns alltså i lokalen precis som i vanliga fall. Försöken genomfördes efter solnedgång och samtliga fönster täcktes för att inte andra ljuskällor än de som användes under försöken skulle störa försökspersonerna. Sammanfattat gick försöken till som så att försökspersonerna leddes in en och en och ombads att sitta ner vid ett av skrivborden i mitten av lokalen, ca 30 m från närmaste nödutgång. De leddes in under normal belysningsstyrka, och instruerades att sitta ner till dess att denna slocknade och ersattes av en nödbelysning. När så skedde skulle de lämna skrivbordet och röra sig mot anvisad nödutgång. De kom då dels att gå genom ett så kallat ”kontorsområde” med skrivbord och stolar, dels ett så kallat ”korridorsområde” som i princip utgjorde en raksträcka utan hinder mot utgången. Efter genomfört försök återgick de till skrivbordet, besvarade en enkät och ombads därefter att röra sig samma sträcka under normal belysningsnivå vilket motsvarade ca 485 lux i korridoren och ca 580 lux i kontorsområdet. I den huvudsakliga delen av försöket undersöktes fem olika belysningsnivåer med 12 försökspersoner i varje scenario. Försökspersonerna deltog alltså endast en gång var, och belysningsnivån var som lägst 0,0021/0,371 lux (kontorsområde/korridorsområde) och som högst 6,28/5,2 lux. I de repeterande försöken deltog 12 försökspersoner ur en äldre population, 12 försökspersoner med god lokalkännedom samt 12 försökspersoner som fick utrymma i grupper à 4 personer. Syftet var att undersöka eventuella avvikande resultat givet dessa förändringar.

Försöket dokumenterades dels genom observation med hjälp av videokameror som kunde filma i mörker, dels genom en enkätundersökning som samtliga försökspersoner ingick i. I den senare fick försökspersonerna bland annat redogöra för hur svårt de tyckte det var att se och hur tillfredställande de tror att belysningen hade fungerat vid en verklig utrymning. Videokamerorna användes för att uppskatta total utrymningstid och antalet kollisioner med objekt utmed utrymningsvägen, men också för att klassificera förflyttningsstilen (det vill säga om försökspersonerna rörda sig ohindrat eller med besvär). Med ett undantag redovisas inga gånghastigheter, dessa skulle dock kunna beräknas i efterhand med kännedom om den kortaste sträckan ut (25,1 m) och den tid det tog försökspersonerna att förflytta sig mellan start och slutpunkt. Resultatet är redovisat på ett sådant sätt att den inledande så kallade varse- och förberedelsetiden kan dras av från den totala tiden och därmed göras jämförbar med andra studier. Boyce [40] påtalar att resultaten sannolikt inte kan tillämpas på fallet med rök i utrymningsvägen, men de kan ändå utgöra en intressant referenspunkt eftersom att det många gånger görs gällande att den lägsta gånghastigheten i rök kan likställas med förflyttning i totalt mörker. De viktigaste slutsatserna som dras baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet) är:

- Totalt studerades fem nödbelysningsnivåer. I allmänhet indikerar resultaten att något händer kring ca 1 lux; vid en belysningsstyrka över 1 lux hade försökspersonerna i allmänhet inga problem att förflytta sig. Den totala tiden att ta sig ut var låg relativt oberoende av belysningsnivån, och antalet kollisioner med andra objekt såsom skrivbord eller papperskorgar var mycket få. Dessutom bedömdes dessa nivåer som bra; försökspersonerna angav inga större svårigheter att se. Under 1 lux däremot ökade den totala utrymningstiden kraftigt med minskad belysningsnivå, liksom antalet kollisioner med andra objekt. Belysningsnivåerna upplevdes vidare som för låga och försökspersonerna angav att de hade svårigheter att se var de skulle.
- Faktorer som ålder, tidigare erfarenhet av lokalen (det vill säga lokalkännedom) eller utrymning i grupper om fyra personer (istället för individuellt) påverkade på det stora hela inte resultatet i någon riktning.
- Boyce [40] drar slutsatsen att vid genomsnittliga belysningsnivåer på 0,2 lux (som vid tiden föreskrevs i det brittiska regelverket) kommer en del människor att uppleva förflyttningssvårigheter; de kommer att röra sig signifikant långsammare än vid 1 lux, och de kommer att krocka med hinder. Vid 1 lux framträder inte dessa.

8.4 Jin och Yamada [16], [46]

I ett försök av Jin och Yamada [16], [46] var syftet att studera människors emotionella påverkan vid exponering för rökfyllda miljöer. Totalt ingick 31 vuxna försökspersoner mellan 20 och 51 år i

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

studien, varav 14 var män och 17 kvinnor. Det framgår att de kvinnor som deltog i studien i huvudsak var hemmafruar och att männen som deltog var universitetsstudenter. De ska inte ha erhållit någon detaljerad information om försöksmiljön utöver att försöket genomfördes i en rökfylld korridor, och att de när som helst kunde avbryta försöket.

Korridoren som försöket genomfördes i var 11 m lång, 1,2 m bred och 2,5 m hög. Den ska ha utrustats med fem mattor på golvet som indikerade för försökspersonerna i vilken riktning de skulle röra sig. Korridoren verkar varit relativt kal, men i den avslutande delen, närmare bestämt under de tre sista metrarna, fanns någon form av värmeelement installerade i taknivå. Syftet var att studera hur den infallande strålningen från dessa värmeelement påverkade försökspersonernas mentala förmåga under förflyttningen i tunneln.

Försökspersonerna deltog individuellt i försöket. Inför varje försök fylldes korridoren med vit rök som genererats genom glödförbränning av spån från japanskt cederträ. Det anges att dämpningskoefficienten inledningsvis uppgick till 1,2 m^{-1}, för att långsamt falla ner mot 0,1 m^{-1} i under en 30-minutersperiod. Under denna period uppges 2-3 försökspersoner ha hunnit delta, vilket innebär att olika försökspersoner i så fall exponerades för olika siktsträckor. Det ska uppmärksammas att försökspersonerna erhöll en handduk inför utrymningen, och att denna fästes över deras mun och näsa. Syftet var att minska irritationsmomentet, och handduken uppges ha skyddat dem till 90 % från röken (någon ytterligare beskrivning ges ej). Korridoren belystes under samtliga försök med lysrör, vilket ska ha renderat en belysningsnivå i intervallet 30-100 lux i marknivå. Det framgår inte om detta var i rökfri eller rökfylld miljö, men tolkningen är det förstnämnda. Under respektive försök rörde sig försökspersonerna från en matta till nästa. När de stannat på en matta ställdes totalt tio frågor till försökspersonen via ett högtalarsystem, och denne skulle då besvara frågorna innan de fortsatte till nästa matta. Det var också mellan dessa mattor som gånghastigheten dokumenterades, sannolikt genom mätning av tiden mellan de två mattorna. Någon detaljerad beskrivning av mätmetoden ges dock inte.

Det är inte särskilt detaljerat beskrivet, men tolkningen är att samtliga försökspersoner deltog två gånger var i försöket. I det första scenariot var korridoren fylld med tjock rök, i det andra scenariot var korridoren rökfri med endast ovan nämnda värmeelement aktiverade. Syftet antas ha varit att studera just rökens påverkan på svarsförmågan. Avseende försökspersonernas gånghastighet redovisas detta som medelvärden i två grupper: män och kvinnor. Redovisningen görs i ett diagram som funktion av dämpningskoefficienten i intervallet mellan ca 0,1 m^{-1} och 1,2 m^{-1}, med en gånghastighet varierande mellan ca 0,5-1,1 m/s för samma intervall. Det kan noteras att den redovisade gånghastigheten verkar avta med ökande dämpningskoefficient i ett liknande samband som försökspersonernas svarsförmåga. Det noteras också att gånghastigheten samstämmer för män och kvinnor, åtminstone i intervallet mellan ca 0,1-0,7 m^{-1}. Vid högre dämpningskoefficienter verkar kvinnornas gånghastighet avta i större utsträckning än för männen. Därutöver dras följande slutsatser baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- Författarna drar slutsatsen att människors kognitiva förmåga försämras av röktäthet i allmänhet och värmestrålning i synnerhet.
- Avseende emotionell påverkan anges det att de deltagande männen i större utsträckning än kvinnorna påverkades fysiologiskt av röken, och att kvinnorna i större utsträckning än männen påverkades psykologiskt.

8.5 Jensen [43], [44]

Jensen [43], [44] beskriver ett försök som genomfördes i Norge i början av 1990-talet som en följd av branden på passagerarfärjan Scandinavian Star. Syftet med försöket verkar ha varit att utvärdera totalt sju olika typer av tekniska utrymningssystem, både visuella och taktila. I försöket ingick 84 försökspersoner som individuellt deltog en gång var i ett av totalt 13 olika scenarier. Någon ytterligare beskrivning av försökspersonernas egenskaper framgår inte i de engelska publikationerna, mer än att 6 personer var blinda. Däremot finns en norsk rapport där information om respektive försökspersons

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

deltagande, inklusive information om ålder, kön och i vissa fall ytterligare information (till exempel militär, student, o s v) redovisas [43].

Försöket ska ha genomförts i en särskild försöksanläggning i totalt tre plan som påminde om mitten av en passagerarfärja eller ett hotell. Den kortaste vägen ut uppgick till 84 m, bland annat innehållandes flera kortare trappor som försökspersonerna gick upp- och nedför, men det framgår inte hur många vägval respektive försöksperson var tvungen att göra under utrymningen (bara att det förekom i någon utsträckning; en del försökspersoner indikeras nämligen ha valt fel väg ut). I försöket användes två olika typer av rök varav den ena benämns som icke-irriterande och den andra som irriterande. Det framgår inte vad denna rök bestod av eller hur den producerades, däremot att de försökspersoner som ingick i scenarier med irriterande rök gjorde det med en skyddande andningsutrustning liknande det som brandmän bär vid rökdykning. Information om hur data samlats in eller hur den senare analyserats beskrivs mycket sparsamt, inte osannolikt på grund av att det huvudsakliga materialet är engelska sammanfattningar av information som publicerades på norska. Det framgår dock att IR-kameror använts för att dokumentera försökspersonernas förflyttning, och att ett särskilt system använts för att dokumentera och logga försökspersonernas beteende i olika beslutspunkter.

Avseende resultat så presenteras en sammanfattning av respektive scenario i en tabell i de engelska publikationerna. Däremot redovisas resultaten på individnivå på norska, bland annat avseende den röktäthet som rådde vid respektive försök samt den totala tid det tog försökspersonerna att förflytta sig från start till mål. I de norska publikationerna framgår även vilken typ av system som använts i de olika scenarierna, och vilken rök som använts. Resultaten på individnivå har beräknats genom att dividera den kortaste sträckan på 48 m med den totala tid som det tog att ta sig ut. Röktätheten redovisas i form av en optisk densitet. Den senare har med största sannolikhet beräknats med tiologaritmen på amerikanskt vis (antagande som bygger på stickprovshandberäkningar och korsreferenser, bland annat Nersveen [54]), men kan översättas till en dämpningskoefficient beräknad med den naturliga logaritmen. Försöket får i sammanhanget betraktas som mycket väldokumenterat, men kräver att engelska och norska publikationer jämförs för att resultaten ska kunna extraheras. I tolkningen av enskilda gånghastigheter i rök bör det noteras att olika tekniska vägledningssystem användes i olika scenarier, och att delar av förflyttningen skett i trappor. Vikt kan även läggas vid de kvalitativa slutsatser som dras av författaren själv:

- Mest effektiva var de testade system som var enklast till sin utformning. Här framlyfts bland annat en semikontinuerlig fotoluminescent markering i marken och en handledare som två olika alternativ, där den senare beskrivs enastående bra i förhållande till de andra typerna. Det ska noteras att slutsatsen baseras på de genomförda försöken, det vill säga i rök.
- Luminansen för elektriskt matad belysning anges som oviktig vid mycket tät rök.
- Allmänbelysningen lyft fram som ett hinder vid utrymning då den riskerar att försämra sikten i rök samt att minska synbarheten av utrymningstekniska installationer. Författaren föreslår därför att den bör stängas i utrymningssammanhang.
- Författaren anger att det faktum fotoluminescenta material ”tappar” sin färg efter ett tag kompenseras av att människor vänjer sig vid den rökfyllda/mörka miljön de utrymmer i. Under den tid som utrymning kan förväntas är tappet sannolikt av mindre betydelse.

8.6 Paulsen [28], [45]

På 1990-talet genomfördes en rad utrymningsförsök i efterspelen av olyckan på passagerarfärjan Scandinavian Star. Ett av dessa beskrivs utförligt i en norsk rapport från SINTEF, och har även sammanfattats i en engelsk konferensartikel. Syftet med försöket var i huvudsak att utvärdera olika belysnings- och taktila systems påverkan på utrymningsförloppet i en miljö som påminner om den i kabindelarna på en passagerarfärja. Totalt ingick 133 försökspersoner i studien, men i presentationen nedan avgränsas beskrivningen till att omfatta 79 försökspersoner. Skälet är att övriga 54 försökspersoner deltog i upprepade försök av identiska scenarier som tidigare försökspersoner deltagit i, men då med en mental belastningsuppgift samtidigt (de skulle komma ihåg en sifferföljd under

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

utrymningen) som kan antas ha påverkat förflyttning och beteende. De 79 försökspersonerna bestod av 33 kvinnor och 46 män i åldrarna 19-25 år, och samtliga var norska universitetsstudenter.

Försöken genomfördes i försöksuppställning i två våningar där miljön hade många likheter med passagerarutrymmet på Scandinavian Star. Det innebar att försökspersonerna på sin väg från start (en kabindörr på plan 1) till slut (en nödutgång på plan 2) i huvudsak rörde sig i en korridor med 1,2 m bredd, men som flera gånger svängde. Totalt ingick 6 vägval (90-graderssvängar) för försökspersonerna, och eftersom att de började på plan 1 ingick även ett trapphus med två trappor à 7 steg och ett vilplan. Den totala sträckan (kortaste avståndet) anges av författarna uppgå till 29 m.

Totalt deltog försökspersonerna i sex scenarier med olika typer av vägledande installationer: 1) punktbelysning i taknivå vid vägvalspunkter; 2) punktbelysning i golvnivå (10 cm från golvet) vid vägvalspunkter; 3) handledare med särskilda utstickande delar vid vägval 85 cm ovan golvet på båda sidor i försöksområdet; 4) kontinuerlig genomlyst linjemarkering i golvnivå på ena sidan i försöksområdet; 5) efterlysande linjemarkeringar i mitten av golvet samt 80 cm upp på ena väggen; 6) en kombinerad version av handledare och punktljus under handledaren. I varje scenario deltog 9-15 försökspersoner, och varje försöksperson deltog endast en gång. Fördelningen av försökspersoner i de olika grupperna hade skett på ett sätt så att egenskaperna skulle vara lika mellan grupperna. Under försöket rökfylldes hela försöksområdet med en vit, konstgjord rök som uppges ha varit ofarlig att andas in, men mycket irriterande för de övre luftvägarna och ögonen. Dokumentation av röktätheten genomfördes med en laserutrustning bestående av en sändare, mottagare och log. Dämpningskoefficienten uppges ha hållits konstant till 1 m^{-1} under hela försöket, och någon närmare presentation av variationen i på individ- eller scenarionivå anges inte. Den ska dock ha varit jämnt fördelad i hela försöksområdet.

Dokumentationen av försöket avseende förflyttning och beteende skedde dels i form av observation, dels i form av en enkätstudie som varje försöksperson fick genomgå efter avslutat försök. Bland annat redovisas antalet ”lyckade” utrymningar, det vill säga försök där försökspersonen hittade ut utan att gå fel, och den totala utrymningstiden på gruppnivå, det vill säga som gruppmedelvärden för respektive scenario. Det gör det svårt att dra några slutsatser om individernas gånghastigheter. Däremot kan det konstateras att det verkar ha tagit längst tid att ta sig ut i det scenario som använde en handledare, och kortast tid med punktbelysning i golvnivå. Det scenario som genererade den längsta utrymningstiden, det vill säga med handledare, var dock bland de scenarier som genererade störst andel ”lyckade” utrymningar. Kompletterad med belysning lyckades samtliga försökspersoner ta sig ut utan att gå fel (detta scenario renderade också nästhögst gånghastigheter). Baserat på resultaten i studien ger författarna följande rekommendation:

- Vid siktnivåer motsvarande en dämpningskoefficient > 1,5 m^{-1} rekommenderas taktila system
- Vid siktnivåer motsvarande en dämpningskoefficient i intervallet 0,1 till 1,5 rekommenderas någon form av kontinuerlig belysning/vägledning
- Vid siktnivåer < 0,1 m^{-1} rekommenderas traditionella utrymningsskyltar/punktmarkering

8.7 Jin och Yamada [55] och Jin [34]

Människors förmåga att förflytta sig i rökfyllda miljöer beror naturligtvis på miljön och kontexten som de ska förflytta sig i, till exempel typen av nöd- och/eller orienterande belysning som finns. I ett japanskt försök studerades särskilt hur en ljusinstallation med så kallade *travelling lights*, det vill säga blinkande ljus som förflyttar sig framåt i till exempel en korridor, upplevdes vid utrymning i både rökfri och rökfylld miljö. Syftet var helt enkelt att utvärdera det bästa alternativet med avseende på i huvudsak avståndet mellan armaturer och hastigheten på ljusets framåtförflyttning i armaturerna. Undersökningen gjordes för flera olika röktätheter, men dessvärre dokumenterades inte gånghastigheten i försöket. Resultaten kan likväl vara till kvalitativ nytta, eftersom att andra studier indikerat att möjligheter till förbättrad orientering i rökfyllda miljöer kan leda till ökade gånghastigheter.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Totalt ingick 12 försökspersoner i studien, men någon närmare precision av deras egenskaper framgår inte. Försöket genomfördes i en kal korridor med måtten 1,4 x 6,3 x 2,5 m (b x l x h). Allmänbelysningen bestod av lysrörsarmaturer i taknivå som renderade en belysningsnivå motsvarande ca 200 lux på marken, mätt i mitten av korridoren (utan rök). Därutöver användes 16 belysningslådor intill den högre väggen med måtten 5 x 25 x 16 cm (b x d x h). I mitten av toppen på denna belysningslåda strålade ljus genom en grönfärgad plastdel med en luminans motsvarande ca 270 cd/m^2. Varje försöksperson deltog i försöket i flera scenarier som bestod av en kombination av egenskaper kopplat till parametrarna: avstånd mellan armaturer, hastigheter på ljusets framåtförflyttning och röktäthet. Vid varje försök gick respektive försöksperson genom korridoren och utvärderade därefter det tekniska systemet på en skala mellan 1-7 (där 7 var bäst). Därefter upprepades försöket. Totalt studerades nio scenarier i rökfri miljö (avstånd mellan armaturer: 0,5, 1 eller 2 m; hastighet: 2, 4 eller 8 m/s), vilka samtliga försökspersoner dels genomgick innan försöken i rök, dels efter försöken i rök. Varje scenario i rökfri miljö upprepades alltså en gång. Samma scenarier studerades i rökfylld miljö, för fem olika röktäthetsnivåer (ca 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 och 1 m^{-1}). Totalt gick alltså varje försöksperson igenom korridoren 18 gånger i rökfri miljö och 45 gånger i rökfylld miljö, vilket särskilt bör noteras i tolkningen av resultaten. Röktätheten uppges ha dokumenterats med hjälp av tre olika lasermätare, och att skillnaden i uppmätt värde mellan dessa inte var särskilt stor.

Baserat på studiens genomförande konstateras att avståndet mellan armaturerna i större utsträckning påverkar den upplevda nyttan av systemet än hastigheten som ljuset förflyttar sig på. Ju kortare avstånd mellan armaturerna, desto större upplevd nytta. I allmänhet verkar också en snabbare framåtförflyttning av ljuset föredras framför en långsammare, men det finns en gräns för hur snabbt, i synnerhet när kortare avstånd mellan armaturerna används. I genomsnitt verkar kombinationen med 0,5 m avstånd mellan armaturerna och en hastighet motsvarande 4 m/s gett bäst resultat, både i rökfri och rökfylld miljö.

8.8 Tanaka, Imaizumi, Takahashi, Komai och Isei [47]

I artikeln redogörs för ett antal försök som genomförts dels i en särskild försöksrigg, dels i en undermarksanläggning (sannolikt en gruva). Såväl förflyttning i rök som förflyttning i rökfri miljö har studerats i dessa försök, och även om något syfte in explicit framgår så verkar det ha handlat om att samla in information om fysiologisk påverkan och gånghastigheter. Avseende de fysiologiska komponenterna inhämtades information om i huvudsak de deltagande försökspersonernas puls och deras andningsfrekvens. Det som i huvudsak är av intresse för den här rapporten är den del av studien som beskriver försöket i försöksriggen som i princip bestod av en korridor.

Totalt uppges åtta personer ha deltagit i försöket, men resultat redovisas för nio personer. Om detta beror på att en av försökspersonerna upprepad försöket eller om det de facto ingick nio försökspersoner i försöket råder det osäkerhet om. Försökspersonernas ålder uppges ha varierat mellan 28-42 år. Sträckan som de olika försökspersonerna utrymde var inte helt rak utan bestod i princip av två korridorer som anslöt till varandra med en nittiograders vinkel. Först rörde sig försökspersonerna ca 3 m innan de tog vänster i den nya korridoren och fortsatte ca 19 m. Hela försöksområdet anges ha haft en bredd motsvarande 2 m.

De åtta (eller nio) försökspersonerna delades in i två grupper beroende på hur de genomgick försöket. I den första gruppen ingick fyra individer som utrymde korridoren totalt två gånger; en gång med icke-irriterande rök (rök utan ”stimuli” tolkas som icke-irriterande rök) och en gång i rökfri miljö. I fallet med rök i korridoren uppges sikten ha motsvarat 0,45 m. I den andra gruppen ingick fem individer som utrymde korridoren totalt tre gånger; en gång utan rök, en gång med icke-irriterande rök och en gång med irriterande rök. I fallet med irriterande rök uppges siktsträckan ha uppgått till 3 m. De två grupperna betecknas sakna lokalkännedom (första gruppen) respektive inneha lokalkännedom (andra gruppen) eftersom att de först genomförde försöket i rökfri miljö.

Dokumentation och genomförande av försöket anges mycket sparsamt. Det framgår dock att röktätheten uppmätts med någon form av akrylplatta. I personlig kommunikation med en av författarna

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

till publikationen anges det att denna vanligen används för att uppskatta sikten i vattendrag och sjöar. Vid samma kommunikation anges att röken i försöket genererades med en rökmaskin. Det framgår av publikationen att de uppmätta gånghastigheterna uppskattats genom att mäta respektive individs förflyttning över tre delsträckor. Här antas att en fördefinierad stäcka (fågelvägen mellan två punkter) dividerats med tiden det tog individen att röra sig den sträckan. För den första gruppen varierade gånghastigheten mellan 0,4-0,8 m/s i fallet med rök, och 1,7-1,8 m/s i fallet utan rök. För den andra gruppen varierade gånghastigheten mellan 1,1-3,2 m/s i fallet utan rök, 0,4-1,1 m/s i fallet med icke-irriterande rök och mellan 0,9-2,7 m/s med irriterande rök. De högre hastigheterna i det sista fallet för grupp 2 är inte osannolikt på grund av individerna då utrymt samma sträcka två gånger tidigare, något som bör uppmärksammas i samband med att resultaten ska tolkas. I sammanhanget betraktas därför den första gruppens värden vara mest intressanta, inte minst eftersom att de innehåller information om samma försökspersons gånghastighet i rökfri miljö som i rök.

Utöver dessa resultat kan följande slutsatser dras baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- En lärandeeffekt påtalas av författarna som anger att det i den grupp som redan var bekant med försöksmiljön fanns individer som i scenarierna med rök i princip sprang sista biten för att de visste vad hur miljön såg ut.
- En slutsats som dras av författarna är att röktätheten påverkade individernas gånghastighet, men att tidigare erfarenhet av försöksmiljön spelade en större roll på resultatet.

8.9 Janse, van de Leur och van Oerlo [41]

Janse et al. [41] beskriver ett försök som genomfördes i en kal korridor i TNO:s brandlabb. Det primära syftet var att studera hur långt människor i allmänhet kan röra sig i rökfyllda miljöer när de håller andan, men samtidigt dokumenterades även försökspersonernas gånghastighet och möjlighet att se en utrymningsskylt. Totalt deltog 20 försökspersoner i studien, närmare bestämt 11 kvinnor och 9 män. Deras ålder varierade mellan 25-72 år, och samtliga saknade erfarenhet av förflyttning i rökfyllda miljöer.

Försöket genomfördes i en korridor med dimensionerna 10 x 1,25 x 2,45 m (l x b x h) i totalt tre olika varianter. Samtliga försökspersoner deltog i alla tre scenarier. Det som varierades var typen av rök; i scenario 1 användes rök som genererats vid glödbrand i trä, i scenario 2 användes rök som genererats av brand i bomull och i scenario 3 användes rök som genererats vid brand i polyuretan. Röken genererades enligt en metod som motsvarade den standardiserade testmetod som vid tiden användes för att testa rökdetektorer och matades in i korridoren med hjälp av ett särskilt ventilationssystem. I sammanhanget ska sägas att försökspersonerna upplevde bomullsröken som den mest irriterande, och polyuretanröken som den minst irriterande.

Under försöken fylldes tunneln med rök motsvarande en siktsträcka på 25 m för reflekterande föremål (det vill säga 0,08 m^{-1}) för samtliga tre rökscenarier, och belysningsnivån i korridoren rapporteras ha varit 180 lux. Det framgår inte i detalj hur dokumentationen av röktätheten skett, mer än att två mätpunkter vid respektive ände av korridoren användes för att kontrollera nivån under försöken. Vidare verifierades dessa mätningar med subjektiva bedömningar av närvarande personal (3 personer som bedömde avståndet till en utrymningsskylt). Hur gånghastigheten dokumenterats framgår inte explicit, men sannolikt har detta gjorts genom att mäta dels sträckan respektive försöksperson gick i korridoren (de verkar ha gått fram och tillbaka några gånger per scenario; sträckan som respektive försöksperson gått anges nämligen i 10-tal), dels tiden respektive försöksperson spenderade i korridoren. Här ska sägas att det var möjligt att lämna korridoren i båda ändar. I slutet av varje försök fick en försöksperson fylla i en enkät om bland annat graden av irritation som de upplevde under försöket.

Avseende den dokumenterade gånghastigheten finns respektive försöksperson gånghastighet angiven, dock som ett genomsnitt från samtliga tre rökscenarier. Denna gånghastighet varierade mellan 1,36

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

m/s för den långsammaste personen, till 2,04 m/s för den snabbaste (den genomsnittliga gånghastigheten för samtliga försökspersoner var 1,67 m/s). Det framgår inte om skillnader förelåg i gånghastighet för de tre olika röktyperna. Däremot skriver Janse et al. [41] att de inte kunde konstatera en korrelation mellan försökspersonernas individuella gånghastighet och deras ålder.

8.10 Heskestad och Schmidt-Pedersen [18] och Heskestad [19]

I artiklarna redogör Heskestad och Schmidt-Pedersen [18] och Heskestad [19] för de slutsatser som dragits från i huvudsak fem olika experiment med människor som försökspersoner i rökfyllda miljöer. Samtliga dessa studier har genomförts i Norge på 1990-talet, och har alla i någon utsträckning en koppling till branden som inträffade 1990 på passagerarfärjan Scandinavian Star. De miljöer som då studerats är rökfyllda trapphus, komplexa miljöer som påminner om kabinutrymmen i en passagerarfärja och enklare korridorer. Försökens primära syfte har inte varit att dokumentera gånghastigheter, utan hur vägval och förflyttning kan påverkas med hjälp av olika vägledande tekniska belysningsinstallationer.

Totalt uppges över 300 försökspersoner ha ingått i dessa fem försök, varav fyra genomförts som individuella försök och ett i gruppform. Miljöerna i de olika försöken skiljer sig åt, liksom antalet försökspersoner och i viss utsträckning även siktsträckan:

1. ”Tiller-försöket” genomfördes 1992 i ett trapphus liknande ett av trapphusen ombord på Scandinavian Star. Totalt testades tre olika vägledningssystem i tio scenarier med 9-16 försökspersoner i respektive scenario (någon ytterligare beskrivning ges inte). Försöksområdet uppges ha varit 29 m långt, och dämpningen av ljuset anges till 90% m^{-1}. Se även separat beskrivning i denna rapport.
2. ”Hoböl-försöket” genomfördes 1993 i ett försöksområde som beskrivs motsvara en yta i mitten av ett hotell eller i mitten av en passagerarfärja. Totalt testades sju olika typer av vägledande system i 13 scenarier med 6 försökspersoner i respektive scenario (någon ytterligare beskrivning ges inte). Försöksområdet uppges ha varit 48 m långt och inkluderat totalt 11 olika beslutspunkter. Dämpningen av ljuset anges ha legat i intervallet 90-95% m^{-1}.
3. ”Bleivik-försöket” genomfördes i en särskild övningsrigg och studerade effekterna av ett lågpositionsljus för vägledning av utrymmande personer. Totalt ingick nio olika scenarier med 5-7 försökspersoner i respektive scenario. Försöksområdet uppges ha varit 31 m långt och dämpningen av ljuset anges till 95% m^{-1}.
4. ”Askim-försöket” genomfördes i en verklig byggnad (ett sjukhus eller vårdhem) i syfte att studera konsekvenserna av olika taktila system för vägledning. Totalt studerades fyra olika scenarier med 5-6 försökspersoner mellan 70 och 80 år i respektive scenario. Försöksområdet uppges ha varit 15 m långt, och det saknas uppgift om eventuell rökfyllnad.
5. ”MS Polarlys-försöket” genomfördes ombord på en passagerarfärja i syfte att studera ett lågpositionsljus för vägledning. Totalt ingick två scenarier i försöket med 21 försökspersoner i respektive scenario. Dessa verkar inledningsvis ha påbörjat försöket inuti hytter ombord på passagerarfärjan. Beroende på avståndet mellan kabinhytterna och utgången varierade försöksområdets längd mellan 3 till 45 m. Det saknas uppgift om eventuell rökfyllnad.

Med utgångspunkt i ett nytt klassificeringssystem som presenteras i artiklarna anger författarna att de på nytt analyserat de fem försöken, och då funnit att gånghastigheten i allmänhet varierat mellan 0,4-0,5 m/s [18] eller 0,2-0,5 m/s [19]. Det senare intervallet härstammar från den artikel som genomgått den bästa kvalitetsgranskningen, och torde därför användas före det förstnämnda. Gånghastigheten avser en förflyttning längs med en enkel korridor utan tillgång till dagsljus, och med en dämpning av ljuset motsvarande minst 95% m^{-1}. Ingen närmare precision avseende den senare procentsatsen ges dock, eller för delen om mät- eller analysteknik. Däremot kan det konstateras att gånghastigheten dels består av en komponent avseende själva förflyttningen, dels av en komponent avseende beslutspauser, det vill säga tillfällen då försökspersonerna stannat för att till exempel välja väg. Den dokumenterade gånghastigheten avser dock förflyttningen via den kortaste vägen och inkluderar således inte den faktiska tillryggalagda sträckan. Några slutsatser som kan dras baserat på publikationen:

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

- Belysningsstyrkan i sig verkar i sig inte ha så stor betydelse jämfört med att det överhuvudtaget finns belysning närvarande.
- Såväl akustisk som taktil information lyfts fram som ett konkret alternativ till visuell information i form av belysning.
- Avseende rent metodologiska aspekter förespråkas en försöksmetod där enskilda försökspersoner deltar före en metod där grupper av människor ingår. Skälet är att den senare metodiken innebär en uppenbar svårighet i att avgöra vad det är som beror på vad, det vill säga att beskriva faktisk orsak-verkan.

Eftersom att artiklarna i princip endast innehåller en sammanfattning av fem tidigare genomförda försök, och på grund av att detaljnivån är mycket låg, inklusive ingen tabell som klassificerar och sammanfattar studien. Det anses helt enkelt inte meningsfullt. Däremot kan slutsatserna som dragits av författarna (och som sammanfattats ovan) möjligen användas för att dra kvalitativa slutsatser i kombination med resultat från andra studier.

8.11 Frantzich [24]

Natten mellan den 20 och 21 maj genomförde Frantzich [24] ett utrymningsförsök i Stockholms tunnelbana, närmare bestämt mellan stationerna Stadion och Östermalms torg. Det primära syftet var att studera människors förflyttning från tunnelbanetåg till tunnel samt från tunnel till stationsområde. Totalt deltog 143 försökspersoner, varav majoriteten (115) var anställda vid Storstockholms Lokaltrafik (SL). Övriga försökspersoner var särskilt inbjudna personer, i huvudsak brandskyddskonsulter. Av de 115 försökspersonerna från SL var 29 st mellan 18-30 år, 56 st mellan 30-50 år och 22 st över 50 år (åtta försökspersoners ålder är okänd), varav 49 var kvinnor och 66 män. Till skillnad från försökspersonerna från SL var de särskilt inbjudna informerade om vad som skulle hända, och hade därför instruerats att agera som övriga, oinformerade försökspersoner.

Försöket genomfördes i en sträcka av tunnelbanesystemet med enkelspår. Tunnelns dimensioner på försöksplatsen anges inte explicit, men uppges ha varit gynnsamma ur ett utrymningsperspektiv med generellt minst en meters bredd mellan spår och tunnelvägg. Underlaget utgjordes av grov makadam som tilljämnats, och belysningen bestod av den fasta monterade belysningen som redan satt i tunneln. Denna bestod av lysrörsarmaturer placerade högt upp i tunneln med några meters intervall. I tunneln förekom även en tillfälligt monterad nödbelysning placerad ca 1 m ovan mark med 7,5 m avstånd mellan armaturerna.

Totalt studerades två olika scenarier i Frantzichs [24] försök, och samtliga försökspersoner deltog i båda scenarierna. I huvudsak varierades belysningsnivåerna och röktätheten mellan scenarierna. I det första scenariot var det inledningsvis helt mörkt i tunneln, varefter nödbelysningen tändes när försöket pågått en tid. I det andra scenariot användes inledningsvis endast var sjätte lysrörsarmatur, och när tillräckligt underlag erhållits avseende gånghastighet för denna belysningsnivå tändes samtliga armaturer. Konstgjord rök fyllde delar av försöksområdet under det första försökscenariot, men någon explicit dokumentation av röktätheten genomfördes inte. Den närmaste uppskattningen av siktsträckan är den som ges av försökspersonerna efter försöket, som då angav ca 5 m sikt. Det framgår dock att försökspersonerna förflyttade sig i partier med både tunn och tät rök. I det andra scenariot rörde sig försökspersonerna i en förhållandevis rökfri miljö.

Information om försökspersonernas förflyttning och beteende samlades in med hjälp av videokameror. Femtiotvå försökspersoner fick även besvara en enkät om sina upplevelser; vissa efter försöksscenario 1 (34 st) och andra efter scenario 2 (18 st). Dessa försökspersoner uppges ha valts ut slumpmässigt. Gånghastigheten dokumenterades den över utvalda sträckor i tunnelmiljön med varierande avstånd. Vissa av dessa sträckor var så korta som 3,5 m, men den längsta översteg 130 m. I resultatpresentationen anges gånghastigheten som intervall för dessa olika sträckor, och i viss utsträckning anges även ett medelvärde för försökspersonernas gånghastighet:

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

1. Utan belysning och tunn rök uppges gånghastigheten ha variet mellan 0,9-1,1 m/s (Frantzich [24] uppger att denna skattning är behäftad med stora osäkerheter) längs med tåget och 0,5-1,0 m/s (medelvärde 0,7 m/s) i tunneln efter tåget
2. Utan belysning och tät rök uppges gånghastigheten ha varierat mellan 0,8-0,9 m/s (Frantzich [24] uppger att denna skattning är behäftad med stora osäkerheter) längs med tåget och 0,5-1,0 m/s (medelvärde 0,7 m/s) i tunneln efter tåget
3. Med nödbelysning och tät i tät rök uppges gånghastigheten ha varierat mellan 1,0-1,45 m/s (medelvärde 1,2 m/s) i ett mätområde, mellan 1,0-1,8 m/s (medelvärde 1,4 m/s) i ett andra mätområde och mellan 1,0-1,2 m/s (medelvärde 1,1 m/s) i ett tredje mätområde.

Några slutsatser som kan dras baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- Avseende förflyttningen i tunneln konstaterar Frantzich [24] att många försökspersoner besvärades av låga belysningsnivåer; i allmänhet rörde sig försökspersonerna snabbare vid bättre ljusförhållanden.
- Försökspersonerna verkar ha vant sig vid att röra sig i tunnelmiljön, då högre gånghastigheter uppmättes vid de positioner i tunneln som låg längst bort från tåget som utrymdes.
- Det nämns att det som i stor utsträckning styrde gånghastigheten var hur snabbt den långsammaste personen i gruppen gick. Passagerarna gick nämligen efter varandra och gruppbildning uppges ha varit tydlig.
- Baserat på försökspersonernas egna svar i enkäten konstateras att försökspersonerna gärna rör sig i den riktning som andra går.
- Belysningsstyrkan i tunneln verkar i sig inte ha så stor betydelse jämfört med att det överhuvudtaget finns belysning närvarande.

8.12 Wright, Cook och Webber [20]

I syfte att studera hur olika typer av ljusinstallationer påverkar människors beteende och gånghastighet i rökfyllda miljöer genomförde Wright et al. [20] ett försök i en rökfylld kontorsbyggnad. Totalt deltog 18 försökspersoner i försöket, vars ålder varierade mellan 23-63 år (den genomsnittlige försökspersonen var 46 år gammal). Sju var män och 11 kvinnor, och samtliga uppges ha haft en god syn. Försöket genomfördes i två plan. Själva sträckan som utrymdes kan beskrivas bestå av följande fyra delar (totalt 29 m):

1. En kortare avsats till en trappa (horisontell) vars sträcka ej anges.
2. En trappa vars sträcka ej anges.
3. En kortare horisontell sträcka i anslutning till trapphuset motsvarande 6 m.
4. En längre horisontell sträcka direkt efter föregående område motsvarande 13 m.

Försökspersonerna deltog individuellt i försöket och började då i vad som tolkas ha varit en kontorsmodul. Därefter förflyttade de sig ovan sträcka. Innan varje försöksperson påbörjade försöket fick de ta del av en relativt detaljerad information både avseende syftet med försöket, men också den miljö de skulle röra sig och hur de skulle förflytta sig. Totalt deltog varje försöksperson i sju olika scenarier; i sex scenarier med olika typer av belysningsalternativ och i ett repeterande scenario (samma som det första). Den sjunde repetitionen berodde på att forskarna ville studera eventuella lärandeeffekter, men slutsatserna av denna repetition går de inte in på närmare i sina slutsatser. De sex olika belysningstyperna var:

1. Nödbelysning i taknivå bestående av någon form av lysrörsarmatur som motsvarade ca 1-2 lux på marknivå i rökfri miljö.
2. Lysrörsarmaturer i taknivå motsvarande i ca 20-165 lux på marknivå i rökfri miljö.
3. Ett grönt elektroluminescent spår monterat på höger vägg ca 1 m ovan marknivå, och i förekommande fall på vänster sida. I spåret förekom även plastkilar med ca 25 cm mellanrum

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

som således bidrog med en taktil vägledning. Belysningsnivån uppgick till ca 0,25-0,5 lux på marknivå.

4. LED-armaturer installerade som spår ca 20-24 cm ovan golvet på höger sida i korridorerna och på båda sidor i trapporna, då på en höjd motsvarande ca 16 cm ovan stegnosen. Belysningsnivån uppgick till ca 0,5-5,5 lux på marknivå.
5. Som i föregående scenario, kompletterat med en LED-armatur i marknivå i den avslutande korridoren. Belysningsnivån uppgick till motsvarande nivåer som i föregående scenario, dock något lägre i den avslutande korridoren.
6. Någon form av vägledningssystem bestående av vitglödande armaturer som monterades med 10 cm avstånd ca 18 cm ovan marken, förutom i trappan där de monterades i marknivå. Oklart om det förekom på en eller båda sidor inom försöksområdet. Belysningsnivån uppgick till ca 0-2 lux.

Under samtliga försök rökfylldes hela försöksområdet med ofarlig, konstgjord rök med hjälp av två rökmaskiner placerade på två olika platser. Det anges att röken var väl omblandad i samtliga försök. Totalt utvärderades röktätheten genom dokumentation med laserljus på sju olika platser; på tre platser i trapphuset och på fyra platser i de horisontella avsnitten. Dokumentationen gjordes kontinuerligt under alla försök och röktätheten uppges i genomsnitt ha varit i storleksordningen 2,5 m^{-1} under hela försöket. Det framgår dock att viss variation förekom mellan de olika försöken. Försökspersonernas förflyttning dokumenterades med hjälp av videokameror som kunde filma i rök.

I resultatpresentationen redovisas försökspersonernas gånghastighet som gruppmedelvärden för de olika belysningsalternativen fördelat på de fyra olika delarna i försöksområdet, det vill säga i fyra diagram. Någon explicit redovisning av försökspersonernas gånghastighet som funktion av röktätheten i de olika scenarierna ges inte, utan här anger författarna att dämpningskoefficienten varit 2,5 m^{-1} i genomsnitt under hela försöket. Några slutsatser avseende gånghastighet och kopplingen till röktäthet är därmed svårt att dra. Däremot går det att dra lite andra slutsatser baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- I samtliga fyra delar av försöksområdet rörde sig försökspersonerna som långsammast för de två första belysningsalternativen, det vill säga när ljuset var monterat i taknivå. Styrkan på ljuset verkar inte ha någon större betydelse för gånghastigheten.
- I övrigt renderade de fyra andra belysningsalternativen relativt likartade resultat avseende försökspersonernas gånghastighet. I den längre korridoren varierade gånghastigheterna mellan ca 0,7-0,9 m/s för dessa.

8.13 Frantzich och Nilsson [23]

Frantzich och Nilsson [23] genomförde sitt försök i en rökfylld övningstunnel som fylldes med konstgjord rök och ättiksyra. Ättiksyran användes för att uppnå en irriterande rök utan att skapa en farlig miljö för försökspersonerna. I tunneln placerades totalt sex bilar för att efterlikna en verklig vägtunnel och olika utrymningssystem installerades vid nödutgångarna. Syftet med försöket var att undersöka hur personers vägval påverkas av olika typer av utrymningssystem i vägtunnlar, samt att studera gånghastighet genom rök. Totalt deltog 46 försökspersoner utan funktionsnedsättning i försöket. Försökspersonerna var studenter på Lunds Tekniska Högskola och de flesta studerade på civilingenjörsutbildningen i väg och vatten. Medelåldern var 22 år. Varje försöksperson gick ensam i försöket och ingen gruppinteraktion studerades.

Försöket genomfördes i en övningstunnel på MSB:s skola i Revinge, Sverige. Övningstunnel var uppbyggd av containrar som var sammansatta till en 36,75 m lång och 5 m bred tunnelliknande konstruktion. Lutningen var svagt neråt (ca 2,5°) från ingången till en lågpunkt och sedan svagt uppåt (ca 2,5°) mot utgången. Höjden till taket var mellan 2,55 - 2,70 m. Både ingången och utgången utgjordes av höga portar som kunde öppnas med en fjärdedels tunnelbredd i taget. Totalt tre utrymningsvägar fanns i tunneln längs vänster vägg. Utrymningsvägarna var försedda med skjutdörrar som var 0,9 meter breda.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Vid försöket fanns totalt sex bilar i tunneln, nämligen tre vid vänster och tre vid höger vägg. För fyra av bilarna var placering sådan att försökspersonerna kunde passera mellan bilen och tunnelväggen. Endast två bilar som var placerad vid utgången till tunnel stod tätt intill tunnelväggen. På två ställen i tunneln kokades ättiksyra på en kokplatta och på två ställen mättes röktätheten. Dessutom fanns det en fläkt i änden av tunneln som rörde om röken. Röken bestod av konstgjort rök från en rökmaskin, vilket togs in med jämna mellanrum i tunneln för att fylla på rök under försökens gång. I försöken varierade dämpningskoefficienten mellan 2 och 7,5 m^{-1} och koncentrationen ättiksyra var under 15 ppm.

Innan försökspersonerna deltog i försöket var de 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 en ögonbindel och leddes in i den rökfyllda tunneln. Inne i tunneln fick de följande instruktioner: ”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 en rökdykare med en IR-kamera. Samtliga försökspersoner fyllde i en enkät efter försöket och en del intervjuades om sina upplevelser.

Vid försöket användes både tänd och släckt allmänbelysning och dessutom testades olika kombinationer av utrymningssystem vid nödutgångarna, till exempel blinkande orangefärgade lampor, rinnande ljus som indikerade riktning till nödutgång och markeringar i tunnelgolvet. I samtliga fall användes genomlysta utrymningsskyltar vid nödutgångarna. Efter försöket analyserades videofilmerna från IR-kamerorna med syftet att bestämma både personernas vägval och gånghastighet. Vid analysen av gånghastigheten bestämdes varje persons gångväg i tunneln som funktion av tiden, vilket innebar att information om eventuella stop och pauser samlades in. Dessutom analyserades personernas svar på enkäten och intervjun.

Frantzich och Nilsson [23] presenterar uppmätta gånghastigheter som funktion av dämpningskoefficient i diagram och presenterar dessutom ekvationer som beskriver förhållandet. Dessutom jämför de resultaten med Jin [14]. I Frantzich och Nilssons [23] försök varierade gånghastigheten mellan 0,2 och 0,9 m/s och avtog med ökande dämpningskoefficient, det vill säga med minskande siktsträcka. Spridningen i hastighet var relativt stor, vilket till viss del kan förklaras av individuella skillnader mellan försökspersonerna. Vid försöken använde ofta försökspersonerna tunnelväggarna vid förflyttning, till exempel genom att följa väggen med handen. I många fall valde personerna att följa höger tunnelvägg, vilket ledde till att de ofta missade nödutgångarna på vänster sida trots att de var markerade med skylt och olika utrymningssystem.

8.14 Boer och Withington [42]

Boer och Withington [42] presenterar ett försök som genomfördes i en vägtunnel i syfte att studera förflyttning i en rökfylld miljö, i synnerhet hur vägvalet i en utrymningssituation påverkas av så kallade ljudfyrar ovanför utrymningsvägar. Försöket genomfördes i en vägtunnel i Rotterdam, som under försöken fylldes med konstgjord rök motsvarande en siktsträcka på mellan 0,5 och 5 meter. Hela tunneln är drygt 1 km lång, men försöksområdet omfattade en sträcka på ca 200 meter. Avståndet mellan tunnelväggarna motsvarade ca 10 m och inkluderar bland annat två körbanor och tillhörande vägren. Inga bilar eller andra hinder förekom under försöket.

Totalt studerades tre olika scenarier i studien, och i varje scenario deltog 32-33 försökspersoner (totalt 97) som i grupp kördes in i den rökfyllda tunnelmiljön tillsammans i en buss. Ingen ytterligare information ges om försökspersonerna, men däremot beskrivs att de fick lämna bussen en och en med ca 40 sekunders mellanrum. Tiden då de gjorde det noterades av en forskare i bussen, och kunde senare jämföras med den tid då försökspersonen anlända antingen vid en av utrymningsvägarna, eller vid en av de konstgjorda avgränsningarna i tunnelns körriktning. Under försöken rökfylldes tunneln med konstgjord rök, men någon närmare beskrivning av hur siktsträckan dokumenterades under försöken ges inte i artikeln. Belysningsnivåer dokumenterades på flera olika platser och varierade mellan 60-80 lux på vägen direkt under en ordinarie armatur, 13-28 lux på vägbanan i närheten av

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

några av de utrymningsvägar som försökspersonerna kunde ta sig ut genom och mellan 70-80 lux på väggen runt utgångarna.

De tre olika scenarierna skiljde sig i huvudsak åt i den information som försökspersonerna gavs inför försöket. Första gruppen fick i princip ingen information om de installerade ljudfyrarna, till skillnad från de efterföljande två grupperna som fick lite eller mycket information om dessa. Data om försökspersonernas förflyttning och gånghastighet samlades i huvudsak in genom observation, bland annat användes en IR-kamera för ändamålet, men även forskarnas egna observationer verkar ha bidragit till resultatpresentationen. Det nämns även att försökspersonerna fått fylla i en enkät i någon del av försöket, men det saknas en närmare presentation av resultaten från denna.

I allmänhet presenteras endast generella och genomsnittliga resultat, och avseende gånghastighetens beroende av röktätheten ges ingen närmare beskrivning. Det är otydligt i resultatpresentationen hur dokumentationen av försökspersonernas gånghastighet dokumenterats; i synnerhet råder det en osäkerhet kring huruvida den dokumenterats över hela sträckan som försökspersonen tillryggalagt eller endast vid vissa utvalda punkter längs med rutten. Sannolikt görs presentationen gruppvis för de grupper av personer som valt samma väg ut (totalt fyra grupper) för de tre olika scenarierna. För de utgångar som låg inom 15-40 m från startpositionen varierade i så fall gånghastigheten mellan 0,45-0,64 m/s i scenario 1, 0,37-0,46 m/s i scenario 2 och 0,27-0,45 m/s i scenario 3. För den utgång som låg så långt bort som 160 m anges gånghastigheten ha varit 0,90 m/s i scenario 1, 0,76 m/s i scenario 2 och 0,87 m/s i scenario 3. Tolkningen är att dessa hastigheter avser ett medelvärde av gånghastighet för de personer som rörde sig till samma utgång, och att denna beräknats genom att dividera den kortaste sträckan mellan start- och slutposition med den totala tiden det tagit att röra sig mellan dessa punkter, det vill säga inklusive pauser.

Några slutsatser som kan dras baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- Majoriteten av försökspersonerna rapporteras ha förflyttat sig långsamt och försiktigt, inte sällan med armar och händer utsträckta framför sig som skydd, för att identifiera hinder framför dem och/eller för att använda väggen som vägledning.
- Ju mer information om ljudfyrarna försökspersonerna delgavs, desto större var benägenheten att använda utrymningsvägarna i tunneln framför portalerna.
- Författarna spekulerar i en inlärningseffekt då de försökspersoner som gick längst i tunneln tenderade att röra sig snabbast.

8.15 Akizuki, Yamao och Tanaka [21]

Akizuki et al. [21] beskriver ett experiment som genomfördes i en korridorliknande miljö i syfte att studera hur snabbt individer med olika synskärpa (*visual acuity*) förflyttar sig i miljöer med varierande belysningsnivå. I studien ingick även ett moment i vilket korridoren rökfylldes, men detta beskrivs inte särskilt utförligt. Totalt deltog 60 försökspersoner, varav 30 klassificeras som yngre (med en genomsnittlig ålder på 24,9 år) och 30 som äldre (med en genomsnittlig ålder på 70,2 år). För ändamålet användes en kal korridor med måtten 1,77 x 1,77 x 27,78 m (b x h x l) som delades in i tre delar med en adaptionszon motsvarande 5,58 m, en förflyttningszon motsvarande 18,48 m och en utvärderingszon motsvarande 3,72 m. Den så kallade adaptionszonen användes i vissa scenarier som en förberedelsezon, i vilken försökspersonerna fick viss tid att vänja sig vid den belysningsnivå som de senare exponerades för i försöket.

I försöket studerades förflyttning i korridoren vid åtta olika belysningsnivåer, från 0,03 lux till 100 lux. I dessa åtta grundscenarier var belysningsnivån i adaptionszonen densamma som i förflyttningszonen, men i försöket ingick även ytterligare elva scenarier. I dessa senare scenarier användes en högre belysningsnivå i adaptionszonen i syfte att studera hur detta påverkade förflyttningen i den senare förflyttningszonen av korridoren. Därtill tillkommer minst åtta scenarier, i vilka korridoren var

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

rökfylld för de olika belysningsnivåerna. Baserat på publikationen är det oklart huruvida varje försöksperson fick gå i korridoren i samtliga scenarier, eller endast i några utvalda scenarier.

Försökspersonernas position i korridoren dokumenterades var tredje meter med hjälp av infraröda sändare och mottagare; sändaren satt på ena väggen och mottagaren på den andra. När en person passerade sändaren blockerades helt enkelt den infraröda strålen. Det redogörs inte för hur data om belysningsnivåer eller röktäthet samlades in, eller vilka metoder som användes i analysen av materialet. Resultatpresentationen är relativt generell, och ofta redovisas genomsnittliga gånghastigheter för de två försöksgrupperna (det vill säga yngre och äldre) vid olika belysningsnivåer, så även för de scenarier då rök användes. Däremot lyfts ett detaljerat exempel fram i vilket enskilda individers gånghastighet redovisas som en funktion av röktätheten, nämligen i scenariot med 1 lux. Akizuki et al. [21] motiverar valet av exempel med att röktätheten just i det scenariot varierade som mest, närmare bestämt mellan ca 0,3 m^{-1} och 1,8 m^{-1}. I detta scenario varierade gånghastigheten mellan ca 0,5-1,2 m/s, med generellt högre gånghastigheter vid bättre siktsträcka än vid lägre.

Några slutsatser som kan dras baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- Den genomsnittliga gånghastigheten ökade successivt i intervallet mellan 0,3 lux och 3 lux för båda försöksgrupperna. Därefter, det vill säga i intervallet mellan 3 lux och 100 lux, är ökningen marginell. Vidare rör sig den yngre försöksgruppen generellt sett snabbare än den äldre i intervallet mellan 0,3 lux och 3 lux.
- Resultaten antyder att det inte nödvändigtvis är åldern som avgör hur fort en person rör sig, utan snarare synskärpan; när denna parameter beaktas i beskrivningen av en individs gånghastighet förefaller skillnaderna mellan yngre och äldre vara försumbara.
- I de scenarier där försökspersonerna exponerades för en högre belysningsnivå i adaptionszonen än i förflyttningszonen rör de sig inledningsvis långsamt, det vill säga början av förflyttningszonen, för att sedan öka mot slutet. En inlärningseffekt, eller kanske snarare en kontinuerlig adoptionsprocess under förflyttningen, verkar framträda.
- Försökspersonerna rör sig i genomsnitt långsammare i rök än i rökfri miljö för samma belysningsnivå.
- Liksom i rökfri miljö verkar försökspersonerna successivt öka gånghastigheten i belysningsintervallet mellan 0,3 och 3 lux. Därefter, det vill säga i intervallet mellan 3 lux och 100 lux, är ökningen marginell. Till skillnad från i fallet rökfri miljö rör sig dock den yngre försöksgruppen alltid snabbare än den äldre i röken.

8.16 Rinne et al. [56], [57]

Rinne et al. [56], [57] genomförde försök i en korridor. Längden på korridoren var 39 meter, men enbart 26 meter av korridoren var fylld med rök. Korridoren var en del av utrymningsvägen från en underjordisk anläggning som användes som en träningsanläggning av den av den finska militären. Enbart en delmängd av de försök som genomfördes av Rinne et al (2012) är relevanta eftersom de fokuserar på hur gånghastigheten påverkas av begränsad sikt. I korridoren fanns två utgångar, men en var blockerad i samband med försöket. Syftet med studien var att studera gånghastigheten och personers vägval. Försökspersonerna skulle hitta vägen ut trots att bara en utgång var tillgänglig (eftersom en utgång var blockerad).

Fyra scenarier med varierande sikt ingick i studien. Sikten i de olika scenarierna var > 40 m, 10-12 m, 5-7 m och < 1 m. Icke irriterande vit rök användes i försöket. Lampor och skyltar var tända i alla scenarier utom i det scenario då sikten var < 1m. I detta fall användes bara skyltarna. Värmekameror och ljusanordningar användes för att spåra försökspersonernas förflyttning. Totalt 42 försökspersoner deltog i studien. Enbart individuella försök genomfördes, men försökspersonerna delades in i fyra grupper. Den första gruppen utsattes för samtliga scenarier. Andra till fjärde gruppen deltog bara i ett scenario (10-12 m, 5-7 m eller < 1 m). Gånghastigheten presenteras som ett medelvärde för de 26

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

meter långa rökfyllda delen av korridoren. Resultaten presenteras som medelhastigheten för varje individ. Dessutom undersöks det för grupp 1 om lokalkännedom påverkade resultaten.

8.17 Fridolf [35], Fridolf, Ronchi, Nilsson och Frantzich [27], Fridolf, Andrée, Nilsson och Frantzich [36] och Fridolf [37]

Sommaren år 2011 genomfördes ett större utrymningsförsök i en gammal arbetstunnel till Södra länken i Stockholm. Det primära syftet med försöket var dels att studera nyttan av olika tekniska hjälpmedel vid utrymning i en rökfylld järnvägstunnel, till exempel vägledande markeringar och belysningsinstallationer, dels att dokumentera beteende och gånghastigheter i den här typen av miljö. Totalt medverkade 100 personer i försöket, varav majoriteten rekryterats från allmänheten i Stockholm. Femtiosex av dessa var män, 44 kvinnor och deras ålder varierade mellan 18 till 66 år. Den genomsnittlige försökspersonen var 29 år gammal.

Tunneln som användes i försöket var ca 300 m lång, varav 200 m utnyttjades för själva utrymningen. Dess bredd uppgick till ca 8 m, och höjden motsvarade ca 6,5 m. Miljön var i allmänhet mörk, och inga av de installationer som använts vid konstruktionen av Södra länken fanns kvar vid genomförandet av försöket. I den efterföljande analysen delades tunneln in i tre delar, där den första delen består av en sträcka på 122 m på slätt underlag med en lutning motsvarande ca 10 %. Den andra delen av försöksområdet bestod av en horisontell sträcka på 76 m, också den på ett slätt underlag. I den andra delen ingick dock en tredje del utmed höger tunnelsida som mätte 32 x 1,5 m (l x b) med ett ojämnare underlag, nämligen makadam i fraktionsintervallet 32-64 mm (vanligen det som används i banvallar). Denna tredje del var placerad ca 150 m in i tunneln, mätt från startområdet. Cirka 180 m in i tunneln, mätt från startområdet, installerades en utrymningsportal med en dörr som inte gick att öppna. Portalen hade utrustats med olika tekniska system som varierades i totalt fem olika scenarier med i storleksordningen 20 försökspersoner i varje scenario. Därutöver installerades belysningsarmaturer var 8 m på båda tunnelväggarna tillsammans med en skylt som informerade försökspersonerna om avståndet till den närmaste utrymningsvägen. Detta var den enda belysningen som fanns att tillgå under försöken, och belysningsnivån motsvarade ca 1 lux i rökfri miljö mätt i mitten mellan två armaturer intill väggen. Under försöket rökfylldes dock tunneln med konstgjord rök i vilken även ättika adderades för att skapa en milt irriterande miljö.

Samtliga försökspersoner deltog individuellt i försöket, som efter en allmän introduktion började med att försökspersonerna fick se en video från Stockholms tunnelbana. Därefter slussades de in i tunneln och instruerades att röra sig mot en säker plats. Efter avslutat försök leddes de ut igen av en forskare som följde försökspersonen i tunneln. Under försöken varierade röktätheten mellan ca 1-3 m^{-1} (i genomsnitt 2,2 m^{-1}). Den dokumenterades var 20:e sekund på två platser i tunneln under hela försöket med hjälp av laserutrustning på höjden en meter ovan mark. Därutöver dokumenterades försökspersonernas beteende, förflyttning och upplevelser under försöket genom att varje försök observerades och spelades in med videokamera samt i en efterföljande enkät- och intervjustudie. I enkätstudien deltog samtliga försökspersoner, och i den efterföljande intervjustudien deltog 66 personer. I den senare fick försökspersonerna svara på ett antal frågor kopplat till deras upplevelse och beteende samtidigt som de fick se på filmen av sin utrymning. Försökspersonernas förflyttning i tunneln analyserades detaljerat, det vill säga faktiskt förflyttad sträcka bestämdes. Analysen inkluderade även de eventuella pauser som försökspersonerna gjorde på vägen mot utrymningsvägen, och i resultatpresentationen ges en beskrivning av såväl försökspersonernas genomsnittliga och detaljerade gånghastighet. Den genomsnittliga gånghastigheten för respektive försöksperson låg någonstans mellan ca 0,4 och 1,4 m/s.

Några slutsatser som kan dras baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

- I genomsnitt förelåg inga större skillnader i gånghastighet i de tre olika delarna av försöksområdet. Det spekuleras i att de eventuella skillnader som skulle noterats i rökfri miljö utgår på grund av den mycket dåliga sikten i försöket, det vill säga att siktsträckan blir dimensionerande framför till exempel ett ojämnt underlag.
- Något direkt samband mellan försökspersonernas gånghastighet och röktätheten kunde inte urskönjas. Inte heller kunde någon korrelation mellan gånghastighet och ålder, längd, kön eller tidigare erfarenhet av att gå i tunnlar identifieras.
- Majoriteten av försökspersonerna valde att följa endera tunnelväggen. Som förklaring ges bland annat att det kändes tryggt och att det var där ljusinstallationerna fanns, vilket underlättade orienteringen i den annars mycket mörka tunneln. Handledare rekommenderas för framtiden dels för att underlätta och förflyttning, dels orientering och i vilken riktning utrymmande personer i rökfyllda tunnlar ska röra sig.
- Skyltar med information om avstånd till närmaste utrymningsväg uppskattades av den stora majoriteten av försökspersoner.
- Trots den dåliga sikten valde ca 80 % av försökspersonerna att röra sig i en upprätt position, ca 20% gick med böjd överkropp.

8.18 Fridolf och Frantzich [26] och Fridolf, Frantzich, Ronchi och Nilsson [38]

I publikationerna beskrivs förutsättningarna och resultaten av ett utrymningsförsök som genomfördes sommaren år 2014 i vägtunneln Norra länken i Stockholm. Syftet var i huvudsak att undersöka hur personer på bästa sätt kan ledas till en motstående tunnelvägg med utrymningsvägar i en rökfylld vägtunnel, men också att kvantifiera med vilken hastighet människor rör sig i rökfyllda tunnelmiljöer. Vid tidpunkten för försöket hade Norra länken fortfarande inte öppnat för trafik, men inom försöksområdet var tunnlarna i stor utsträckning färdigställda. En del av infrastrukturen utnyttjades därför inom ramen för försöket, till exempel de befintliga belysningsarmaturerna i taket. Däremot var i princip samtliga utrymningsinstallationer övertäckta för att försöket skulle kunna undersöka effekten av olika installationer var för sig. Dit hörde bland annat en utrymningsportal som installerats i det rökfyllda försöksområdet.

Totalt deltog 66 personer i försöket; både män och kvinnor i åldrarna 18-72 år som rekryterats från allmänheten. Samtliga deltog individuellt i försöket, fördelade i totalt fem olika scenarier med olika tekniska installationer aktiva i respektive scenario. Medverkan omfattade i huvudsak utrymningen av en rökfylld del av tunnelsystemet motsvarande ca 120 m, och därefter normal gång i en rökfri del av tunnelsystemet motsvarande ca 360 m. Underlaget i den rökfyllda delen av försöksområdet bestod av slät asfalt och lutningen varierade över hela sträckan; de första ca 25 m med en lutning nedåt motsvarande ca 0,5 %, en lutning som successivt avtog för at övergå i en lutning uppåt motsvarande ca 5% i slutet. Bredden mellan barriärelementen, det vill säga den fria bredden i försöksområdet, uppgick till ca 8,3 m och höjden var ca 5 m.

Under försöket dokumenterades röktätheten var 30:e sekund med laserutrustning ca 1 meter från marken på två olika positioner i tunneln. En så kallad IR-kamera användes för att spela in respektive utrymning i den rökfyllda miljön, och traditionella videokameror i den rökfri miljön. I den rökfyllda miljön dokumenterades hela förflyttningen, till skillnad från i den rökfria miljön där försökspersonernas position endast loggades i början och slutet av försöksområdet. Efter avslutat försök fick samtliga försökspersoner besvara en enkät om sina upplevelser; en enkät som på många sätt liknade den som användes vid försöket i Stockholm sommaren år 2011 [35]. Beräkningen av respektive försökspersons gånghastighet baserades på kännedom om avstånd mellan några positioner i tunneln (utmärkta med värmeindikatorer) och den tid det tog försökspersonerna att förflytta sig mellan dessa punkter. Beräkningen baseras alltså på det kortaste avståndet mellan värmeindikatorerna, och inte den faktiska sträckan som försökspersonen gick (som kan vara längre). Försökspersonernas gånghastighet i den rökfyllda miljön var i genomsnitt 1,2 m/s (standardavvikelse 0,3 m/s). Den långsammaste personen rörde sig med hastigheten 0,6 m/s och den snabbaste med hastigheten 1,9 m/s. I den rökfria miljön var den genomsnittliga gånghastigheten 1,6 m/s (standardavvikelse 0,2 m/s). Den

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

långsammaste personen rörde sig med hastigheten 1,0 m/s och den snabbaste med hastigheten 2,1 m/s. Det var inte samma personer som var snabbast respektivelångsammast i de två miljöerna. Övriga slutsatser som kan dras baserat på publikationen (givet de begränsningar som är förknippade med genomförandet):

- Många personer använda sina händer för att orientera och/eller röra sig framåt i den rökfyllda miljön, till exempel genom att känna sig fram längs tunnelväggen. Handledare rekommenderades därför för framtida tunnlar. Det spekuleras i att detta kan leda till högre gånghastigheter på grund av minskad osäkerhet.
- Resultaten på individnivå tyder inte på någon korrelation mellan individernas gånghastighet och föreliggande dämpningskoefficient. Inte heller kunde någon korrelation mellan gånghastighet och kön, ålder, längd eller vikt noteras.

8.19 Fuji, Sano och Ohmiya [39]

I försöket användes en korridorliknande geometri utan hinder med den totala längden 14,8 meter och en ungefärlig bredd på 1,8 meter (uppskattad från bilder och ritningar). Försökspersonerna fick gå 11 meter i korridoren vid försöket. Syftet med försöket var att undersöka påverkan av rök, belysning (allmänbelysning) och en utrymningsskylt på gånghastigheten. Totalt deltog 20 försökspersoner utan funktionsnedsättning som tillsammans gick 130 gånger genom korridoren. Varje försöksperson gick ensam i försöket och ingen gruppinteraktion studerades.

I försöket var dämpningskoefficienten 0 m^{-1}, 0,5 m^{-1}, 1,0 m^{-1} respektive 1,5 m^{-1}. Dessutom varierades belysningen (allmänbelysningen) mellan tänd och släckt. Utan rök var belysningsnivån 170 lx, men det framgår inte av artikeln var denna nivå uppmättes. Totalt tre belysningsarmaturer var placerade i taket längs med den 11 meter långa sträckan. Avståndet mellan armaturerna var 4 meter. I majoriteten av försöken fanns det en genomlyst utrymningsskylt i änden av korridoren.

Gånghastigheten bestämdes med hjälp av videokameror som placerades med två meters mellanrum i korridoren. Filmerna från dessa kameror synkroniserades och det bestämdes när försökspersonerna passerade linjer på golvet som syntes i filmerna. Försökspersonerna bar hjälm i försöken och på hjälmen fanns en markering (ett kryss). Denna markering var självlysande för att den skulle kunna ses i försöken med släckt belysning. Dessutom fanns det en laser monterad på hjälmen för att personernas placering skulle ses lättare vid låg belysning och rök.

Vid beräkningen av gånghastigheten togs eventuell acceleration och retardation bort. Det är dock inte helt tydligt från artikeln hur beräkningen av gånghastigheten gjordes, men det antyds att hastigheten mellan två närmast liggande linjer beräknades genom att ta vinkelräta avståndet mellan linjerna delat med den tid det tog för personen att komma från den första till den andra linjen.

Resultaten presenteras i artikeln som medelhastigheter för de olika scenarierna. Dessa hastigheter varierar mellan ca 0.8 m/s till ca 1.3 m/s. Vid tänd belysning var gånghastigheten ca 1,2 m/s oavsett om det fanns en utrymningsskylt eller inte i änden av korridoren för de tre dämpningskoefficienterna 0 m^{-1}, 0,5 m^{-1} och 1,0 m^{-1}. För röktätheten 1,5 m^{-1} sjönk gånghastigheten till ca 1,0 till 1,1 m/s. Vid släckt belysning utan rök (Cs = 0 m^{-1}) var det stor skillnad på gånghastigheten för fallen med och utan utrymningsskylt. Även röktätheten hade stor inverkan på gånghastigheten när belysningen var släckt. I artikeln har det dock inte undersökts om någon av dessa skillnader är signifikanta. I artikeln ges förslag på hur resultaten kan tolkas.

8.20 Seike, Kawabata och Hasegawa [48]

Seike et al. [48] genomförde ett försök i en rökfylld tunnel. Tunneln var 700 meter lång, 9,8 m bred och 6,9 m hög, men enbart 400 meter av tunneln användes i försöket. Enbart en delmängd av de försök som genomfördes av Seike et al [48] är relevanta eftersom de fokuserar på vad författarna definierar som normal gånghastighet. Experiment med utrymningsinstruktioner genomfördes också, men eftersom den observerade gånghastigheten var väldigt hög inkluderas dessa experiment inte inom

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

ramen för den här förstudien. Syftet med försöket var att undersöka människors gånghastighet i en rökfylld tunnel för det fall då dämpningskoefficienten understiger 1 m^{-1}. De valde detta område eftersom att Japanska regler rekommenderar dämpningskoefficienten på 0,4 m^{-1} och eftersom andra experiment inte tidigare studerat just detta intervall.

Gånghastigheten mättes med hjälp av stoppur genom att deltagarna tryckte på olika kontrollstationer (8 totalt, varje 100 m). Endast två sektioner användes (0-100 m och 200-300 m), eftersom belysningsnivån var lägre mellan 100 och 200 m än i andra sektioner. Ljuset i tunneln bestod av apelsinfärgade natriumlampor installerade på samma sätt som i en verklig tunnel. Belysningsstyrkan var mellan ca 40 och 100 lux. Tre hinder (2 m x 4 m) var därutöver installerade på slumpmässiga platser längs gångstråket.

Tre scenarier med varierande sikt ingick i studien. Dämpningskoefficienten ökades i tre steg från tunn till tjock rök, där varje steg kallas experiment I, experiment II respektive experiment III. En lasersensor användes för mätningarna. Dämpningskoefficienten var mellan 0.12-0.38 m^{-1} i experiment 1, mellan 0.46-0.87 m^{-1} i experiment 2 och mellan 0.56-1.1 m^{-1} i experiment 3. Icke irriterande och icke toxisk vit rök användes i försöket.

Totalt deltog 164 försökspersoner i studien och 263 datapunkter samlades in. Försökspersonerna var bland annat anställda av förvaltningsbolag, universitet och ett järnvägsföretag. Genomsnittsåldern var mellan 30 och 40 år. Förutom en kvinna var alla försökspersoner män. Deltagarna var utrustade med en säkerhetsväst, mask och hjälm, samt bar en smartphone för att efterlikna en ficklampas funktion. Gånghastigheten presenteras som ett medelvärde för de rökfyllda delarna av tunneln för varje individ. Den viktigaste slutsatsen som kan dras baserat på publikationen:

- Med tanke på att dämpningskoefficienten var under 1 m^{-1} anses gånghastighet inte ha påverkats nämnvärt av siktförhållandena.

8.21 Publikationer som inte inkluderades

Som nämnts ovan valdes ett antal studier bort efter en första genomläsning. Dessa presenteras kortfattat i *Tabell 4*. Det primära syftet med tabellen är att öka spårbarheten. Flera av studierna exkluderades till exempel på grund av att beröringspunkterna med människors förflyttning i rökfyllda miljöer ansågs vara för få eller svaga. Informationen i publikationerna kan dock vara intressanta för att öka förståelsen kring människors beteende och förflyttning i bränder.

Tabell 4. Publikationer som inledningsvis studerades i fas 1, men som kom att exkluderas i det fortsatta arbetet inom ramen för förstudien.

Referens	**Beskrivning**
Guo et al. [58]	Syftet med försöket av Guo et al. [58] var att undersöka utrymmande personers vägval vid god sikt och ingen sikt med hjälp av experiment och modellering. I försöken användes ingen rök. Personerna bar istället en mask för ögonen, vilken gjorde att de inte kunde se något när de utrymde försöksuppställningen, nämligen ett klassrum. Denna metod medför att studien av Guo et al. [58] avfärdades eftersom den inte fokuserar på hur försämrad sikt på grund av rök bidrar till reducerad gånghastighet.
Isobe et al. [59]	Likt försöket av Guo et al [58], försågs försökspersonerna i den aktuella studien med en ansiktsmask som gjorde att de inte såg något. Denna metod medförde att studien av Isobe et al. [59] avfärdades eftersom den inte fokuserar på hur försämrad sikt på grund av rök bidrar till reducerad gånghastighet.
Kady & Davis [60]	Syftet med det försök som genomfördes av Kady och Davis [60] var att undersöka hur personers egenskaper, till exempel kön och BMI, påverkar hur de går respektive kryper vid utrymning. Dock

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Referens	Beskrivning
	användes ingen rök i försöken och studien av Kady och Davis [60] ansågs därför inte relevant för den aktuella förstudien.
Nagai et al. [61]	I studien av Nagai et al. [61] undersöktes förflyttningen i en korridor då försökspersoner gick respektive kröp. Samtliga försök genomfördes i en rökfri miljö och försöken ansågs därför inte relevant för den aktuella förstudien.
Jeon et al. [53], [62]	Försöken som genomförts av Jeon et al. [53], [62] är exempel på uppställningar där forskare försökt att simulera en rökfylld miljö med hjälp av filter som placeras framför ögonen, till exempel en typ av mask som bara släpper igenom en andel av omgivningsljuset. I försöken görs ett försök att uppskatta vad en dämpning av ljusintensiteten orsakad av filtret motsvarar i termer av dämpningskoefficient eller sikt. Problemet med detta angreppssätt är att det föreligger en fundamental skillnad mellan ett filter framför ögonen och en rökfylld miljö. En rökfylld miljö kan liknas vid en situation med många filter mellan försökspersonen och det objekt som försökspersonen observerar. Om objektet ligger nära försökspersonen så är det som om det är få filter mellan, medan det är många filter om avståndet mellan objektet och försökspersonen är stort. Dämpningen av ljuset är därför inte samma för objekt som är placerade på olika avstånd, vilket är det antagande som görs om man ersätter en rökfylld miljö med ett filter framför ögonen. Metoden anses därför inte vara ett korrekt sätt att representera rök och misstänks ge upphov till stora felkällor.
Xie [63]	Xie [63] presenterar i sin studie en sammanställning av data från Frantzich och Nilsson [25], Jin et al. [14], [16], [34], [64] och Wright et al. [20]. Dessutom presenteras data från de så kallade SHEBA-försöken översiktligt. Det är dock inte möjligt att utläsa någon detaljerad information om SHEBA-försöken via Xies [63] publikation, eller på annat sätt, varför publikationen inte inkluderats inom ramen för denna förstudie.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

9 Bilaga 3: Bedömningsmall

Baserat på den matris som togs fram i förstudiens första fas skapades en bedömningsmall som användes i analysarbetet, se *Tabell 5*. För varje rad i bedömningsmallen matade ansvarig projektdeltagare in motsvarande uppgifter.

Tabell 5. Den bedömningsmall som användes i analysarbetet, det vill säga granskningen av respektive publikation som ingick i förstudien.

Kategori	Subkategori	Alternativ	Skala
Metod	Forskningsmetod	Fallstudie (1) eller experiment (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal
	Datainsamlingsteknik: Förflyttningsrelaterade aspekter	Observation, enkätundersökning och/eller intervjustudie	Nominal
		Ett medelvärde (1) eller flera mätpunkter (längs en sträcka) (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal
		Typ av gånghastighet: detaljerad med pauser (1), detaljerad utan pauser (2), fågelvägen med pauser (3) eller fågelvägen utan pauser (4). Om information saknas, ange -1.	Nominal
	Datainsamlingsteknik: Rökaspekter	Mätteknik (till exempel laserljus)	Text
		Mätintervall (det vill säga noggrannhet)	Text
		Mätplats (ange ungefär plats för mätning)	Text
		Mäthöjd (ange på vilken höjd mätning gjordes samt eventuell information om röken blandades inom försöksområdet)	Text
Försökspersoner	Allmän information	Allmän karaktäristika om försökspersonerna (till exempel "finska militärer")	Text
	Antal försökspersoner	Ange hur många som deltog i försöket	Intervall
	Deltagande	Deltog varje försöksperson en (1) eller flera gånger (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal
	Ålder	Genomsnittlig ålder +/- standardavvikelse, alt [min, medel, max]	Intervall
	Kön	Antal män/kvinnor	Text
	Känslighet	Eventuell närvaro av försökspersoner med en särskild känslighet för rök. Om ja, beskriv hur många och vilken typ. Om nej behövs ingen ytterligare beskrivning.	Text

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Kategori	Subkategori	Alternativ	Skala
	Tidigare erfarenhet	Eventuell närvaro av försökspersoner med tidigare erfarenhet, antingen av miljön som försöket genomfördes i eller av att ha deltagit i liknande försök. Om ja, ange hur många och vilken typ. Om nej behövs ingen ytterligare beskrivning.	Text
	Funktionsnedsättning	Eventuell närvaro av försökspersoner med någon form av funktionsnedsättning. Om ja, ange typen av funktionsnedsättning. Om nej behövs ingen ytterligare beskrivning.	Text
	Förhandsinformation om syftet med försöket	Anges på en skala mellan 1-3, där 1 motsvarar ingen/missledande/mycket begränsad information, 2 motsvarar begränsad allmän information (till exempel om själva genomförandet, men inte om de variabler/parametrar som studerades), 3 mycket information (till exempel information om vad som skulle hända, vilka variabler/parametrar som studerades, o s v). Om information saknas, ange -1.	Ordinal
	Förhandsinformation om försöksmiljön	Anges på en skala mellan 1-3, där 1 motsvarar ingen/missledande/mycket begränsad information, 2 motsvarar begränsad allmän information (till exempel kort, allmän information om försöksmiljön, installationer, närvaro av hjälpmedel och utgångar, m m) och 3 mycket information (mycket information rörande majoriteten av försöksmiljön, installationer, närvaro av hjälpmedel och utgångar, m m). Om information saknas, ange -1.	Ordinal
Rök	Dämpningskoefficient (1/m) (OBS! Ska anges beräknad med naturlig logaritm)	Genomsnittlig dämpningskoefficient +/- standardavvikelse, alt [min, medel, max]	Intervall
	Grad av irritation	Anges på en skala mellan 1-3, där 1 motsvarar ingen irritation, 2 motsvarar en mild irritation (till exempel genom ättiksprit) och 3 en hög grad av irritation (till exempel orsakad av riktig brandrök, tårgas, m m). Om information saknas, ange -1.	Ordinal
	Partikelfas	Fast fas (till exempel riktig brandrök) (1) eller vätskefas (till exempel konstgjord rök från rökmaskin) (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal
	Färg	Mörk (1) eller ljus (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal
	Värmeeffekter	Varm (1) eller kall (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal
	Toxicitet	Giftig (1) eller giftfri (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

Kategori	Subkategori	Alternativ	Skala
Försökmiljö	Hinder	Eventuell närvaro av hinder. Om ja, ange vilken typ. Om nej behövs ingen ytterligare beskrivning.	Text
	Belysning	Typ av belysning och position.	Text
		Ange belysningsnivå i lux	Intervall
	Synlig information	Typ av information och position	Text
	Akustisk information	Typ av information (till exempel bakgrundsljud, utrymningslarm och/eller meddelande, lokalt larm eller heltäckande larm, o s v)	Text
	Taktil information	Typ av information och position (till exempel handledare)	Text
	Närvaro av andra	Individuella försök (1) eller gruppförsök (2). Om information saknas, ange -1.	Nominal
Presentation	Gånghastighet	Presenteras information för resp individ (1), definierade grupper av individer (till exempel scenariovis) (2) eller som ett enda medelvärde (3). Om information saknas, ange -1.	Nominal

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

10 Bilaga 4: Alternativ metod för att beskriva och representera människors gånghastighet i rök

I den här rapporten har en rekommendation presenterats om hur människors gånghastighet i rök kan och bör representeras vid brandteknisk projektering. Oavsett hanteringen av föreliggande osäkerheter innebär rekommendationen att en individs gånghastighet i rök reduceras linjärt i förhållande till samme individs gånghastighet i rökfri miljö när siktsträckan är lika med eller mindre än tre meter. Implicit innebär det att representationen av människors gånghastighet i rök kommer att bero på gånghastigheten i rökfri miljö. Fullt stöd för att det verkligen är så saknas dock i den genomgångna litteraturen.

Vid framtagandet av rekommendationen utvärderades därför även en alternativ variant som dock ratades dels på grund av att den inte bedömdes som mer korrekt än den som presenterats ovan, dels på grund av att den bedömdes som besvärligare att tillämpa rent praktiskt. Den återges likväl i denna bilaga för ökad spårbarhet, och för att kunna tillämpas praktiskt i det fall ett sådant önskemål finns.

Precis som för den rekommendation som presenterats ovan består den alternativa rekommendationen av olika metoder att representera gånghastigheten beroende på nivån av osäkerhetshantering. En annan likhet är antagandena dels om vid vilken siktsträcka som en reduktion av människors gånghastighet kommer att inträda (3 meter), dels om en minsta gånghastighet (0,2 m/s). Diskrepansen i förhållande till den rekommendation som presenterats ovan består dock i huvudsak i hur reduktionen i siktsträcksintervallet 0-3 meter representeras. Detta redovisas i korthet för två olika fall av osäkerhetshantering nedan. Utgångspunkten, oberoende av metod, är att en individs gånghastighet bestäms genom att två olika gånghastigheter – en övre i rökfri miljö, och en lägre vid 0,5 meters siktsträcka – först definieras oberoende av varandra, och att en linje därefter dras mellan dem för att beskriva reduktionen i rök.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

10.1 Alternativ metod 1: Representationen sker på samma sätt för samtliga individer

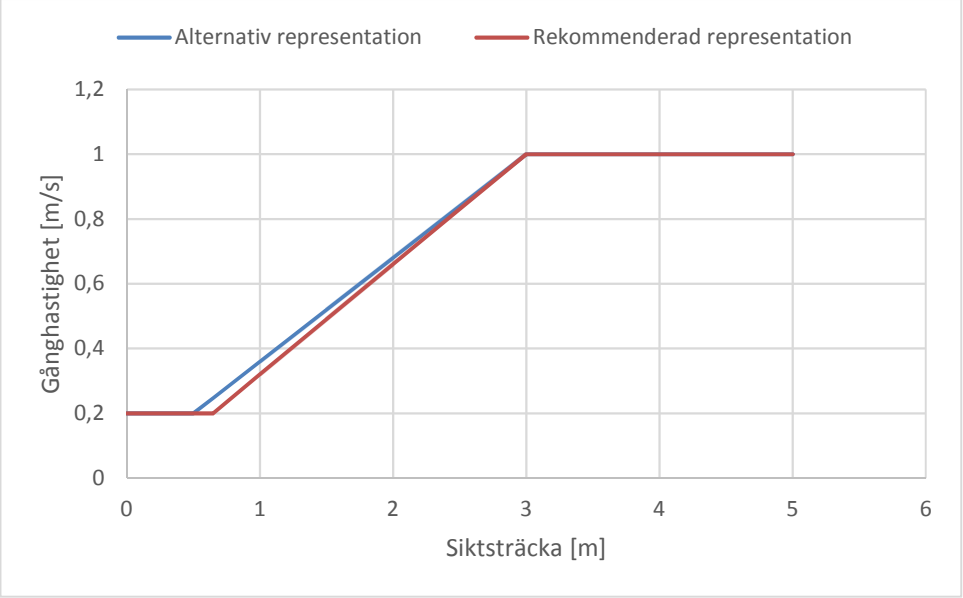
Praktiskt innebär alternativ metod 1 att människors gånghastighet i rök bestäms enligt följande princip:

- Gånghastigheten i rökfri miljö, det vill säga vid siktsträckor > 3 meter, representeras av det medelvärde för människors gånghastighet som redovisats av Fruin [50], minus cirka 1,5 standardavvikelse. Det motsvarar ungefär 1 m/s, och innebär att drygt 90 % av osäkerheten förknippad med människors gånghastighet i rökfri miljö täcks in.
- Gånghastigheten vid 0,5 meters siktsträcka representeras av 0,2 m/s.

Sambandet som beskriver människors gånghastighet i såväl rökfri som rökfylld miljö kan då beskrivas med följande ekvation (där *v* är individens gånghastighet [m/s] och *s* siktsträckan [m]):

$$v = \min\left(1; \max\left(0{,}2; \frac{(1-0{,}2)}{(3-0{,}5)} * (s-0{,}5) + 0{,}2\right)\right) = \min(1; \max(0{,}2; 0{,}32 * s + 0{,}04)$$

Konsekvensen av denna rekommendation illustreras grafiskt i *Figur 26*.



Figur 26. Alternativ representation (blå linje) av människors gånghastighet i rök då representationen sker på samma sätt för samtliga individer. I figuren ingår även den rekommenderade representation (röd linje) som presenterats ovan.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

10.2 Alternativ metod 2: Representationen sker individuellt

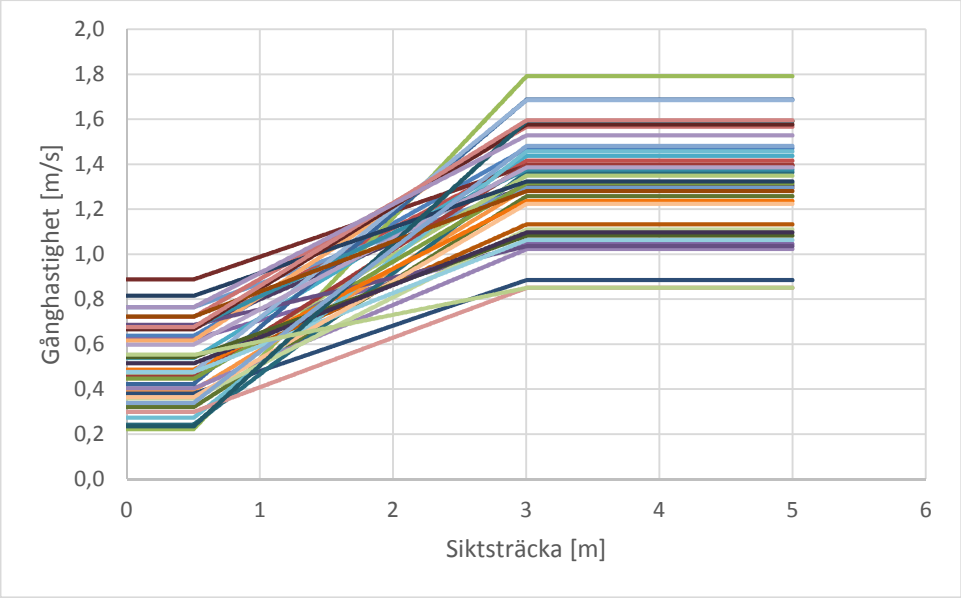
Praktiskt innebär alternativ metod 2 att människors gånghastighet i rök bestäms enligt följande princip:

- Respektive individs gånghastighet i rökfri miljö, det vill säga vid siktsträckor > 3 meter, representeras av ett randomiserat värde från en normalfördelningskurva med väntevärde 1,35 m/s och standardavvikelse 0,25 m/s (baserat på Fruin [50]) med minimi- och maximigränserna 0,85 respektive 1,85 m/s.
- Respektive individs gånghastighet vid 0,5 meters siktsträcka representeras av ett randomiserat värde från en likformig fördelningskurva med minimi- och maximigränser som baseras på prognosintervallets bredd för 95 % konfidensgrad i *Figur 22*, dock lägst 0,2 m/s och högst individens gånghastighet i rökfri miljö.

Sambandet som beskriver människors gånghastighet i såväl rökfri som rökfylld miljö kan då beskrivas med följande ekvation (där $v_{rökfri}$ är individens gånghastighet i rökfri miljö, $v_{rökfylld}$ är individens gånghastighet i rökfylld miljö vid 0,5 meters siktsträcka [m/s] och s siktsträckan [m]):

$$v = \min(v_{rökfri}; \max\left(v_{rökfylld}; \frac{(v_{rökfri} - v_{rökfylld})}{(3 - 0{,}5)} * (s - 0{,}5) + v_{rökfylld}\right))$$

Konsekvensen av denna rekommendation illustreras grafiskt i *Figur 27*.



Figur 27. Exempel på hur representationen av människors gånghastighet i rök kan se ut när representationen sker individuellt med den alternativa rekmomendationen.

© SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut AB

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP-koncernens vision är att vara en internationellt ledande innovationspartner. Våra 1 400 medarbetare, varav över hälften akademiker och cirka 380 med forskarutbildning, utgör en betydande kunskapsresurs. Vi utför årligen uppdrag åt fler än 10 000 kunder för att öka deras konkurrenskraft och bidra till hållbar utveckling. Uppdragen omfattar såväl tvärtekniska forsknings- och innovationsprojekt som marknadsnära insatser inom provning och certifiering. Våra sex affärsområden (IKT, Risk och Säkerhet, Energi, Transport, Samhällsbyggnad och Life Science) svarar mot samhällets och näringslivets behov och knyter samman koncernens tekniska enheter och dotterbolag. SP-koncernen omsätter ca 1,5 miljarder kronor och ägs av svenska staten via RISE Research Institutes of Sweden AB.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02
E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se
www.sp.se

SP Rapport 2016:81
ISBN 978-91-88349-70-5
ISSN 0284-5172

Mer information om SP:s publikationer: **www.sp.se/publ**

PART OF RI.SE