

Modellering av utrymningshissar som utrymningsväg från djupa undermarksanläggningar

- En undersökning av utrymningshissars effektivitet

ANNA-LENA JOHANSSON & OSCAR MÅRTENSSON |
AVDELNINGEN FÖR BRANDTEKNIK |
LTH | LUNDS UNIVERSITET |



**Modellering av utrymningshissar som utrymningsväg från djupa
undermarksanläggningar**
– En undersökning av utrymningshissars effektivitet

Anna-Lena Johansson & Oscar Mårtensson

Lund 2022

Titel: Modellering av utrymningshissar som utrymningsväg från djupa undermarksanläggningar
– En undersökning av utrymningshissars effektivitet
Title: Modelling of evacuation elevators as an escape route from deep underground facilities
– An investigation of the efficiency of evacuation elevators

Författare/Authors: Anna-Lena Johansson & Oscar Mårtensson

Report 5656

ISRN: LUTVDG/TVBB--5656--SE

Antal sidor/Number of pages: 72

Illustrationer: Om inte specificerat, tillhör alla illustrationer författarna.

Illustrations: If not specified, all illustrations belong to the authors.

Sökord:

Utrymning, utgång, hiss, undermark, byggnad, utrymningshiss, utrymning i uppåtgående riktning, trappor, modell, val av utrymningsväg, mänskligt beteende

Keywords:

Evacuation, egress, elevator, underground, building, evacuation elevator, emergency elevator, ascending evacuation, stairs, model, occupant evacuation elevator, OEE, exit choice, human behaviour

Abstract

Elevators could be an important alternative means of egress when it comes to evacuation. This report is the result of a model developed to calculate the efficiency of elevator evacuation in different scenarios in deep underground facilities. The model is an Excel-tool designed to be applicable in different tailor-made scenarios for analysis and comparison. This report includes four different cases that focus on comparing the differences between ascending stair evacuation and the use of emergency evacuation elevators. Due to the scarce information and uncertainty in the literature of social impact regarding usage of evacuation elevators, this is investigated in one of the cases. Results include and focus on total evacuation time, total number of people in need of help from rescue service and the total cost due to different designs. Results indicate that for evacuation time there is an optimal number of elevators in deep underground facilities when considering costs, total evacuation time and number of people in need of assistance. It also shows that these results are strongly connected to the evacuees' willingness to use the elevators in an emergency. The model and data presented in this report provide useful information in both construction design as well as the calibration and validation of evacuation modelling tools.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering
Lund University, Lund 2022

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2022.

Avdelningen för Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

<http://www.brand.lth.se>
Telefon: 046 - 222 73 60

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

<http://www.brand.lth.se>
Telephone: +46 46 222 73 60

Sammanfattning

I takt med att storstäderna i världen har växt de senaste decennierna har också behovet av transportlösningar under mark ökat. En problematik som uppstår vid utrymning från djupa undermarksanläggningar är att personer ofta måste kunna utrymma långa vertikala avstånd, vilket ställer höga krav på personers fysiska förmåga vid utrymning via trappor. Utrymningshissar är en intressant utrymningslösning från djupa undermarksanläggningar då samtliga personer i anläggningen effektivt kan utrymma till det fria på egen hand. Studier pekar på att en hög andel personer kan tänka sig använda utrymningshissar som utrymningsväg med rätt tekniska förutsättningar. Däremot är forskningen om utrymning via utrymningshissar fortfarande begränsad. Det finns således ett behov av att undersöka vilka faktorer samt deras ingående osäkerheter som påverkar utrymningshissarnas effektivitet mest, varvid framtida forskning bör inriktas på dessa.

För att identifiera vilka faktorer som påverkar utrymningshissarnas effektivitet som utrymningsväg mest togs en utrymningsmodell fram. Syftet med modellen var att den på ett övergripligt men realistiskt sätt skulle beskriva en utrymning från en undermarksanläggning som nyttjar utrymningshissar. Med hjälp av modellen kunde det sedan undersökas vilka faktorer som påverkar hissarnas utrymningseffektivitet mest genom att undersöka ett antal olika fall i en djup tunnelbanestation samt med hjälp av känslighetsanalyser. En av de största osäkerheterna i litteraturen var hur social påverkan inverkar på val av utrymningsväg, varvid detta inkluderades som ett eget fall. För att kunna jämföra hur fallen påverkade resultatet undersöktes även ett referensfall, vilket bedömdes vara det fall som är mest sannolikt enligt befintliga studier och rimliga antaganden. Samtliga fall listas nedan:

- Ett referensfall där de uppskattade andelarna av personer som väljer mellan hissar och trappor uppskattas enligt befintliga studier och rimliga antaganden.
- Ett fall där samtliga individer i byggnaden antas använda hissen som utrymningsväg.
- Ett fall där samtliga individer i byggnaden antas använda trappan som utrymningsväg.
- Ett fall där fler byter till trappa från hiss på grund av social påverkan.

Baserat på de undersökta fallen kunde ett antal slutsatser dras. För att minimera utrymningstiden anses en kombination av utrymningshissar och trappor vara lämplig. Utrymningstiden minskar med ett ökande antal hissar, men denna tidsvinst avtar när antalet hissar blir stort och det till slut är utrymningstiden via trappor som tar längst tid. Detta talar för att det finns ett optimalt antal hissar. Utrymningshissarnas effektivitet är kraftigt beroende på vilka kötider till hiss som accepteras samt social påverkan. Detta talar för att det behövs ett tillräckligt stort personflöde via hissarna för att de ska fungera som utrymningslösning. Enligt känslighetsanalyser kan detta enklast uppnås genom att ha fler hissar, en ökad personkapacitet i varje hiss eller att se till att göra det lätt för personer att gå in och ut ur hissarna. Om personer inte är särskilt benägna att välja hiss, utan byter till trappa, kommer antalet personer som inte kommer att klara att gå hela vägen upp till marknivå att öka. Vid djup som överstiger 100 meter börjar andelen som når det fria sjunka kraftigt på grund av populationens kondition. En slutsats som kan dras är att kostnaden för varje sparad minut på utrymningstiden ökar kraftigt ju fler hissar som installeras. Detta antyder att undermarksanläggningar har ett optimalt antal utrymningshissar även ur kostnadssynpunkt.

Summary

In the last decades cities have developed and evolved which also have meant an increase of transportation system underground. A problem that arises when evacuating from deep underground facilities is that people must be able to evacuate long vertical distances, which requires a certain physical ability when evacuating using the stairs. Emergency elevators allows all evacuees to be able to effectively evacuate on their own. Studies have shown that many evacuees are willing to use emergency elevators under certain conditions, including technical installations. Available research on the usage of emergency elevators is limited. There is therefore a need to address the uncertainties and factors that affect the efficiency of emergency elevators for future research.

A model was developed to identify which factors that most affect the efficiency of emergency elevators as a means of evacuation. The purpose of the model was to describe an evacuation comprehensively but realistically from an underground facility that uses emergency elevators. With the model it was possible to investigate which factors that affect the elevators evacuation efficiency the most. By examining several different cases in a fictitious deep metro station and with the help of sensitivity analysis a result was concluded. One of the biggest uncertainties in the literature was how social impact affects the choice of escape route, which was therefore included as a separate case. To be able to compare the different cases, a reference case was constructed. The reference case is built on the most likely probabilities according to existing studies and reasonable assumptions. Listed cases below:

- A reference case where the estimation of evacuees who choose between elevators and stairs are estimated according to existing studies and reasonable assumptions.
- A case where all individuals in the building are assumed to use the elevator as an escape route.
- A case where all individuals in the building are assumed to use the stairs as an escape route.
- A case where more people switch to stairs from an elevator due to social impact.

Based on the investigated cases, several conclusions could be drawn from this study. To minimize the evacuation time, a combination of evacuation elevators and stairs is suitable. The evacuation time decreases with an increasing number of elevators, but the effect decreases when the number of elevators becomes large and, in the end, it is the evacuation time through stairs that takes the longest time. This suggests that there is an "optimum" number of elevators. The efficiency of evacuation elevators strongly depends on the acceptance of queue times for elevators and social impact. This suggests that a sufficiently large flow of people through the elevators is needed for them to function as an efficient evacuation solution. According to the sensitivity analysis, this can be achieved by having more elevators, an increased passenger capacity in each elevator or making it easier for people to get in and out of the elevators. If a great amount of people are likely to switch from elevators to stairs, there will also be an increased amount of people who can't complete the stair evacuation. At depths that exceeds 100 meters, the amount of people that reaches the surface will decrease drastically due to the population's fitness. One conclusion that can be drawn is that the cost of every minute saved during the evacuation time increases sharply the more elevators are installed. This suggests that underground facilities have an "optimum" number of evacuation lifts regarding costs as well.

Förord

Efter ett antal månaders arbete står vi äntligen på randen till examen. Examensarbetet blir den slutliga knuten på säcken för våra år som studenter vid Lunds Tekniska Högskola. Att dessa år har varit både roliga och lärorika är något vi håller gemensamt, och detta examensarbete har varit ett ypperligt tillfälle för oss att nyttja erhållna kunskaper. Ett arbete är inte fulländat utan både motgång och medgång, vilket även vi fått uppleva. Men med dialog och kompromisser kommer man långt – allra helst under en fikapaus.

Examensarbetet utförs inom kursen VBRM10 och omfattar 30 högskolepoäng. Arbetet har utförts under höstterminen 2021 och är den avslutande kursen för brandingenjörsprogrammet samt Civilingenjörsutbildningen inom riskhantering.

Vi ämnar tacka de personer som varit delaktiga i arbetet, utan dessa kunskaper och erfarenheter hade detta arbete inte varit möjligt. Eller jo kanske, men det hade tagit betydligt längre tid. Vi vill även tacka de som stått oss nära under detta till synes oändliga skrivande – äntligen är vi i mål.

Håkan Frantzych

Universitetslektor vid avdelningen för Brandteknik och handledare. *Tack för stöttning och vägledning, även ett och annat skratt under handledarmötena.*

Axel Mossberg

Forskningschef och brandkonsult på Bengt Dahlgren och extern handledare. *Tack för kunskap och värdefulla kommentarer, det är här grunden till vårt arbete har lagts.*

Enrico Ronchi

Universitetslektor vid avdelningen för Brandteknik. *Tack för expertis inom utrymningssimuleringar.*

Karl Fridolf

Nationell samordnare tunnelsäkerhet på Trafikverket. *Tack för input och kommentarer på framför allt vår modell.*

Göran Nygren

Brand- och riskingenjör samt gruppchef på WSP. *Tack för input och kommentarer på framför allt vår modell.*

Niklas Wetterberg

Brand- och riskingenjör på Deap. *Tack för input och kommentarer på framför allt vår modell.*

Vänner och familj

Tack för stöd och pepp, inte bara under detta arbete utan alla år på LTH. Genom varje tentaperiod, genom varje efterfest. Stort tack.

Anna Fasold

Frida Hansson

Carl Ljungkvist

Brandingenjörer, klasskamrater och framför allt nära vänner. *Om det så vore under tentaperiodernas längsta dagar, höstfesterna eller tidiga morgonföreläsningar. Ni har haft vår rygg genom alla dessa år, och vi ser fram emot fortsättningen - fast numera som kollegor i branschen.*

Lund 2021

Anna-Lena Johansson

Oscar Mårtensson

Symbolista

$A_{hisschakt}$	Area på hisschakt [m^2]
$A_{trappschakt}$	Area på trappschakt [m^2]
$bredd_T$	Trappbredd [m]
D	Persontäthet i trappan [pers/ m^2]
Kap_H	Hisskapacitet [pers]
K_H	Kostnad per hiss [tkr]
K_{Htot}	Total kostnad för hissar [tkr]
K_{schakt}	Schaktkostnad [tkr/ m^3]
K_T	Kostnad per trappa [tkr/våning]
K_{tot}	Total kostnad [mkr]
K_{Ttot}	Total kostnad för trappor [mkr]
K_{UV}	Kostnad per utrymningsvåning [tkr]
K_{UVtot}	Total kostnad för utrymningsvåningar [tkr]
n_H	Antal hissar
n_T	Antal trappor
$n_{trapphus}$	Antal trapphus
p_{byter}	Andel som först valde hiss men byter till trappa på grund av social påverkan
$Pers_{tot}$	Antal personer i hisshall
$Pers_H$	Förväntat antal personer i hiss
$Pers_{Hisskö}$	Antal personer som kan ta hissen inom den maximalt accepterade kötiden
$Pers_{byter}$	Antal personer som byter från hiss till trappa på grund av lång kötid
$Pers_{UP}$	Antal personer i utrymningsplatser
$Pers_{UV}$	Antal personer i utrymningsvåningar
$Pers_{RTJ}$	Antal personer som inväntar hjälp från räddningstjänst
p_H	Andel som först väljer hiss baserat på stationsdjup
p_T	Andel som väljer trappa
$p_{rörelsehinder}$	Andel rörelsehindrade i hisshall

p_{UP}	Andel personer som nyttjar utrymningsplats
p_{UV}	Andel i trappa som behöver utrymningsvåning
$p_{väljer}$	Andel som först kan tänka sig välja hiss
t_{fyll}	Tid för hissfyllning [s]
t_H	Total restid för hiss att åka upp och ner [s]
$t_{Hdö}$	Tiden det tar för hissdörrarna att öppnas [s]
t_{Hds}	Tiden det tar för hissdörrarna att stängas [s]
t_{Hutr}	Total utrymningstid, hiss [min]
$t_{Hisskö}$	Maximalt accepterad kötid för hiss [min]
t_T	Total tid att gå upp från hisshall till markplan [s]
$t_{Trappkö}$	Kötid för trappa [s]
t_{Tutr}	Total utrymningstid, trappa [min]
$t_{töm}$	Tid för hisstömning [s]
t_{utr}	Total utrymningstid [min]
$v_{gång}$	Gånghastighet i trappa [m/s]
v_H	Hisshastighet [m/s]
v_{stig}	Stighastigheten i trappa [m/s]
Z	Djup på hisshall [m]
Q_H	Personflöde via hissar [pers/s]
Q_S	Specifikt personflöde i trappa [pers/(m·s)]
Q_T	Personflöde via trappor [pers/s]
η_H	Nyttjandegrad av hiss [%]

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	2
1.3	Frågeställningar	2
1.4	Avgränsningar och begränsningar	2
2	Metod	3
2.1	Litteraturstudie.....	3
2.2	Modellens uppbyggnad.....	3
2.3	Jämförelse av fall och känslighetsanalys.....	4
3	Litteraturstudie	5
3.1	Gällande föreskrifter	5
3.2	Utformningsmöjligheter för utrymning under marknivå.....	5
3.2.1	Vertikal utrymning	6
3.2.2	Befintliga modeller.....	6
3.2.3	Problematik med trapputrymning.....	7
3.3	Inträffade bränder	9
3.3.1	King's Cross Station (London, 1987)	9
3.3.2	Baku Metro (Azerbadjan, 1995).....	10
3.3.3	Daegu Metro (Sydkorea, 2003).....	10
3.4	Hiss som utrymningsväg	10
3.4.1	Utformning av utrymningshiss.....	10
3.4.2	Riskperception av hissar.....	11
3.5	Människors beteende vid utrymning	12
3.5.1	Teoretiska ramverk.....	12
3.5.2	Självuppskattat beteende vid utrymning	13
3.5.3	Observerat beteende	15
3.6	Personer med nedsatt rörelseförmågas möjligheter att utrymma	17
4	Modellen	19
4.1	Uppbyggnad.....	19
4.2	Förutsättningar.....	21
4.2.1	Giltighetsområde	21
4.2.2	Användning	22
4.2.3	Begränsningar.....	22

4.3	Val av utrymningsväg.....	22
4.3.1	Hissutrymning	23
4.3.2	Utrymningsplatser	27
4.3.3	Trapputrymning.....	28
4.4	Kostnader.....	33
4.5	Beräknade variabler	34
4.5.1	Utrymningsvariabler.....	34
4.5.2	Kostnadsvariabler.....	35
5	Undersökning av fall.....	37
5.1	Referensfall - station Sofia	37
5.2	Fall 1: Hiss som enda utrymningsväg.....	38
5.3	Fall 2: Trappa som enda utrymningsväg	39
5.4	Fall 3: Fler byter till trappa.....	39
6	Resultat	40
6.1	Referensfall - station Sofia	40
6.2	Jämförelse mellan olika beräkningsfall	41
6.3	Känslighetsanalys	42
7	Diskussion.....	45
7.1	Källor.....	45
7.2	Modellen.....	46
7.3	Allmänt.....	47
8	Slutsatser	49
9	Förslag på framtida studier	50
	Referenser.....	51
	Bilaga A.....	56
	Bilaga B.....	60
	Bilaga C.....	62

1 Inledning

1.1 Bakgrund

I takt med att storstäderna i världen har växt de senaste decennierna har också behovet av transportlösningar under mark ökat (Fridolf, Norén, & Delin, 2014). Väg- och järnvägstunnlar byggs idag både längre och djupare än tidigare (worldatlas, 2021). Däremot har kunskapsläget inom utrymningssäkerhet från undermarksanläggningar inte hängt med i utvecklingen, något som uppmärksammas på senare tid (Ronchi, et al., 2015). Problematiken kopplad till utrymning från djupa undermarksanläggningar har blivit aktuellt i Sverige i samband med att tunnelbanan i Stockholmsregionen byggs ut. Detta då en av tunnelbanestationerna, station Sofia, är planerad att byggas på drygt 100 meters djup (Stockholms läns landsting, 2021).

En problematik som uppstår vid utrymning från djupa undermarksanläggningar är att personer ofta måste kunna utrymmas långa vertikala avstånd. Vid utrymning uppåt via trappor eller stillastående rulltrappor ställer detta höga krav på personers fysiska förmåga (Ronchi, et al., 2015). Detta gör det svårt, om inte omöjligt, för äldre, barn och personer med nedsatt rörelseförmåga att utrymma på detta vis (Lam, Yuen, Lee, & Lee, 2014). Dessa personer hade vid en utrymning därför behövt invänta hjälp på utrymningsplatser vid hisshallen eller på utrymningsvåningar i trapporna för fortsatt utrymning. Studier visar att många av de som förväntas nyttja utrymningsplatser i samband med en utrymning upplever detta som otryggt (Andrée, Jönsson, Bengtson, & Frantzich, 2015). Utrymningshissar kan effektivisera utrymningen från en djup undermarksanläggning då personer som annars hade behövt invänta hjälp istället kan utrymma på egen hand och utan hjälp från till exempel räddningstjänsten. För personer som har svårt att gå i trappor utgör hissar en naturlig utrymningsväg då personerna är vana användare av hissar (Bukowski & Jensen, 2012) samt att de kan nyttjas av nästan alla (Boyce, 2017).

Trots att hissar är en av de allra vanligaste vertikala transportlösningarna i till exempel höghus är användningen av dessa som utrymningsväg långt ifrån självklar. Detta är något som diskuterats i nästan 30 år (Klote, Deal, Levin, Groner, & Donoghue, 1993). Sedan dess har utformningen och de brandtekniska kraven som ställs på hissarna blivit klarare, varvid hissarna kan tekniskt utformas så att de är säkra vid brand (Mossberg & Nilsson, 2018). Då det idag finns fler regelverk och standarder gällande utrymningshissars utformning, byggs fler och högre byggnader samt att utrymningshissar i många fall effektiviserar utrymningsförloppet från dessa har de blivit allt vanligare runt om i världen (Mossberg, Nilsson, & Wahlqvist, 2021). Även om hissarna är tekniskt säkra vid brand behöver utrymmande känna sig bekväma med att använda dem. Detta är inte självklart då allmänheten uppmanas att inte använda vanliga hissars vid brand. Flera studier har därför gjorts för att försöka bättre förstå hur människor interagerar med hissarna vid en utrymning (Mossberg, Nilsson, & Wahlqvist, 2021; Arias, Mossberg, Nilsson, & Wahlqvist, 2021). Studierna pekar på att en hög andel personer kan tänka sig använda utrymningshissar som utrymningsväg med rätt tekniska förutsättningar.

Utrymningshissar är intressant som utrymningslösning från djupa undermarksanläggningar då samtliga personer i anläggningen kan effektivt utrymma till det fria på egen hand. Däremot är forskningen om utrymning via utrymningshissar fortfarande begränsad. Det finns således ett behov av att undersöka vilka faktorer och deras osäkerheter som påverkar utrymningshissarnas effektivitet mest, varvid framtida forskning bör inriktas på dessa.

1.2 Syfte och mål

Syftet med arbetet är att undersöka hur olika mänskliga och tekniska faktorer påverkar utrymningshissars effektivitet som utrymningsväg från undermarksanläggningar belägna djupt under mark.

Målet är att genom en litteraturstudie framställa en modell vilken beskriver hur en utrymning från en djup undermarksanläggning går till. Modellen ämnar till att identifiera vilka faktorer som påverkar utrymningshissarnas effektivitet som utrymningsväg mest. Faktorerna förväntas avgöras med modellen genom att undersöka ett antal olika fall i en djup tunnelbanestation samt med hjälp av känslighetsanalyser.

1.3 Frågeställningar

Vilka faktorer är det som har störst påverkan på utrymningseffektiviteten av utrymningshissar?

Finns det ett optimalt antal hissar och trappor som ger högst utrymningseffektivitet i en djup undermarksanläggning?

Vilken påverkan har möjligheten för självutrymning via utrymningshissar på antalet personer som når det fria?

1.4 Avgränsningar och begränsningar

Arbetet avgränsas till att undersöka utrymningshissars effektivitet som utrymningsväg i en tunnelbanestation i Sverige. På grund av en begränsad mängd anläggningar av denna sort baseras modellen konceptuellt på ett verkligt projekt. Beräkningar avgränsas görs främst utifrån de svenska standarder och praxis som finns inom bygg och installation, där kostnader anges i kronor. Utrymningshissarnas användning undersöks endast i utrymningsfallet.

2 Metod

Arbetet har utförts med en utforskande metodik beskrivet av Höst, Regnell och Runeson (2006) som: ”studier som syftar till att på djupet förstå hur något fungerar eller utförs”. Syftet var att förstå vilka faktorer som avgör utrymningshissars effektivitet från djupa undermarksanläggningar, och försöka kvantifiera detta med en modell.

Arbetet delades in i tre huvudsakliga delar; litteraturstudie, modellens uppbyggnad samt jämförelse av olika fall. Respektive del beskrivs mer utförligt under rubrikerna nedan.

2.1 Litteraturstudie

Arbetet inleddes med att samla in data över tidigare studier och forskning gällande utrymningshissar. Detta gjordes genom att fastställa vilka sökord och databaser som skulle ligga till grund för sökningen. För att hitta relevant litteratur användes databaserna LUBsearch och ScienceDirect. LUBsearch är en sökmotor för Lunds universitets bibliotek som ger tillgång till en stor del av bibliotekets elektroniska och fysiska samlingar (LUBsearch & Electronic Resources, 2021). ScienceDirect är en hemsida som ger tillgång till en stor databas för både vetenskapliga och medicinska publiceringar från den holländska utgivaren Elsevier (About ScienceDirect, 2021). Därefter påbörjades sökningarna och relevant litteratur valdes utifrån titel och abstrakt. Efter att samtliga relevanta sökningar hade gjorts lästes litteraturen mer utförligt och en kort sammanfattning skrevs för varje publikation för att lättare hantera all information som insamlats. Litteratur tillhandahölls även av handledare och andra personer kopplade till arbetet.

Det kompletta sökprotokollet redovisas i Bilaga A. Sökningarna har skett på engelska.

2.2 Modellens uppbyggnad

Baserat på litteraturstudien identifierades ett antal variabler som kan påverka en utrymning via hissar från en djup undermarksanläggning. Modellen utgår från de utrymmandes val av utrymningsväg i en utrymningssituation, där dessa beslut tillskrivs sannolikheter. För att identifiera samtliga variabler samt hur de påverkar varandra ritades ett flödesschema upp över beslutsprocessen. Modellens uppbyggnad uppdaterades kontinuerligt under arbetets gång i samband med att ny litteratur lästes eller vid granskningar från personer med kunskap och expertis inom området.

Modellen konstruerades i programvaran Excel. Syftet var att göra en modell som är lätt att använda och som samtidigt ger goda möjligheter att göra ändringar efter behov. Målet var att ge ett verktyg med tydligt definierade variabler med tillhörande beskrivningar samt göra de olika kopplingarna mellan variablerna överblickbar. Användarvänligheten av modellen har således varit i fokus genom hela modelleringen. Detta har bland annat gjorts genom förklarande texter och kommentarer till respektive variabel i modellen som användaren kan behöva ta hänsyn till.

Baserat på modellens uppbyggnad beskriven ovan samlades indata till samtliga variabler. Data samlades huvudsakligen in med hjälp av den undersökta litteraturen som hittades i litteraturstudien, men även till exempel via sökningar på nätet samt kontakt med relevanta aktörer som till exempel hissinstallatörer. För att ta hänsyn till osäkerheter hos vissa variabler används sannolikhetsfördelningar. Dessa anger sannolikheten att en variabel antar ett visst värde. För variabler med begränsad tillgång till data och stora osäkerheter ansattes en likformig fördelning baserat på det lägsta och högsta identifierade värdet. Om det fanns underlag för att ett visst värde

inom detta intervall är mer sannolikt har en triangelfördelning nyttjats. Inskaffandet av data till modellen och förfinande av fördelningarna gjordes i den utsträckning tiden räckte till. I enstaka fall användes den befintliga litteraturen för att ta fram egna samband mellan variabler.

Modellens uppbyggnad verifierades med hjälp av tredjepartsgranskningar av personer med olika expertis och bakgrund inom området. Verifieringarna bestod av att granskarna gavs de delar i rapporten som berörde modellens uppbyggnad och funktioner, lämnade kommentarer och i samråd med författarna tog arbetet framåt. Den slutgiltiga modellen beskrivs under kapitel 4.

2.3 Jämförelse av fall och känslighetsanalys

För att undersöka utrymningshissars effektivitet som utrymningsväg konstruerades ett antal olika fall, vilka jämfördes mot ett referensfall. På grund av den mängd information som fanns tillgänglig valdes station Sofia och dess utformning som referensfall.

För att undersöka hur de ingående variabelernas osäkerheter påverkade analysens resultat nyttjades programvaran @Risk (Version 8) (Palisade Risk Analysis, 2021). @Risk är ett tillägsprogram till Excel vilken låter användaren göra statistiska undersökningar. Med @Risk kunde en Monte Carlo-analys genomföras där varje variablers värde i modellen slumpades ett stort antal gånger enligt deras respektive fördelning. Detta gav en fördelning över resultatet och en möjlighet att beskriva osäkerheterna av beräkningarna.

3 Litteraturstudie

Litteraturstudien har främst utförts för att få en inblick i tidigare utförd forskning inom området. Fokus har legat på information som ansetts vara relevant för de frågeställningar som formulerats, men även den information som krävs för att sammanfatta kunskapsläget gällande både utrymningshissar och utformning av undermarksanläggningar i dagens läge.

3.1 Gällande föreskrifter

Bestämmelser om krav för att säkerställa personsäkerheten i tunnlar och plattformsrum för tunnelbanor och spårvägar i Sverige ges av Transportstyrelsen (Transportstyrelsen, 2017). Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om personsäkerhet i tunnlar och plattformsrum anges i TSFS 2017:119 med ändringar t.o.m. 2018:10. Föreskrifterna gäller endast för de delar av tunnelbanor som är tilltänkta för persontrafik samt tillträdes- och utrymningsvägar som primärt är avsedda för resande (2 §). I TSFS 2017:119 tas hänsyn till både utrymningshissar som utrymningsväg och möjligheten för personer med nedsatt rörelseförmåga att utrymma från en tunnelbana eller plattform. Vidare krav på tillgänglighet och utrymningsmöjligheter för personer med nedsatt rörelseförmåga inom byggnader ges i kapitel 3 i Boverkets byggregler (BBR). BBR kraven är dock inte gällande i undermarksanläggningar, men kan fungera som referens eller vägledning (Boverket, 2011).

3.2 Utformningsmöjligheter för utrymning under marknivå

När det kommer till utrymning av undermarksanläggningar är säkerheten en central punkt i planeringen. En av anledningarna är att underjordiska konstruktioner oftast står inför fysiska begränsningar som kräver genomtänkta lösningar. Den grundläggande tanken är att man vill kunna utrymma människor inom en acceptabel tidsram, där brand ses som en av de svåraste olyckorna att hantera under mark (Carmody, Huet, & Sterling, 1994). Utformningen av undermarksanläggningar, oavsett om det är en byggnad under marken eller någon form av underjordisk station, behöver man ofta förlita sig på vertikal utrymning i form av rulltrappor, hissar eller trappor (Kinsey M., 2011). Dessa alternativ utnyttjas framför allt för att transportera personer dagligen mellan olika nivåer under mark, där de två förstnämnda anses vara ett bekvämare sätt att transporteras än via traditionella trappor. Tack vare behovet av effektivare utrymning i höjddled har man tagit fram allt fler anpassade modeller, se avsnitt 3.2.2. Carmody et al. (1994) lyfter även möjligheten att utrymma till intilliggande brandceller på samma sätt som i vanliga byggnader. Med brandcell menas ett utrymme som är brandtekniskt avskilt från resten av anläggningen med separat ventilation. Sådana utrymnen kan dock komma i konflikt med arkitektens eftersträvan att ha stora och öppna ytor för att kompensera för bristen på fönster.

Avsaknad av fönster under marknivå förhindrar att vid strömavbrott kunna förse lokalen med naturligt ljusinsläpp och därmed hjälpa personer att orientera sig i faciliteten. Detta innebär även en svårighet för brandbekämpning under marknivå. Räddningstjänstpersonal kan varken se branden utifrån eller utföra utrymning via fönster. Möjligheten att ventilerare branden via dörrar eller fönster blir också mer begränsad vid insats under marknivå (Carmody et al., 1994).

3.2.1 Vertikal utrymning

Carmody et al. (1994) lyfter olika aspekter för en säker vertikal utrymning från undermarksanläggningar i form av trappor, rulltrappor eller hissar. Vid trapputrymning behöver man ta hänsyn till att personer behöver gå uppför trapporna gentemot det normala utrymningsfallet ovan marknivå där man vanligtvis går nedåt. Gånghastigheten upp för trappor blir generellt lägre samt att det finns risk för utmattning. Trappor avsedda för utrymning uppåt behöver ha djupare och lägre trappsteg för att underlätta trappbestigningen. Författarna lyfter även trappan som en effektiv tillträdesplats för brandmän, där slangar kan transporteras både i uppåt- och nedåtgående riktning. Rulltrappor menar författarna är praktiska i den egenskapen av att de underlättar orientering i relativt öppna ytor. Däremot i motsats till utrymningstrappor så är de oftast i öppen miljö utan brandklassade dörrar. Slutligen lyfts tillämpningen av hissar. Hissar används vanligen inte vid utrymning, men djupt under marken kan det komma till att vara den enda utvägen. Carmody et al. (1994) föreslår att två olika typer av hissar bör användas vid utrymning av undermarksanläggningar: 1) Hissar designade för normala förhållanden och 2) Hissar designade för utrymning, med separata lobbyer som fungerar som utrymningsplats på varje våning.

3.2.2 Befintliga modeller

Beräkningar för utrymningstid via trappor utfördes av Sano, Ronchi, Minegishi & Nilsson (2018). Här presenterades en förenklad simuleringsmodell för beräkningar som utredde två huvudsakliga variabler för utrymningstiden av varje våning: 1) Initialt olika personantal vid varje våning och 2) Inkommande flöde vid varje våning. Denna modell tillåter därmed att beräkna utrymningstiden för varje våning med olika utgångslägen gällande personantal och sammanfallande personflöden. Notera att modellen utfördes för en fiktiv flervåningsbyggnad där de utrymmande utrymde i nedåtgående riktning. Modellen är även tillämpbar vid utrymning i olika faser där man utnyttjar en utrymningsstrategi som tillämpar prioritering av olika våningar (Sano et al., 2018).

Ronchi, Reneke och Peacock (2016) skrev en rapport som syftade till öppna debatten kring att påverkan av trötthet skall vara med i simuleringar där det finns en självklar koppling, till exempel vid bestigning av trappor. Rapporten presenterar främst en konceptuell modell inom de redan existerande modeller som finns. Man tar här hänsyn till påverkan av trötthet i samband med evakueringsmodeller vid trapputrymning. De faktorer som modellen tar hänsyn till är fysiska faktorer och psykologiska faktorer (motivation och en variabel som balanserar uppfattad risk och trötthet) (Ronchi et al., 2016).

Kadokura, Sekizawa och Takahashi (2012) studerade tillgängligheten och problematiken med att använda stoppade rulltrappor vid utrymning från tunnelbana. Rapporten kom till utifrån att man såg en ökad tillämpning av rulltrappor, även som ersättning av befintliga trappor, för den ökande tillgängligheten för äldre och personer med funktionshinder. Grundläggande data för exempelvis gånghastighet erhöles genom ett experiment där personer gick uppför de stoppade rulltrapporna. I slutresultatet fann man att utrymningspotentialen för personer från en plattform förbättrades avsevärt om rulltrappor fanns tillgängligt utöver trappor för utrymning.

Tydliga utrymningsmodeller som fokuserar enbart på utrymning i uppåtgående riktning med olika utrymningsalternativ har inte hittats.

3.2.3 Problematik med trapputrymning

Som nämdes tidigare kan utrymning via trappor bli en fysisk utmaning för personer att försätta sig själva i säkerhet. I projektet ”Utrymning i långa trappor uppåt: Utmattnings, gånghastighet och beteende” av Ronchi et al. (2015) gjordes en sammanställning för utrymning i trappor i uppåtgående riktning. Projektet bestod av en litteraturstudie på befintligt material, utförda försök inom området samt en modell framtagen för att applicera personliga faktorer som kan påverka den fysiska ansträngningen (ålder, kön, fysisk kapacitet etc.). Ett av försöken utfördes på friska personer som fick gå uppåt i trappor i tre olika försök: 13-våningsbyggnad (Ideon), 31-våningsbyggnad (Kista) och en 33 meter lång stillastående tunnelbanerulltrappa (Västra Skogen). Genom att mäta syreupptagningsförmågan, hjärtfrekvensen och elektromyografen (endast i de första två försöken) kunde de påvisa att personernas benmuskler och kondition (VO_2max) begränsade prestationen. Försökspersonernas gånghastigheter mättes vid flera våningar, varvid sannolikhetsfördelningar över olika gånghastigheter vid olika höjder kunde tas fram. Fördelningarna visar på att mediangånghastigheten i Kista stabiliserades mellan cirka 40–100 höjdmeter, på cirka 0,75 m/s. Däremot sjönk i regel personers gånghastighet längre upp i trappan gentemot deras initiala gånghastighet på grund av trötthet. Även i de andra försöken visade resultatet att den fysiska arbetskapaciteten påverkade gånghastigheten vid bestigning av långa trappor, och att det bör tas med i beräkningar vid dimensionering av denna typ av utrymning (Ronchi, et al., 2015). I studien uppmättes även den vertikala gånghastigheten, eller stighastigheten, i både Ideon och Kista. Detta gjordes genom att ta tiden mellan att personer befann sig på olika höjder. I gruppöversök låg stighastigheten relativt stabilt mellan 0,1–0,3 m/s. Gånghastigheten i trapporna uppmättes som den uppskattade sträcka försökspersonerna rört sig i trappan, ofta rörde de sig nära intill räcket i mitten av trappan. Hastigheten mättes för denna sträcka samt sträckan som personerna gått i vilplanet. Förhållandet mellan den stighastigheten och gånghastigheten definierad enligt ovan var mellan 0,3–0,4 i Ideon och Kista.

Ett antal studier har gjorts för att uppskatta mer noggrant vilken höjd som personer klarar av att utrymma uppåt i trappor. Lam et al. (2014) testade 120 personers (både kvinnor och män, och med stort åldersspann, 5–55 år) förmåga att gå upp för trappor i ett typiskt bostadshus i Hong Kong. Studien fann att deltagarna i medel kunde gå 7,4 våningar upp (cirka 20 meter), där 95 % kunde gå mer än 4 våningar (cirka 11 meter). Av grupperna som testades fann de att gruppen mellan 5–10 år hade svårast att gå i trappor. Försök utförda av Kuklane och Halder (2016) visade att friska individer klarade gå 86 höjdmeter på i genomsnitt 3,5 minut om de gick i ett konstant och högt tempo i en trappmaskin. Baserat på data från Ideon, Kista och trappmaskinen tog Ronchi et al. (2015) fram ett samband vilken uppskattar personers vertikala gånghastighet i trappor beroende av deras VO_2max och vilken intensitet av VO_2max de går i:

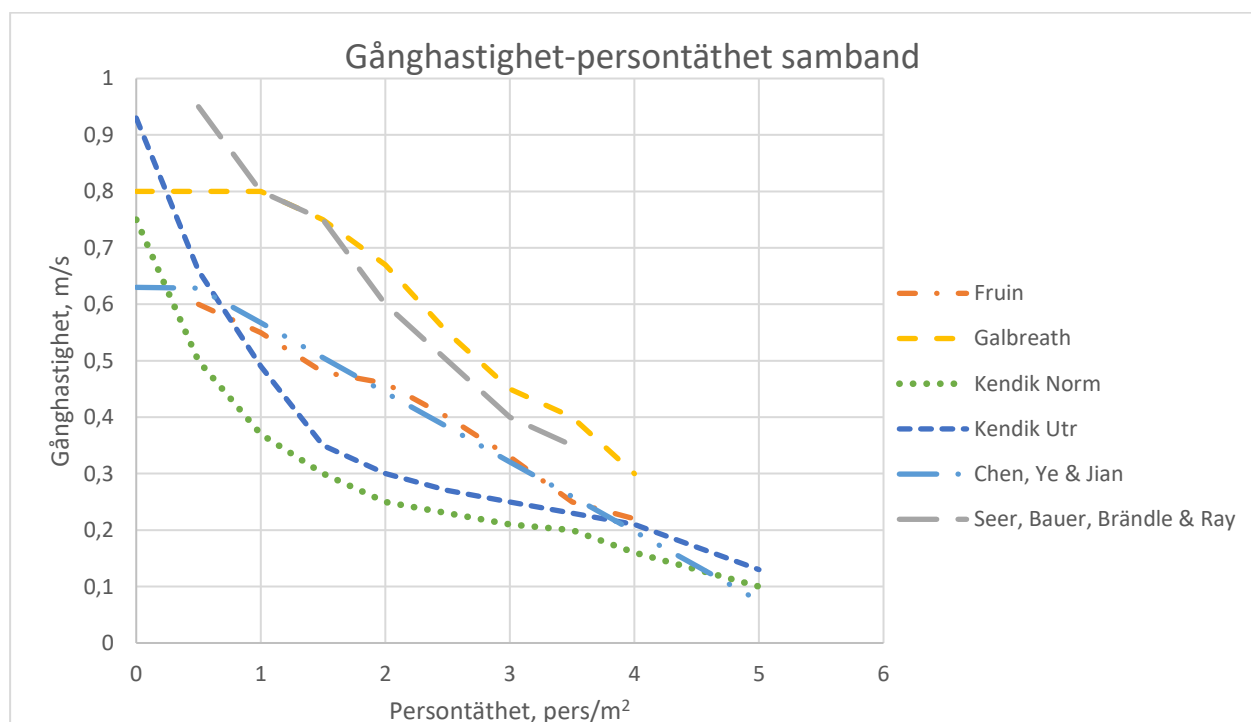
$$h_{vert} = -21,7727 + 0,4024 VO_2max + 0,2658\%VO_2max \quad \text{Ekv. 1}$$

Där h_{vert} är stighastigheten i [m/min], VO_2max är personens relativa maximala syreupptagningsförmåga i [ml/min/kg] och $\%VO_2max$ är vilken andel av personens relativa maximala syreupptagningsförmåga som personen går i [%]. Tidigare studier har angett att personer maximalt klarar av att gå i 75 % av deras VO_2max i 15 minuter (Ronchi, et al., 2015). Modellen uppskattar att en 75-årig dam med VO_2max på 14 mL/min/kg, vilket motsvarar dålig till väldigt dålig kondition, bör klara att gå cirka 3,8 m/min i 75 % av hennes maximala kapacitet. Om hon går i 15 minuter når hon då en höjd på 57 meter. Om damen antas gå i 90 % av hennes maximala

kapacitet, vilket personer i regel klarar bibehålla i 5 minuter, hade hon nått cirka 40 höjdmeter. Däremot är ovanstående undersökningar främst genomförda på friska och unga vuxna. Svårigheten för både barn och äldre vuxna att gå i trappor har inte undersökts i samma utsträckning. Enligt en populationsstudie av Verghese, Levalley, Hall, Katz, Ambrose och Lipton (2006) utförd på den äldre befolkningen hade 35 % av personer 70 år och äldre gångsvårigheter. Författarna påpekar dock att det kan finnas fler faktorer än ålder som påverkar individers svårigheter till att gå (Verghese, et al., 2006).

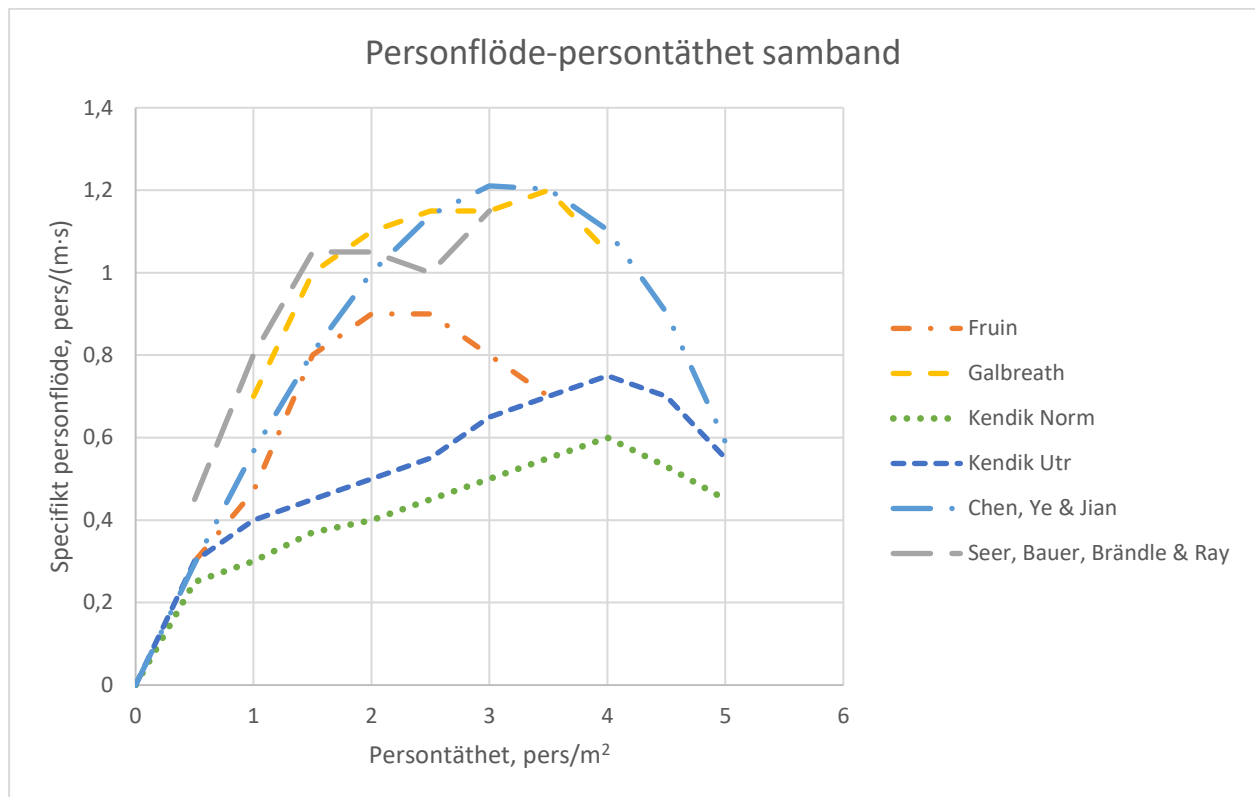
En kohortstudie från 1995–2017 av över 354 000 deltagare visade att Sveriges befolknings kondition, eller VO_2max , i medel har minskat 10,8 % över studiens tid (Ekblom-Bak, et al., 2018). Andelen personer med låg VO_2max (<32 ml/min/kg) ökade över denna tid från 27 % till 46 % ($P < 0,001$). I studien angavs att 2017 hade cirka 10 % av befolkningen ett VO_2max lägre än 21,5 mL/min/kg. Med Ekvation 1 ovan uppskattas dessa personer kunna maximalt gå cirka 100 höjdmeter på 15 minuter om de går i 75 % av deras maximala kapacitet.

Men det är inte bara trötthet som kan påverka gånghastigheterna i trapporna, utan även persontätheten (Chen, Ye, & Jian, 2010; Seer, Bauer, Brändle, & Ray, 2008; Frantzich, 1992). Med persontäthet menas här antalet personer på en horisontell yta i trappan, ofta per kvadratmeter. Frantzich (1992) gjorde en sammanställning av dåtidens kunskapsläge av utrymningsvägars fysiska kapacitet. Mängden data som fanns var begränsad, men studierna pekade generellt i samma riktning, se Figur 1 nedan. Överlag minskade gånghastigheten uppför trappor med en ökad persontäthet. Denna observation har nu styrkts av senare forskning (Chen et al., 2010; Seer et al., 2008). Flera av studierna pekar på att gånghastigheten uppför trappor börjar avta linjärt först när persontätheten överstiger cirka 0,5 pers/m² (Chen et al., 2010; Frantzich, 1992). Gånghastigheten i trappor vid väldigt höga persontätheter på cirka 5 pers/m² sammanstrålar mot cirka 0,1 m/s för samtliga studier.



Figur 1 Samband mellan ökad persontäthet och gånghastigheter vid gång upp för trappor. Figur återskapad från Frantzich (1992) med data inkluderat från senare studier (Chen et al., 2010; Seer et al., 2008).

Personflödet i trappor uppskattas med hjälp av det ideala sambandet att specifikt flöde [pers/(m·s)] är lika med persontäthet [pers/m²] multiplicerat med gånghastighet [m/s]. Samband mellan personflöde och persontäthet från studier presenterade av Frantzich (1992) med data från senare studier (Chen et al., 2010; Seer et al., 2008) redovisas i Figur 2 nedan.



Figur 2 Samband mellan specifikt personflöde och ökad persontäthet vid gång upp för trappor. Figur återskapad från Frantzich (1992) med data inkluderat från senare studier (Chen et al., 2010; Seer et al., 2008).

3.3 Inträffade bränder

Generellt sker få bränder i järnvägstunnlar och tunnelbanor (Papakonstantinou, Benardos, Kallianiotis, & Menegaki, 2016), men till skillnad från liknande bränder ovan mark är dess konsekvenser betydligt allvarigare. Historiskt sett har bränder som skett i utrymmen under marknivå i flera fall haft förödande konsekvenser. Nedan presenteras några inträffade bränder i undermarksanläggningar. I litteraturstudien hittades inga inträffade bränder där hissar använts som utrymningsväg från undermarksanläggningar.

3.3.1 King's Cross Station (London, 1987)

År 1987 inträffade en brand på King's Cross Station i London där 31 personer miste livet (Kletz, 2001). Den ursprungliga orsaken var en tändsticka som tänts i samband med att en person var på väg upp ifrån tunnelbanan (det var förbjudet att röka nere i tunnelbanan men på vägen upp ansågs det accepterat). Tändstickan föll genom ett glapp i rulltrappan och satte fyr på en ansamling av fett och damm. Branden spred sig därefter vidare längs rulltrappan, som var byggd i trämaterial, och till biljetthallen där övertändning skedde. Förutom det snabba brandförloppet var det även omfattande brister i organisationen som orsakade den stora förödelsen. Rulltrapporna var försedda med ett vattenspray-system som behövde aktiveras manuellt, där den ansvarige i tunnelbanan vid tiden för olyckan inte hade blivit utbildad i systemet, och därmed inte kunde bistå

räddningstjänsten. Annan personal på plats vid tillfället visade sig också sakna träning för att hantera nödsituationen som uppstod (Kletz, 2001).

3.3.2 Baku Metro (Azerbadjan, 1995)

År 1995 inträffade en brand i metron i Azerbadjan mitt under rusningstid och kostade 289 personer livet (Rohlén & Wahlström, 1996). Kolmonoxid utsöndrades från brinnande syntetiskt material i vagnarna vilket snabbt överrumplade personerna som befann sig i dessa. Utredningen efteråt visade att branden startades av en elektrisk gnista under en av vagnarna. Baku metro var närmare 30 år gammal vid tillfället och vagnarna var konstruerade av material som gav ifrån sig skadliga ångor vid brand, varav 90% av materialet var brandfarligt. Trots att en stor del lyckades utrymma vagnarna är det än idag en av världens största tunnelbaneolyckor (Rohlén & Wahlström, 1996).

3.3.3 Daegu Metro (Sydkorea, 2003)

År 2003 förlorade 189 personer sitt liv i en brand i tunnelbanan i Sydkorea. Branden orsakades av en mentalt sjuk person som tände fyr i syfte att ta sitt eget liv och fler därtill. På grund av att vagnen bestod till stor del av brännbart material spred sig branden väldigt snabbt. Trots detta kunde en stor andel av dessa passagerare fly ifrån vagnen och utrymma via stationen. Det höga dödstalet berodde istället på att ett annat tåg som kom från motsatt håll stannade jämsides med det branddrabbade tåget, där passagerarna inte kunde ta sig ut. Detta på grund av att branddetektorsystemet bröt strömmen till tåget så det varken gick att köra därifrån eller att öppna dörrarna. En efterföljande analys visade att det var det brännbara materialet som ledde till den snabba brandtillväxten. Analysen fann även att stationen saknade nödbelysning och ventilationssystem samt att sprinklersystemet som var installerat var ur funktion. Detta i kombination med dålig kommunikation samt en missbedömning av tunnelbanans anställda. Efter incidenten gjorde man en insats att förbättra tunnelbanornas utformning och material över hela landet (South Korea Daegu Subway Station – Arson, 2021).

3.4 Hiss som utrymningsväg

Statistiskt sett är utrymning via hiss ett av de säkraste transportalternativen. Dessa höga säkerhetsnivåer grundas i att flera säkerhetsanordningar finns tillgängliga, där minsta antydning till fel orsakar stopp i systemet (Bukowski & Jensen, 2012).

3.4.1 Utformning av utrymningshiss

Den grundläggande funktionen för utrymningshissar är att säkerställa en tillfredsställande utrymning vid händelse av brand. Med tillfredsställande utrymning avses att personer som utrymmer, med tillräcklig säkerhet, inte utsätts för nedfallande byggnadsdelar, hög temperatur, hög värmestrålning, giftiga brandgaser eller dålig sikt som hindrar utrymning till en säker plats enligt kapitel 5:31 i Boverkets byggregler (2011). Utrymningshissens syfte är även att möjliggöra självständig utrymning för personer med rörelsenedsättning, där hjälp av räddningstjänst eller utbildad personal inte krävs (Kindblom, 2018). Innan utrymningshissar dimensioneras eller tas i bruk bör man enligt Bukowski och Jensen (2012) utvärdera strategin enligt följande system:

- Driftsäkerhet vid brand
- Funktion och användarvänlighet av både tränade och icke tränade personer
- Under vilka förhållanden där en del av de evakuerande kan använda trappor

För att hissarna ska vara effektiva som utrymningsväg behöver de fyllas av tillräckligt många personer (Mossberg & Nilsson, 2018). Detta då varje "tom" plats i hissen medför ett lägre personflöde eftersom restiden är densamma. Vidare behövs system som gör att personer inte förhindrar att hissarna åker i samband med fyllning genom att blockera dörrarna. Författarna föreslår att hissdörrarna initierar stängning när hisskorgen fyllts upp till en viss andel av deras maximala lyftkapacitet. De ger sedan två olika förslag för att undvika att personer förhindrar dörrarna från att stänga. Det första förslaget är ett tekniskt system som informerar personerna i hissen att den stått för länge genom exempelvis ett rött sken och ett talat meddelande om varför hissen inte kan avgå. Det andra förslaget är en aggressiv dörrstängning för att markant markera att hissen avgår. Detta alternativ avråder dock författarna ifrån, då det kan skapa en onödig frustration hos resenärer (Mossberg & Nilsson, 2018).

3.4.2 Riskperception av hissar

Enligt Klote et al. (1993) är det flera problem som uppstår när det kommer till hissars användning vid utrymning. Dels har man i flera decennier uppmanat allmänheten att man inte ska använda hissarna vid utrymning. Samtidigt finns det en osäkerhet hos personers förtroende för hissarna. I en studie av Liao, Lu, Liu och Liao (2014) var personernas största rädsla vid hissutrymning maskinfel eller strömavbrott. Samtidigt har människor stort behov av att känna sig i kontroll vilket hissar inte möjliggör (Klote et al., 1993). Detta gör att många kan uppleva trappor som ett säkrare alternativ, eftersom individerna själva kan kontrollera sin förflyttning (Andersson & Jönsson, 2011).

Salo och Lindén (2015) beskriver riskperception som möjligheten att agera på riskfyllda händelser beroende på hur man initialt uppfattar risken. Med en efterföljande analys kan individen sedan välja ett beteende som kan minimera konsekvenserna av ett negativt händelseförlopp. I rapporten används det i samband med vilka risker man uppfattar i samband med olika typer av utrymningsvägar.

I ett examensarbete utfört av Andersson och Jönsson (2011) undersöktes personers riskperception i samband med utrymning av höga byggnader, där hissutrymning var en del av utrymningsstrategin. Detta gjordes genom enkäter där personerna bland annat fick ange sin benägenhet till att använda hiss och vilka risker de såg med en utrymning från en hög byggnad. Respondenterna angav risken för köbildning, risken för att rök ska tränga in i trapphuset och risken att fastna i hissen som de största osäkerheterna vid en utrymning via trappor eller hiss. Vid trapputrymning visade resultatet att respondenterna tenderade att uppleva större osäkerhet desto högre upp i byggnaden de befann sig, vilket även kan vara en anledning till ökad tilltro till hissar (Andersson & Jönsson, 2011). Författarna beskriver att det kan bero på rädslan för att behöva befinna sig en längre tid i trapphuset och därmed utsättas för de risker som uppstår längs utrymningsvägen. Här lyftes risken för lågor och rök i trapphuset som den största rädslan.

Engstrand och Näslund (2014) utförde liknande enkätundersökningar för hissutrymning men för utrymning från tunnelbanestationer. Respondenterna fick veta att de befann sig antingen 8 meter eller 30 meter under marknivå. De flesta föredrog att använda trappor, trots vetskapen att hissarna var utförda som utrymningshissar. Vid fråga kring upplevd risk fann man att "*hiss som utrymningsväg*" rankades som det alternativ med högst risk (Engstrand & Näslund, 2014), där den största rädslan var att fastna i hissen. Andersson och Jönsson (2011) lyfter att det är viktigt för

individerna att uppleva kontroll och klarhet i en sådan situation. Vid användning av hiss överlåter man en stor del av denna kontroll till tekniken, vilket beskrivs som en av anledningarna till att flera av deltagarna i deras undersökning ansåg att utrymningshiss innebär fler osäkerheter än trapputrymning. Risken för köbildning i samband med hiss förknippades tydligt med rädslan till fördröjning av utrymningen, speciellt i anknytning till lokaler där många personer vistas och således kommer behöva starta sin utrymning samtidigt (Andersson & Jönsson, 2011).

3.5 Människors beteende vid utrymning

För att utrymningshissar ska fungera som utrymningsväg behöver deras design och implementering ta hänsyn till människors beteende vid brand. Nedan beskrivs olika teoretiska ramverk vilka kan användas för att uppskatta hur människor kommer bete sig vid en utrymning, hur personer själva förväntar sig att de kommer reagera samt observerade beteenden vid inträffade händelser.

3.5.1 Teoretiska ramverk

För att kunna förstå hur de utrymmande beter sig vid en utrymning finns flera modeller och teorier. Exempel på användbara teorier är beteendesekvensmodellen, anknytningsmodellen, social påverkan samt teorin om "affordances" (Fridolf, Nilsson, & Frantzich, 2013), vilka författarna har bedömt vara relevanta även under mark.

Beteendesekvensmodellen av Canter, Breaux och Sime (1980) anger att människor agerar rationellt beroende på vilken information de har fått om situationen samt den roll de har i sammanhanget. När människorna i en byggnad får information om en brand tolkar de denna information och agerar därefter. Däremot kan en tågvärd och en passagerare få samma information, tolka den på samma sätt men ändå agera annorlunda. Detta kan förklaras av "role-rule"-modellen, vilken anger att personer som har en viss "roll" innan en utrymning påbörjar fortsätter utöva denna roll även under utrymningsförloppet (Canter et al., 1980). Detta kan leda till att resande, osäkra på hur de bör reagera vid en utrymning, inväntar instruktioner från personal.

Anknytningsteorin av Sime (1985) belyser faktumet att människor har en tendens att vilja utrymma samma väg som de kom in i en byggnad och med samma grupp människor som de gick in i byggnaden. Detta innebär att människor inte nödvändigtvis väljer den närmaste utrymningsvägen vid en utrymning. För att fördela de utrymmande bland de tillgängliga utrymningsvägarna kan till exempel tågpersonal med utbildning som utrymningsledare vägleda de utrymmande till närmaste utrymningsväg.

Vid en utrymning där ett större antal personer är inblandade kan social påverkan ha ett stort inflytande över människors beslutsfattande (Latané & Darley, 1968). Termen social påverkan innebär alla typer av förändringar hos en person eller en grupp i dess sätt att tänka eller agera som har sin grund i den sociala omgivningen eller omvärlden (Psykologilexikon, 2021). Detta sker antingen automatiskt eller genom grupstryck, alternativt att man litar på andras bedömningar kring situationer. Detta kan påverka människors villighet att påbörja utrymning samt deras val av utrymningsväg (Fridolf, Nilsson, & Frantzich, 2016). Att vara den som först påbörjar utrymning kan upplevas som en risk att förlöjliga sig själv. För att uppnå en effektiv utrymning är det därför nödvändigt att personer känner sig bekväma med att påbörja utrymning.

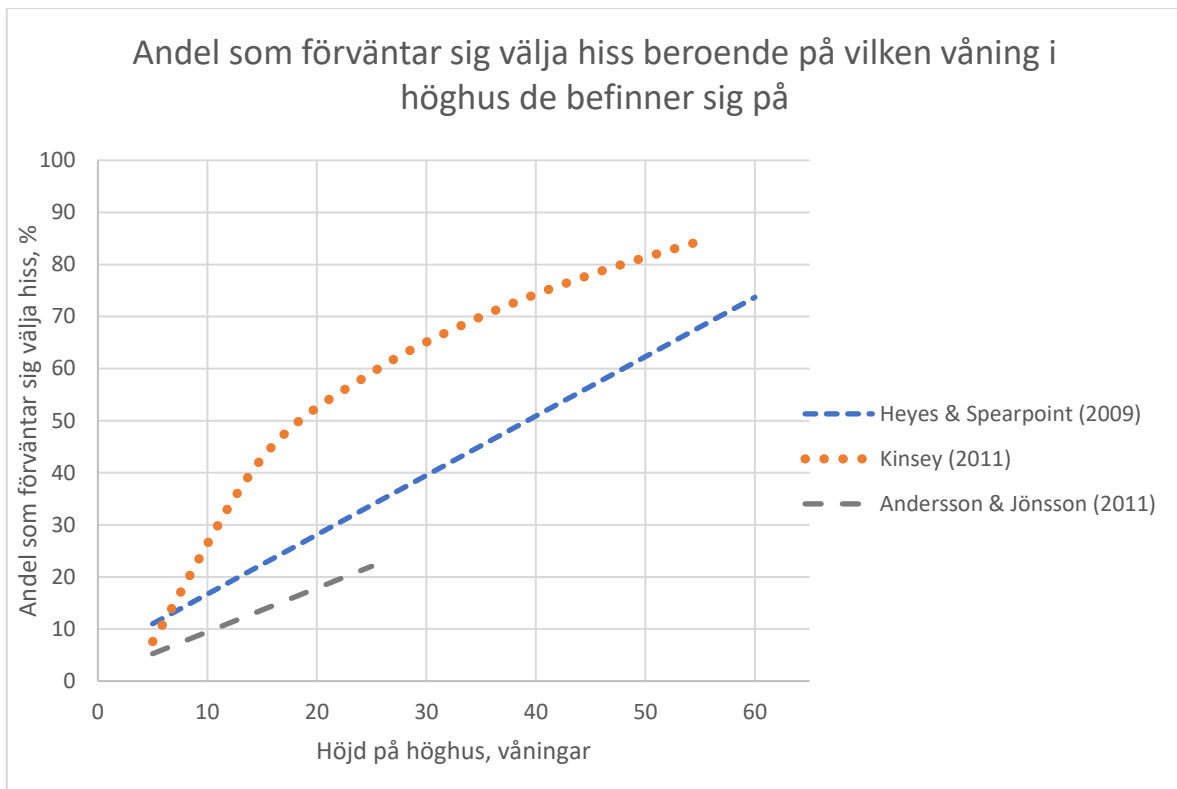
Teorin om "affordances" av Gibson (1979) belyser att en utrymningsväg uppfyller sin funktion är kopplat till interaktionen mellan personen och omgivningen. Teorin om "affordances" vidareutvecklades senare av Hartson (2003). Hartson menade att en väl designad utrymningsväg bör vara utformad på så vis att den är lätt att upptäcka (se eller höra), lätt att förstå vad den är till för (utrymning), ska vara fysiskt användbar (öppningsbar) och slutligen ska den uppnå målet som personen har (att ta sig till säkerhet).

Nedan presenteras den litteratur om människors beteende som hittats i litteraturstudien.

3.5.2 Självpuppskattat beteende vid utrymning

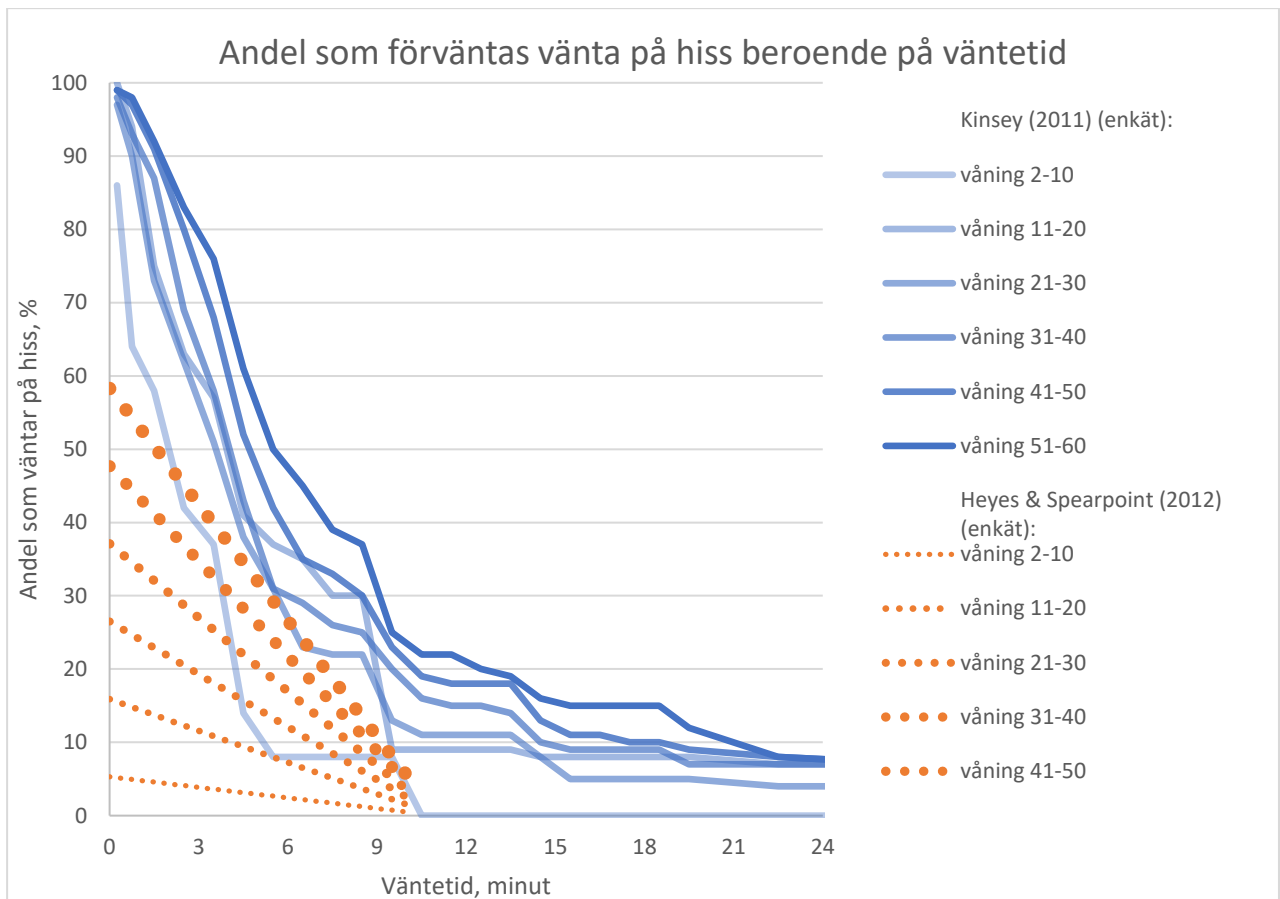
Flera enkätundersökningar och intervjuer har utförts för att uppskatta människors beteende vid en utrymning från en station under mark, samt deras villighet att använda hissar som utrymningsväg från höghus.

En enkätundersökning utförd av Shiwakoti et al. (2017) pekar på att de flesta förväntar sig vara reaktiva men samarbetsvilliga, och därför villiga att följa personalens direktiv vid en utrymning från en undermarksstation. Antalet som förväntar sig vara villiga att använda hiss som utrymningsväg från höghus är beroende på vilken våning de befinner sig på (Heyes & Spearpoint, 2012; Liao et al., 2014; Kinsey, Galea, & Lawrence, 2012), se Figur 3, samt hur god lokalkännedom de har i byggnaden (Liao, Lo, Liu, & Liao, 2014). Enligt Figur 3 ökar personers förväntade villighet att ta hiss som utrymningsväg ju högre upp de befinner sig i en byggnad. Kinsey et al. (2012) fann att 66 % av de svarande bedömde att de skulle överväga att inte välja hissar som utrymningsväg trots information om att dessa var säkra. Heyes och Spearpoint (2012) fann att det som verkar avgörande för det förväntade valet av hiss eller trappa som utrymningsväg är den tid som personer uppskattar det tar att ta sig till det fria, där de förväntar sig välja den de tror går snabbast. Aleksandrov et al. (2018) fann att valet mellan hiss och trappor som utrymningsväg berodde på om utrymningshissen var den primära utrymningsvägen, samt huruvida trapporna var överfulla eller inte. De utrymnande tenderade att förvänta sig välja trapporna givet att dessa inte var överfulla eller om utrymningsvåningen var överfull.



Figur 3 Andel som förväntar sig välja hiss beroende på antal våningar (Kinsey M., 2011; Heyes & Spearpoint, 2012; Andersson & Jönsson, 2011).

Liknande slutsatser gällande undvikande av överfulla utrymningsvägar drogs av Haghani och Sarvi (2016) när de frågade järnvägspassagerare om deras förväntade beteende vid hypotetiska utrymningsscenarier från en station. Lovreglio et al. (2016) utförde en enkätundersökning för totalt 1503 deltagare och fann att faktorer som rök, avstånd till utrymningsvägen och antal personer nära utrymningsvägen samtliga hade en negativ inverkan på val av denna utrymningsväg. Nödbelysning och flöde av personer genom utrymningsvägen hade istället en positiv inverkan. Heyes och Spearpoint (2012) och Kinsey (2011) undersökte även vilken väntetid de utrymmande förväntade sig acceptera för att utrymma via en hiss, och båda fann att det förväntade antalet hissutrymmande avtog med ökad väntetid, se Figur 4 nedan. Båda fann att den förväntade accepterade väntetiden på hissarna ökade med ökande våningsantal, vilket överensstämmer med trenden i Figur 3. I figuren presenteras den kumulativa andelen personer som förväntar sig vara villiga att vänta på hiss beroende på väntetiden. Efter omkring 10 minuter förväntar sig cirka 0-20 % vara villiga att fortsätta vänta på hiss.



Figur 4 Andel svarande eller försökspersoner som förväntas vänta på hiss under en viss tid. Data hämtad från Kinsey (2011) och Heyes och Spearpoint (2012).

Däremot är både Figur 3 och Figur 4 baserat på personers självuppskattade beteende. Figurerna bör således användas med försiktighet då detta kan skilja sig från hur personer faktiskt beter sig (Liao, Lo, Liu, & Liao, 2014; Mossberg & Nilsson, 2018). Mossberg och Nilsson (2018) drog därför slutsatsen att de genomförda enkätstudierna troligtvis underskattar andelen som väljer en hiss vid en utrymningssituation. Detta då personer inte är medvetna om sin inställning innan de har exponerats för en situation. Av samma skäl bedömde Mossberg och Nilsson (2018) att respondenterna sannolikt även underskattade deras accepterade väntetid.

3.5.3 Observerat beteende

För att försöka få en bättre förståelse för hur människor faktiskt agerar vid en utrymning har experiment utförts, inträffade händelser analyserats och även Virtual Reality-försök genomförts i tidigare studier. VR-försök verkar ha god samstämmighet med experiment gällande till exempel val av utrymningsväg och tiden det tar innan utrymning påbörjas (Arias et al., 2021), varvid detta utgör ett värdefullt verktyg för att förstå människors beteende.

Heyes och Spearman (2012) undersökte data från en tidigare incident vid ett bombhot i ett höghus där hissar användes för utrymning. De fann att 17–30 % av de som använde hissar eller trappor valde respektive utrymningsväg på grund av social påverkan, där de helt enkelt följde de som gick framför. Endast en utrymnande angav att de valde hissens för att de trodde det var den snabbaste utrymningsvägen. Det finns osäkerheter varför skillnader mellan personers självuppskattade beteende i enkätundersökningarna och det observerade beteenden i incidenten som Heyes och

Spearman (2012) gjorde uppstod. Författarna menar att det kan vara på grund av att den bombhotade byggnaden inte var lika hög som i deras enkätundersökning, om de utrymmande bedömde skillnaden i tidsvinst mellan utrymningsvägarna vara marginell eller om fokuset på tidsvinsten som upptäcktes i enkätundersökningen var på grund av hur undersökningen utfördes.

Philpot och Levine (2021) utförde en videoanalys av 40 personers beteende då en verklig explosion och en mindre brand utbröt i den tunnelbanevagn de befann sig i. De jämförde deras observationer med hur datorsimuleringar utförs och fann i deras observationer, till skillnad från vanliga antaganden inom utrymningssimuleringar, stor spridning i gånghastigheten, tid till dess att utrymning påbörjar samt val av utrymningsväg. Författarna understryker att social påverkan behöver tas hänsyn till samt att personer efter händelsen generellt var hjälpsamma och inväntade andra vid utrymningen snarare än att agera själviskt.

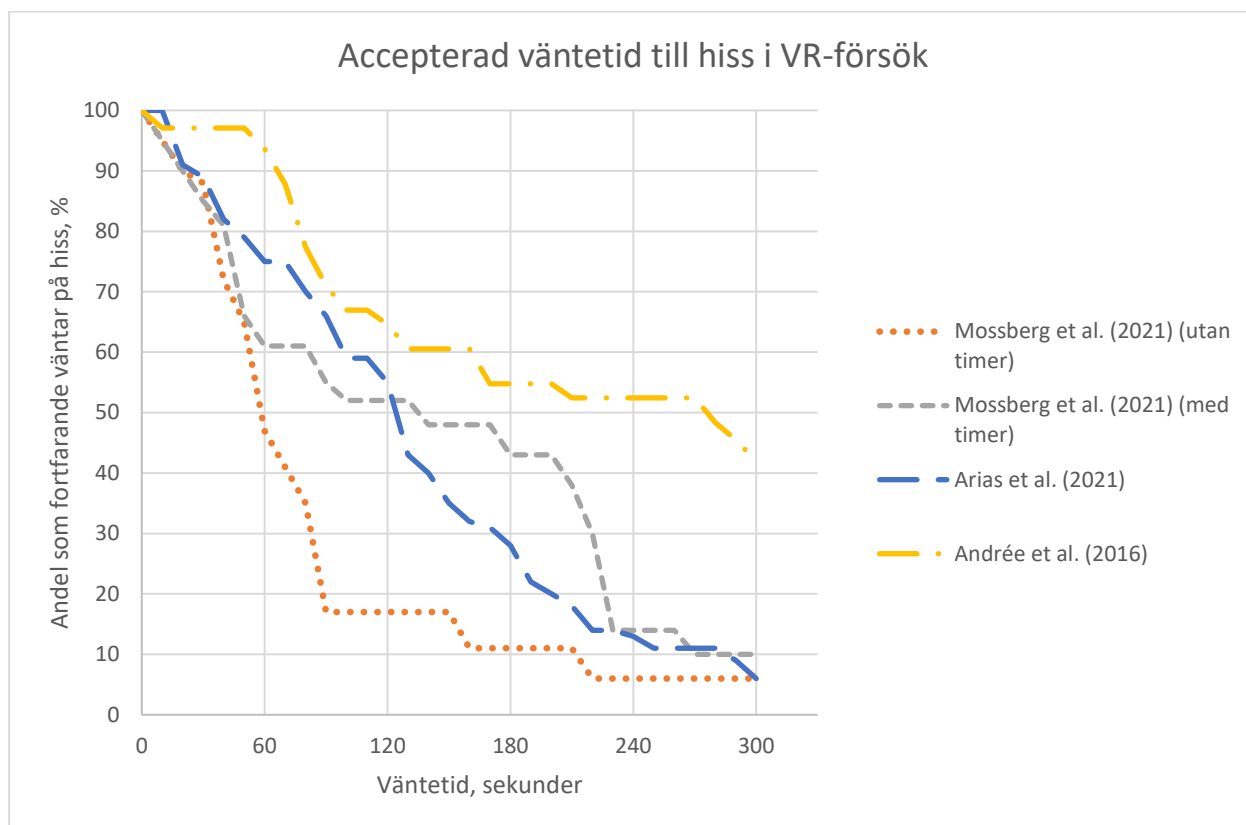
Van der Wal et al. (2021) undersökte vilka kommunikationsstrategier som kunde minimera riskbeteenden vid utrymningar med hjälp av en videoanalys av tidigare händelser. Med riskbeteenden syftar författarna på: 1) en fördröjd respons, 2) filmande av incidenten och 3) springande. De fann att utrymningsledare var den mest effektiva kommunikationsstrategin för att uppmuntra en snabbare och mer effektiv respons, följt av talat meddelande och ett direktsänt meddelande. Simuleringar av utrymning från en tunnelbanestation fann att utrymningsledare är en effektiv metod för att minimera utrymningstiden för stora personantal med dålig lokalkännedom (Zhou, Dong, Zhao, Y, & Ioannou, 2018; Song, Z, Peng, & Shi, 2017). Utrymningsledarna bör placeras där de når den maximala täckytan av personer då utrymning påbörjar. Däremot ökar inte effektiviteten av utrymningen linjärt med antal utrymningsledare, utan båda studierna fann att det finns ett optimalt antal utrymningsledare.

Fridolf et al. (2013) lyfter vikten av att utrymning påbörjas direkt, något som historiskt sett visat sig vara en utmaning vid tidigare händelser i undermarksanläggningar. De fann att detta berodde bland annat på att personer tenderade att behålla sina roller som till exempel passagerare, och är därför motvilliga att lämna stationen eftersom de har som syfte att ta sig från A till B. Detta är ett exempel på den så kallade "role-rule" modellen vilken beskrivs i 3.5.1. Vidare krävs snabb, tydlig och konsekvent information till de utrymmande. Om utrymningslarmet går samtidigt som informationsskyltar säger att nästa tåg anländer om 5 minuter kan detta leda till förvirring och motarbeta att en utrymning påbörjar. Talade meddelanden är ett effektivt sätt att minimera tiden mellan att personer inser att något inte stämmer och att de påbörjar utrymning (Arias et al., 2021).

När utrymningen väl påbörjats behöver de utrymmande vara villiga att välja en utrymningshiss som utrymningsväg. Experiment utförda i höga hotell pekar på att ett talat meddelande på svenska och engelska som informerar om att en brand inträffat och att hissarna kan användas för utrymning är ett effektivt sätt att öka antalet som nyttjar hissarna (Arias et al., 2021). Enligt Simes anknytningsteori vore det sannolikt att fler personer skulle välja hiss som utrymningsväg om de använde hissarna när de tog sig in i byggnaden (Sime, 1985). Detta är sannolikt fallet i byggnader där hissar utgör den normala ingången som i höghus eller djupa undermarksanläggningar.

Givet att de utrymmande känner sig bekväma med att inledningsvis välja hiss som utrymningsväg kvarstår frågan om hur dessa bör utformas så de utrymmande är villiga att invänta hissarna. Den accepterade väntetiden undersöktes i VR-försök och fysiska experiment som visade att de flesta inte vill vänta mer än 5 minuter på en hiss, men beroende på trygghetskänslan kan

vissa stanna mer än 20 minuter (Andrée, Nilsson, & Eriksson, 2016). Ytterligare VR-försök utförda för en tunnelbanestation under mark visade att endast ett fåtal tekniska installationer kan öka antalet utrymmande som kan förväntas använda hissarna, samt att en timer ovanför hissen verkade öka deras förväntade väntetid i hisshallen (Mossberg, Nilsson, & Wahlqvist, 2021). En jämförelse av undersökningar av personers accepterade väntetider i olika VR-studier görs i Figur 5 nedan.



Figur 5 Andelen personer som väntar på hiss beroende på väntetiden. Data hämtad från tidigare VR-försök (Andrée et al., 2016; Mossberg, Nilsson, & Wahlqvist, 2021; Arias et al., 2021).

3.6 Personer med nedsatt rörelseförmågas möjligheter att utrymma

En kritisk del av utrymningen som har lyfts mer och mer på senare tid är så kallad frångänglighet. Med detta menas att om en byggnad, konstruktion eller annat är tillgängligt för hela befolkningen bör även utrymningen vara anpassad för hela befolkningen. Detta är speciellt viktigt då det är mycket vanligare idag att personer med nedsatt rörelseförmåga utnyttjar funktioner som till exempel undermarksanläggningar än innan (Boyce, 2017).

Behovet av utrymningshissar och möjligheten för personer med nedsatt rörelseförmåga att utrymma blev tydligt efter terroristattacken den 11:e september 2001. Detta gällde bland annat flera olika aspekter som utrymningsvägar, människors beteende samt det bristande kunskapsläget överlag vid utrymning av väldigt höga byggnader. Shields et al. (2009) undersökte upplevelsen och erfarenheterna som ett antal personer med nedsatt rörelseförmåga uttryckte i samband med intervjuer som genomfördes efter attacken. De fann att de utrymmande klarade sig relativt bra på egen hand, där de i enstaka fall fick hjälp från kollegor. I detta fall utrymde personerna nedåt via trapporna i byggnaden. För undermarksanläggningar där utrymning behöver ske uppåt ställs högre krav på de utrymmandes fysiska förmåga, vilket beskrivs i mer detalj under avsnitt 3.2.3.

Utrymningshissar bedöms vara en föredragen lösning för att möjliggöra självutrymning för personer med nedsatt rörelseförmåga gentemot trappor då hissarna utgör en del av deras vardagliga vägval (Bukowski & Jensen, 2012), bibehåller de utrymmandes värdighet samt kan nyttjas av nästan alla personer med nedsatt rörelseförmåga (Boyce, 2017). Simuleringar utförda för höghus fann att om personer med nedsatt rörelseförmåga nyttjade utrymningshissar medan övriga utrymmande nyttjade trapporna gav detta en mycket effektiv utrymning (Koo, Kim, Kim, & Christensen, 2013). Detta var fallet då de med nedsatt rörelseförmåga har lägre utrymningshastigheter samt tar upp en större yta än övriga utrymmande, medan i hissen var dessa faktorer inte lika avgörande.

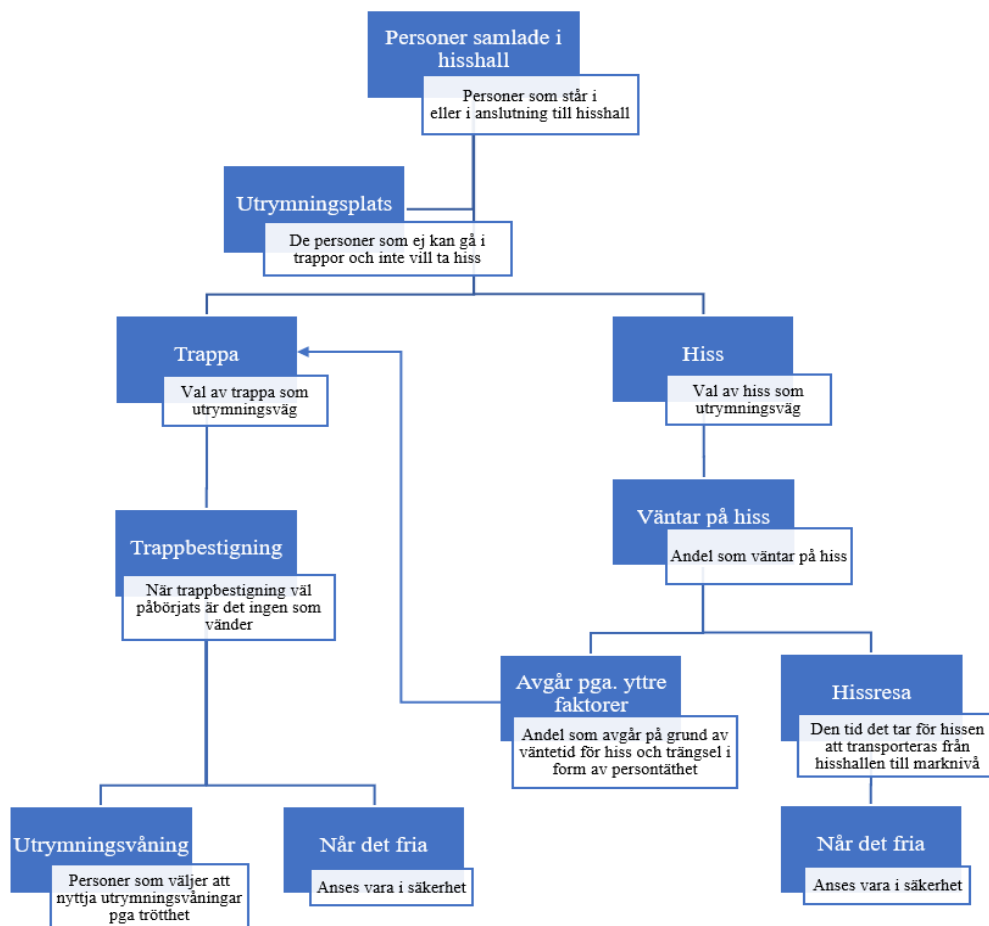
4 Modellen

Baserat på litteraturstudien kan det nu tas fram en modell vilken beskriver en utrymning från en djup undermarksanläggning med utrymningshissar och trappor. I detta kapitel beskrivs modellens uppbyggnad, vilka förutsättningar som modellen bygger på, hur modellen kan användas samt vilka begränsningar modellen har.

4.1 Uppbyggnad

Syftet med modellen är att den ska på ett övergripligt men realistiskt sätt beskriva en utrymning från en undermarksanläggning som nyttjar utrymningshissar. Med hjälp av modellen kan det sedan identifieras vilka faktorer som påverkar utrymningshissarnas effektivitet som utrymningsväg mest. Modellen byggs upp som en matematisk modell i Excel och bygger på sannolikheter och fördelningar av lämpliga variabler enligt avsnitt 2.2.

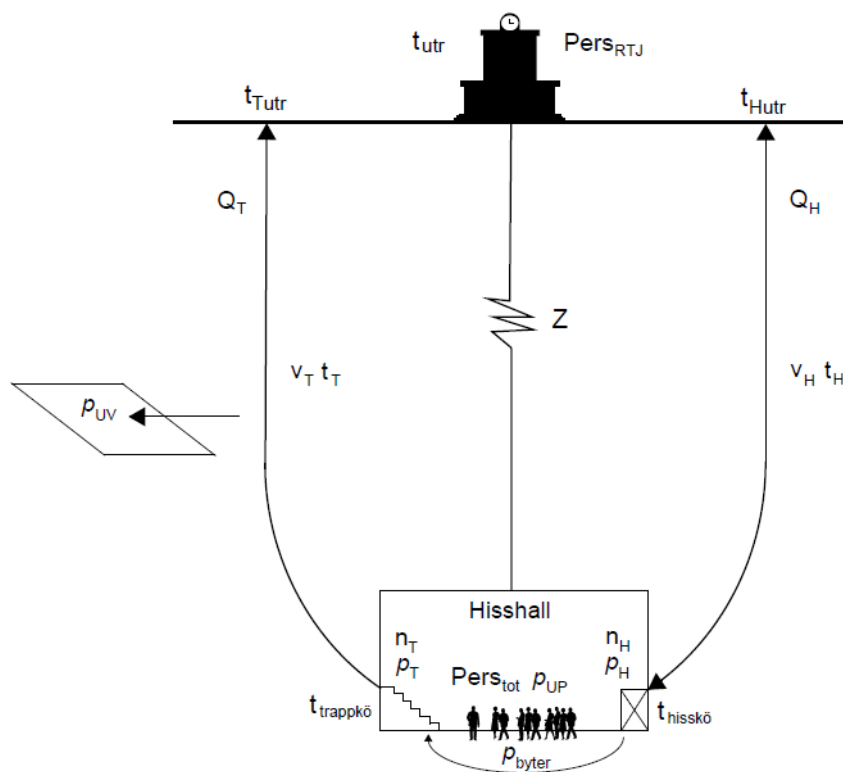
I Figur 6 presenteras ett flödesschema i kronologisk ordning för händelseförloppet från dess att utrymning påbörjats. Flödesschemat ger en grafisk förklaring av modellens uppbyggnad, i form av de olika val och händelser som modellen beskriver (blåa rutor) med kortare förklaringar (vita rutor). Utrymmande förväntas inledningsvis välja mellan trappa och hiss som utrymningsväg. Personer som inte kan gå i trappor och inte vill ta hiss nyttjar i stället utrymningsplats. De som inledningsvis väljer att ta hissen kan byta till trappa antingen på grund av långa väntetider eller på grund av yttre faktorer som social påverkan eller höga persontätheter i hisshallen. Personer i trapporna som inte klarar att gå hela vägen upp behöver invänta hjälp på en utrymningsvåning.



Figur 6 Flödesschema över modellen.

Figur 7 presenterar en grafisk förklaring av några av de viktigaste variablerna som ingår i modellen. De allmänna beteckningar som används och deras betydelse i modellen är följande: $Pers$ för antal personer, p för andel av den totala populationen, n för antal hissar eller trappor, v för hastighet, t för tid och Q för personflöde. Variabler relaterade till hissutrymning betecknas med H och variabler relaterade till trapputrymning betecknas med T i modellen. Samtliga variabler presenteras löpande i kapitlet, och finns även sammanställt i symbollistan.

Längst ner i figuren är hisshallen, där samtliga personer är i början av utrymningen. Personerna förväntas enligt ovan inledningsvis välja mellan trappa, hiss eller utrymningsplats i hisshallen (p_T , p_H och p_{UP}). En viss andel personer förväntas byta från hiss till trappa (p_{byter}) på grund av långa väntetider eller social påverkan. Beroende på personflöden via hissar och trappor behöver de utrymmande köa till respektive utrymningsväg ($t_{trappkö}$ och $t_{hisskö}$). Personflöden (Q_T och Q_H) beror bland annat på utrymningsvägarnas utformning, den totala tiden det tar att nå marknivå från hisshallen (t_T och t_H), djupet på hisshallen (Z) samt antalet tillgängliga trappor och hissar (n_T och n_H). Beroende på personflöden kan utrymningstider via respektive utrymningsväg uppskattas (t_{Tutr} och t_{Hutr}), där den längsta av de två utgör den totala utrymningstiden (t_{utr}). Beroende på djupet kommer en andel personer behöva invänta hjälp på en utrymningsvåning i trappan (p_{UV}). Detta ger ett totalt personantal som inväntar hjälp för fortsatt utrymning, vilket sannolikt tillfaller räddningstjänsten ($Pers_{RTJ}$).



Figur 7 Illustration av modellen och några av variablerna som ingår. För en komplett lista över alla variabler se symbollistan.

Samtliga ingående variabler med variabilitet eller osäkerheter presenteras i slutet av varje delkapitel med deras respektive fördelningar. Typen av fördelning har valts ut beroende på mängden data som finns att tillgå enligt 2.2. Om endast minsta och största värden har identifierats har en likformig fördelning ansatts. Om det finns underlag för att ett värde inom intervallet är mer sannolikt har en triangelfördelning nyttjats.

4.2 Förutsättningar

Enligt flödesschemat i Figur 6 utgår modellen från ett personantal i undermarksanläggningen, $Pers_{tot}$, vilka befinner sig inom eller i anslutning till hisshallen. Hisshallen förutsätts vara en egen brandcell och därmed skydda de utrymmande från ett fullständigt brandförlopp.

I undermarksanläggningen förutsätts liknande förutsättningar för utrymningshissar som beskrivet i det utökade scenariot i tunnelbanestationen Sofia enligt Mossberg et al. (2021). Dessa utgörs av följande:

- Utrymningslarm med talat meddelande, vilken anger att hissarna kan användas som utrymningsväg samt att hisshallen är säker vid brand.
- Utrymningsskyltar till hisshallen utrustade med gröna blinkande lampor.
- Blå informationsskyltar invid trappor vilka anger djupet på hisshallen.
- Utrustning för tvåvägskommunikation.

Personal som kan agera som utrymningsledare förutsätts inte vara tillgängligt i modellen. Undermarksanläggningen förutsätts ha en hisshall vilken är brandtekniskt avskild från resten av anläggningen där de utrymmande sedan kan välja att utrymma via hiss eller trappa.

Hissarna går från hisshallen direkt till marknivå och tillbaka, inga fler stannplan utnyttjas. Det förutsätts finnas informationsskyltar på varje utrymningsvåning som informerar de utrymmande om att de kan invänta hjälp där och att det kan behöva vänta en längre tid. Hissarna förutsätts fungera vid händelse av brand. Utrymningsplatser för personer med nedsatt rörelseförmåga förutsätts vara placerade inom hisshallen. Vid trapputrymning i separat schakt förutsätts utrymningsvåningar vara placerade var 11:e meter.

I modellen förutsätts branden ha startat i en anslutande brandcell. Hisshallen förutsätts enligt tidigare vara byggnadstekniskt avskild under hela brandförloppet, således antas att de utrymmande inte kommer utsättas för brandpåverkan. I modellen förutsätts det att utrymningslarmet har aktiverats och informerat de utrymmande om att hissarna kan nyttjas som utrymningsväg. Ingen förberedelsetid är inräknad i modellen utan de utrymmande antas påbörja utrymning direkt. Detta eftersom modellen fokuserar på att undersöka på vilka sätt utrymning via trappor eller hiss skiljer sig, snarare än att ange en total utrymningstid från en specifik anläggning.

4.2.1 Giltighetsområde

Modellen ska fungera för djupa undermarksanläggningar, vilket naturligt sett medföljer att vissa begränsningar uppkommer. Följande modell beaktar anläggningar på sådana djup där vanliga transportlösningar som rulltrappor inte bedöms vara lämpliga på grund av höga kostnader eller långa restider. Om anläggningen placeras på sådant djup att rulltrappor är lämpligt behöver detta undersökas separat. Inga begränsningar ställs på hur djupt belägen anläggningen får vara i modellen. Eventuellt kan det uppkomma komplikationer eller svårigheter på väldigt stora djup, något som modellen inte berör, vilka användaren själv kan komma till att behöva ta hänsyn till.

I undermarksanläggningen förutsätts personerna generellt ha dålig lokalkännedom. Med hänsyn till de tekniska installationer som finns installerade enligt 4.2 antas dessa till viss del kompensera för detta.

Modellen förutsätter att det är ett högt personantal som behöver utrymma samtidigt. Detta eftersom utrymningshissar bedöms vara mest aktuellt i djupa anläggningar vilka har en hög vardaglig personomsättning via hissarna, till exempel en tunnelbanestation. Modellen är således inte lämplig för låga personantal eller en sekventiell utrymning.

Hissarna antas endast gå mellan hisshallen och marknivå. Därav kan utrymningssimuleringar av anläggningar som inkluderar flera våningar eller nivåer och därmed flera stannplan för hiss ej nyttjas av denna modell. Modellen hanterar inte de fall där problematik med hiss uppstår och personal manuellt behöver styra hissarna mellan våningar för att utrymma personer.

4.2.2 Användning

Modellen är uppbyggd i Excel men används fördelaktigt tillsammans med tilläggswerktyget @Risk. Detta verktyg appliceras vid kvantitativa riskanalyser där man ansätter numeriska värden på risker, antingen utifrån empiriska data eller genom kvantifiering av kvalitativa bedömningar (Palisade Risk Analysis, 2021). Genom dess användning kan man tilldela diskreta värden fördelningar, bygga upp olika scenarion och därmed få värden på olika möjliga utfall.

Modellen kan även användas utan sannolikhetsfördelningar. Väntevärden från samtliga fördelningar för de ingående variablerna finns tillgängligt i en egen kolumn i modellen för att möjliggöra användning utan @Risk.

I modellen finns möjligheten att undersöka fyra olika fall i olika flikar. Den första fliken, ”utrymningsmodellen”, är det fall som anses mest troligt och kommer beskrivas i detalj i detta kapitel. Antaganden har gjorts med hjälp av tidigare försök och studier för att få en så trovärdig bild av ett utrymningsförlopp som möjligt. De resterande fallen undersöker de fall där samtliga personer tar hiss eller samtliga som kan tar trappa. Detta gör det möjligt för användaren att själv genomföra en känslighetsanalys. Alla fall finns presenterade under kapitel 5.

Enligt Figur 6 & 7 börjar samtliga utrymmande i hisshallen. De utrymmande har då tre möjliga val: hissutrymning, trapputrymning eller utrymningsplats där de kan invänta fortsatt utrymning, sannolikt via räddningstjänst.

4.2.3 Begränsningar

Modellen är tänkt för djupa undermarksanläggningar och bör endast appliceras på liknande verksamheter. Överlag finns det stora osäkerheter i ingående värden, varvid resultaten inte bör tolkas som exakta svar utan snarare ge möjligheten att jämföra mellan olika alternativ. Modellen tar inte hänsyn till inverkan av flera små hissars gentemot en större hiss med samma totala personkapacitet. Vidare har det inte inkluderats att personer kan byta från trappa till hiss. Detta antas rimligt om personerna inte var villiga att välja hiss från början. På liknande sätt kan personer endast byta från hiss till trappa på grund av social påverkan eller långa kötider. Modellen har inte tagits fram för att användas som dimensionering av undermarksanläggningar, men det finns inget som hindrar användaren från att till exempel tillämpa lämpliga kriterier enligt Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd (Boverket, 2011).

4.3 Val av utrymningsväg

Enligt Figur 6 & 7 börjar samtliga utrymmande i hisshallen. De utrymmande har då tre möjliga val: hissutrymning, trapputrymning eller utrymningsplats där de kan invänta fortsatt utrymning,

sannolikt via räddningstjänst. I nedanstående delkapitel beskrivs hur de utrymmande förväntas välja mellan utrymningsvägarna.

4.3.1 Hissutrymning

I modellen förutsätts en viss andel personer inledningsvis vara villiga att nyttja hissen som utrymningsväg. För att uppskatta denna andel nyttjas fysiska experiment och VR-försök gjorda i höghus och tunnelbanor på olika djup och i olika riktningar, se Tabell 1. Notera att samtliga studier hade ett talat utrymningslarm samt gröna blinkande lampor bredvid utrymningsskyltar som markerade utrymningsvägar. Det talade utrymningslarmet som informerar om hiss som utrymningsväg samt de gröna blinkande lamporna gör att fler personer är villiga att använda hissarna (Mossberg & Nilsson, 2018). Mossberg et al. (2021) skiljer sig på så vis att de utrymmande ej nyttjade hissarna som entré innan försöket påbörjades. Sannolikt skulle en högre andel personer välja hiss som utrymningsväg om de hade startat simuleringen med att ta hissen ned till stationen enligt Simes anknytningsteori (1985), se 3.5.1. De övriga studierna bedöms därför närmre spegla de förutsättningar som råder i en djup anläggning där hissar används för att ta sig ned till stationsnivå, speciellt om anläggningen har varit i bruk en längre tid.

Tabell 1 Andel personer som valde hiss som första utrymningsväg i olika studier.

Författare	Studie	Utrymnings- riktning	Höjdskillnad till markplan (våningar)	Andel som valde hiss som första utrymningsväg [%]
Mossberg et al. (2021)	VR-försök i tunnelbana (HMD)	Uppåt	30	68
Mossberg et al. (2020)	Fysiskt försök i hotell	Nedåt	16	95,5
Andrée et al. (2016)	VR-försök i hotell (CAVE)	Nedåt	16	90
Arias et al. (2021)	VR-försök i hotell (HMD)	Nedåt	16	89

Baserat på Tabell 1 förväntas en inledningsvis hög andel personer inledningsvis vara villiga att nyttja hiss som utrymningsväg ($p_{väljer}$) från ett höghus eller en undermarksanläggning. Den höga andelen anses rimligt med hänsyn till det talade utrymningslarmet och de gröna blinkande lamporna. Notera att i samtliga studier har försökspersonerna varit ensamma i varje försök, varvid social påverkan inte har undersökts.

Beroende på personflödet via hissarna och därmed den kötid som uppstår kan en viss andel personer förväntas byta till trappa. Således är nästa steg i modellen att undersöka personflödet via hissarna. Personflödet via hissarna uppskattas genom att dividera det totala antalet personer som transporteras i samtliga hissar per hissresa med den totala restiden via hissarna enligt Ekvation 2 nedan:

$$Q_H = \left(\frac{n \cdot Pers_H}{t} \right)_H$$

Ekv. 2

Där Q_H är det konstanta personflödet från hisshall till markplan [pers/s], n_H är det totala antalet hissar i hisshallen, $Pers_H$ är antalet personer som förväntas åka i varje hiss per hissresa [pers/hiss] och t_H är den totala restiden för en hiss [s].

Denna förenkling innebär att varje enskild hiss inte modelleras gå mellan stannplanen var för sig, utan istället förenklas till att samtliga hissar lämnar hisshallen samtidigt. Vid första hissresan är detta orimligt, då det förutsätter att personer direkt vid utrymningens början befinner sig framför hissarna. Efter den första hissresan bedöms dock antagandet att samtliga personer väntar direkt utanför hissarna vara rimligt.

För att kunna uppskatta personflödet via hissarna enligt Ekvation 2 behöver således det förväntade antalet personer per hiss och hissresa uppskattas. Varje hiss har lastkapacitet för ett maximalt antal passagerare, Kap_H . Hissarna går automatiskt vid en utrymning och förutsätts initiera stängning när 80 % av hissens lyftkapacitet har nåtts enligt branschpraxis (Siikonen & Sorsa, 2011). Eftersom personers vikt samt platsen som de tar upp kan variera har detta tagits hänsyn till med en fördelning av en viss nyttjandegrad av hissarnas kapacitet, μ_H . Denna variabel antas därför vara triangelfördelad mellan 70-90 % av hissarnas kapacitet, där en fyllnadsgrad på 80 % antas vara mest sannolikt då hissdörrarna då initierar stängning. Det förväntade personantalet för varje hissresa och hiss ($Pers_H$) fås enligt Ekvation 3 nedan:

$$Pers_H = (Kap \cdot \mu)_H$$

Ekv. 3

Slutligen för att uppskatta personflödet via hissa behövs restiden för en hiss beräknas. I modellen definieras restiden för en hiss (t_H) som den tid det tar för hissen att åka en resa fram och tillbaka mellan hisshallen och marknivå samt fyllas och tömmas på respektive stannplan. Eftersom stationen är djup och endast har två stannplan kommer acceleration och retardation av hissen i samband med stannplanen ha en begränsad påverkan. Således görs en förenkling där hissarna antas ha en konstant hastighet. Restiden för en hiss uppskattas då enligt Ekvation 4 nedan:

$$t_H = \frac{Z}{v_H} \cdot 2 + (t_{Hdö} + t_{Hds}) \cdot 2 + t_{fyll} + t_{töm}$$

Ekv. 4

Där Z är djupet på hisshallen [m], v_H är hisshastigheten [m/s], $t_{Hdö}$ är hissdörrarnas öppningstid [s], t_{Hds} är hissdörrarnas stängningstid [s], t_{fyll} är tiden det tar att fylla hissen [s] och $t_{töm}$ är tiden det tar att tömma hissen [s].

Den genomsnittliga fyllningstiden för varje person i en hiss har uppskattats till cirka 1 s/pers (Ding, Chen, & Zhang, 2017; Siikonen & Sorsa, 2011). Däremot fick Ding, Chen & Zhang (2017) resultat som indikerade att fyllningstiden minskade i takt med ökat antal personer som skulle ta hissen. Författarna menar att vid högre personantal skyndar sig personerna in i hissen och därmed minskar fyllningstiden. Detta antas kunna uppstå vid en utrymningssituation där folk förväntas ha en större benägenhet att vilja få en plats i hissen innan den är full. Detta har tagits hänsyn till genom att fyllningstiden även kan gå snabbare än 1 s/pers. Däremot behöver även hänsyn tas till hur tid för fyllning och tömning påverkas av till exempel rullstolsbundna eller en utdragen dörrstängning. Detta då försök utförda av Brand och Sörqvist (2000) visade att tiden för fyllning och tömning kan uppgå till så mycket som 3-10 s/pers vid höga andelar rörelsehindrade (33-45 %). Deras resultat

bedöms vara för konservativt för att tillämpas direkt. I modellen ansätts fyllningstiden därför variera mellan 0,9-1,5 s/pers, där 1 s/pers anses mest sannolikt. Tömningstiden förutsätts variera på liknande sätt som fyllningstiden, men ett grovt antagande görs att detta generellt går cirka 20 % fortare än att fylla hissen

Med hjälp av Ekvation 1-4 kan då personflödet via hiss bestämmas. Beroende på detta personflöde, samt personantalet som väljer hiss, fås en väntetid till hissarna. Andelen som inledningsvis är villiga att välja hiss som utrymningsväg angavs i Tabell 1. För personer som inledningsvis väntar på hissarna i hisshallen beskrivs möjligheten att ”ändra sig” och byta till trappa på grund av yttre faktorer i flödesschemat, se Figur 6. Detta kan till exempel bero på trängsel i hisshallen, långa kötider till hissarna eller social påverkan. Med social påverkan menas att personer inte vill vara först att lämna kön till hissarna. Social påverkan skulle även kunna leda till att en stor del av kön ändrar sig från hiss till trappa. Det antas i modellen vara sannolikt att en stor andel av de köande är villiga att vänta på hissarna i enlighet med det talade meddelandet och informationsskyltarna. Vidare har det antagits att rörelsehindrade är mer villiga att använda hissarna än övriga, vilket har beaktats genom att dessa personer inte byter från hiss på grund av yttre faktorer. Istället väljer dessa personer mellan att ta hiss eller att nyttja utrymningsplatser i hisshallen.

I modellen beskrivs andelen personer som byter från hiss till trappa på grund av yttre faktorer med variabeln p_{byter} . Då ingen data finns tillgänglig för denna variabel uppskattas den vara mellan 5–15 %. Däremot finns stora osäkerheter om hur social påverkan och en hög persontäthet i hisshallen inverkar på valet av hiss som utrymningsväg samt accepterade kötider till dessa. På grund av detta undersöks hur variabeln påverkar resultatet i kapitel 5. De som väljer att inte längre vänta på hiss avviker för att istället ta trapporna. Baserat på andelarna ovan kan den slutgiltiga andelen personer som väljer att nyttja utrymningshissarna som utrymningsväg (p_H) fastställas. Detta är summan av den populationen som kan gå i trappor och som väljer hissen trots social påverkan, samt andelen personer som är rörelsehindrade och som är villiga att ta hissen enligt Ekvation 5 nedan:

$$p_H = p_{väljer} \cdot (1 - p_{byter})(1 - p_{rörelsehindrade}) + p_{väljer} \cdot p_{rörelsehindrade} \quad \text{Ekv. 5}$$

Där p_H är andelen personer i hisshallen som tar hiss, $p_{väljer}$ är andelen som först väljer hiss, p_{byter} är andelen som först väljer hiss men byter till trappa på grund av yttre faktorer och $p_{rörelsehindrade}$ är andelen rörelsehindrade i hisshallen.

Även om personer är först villiga att ta hissen kan det inte förutsättas att personer är villiga att vänta hur länge som helst på en hiss enligt avsnitt 3.5.3. Således läggs det in en maximalt accepterad kötid i modellen, $t_{hisskö}$, samt antalet personer som hinner ta hissen inom denna tid, $Pers_{hisskö}$. Det maximala antalet personer som hinner ta hissen är som mest lika med det totala personantalet som kan tänka sig ta hissen, se Ekvation 6 nedan:

$$Pers_{hisskö} = \text{MINIMUM}(Pers_{tot} \cdot p_H; Q_H \cdot t_{hisskö}) \quad \text{Ekv. 6}$$

Där $Pers_{hisskö}$ är antalet personer som hinner ta hi

sssen inom den maximalt accepterade kötiden, $Pers_{tot}$ är det totala personantalet i hisshallen, p_H är andelen personer i hisshallen som kan tänka sig ta hiss, Q_H är personflödet via hissarna [pers/s] och $t_{hisskö}$ är den maximalt accepterade kötiden [s]. Om antalet personer som hinner ta hissen

($Pers_{hisskö}$) är lägre än det totala personantalet som kan tänka sig använda hissen antas att mellanskillnaden av dessa byter till trappa istället, se Ekvation 7 nedan:

$$Pers_{byter} = \begin{cases} 0 & \text{om } Pers_{hisskö} > Pers_{tot} \cdot p_H \\ Pers_{tot} \cdot p_H - Q_H \cdot t_{hisskö} & \text{annars} \end{cases} \quad \text{Ekv. 7}$$

Baserat på de resonemang och antaganden i ovanstående text presenteras en sammanställning av de variabler där fördelningar ansatts i nedanstående Tabell 2. Hur de olika fördelningstyperna ansatts har tidigare presenterats under 4.1.

Tabell 2 Ingående variabler i hissutrymningsdelen samt deras fördelningar

Variabler	Beteckning	Fördelning	Kommentar
Andel i populationen som kan tänka sig välja hiss	$p_{väljer}$	Likformig(0,89;0,96)	Inledningsvis antas en hög andel personer vara villiga att använda hissar som utrymningsväg enligt Tabell 1. Påverkan från yttre faktorer som trängsel och social påverkan hanteras av p_{byter} .
Andel av populationen som kan ta trappor och som byter från hiss till trappa på grund av yttre faktorer	p_{byter}	Likformig(0,05;0,15)	I modellen förutsätts det mer sannolikt att endast liten andel personer väljer bort hiss på grund av yttre faktorer med hänsyn till de tekniska system som är installerade.
Nyttjandegrad av hissar	η_H	Triang(0,70;0,80;0,90)	Andelen av den totala personkapaciteten i hissarna som nyttjas vid utrymning. Förutsätts vara i medel 80 % av hisskapaciteten, men tar hänsyn till variationer i personers vikt och plats som tas upp.
Hissfyllning per person	t_{fyll}	Triang(0,9;1,0;1,5)	Enligt källa är hastigheten vid normala förhållanden 1 s/person, där fyllnadstiden sannolikt minskar vid ökat antal personer. Höjd tas för personer med nedsatt rörelseförmåga genom att öka tiden.
Hisstömning per person	$t_{töm}$	Triang(0,72;0,8;1,2)	Antas vara 20 % lägre än fyllningstiden per person.

4.3.2 Utrymningsplatser

Med resonemang och beräkningar ovan kan det nu uppskattas hur många som inledningsvis är villiga att använda hiss, och hur många som byter till trappa på grund av långa väntetider eller social påverkan. Enligt Figur 6 & 7 behöver det även uppskattas andelen personer som inte kan ta trapporna och inte heller vill ta hiss och därmed behöver utrymningsplatser (p_{UP}). Dessa personer nyttjar således hisshallen eller anslutande brandcell som utrymningsplats. Personerna inväntar där till dess att räddningstjänsten anländer.

Andelen personer som är i behov av utrymningsplatser, p_{UP} , antas främst utgöras av andelen av personer med nedsatt rörelseförmåga som inte kan gå i trappor. Enligt de nationella folkhälsoenkäterna de senaste 15 åren uppskattar Folkhälsomyndigheten i Sverige att cirka 11 % av befolkningen har nedsatt rörelseförmåga (Folkhälsomyndigheten, 2021). Med nedsatt rörelseförmåga syftas i enkäten på personer som själva angett att de inte kan gå upp ett trappsteg utan besvär eller inte kan ta en kortare promenad på cirka 5 minuter. Liknande data anges av Shields et al. (2009) som hänvisar till en enkätundersökning som genomfördes i norra Skottland, där 8 % av de svarande angav att de hade svårt att gå längre än 400 meter.

I modellen har det antagits att rörelsehindrade generellt är mer villiga att använda hiss än den övriga populationen (se Ekvation 5) då detta förväntas utgöra deras vanliga väg in och ut ur byggnader med flera våningar, i enlighet med 3.6. Detta hanteras i modellen genom att anta att rörelsehindrade inte påverkas av yttre faktorer som väntetid, persontäthet eller social påverkan. Istället är det som avgör huvuvida personerna är villiga att ta hiss eller inte. Andelen som väljer att nyttja utrymningsplats är således rörelsehindrade som inte är villiga att ta hiss, se Ekvation 8 nedan:

$$p_{UP} = (1 - p_{v\ddot{a}ljer}) \cdot p_{r\ddot{o}relsehindrade} \quad \text{Ekv. 8}$$

Där p_{UP} är andelen personer som behöver nyttja utrymningsplatser i hisshallen, $p_{v\ddot{a}ljer}$ är andelen personer som inledningsvis kan tänka sig välja hiss som utrymningsväg och $p_{r\ddot{o}relsehindrade}$ är andelen utrymnande som är rörelsehindrade. Om utrymningshiss saknas antas att samtliga personer som inte är rörelsehindrade tar trapporna, varvid samtliga rörelsehindrade hade vart i behov av utrymningsplatser i hisshallen.

Baserat på de resonemang och antaganden i ovanstående text presenteras en sammanställning av de variabler där fördelningar ansatts i nedanstående Tabell 3. Hur de olika fördelningstyperna ansatts har tidigare presenterats under 4.1.

Tabell 3 Fördelningar över andelen rörelsehindrade i hisshallen.

Variabler	Beteckning	Fördelning	Kommentar
Andel rörelsehindrade i hisshallen	$p_{r\ddot{o}relsehinder}$	Likformig(0,08;0,11)	Enligt källor cirka 11 % av Sveriges befolkning med nedsatt rörelseförmåga. Tar hänsyn till att eventuellt en lägre andel rörelsehindrade nyttjar undermarksanläggningen.

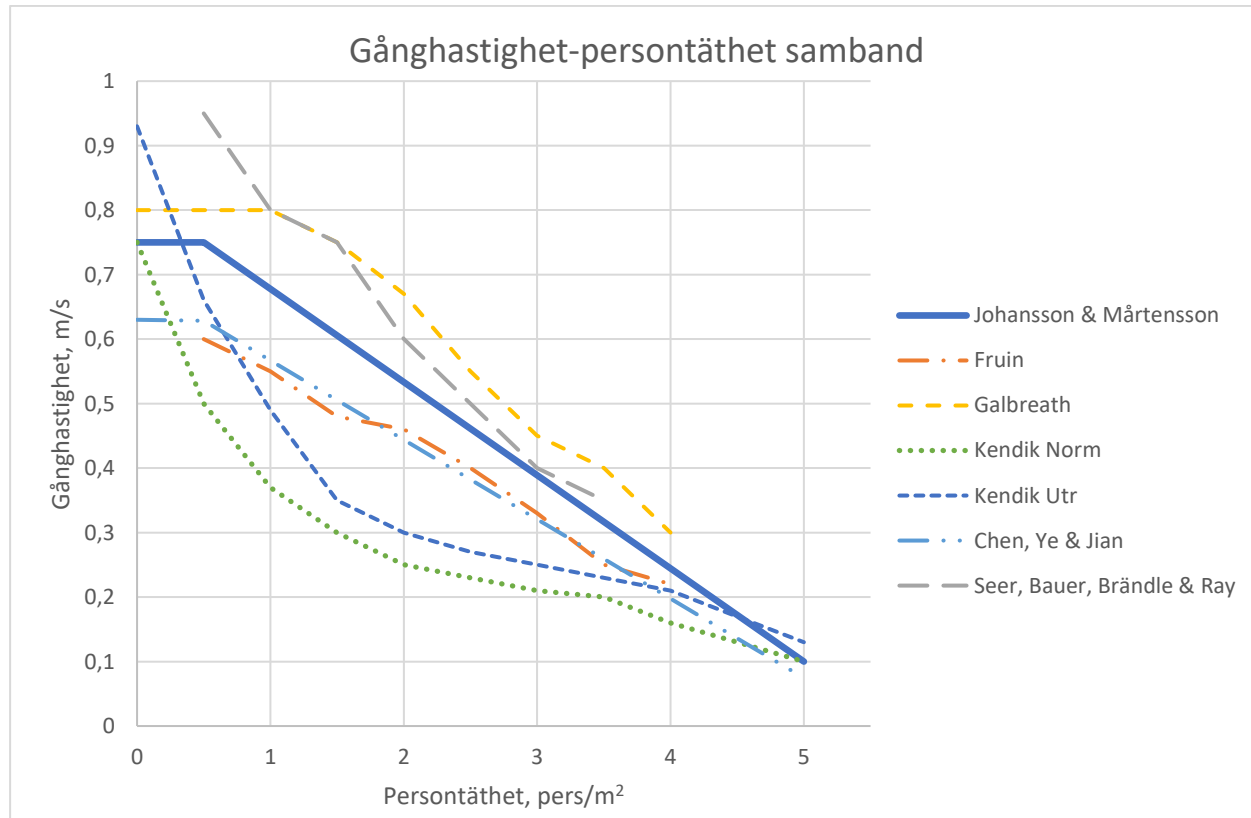
4.3.3 Trapputrymning

Enligt flödesschemat (Figur 6) antas en andel av utrymmande välja trappa som utrymningsväg. I modellen antas det att andelen personer som väljer att utrymma via trappan (p_T) är de personer som inte nyttjar hiss eller utrymningsplats, vars andelar uppskattades i avsnitt 4.3.1 och 4.3.2. Andelen som väljer att ta trappa blir då enligt Ekvation 9 nedan:

$$p_T = 1 - p_H - p_{UP} \quad \text{Ekv. 9}$$

Där p_H är andelen som tar hissar och p_{UP} är andelen personer som behöver nyttja utrymningsplatser i hisshallen.

På samma sätt som för hissarna behövs kötiden in till trapporna uppskattas för att senare kunna beräkna den totala utrymningstiden via trapporna. I modellen antas att det är flödet i trapporna som är begränsande och därmed avgörande för den totala tiden för trapputrymningen, snarare än flödet i dörröppningarna in till trapphuset. Kötiden till trappan beror då på det lägsta personflödet i trappan. Enligt tidigare studier för utrymning uppför trappor, presenterade i 3.2.3, sjunker gånghastigheten med en ökad persontäthet i trappan. I dagsläget saknas det enkla beräkningssamband för att kunna uppskatta hur gånghastigheten påverkas av persontätheten vid längre trapputrymningar i uppåtgående riktning. Således har det i samband med denna modell tagits fram ett gånghastighet-persontäthets samband baserat på den fria mediangånghastigheten i trappor på cirka 0,75 m/s av Ronchi et al. (2015) samt de allmänna trenderna enligt Frantzich (1992). Sambandet presenteras tillsammans med befintliga samband i Figur 8 nedan.



Figur 8 Framtaget gånghastighet-persontäthet samband vid trapputrymning uppåt i långa trappor. Baseras på observationer från tidigare samband (Frantzich, 1992; Chen, Ye, & Jian, 2010; Seer, Bauer, Brändle, & Ray, 2008) samt med data från utrymningar i långa trappor uppåt av Ronchi et al. (2015).

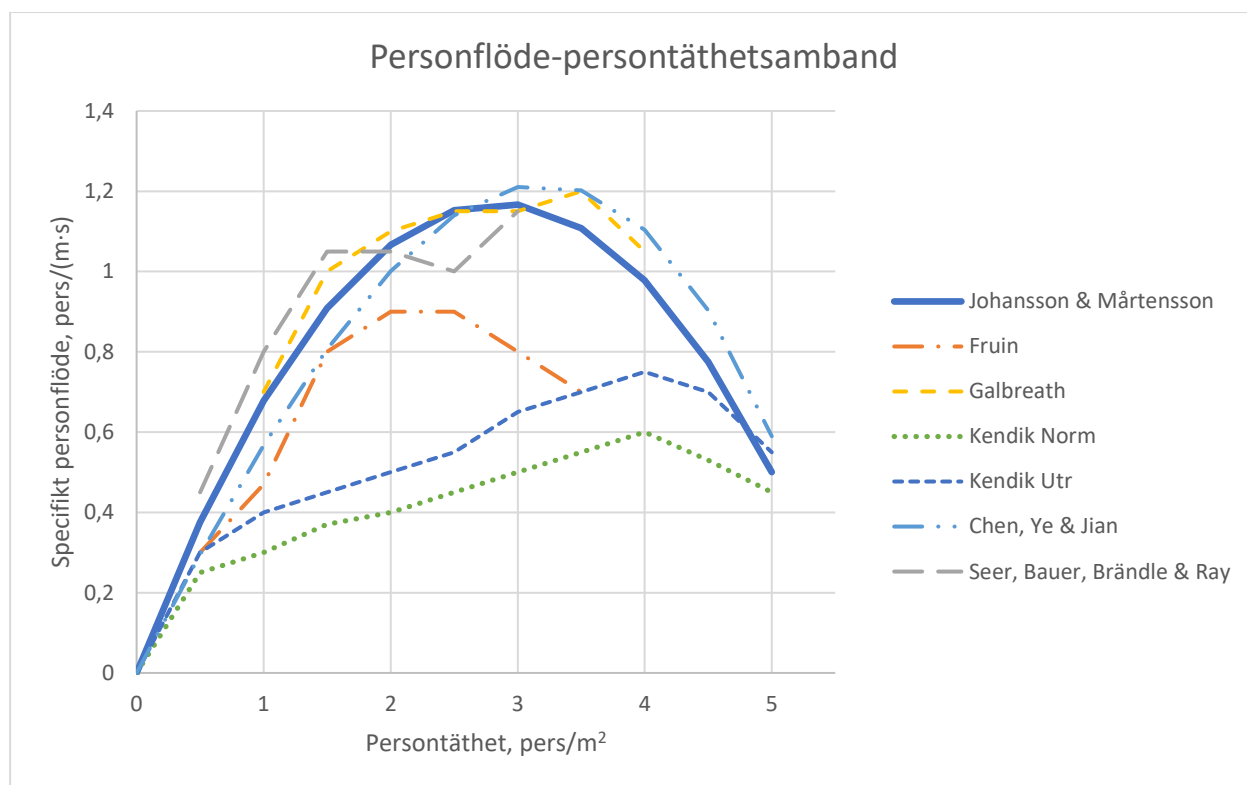
Ekvationen för det heldragna gånghastighet-persontäthetsambandet är följande:

$$v_{g\ddot{a}ng} = 0,75 - 0,144 \cdot (D - 0,5) \quad \text{Ekv. 10}$$

Där $v_{g\ddot{a}ng}$ är mediangånghastigheten vid en lång uppåtgående utrymning via trappor [m/s], och D är persontätheten i trappan [pers/m²]. Sambandet utgår från en konstant fri gånghastighet i trappor på 0,75 m/s, vilken avtar linjärt då persontätheten överstiger 0,5 pers/m². Lutningen på linjen bestämdes genom att ansätta att gånghastigheten avtar från 0,75 m/s vid en persontäthet på 0,5 pers/m² till 0,1 m/s vid en persontäthet på 5 pers/m² i enlighet med resterande samband.

Hur personflödet i trapporna beror på persontätheten kan sedan uppskatt

as med hjälp av det ideala sambandet att specifikt flöde [pers/(m·s)] är lika med persontäthet [pers/m²] multiplicerat med gånghastighet [m/s]. Om detta ideala samband tillämpas på det framtagna gånghastighet-persontäthetsambandet enligt Ekvation 10 fås följande personflöde-persontäthetsamband:



Figur 9 Framtaget personflöde-persontäthetsamband baserat på det ideala sambandet mellan specifikt flöde, persontäthet och gånghastighet. Samband jämförs med data från Frantzych (1992) och data inkluderat från senare studier (Chen, Ye, & Jian, 2010; Seer, Bauer, Brändle, & Ray, 2008).

Med detta enkla samband kan nu personflödet i trapporna uppskattas med hjälp av den förväntade persontätheten i trappan. Persontätheten förväntas vara som högst i början av trappan innan de snabbare individerna har gått förbi de långsammare (Ronchi et al., 2015). En förutsättning för att detta antagande ska gälla är att trappan är tillräckligt bred för att möjliggöra förbipasserande. En minsta bredd på 1,7 meter har ansatts där man antas kunna passera utan större förhinder enligt försök i Kista (Ronchi, et al., 2015). Detta stämmer väl överens med tidigare forskning som anger att en trappa bör vara minst 1,4-1,5 meter bred för att tillförlitligt möjliggöra att två personer kan

gå direkt bredvid varandra (Pauls, Fruin, & Zupan, Minimum Stair Width for Evacuation, Overtaking Movement and Counterflow - Technical Bases and Suggestions for the Past, Present and Future, 2005). Om trappbredden överstiger 1,7 meter antas vilande personer inte inverka negativt på personflödet i modellen.

I Frantzich rapport (1992) framgår att en persontäthet vid en utrymning i trappor nedåt är cirka 1,5-2 pers/m². Chen, Ye och Jian (2010) menar att det generellt förväntas en högre persontäthet i trappor uppåt på grund av att ett generellt kortare avstånd till framförvarande person accepteras. Eftersom persontätheten sannolikt är något lägre längre upp i trappan då personer spridit ut sig enligt deras föredragna gånghastigheter bedöms dessa skillnader ta ut varandra och persontätheten ansätts därför till 1,5-2 pers/m². Enligt sambandet för personflöde-persontäthet (se Figur 9) kommer en minskad persontäthet leda till ett lägre personflöde. Detta då det är först när persontätheten överstiger 3 pers/m² i trappan som personflödet sjunker till följd av en ökad persontäthet. Om persontätheten i början av trappan förväntas överstiga 3 pers/m² så uppstår köbildningen sannolikt där istället för längre upp i trappan, då det specifika personflödet minskar vid väldigt höga persontätheter.

För att uppskatta gånghastigheten för en population med en bred åldersfördelning och rörelsemöjligheter används de kumulativa sannolikhetsfördelningarna över gånghastigheterna från försöken i Ideon och Kista enligt Ronchi et al. (2015). Enligt försöken uppskattas 5 %-percentilen av försökspersonerna gå i cirka 0,5 m/s i trapporna i båda försöken. Detta värde förutsätts fungera väl som ett riktvärde för de långsammare individerna som i försöken klarade att utrymma upp till 109 meter. Däremot tas hänsyn till att försökspersonerna var relativt unga och de flesta utan rörelsehinder, varvid gånghastigheten för de långsammare individerna skulle kunna vara ännu lägre, se Tabell 4. Det bör understrykas att samtliga personer som deltog i experimenten klarade att utrymma hela vägen upp. Gånghastigheten hos personer som inte når marknivå utan behöver invänta hjälp på utrymningsvåningar används inte för att uppskatta den totala utrymningstiden via trappan. Detta då dessa inte klarar att gå hela vägen samt att det antas finnas möjlighet att passera framförvarande personer.

Enligt gånghastighet-persontäthets sambandet i Figur 8 minskar gånghastigheten med en ökad persontäthet. Givet att de långsammaste individerna, men som klarar att gå upp till marknivå, har en fri gånghastighet på 0,5 m/s kan det avläsas ur figuren att dessa individers gånghastighet kommer först att påverkas av en hög persontäthet när denna överstiger 2,2 pers/m². Om persontätheten längre upp i trappan förutsätts vara högre än 2,2 pers/m² så beräknas gånghastigheten uppför trappan ($v_{gång}$) för de långsammare individerna enligt Ekvation 10 nedan:

$$v_{gång} = \begin{cases} 0,75 - 0,144 \cdot (D - 0,5) & \text{om } D \geq 2,2 \frac{\text{pers}}{\text{m}^2} \\ \text{Fördelning enligt Tabell 4} & \end{cases}$$

Där $v_{gång}$ är gånghastigheten för de långsammaste individerna [m/s], 0,75 är den konstanta fria gånghastigheten i trappan vid låga persontätheter [m/s], som sedan sjunker linjärt om persontätheten överstiger 0,5 pers/m² enligt gånghastighet-persontäthets sambandet i Figur 8. Persontätheten förväntas överstiga 0,5 pers/m² längst ner i trappan, vilket medför att gånghastigheten i början av trappan är lägre än den fria gånghastigheten enligt Ekvation 10 ovan. Eftersom personerna går långsammare i början av trappan kommer de inte hinna trötta ut sig för

tidigt och därmed sannolikt orka gå en högre höjd enligt Ronchi et al. (2015). Detta innebär att gånghastigheten troligtvis inte kommer sjunka kraftigt senare i trappstigningen. Således bedöms antagandet om en konstant fri gånghastighet enligt 3.2.3 vara rimligt.

Personflöden och gånghastigheter i trapporna kan då uppskattas enligt de fundamentala sambanden ovan, där det totala personflödet via trapporna beräknas enligt Ekvation 11 nedan:

$$Q_T = D \cdot v_{gång} \cdot T_b \cdot n_T \quad \text{Ekv. 11}$$

Där Q_T är det lägsta personflödet i trapporna [pers/s], D är persontätheten i trappan [pers/m²], $v_{gång}$ är gånghastigheten i trappan för de långsammaste individerna [m/s], T_b är den effektiva trappbredden [m] och n_T är antalet trappor. Den effektiva trappbredden beräknas genom att subtrahera den totala faktiska bredden av trappan med den icke nyttjade trappbredden som uppstår närmst väggarna. Denna bredd nyttjas inte då personer i regel inte går precis intill väggar, räcken och dylikt. Normalt antas denna bredd till att vara cirka 150 mm på vardera sida av trappan i enlighet med studier och statistiska analyser genomförda av Pauls (1983). Eftersom persontätheten, D , sannolikt uppskattas vara lägre än 2,2 pers/m² längre upp i trappan ansätts en gånghastighet för de långsammaste individerna på maximalt cirka 0,5 m/s enligt Ekvation 10 ovan.

För att uppskatta tiden det tar att gå från hisshallen till marknivå för de långsammaste individerna behöver stighastigheten i trappan (v_{stig}) uppskattas. Med stighastighet menas den vertikala gånghastigheten i trappan. Stighastigheten uppskattas med hjälp av förhållandet mellan stig- och gånghastigheten från försöken i Ideon och Kista enligt Ronchi et al. (2015). De fann att kvoten mellan stighastigheten och gånghastigheten var cirka 0,3–0,4. Givet en gånghastighet för de långsammaste individerna på 0,5 m/s fås en stighastighet på cirka 0,15–0,2 m/s. Stighastigheten beräknad enligt modellen (0,15–0,2 m/s) stämmer väl överens med försöken i Ideon och Kista (0,1–0,3 m/s).

Notera att i beräkningarna förutsätts det vara flödet i trapporna som är begränsande och därmed avgörande för den totala tiden för trapputrymningen, snarare än flödet i dörröppningarna in till trapphuset. Kötiden för att påbörja trapputrymning beskrivs av Ekvation 12 nedan:

$$t_{Trappkö} = \frac{Pers_{tot} \cdot p_T + Pers_{byter}}{Q_T} \quad \text{Ekv. 12}$$

Där $Pers_{tot}$ är antalet personer som ursprungligen befinner sig i eller i anslutning till hisshallen, p_T är andelen som utrymmer via trappa, $Pers_{byter}$ är antalet personer som byter till trappa om den maximalt accepterade kötiden till hissarna överstigs [pers] och Q_T är totala personflödet i trapporna [pers/s]. Total tid att bestiga trapporna från hisshall till marknivå beskrivs av Ekvation 13 nedan:

$$t_T = \frac{Z}{v_{stig}} \quad \text{Ekv. 13}$$

Där Z är djupet på hisshallen [m] och v_{stig} är stighastigheten i trappor [m/s].

Det finns även en viss andel personer som inte klarar att utrymma hela vägen till det fria via trapporna, utan behöver invänta hjälp vid en utrymningsvåning (p_{UV}). Utrymningsvåningarna är i

normala fall placerade med ett visst konstant avstånd mellan dem. I modellen förenklas detta till att dessa personer som inte klarar att gå hela vägen upp för trappan någon gång under trappbestigningen tvingas stanna på en utrymningsvåning, utan att specificera exakt vilken våning. Det antas i modellen att avståndet mellan utrymningsvåningarna är 11 meter på samma sätt som för station Sofia (Stockholms läns landsting, 2018).

Andelen personer som inte kommer kunna nå marknivå utan behöva invänta hjälp på en utrymningsvåning, p_{UV} , är beroende av flera faktorer. Bland annat ålder, populationens kondition, rörelseförmåga eller om de har underliggande sjukdomar som påverkar deras förmåga att gå i trappor. Om modellen av Ronchi et al. (2015) tillämpas med kohortstudien av Ekblom-bak et al. (2018) skulle cirka 10 % av Sveriges befolkning mellan 18–74 år ha svårt att klara utrymma runt 100 höjdmeter på grund av deras kondition. Utöver dessa personer behöver även barn och personer med lättare rörelsehinder som tar trapporna tas hänsyn till. Detta eftersom enligt 3.2.3 kommer dessa personer sannolikt ha svårt att utrymma uppåt. Däremot förutsätts det att personer som har svårt att gå i trappor främst väljer hiss, om hissar finns tillgängliga. Om inga hissar finns antas att en större andel personer behöver nyttja en utrymningsvåning, till följd av att en större andel av dessa personer tvingas använda trapporna. I modellen antas därför att dessa maximalt utgör 5 % av populationen om hissar finns, och maximalt 10 % om inga hissar finns.

Baserat på de resonemang och antaganden i ovanstående text presenteras en sammanställning av de variabler där fördelningar ansatts i nedanstående Tabell 4. Hur de olika fördelningstyperna ansatts har tidigare presenterats under 4.1.

Tabell 4 Ingående variabler i trapputrymningsdelen samt deras fördelningar

Variabler	Beteckning	Fördelning	Kommentar
Persontäthet i trappan	D	Likformig(1,5;2,0)	Enligt källor mellan 1,5–2,0 pers/m ² för nedåtgående utrymning, vilket förutsätts vara rimligt även uppåt. Antar ett ungefärligt spann för att ta höjd för skillnader i populationen.
Gånghastighet i trappan	$v_{gång}$	Likformig(0,4;0,5)	Gånghastigheten för de långsammaste individerna som ändå väljer att ta trappan som utrymningsväg. Om D överstiger 2,2 pers/m ² beräknas gånghastigheten enligt Ekvation 10.
Förhållandet mellan stighastighet och gånghastighet	v_{stig}	Likformig($v_{gång} \cdot 0,3$; $v_{gång} \cdot 0,4$)	Baserat på försök i Ideon och Kista höghus av Enrico et al. (2015).

4.4 Kostnader

För att kunna utvärdera och jämföra olika utformningar av utrymningsvägar behövs ungefärliga kostnader tas med i modellen. Kostnaderna för att till exempel bygga en trappa beror dels på storleken på schaktet och den förknippade kostnaden med att schakta material, dels materialkostnaden för själva trappan. I modellen förutsätts schakt- och materialkostnader samlat utgöra den största kostnaden och nyttjas därför vid jämförelser.

I modellen antas det att schakten som byggs går rakt upp hela vägen till marknivå. Således uppskattas kostnaden för schaktning genom att multiplicera schaktareor för till exempel hiss eller trappa med djupet och schaktkostnaden per m^3 . I praktiken spelar utformning och placering av de olika delarna i anläggningen roll. Kostnaden uppskattas till cirka 13 tkr/ m^3 med hjälp av utförandeentreprenadkostnaden angiven för schaktningen på 1 miljard kronor (Region Stockholm, 2021) delat med den totala schaktstorleken på 78 000 m^3 (Stockholms läns landsting, 2021) för station Sofia, vilken bedöms fungera som ett bra riktmärke. Schaktkostnaden beror på vilken typ av mark som ska schaktas samt kostnader för sprängning av berg, vilket användaren hade behövt ta hänsyn till från fall till fall.

Två trappor kan placeras i ett och samma trapphus genom att trapporna går omlott. Materialkostnaden för en trappa uppskattas grovt till 25 tkr/våning då ingen direkt information har hittats gällande detta. I denna ingår kostnaden för till exempel allmän- och nödbelysning med tillhörande backup för strömförsörjning. Material- och installationskostnaden för en vanlig hiss i ett höghus uppskattas till 1,5–1,8 mkr baserat på kalkyl från hissinstallatör (Altandk, 2021).

Utrymningsplatser förutsätts placeras inom hisshallen, vilken utgör en egen brandcell. Personer ska här kunna invänta hjälp, sannolikt från räddningstjänsten. Om utrymningshissar finns tillgängliga hade dessa utrymningsplatser inte behövts, eller antalet platser minimerats kraftigt. I beräkningarna av den totala kostnaden tas inte denna alternativkostnad med, men diskuteras under kapitel 7. Utrymningsvåningar förutsätts placeras var 11:e meter inom trapp- och hisschaktet på samma sätt som station Sofia (Stockholms läns landsting, 2018) och även utformas på liknande sätt. Kostnaderna förknippade med utrymningsvåningarna antas därför vara två brandklassade dörrar i klass EI60-S₂₀₀ med dörrstängare per trappa och utrymningsvåning. Kostnaden för utrymningsvåningarna är således beroende av djupet på hisshallen.

Baserat på de resonemang och antaganden i ovanstående text presenteras en sammanställning av de variabler där fördelningar ansatts i nedanstående Tabell 5. Hur de olika fördelningstyperna ansatts har tidigare presenterats under 4.1.

Tabell 5 Ingående variabler i kostnadsdelen samt deras fördelningar. Kostnaderna anges i tusentals kr

Variabler	Beteckning	Fördelning	Kommentar
Kostnad per hiss	K_{Htot}	Likformig($3 \cdot 1,8 \cdot 10^3; 5 \cdot 1,8 \cdot 10^3$)	Kostnaden för en vanlig hiss uppskattas till 1,8 mnkr (Altandk, 2021). En utrymningshiss antas kosta 3-5 gånger mer än en vanlig hiss enligt kontakter med station Sofia.
Kostnad för trappa	K_{Ttot}	Likformig(20;30)	Uppskattas till att kosta cirka 25 tkr per våning. En våning antas vara cirka 3 meter hög.
Kostnad för utrymningsvåning	K_{UV}	Likformig(35;45)	Två brandklassade dörrar i EI60-S ₂₀₀ samt dörrstängare uppskattas till cirka 40 tkr per utrymningsvåning och trappa.
Schaktkostnad per m ³	K_{Schakt}	Likformig(10;12,8)	Kostnaden uppskattades med den totala entreprenadkostnaden för schaktning av station Sofia dividerat med den totala schaktvolymen (Stockholms läns landsting, 2021)

4.5 Beräknade variabler

I modellen finns ett stort antal beräknade variabler. De variabler som valts ut för vidare undersökning och som presenteras nedan anses ha en betydande del vid planering och dimensionering av utrymningsanläggningar. En del av dem kan bli kritiska för byggnationen i form av att de inte får överstigas eller har ett minimumkrav på sig, exempelvis utrymningstid eller totala kostnader.

4.5.1 Utrymningsvariabler

Ett konstant personflöde från hisshallen till marknivå via hissarna samt det förväntade antalet personer som väljer att vänta på en hiss ger den totala tiden för hissutrymning (t_{Hutr}), se Ekvation 14 nedan. Utrymningstiden via hissarna är ungefär lika med kötiden till hissarna, med skillnaden att personen som är sist i kön till hissen även behöver åka från hisshallen till marknivå.

$$t_{Hutr} = \frac{Pers_{hisskö}}{Q_H \cdot 60} \quad \text{Ekv. 14}$$

Där t_{Hutr} är tiden för utrymning med hiss i [min], $Pers_{hisskö}$ är antalet personer som hinner ta hissen inom den maximalt accepterade kötiden [pers] och Q_H är det totala personflödet via hissarna

[pers/s]. Den totala utrymningstiden för de som väljer att utrymma via trappor beskrivs enligt Ekvation 15 nedan. Tiden utgår från att sista person når det fria. I beräkningarna förenklas det att någon av de sista personerna utrymmer hela vägen upp (och viker alltså inte av till utrymningsvåningen). Gånghastigheten för de långsammaste (som troligtvis nyttjar utrymningsvåningen) avgör hastigheten i trappan.

$$t_{Tutr} = \frac{t_{Trappkö} + t_T}{60} \quad \text{Ekv. 15}$$

Där t_{Tutr} är tiden för utrymning via trappor i [min], $t_{Trappkö}$ är kötid för trappa i [s] och t_T är den totala tiden det tar att gå upp från hisshall till markplan [s]. Den totala utrymningstiden ges av den längsta utrymningstiden från hiss eller trapputrymning, enligt Ekvation 16 nedan:

$$t_{utr} = \text{MAX}(t_{Hutr}; t_{Tutr}) \quad \text{Ekv. 16}$$

Där t_{utr} är den totala utrymningstiden för trapp och hissutrymning i [min], t_{Hutr} är tiden för utrymning via hiss i [min] och t_{Tutr} är tiden för utrymning via trappor i [min]. Antalet personer som behöver hjälp av räddningstjänst via antingen utrymningsplats i nivå med hisshall, eller någon av utrymningsvåningarna längs med trapporna ges av Ekvation 17.

$$Pers_{RTJ} = Pers_{tot}(p_{UP} + p_T \cdot p_{UV}) + Pers_{byter} \cdot p_{UV} \quad \text{Ekv. 17}$$

Där $Pers_{RTJ}$ är det totala antalet personer som inväntar räddningstjänsten [pers], $Pers_{tot}$ är det totala antalet personer i hisshallen [pers], p_{UP} är andelen personer som väljer att nyttja utrymningsplatserna i hisshallen, p_T är andelen som väljer trappa som utrymningsväg, p_{UV} är andelen personer som utrymmer via trappan som inte klarar att utrymma hela vägen upp och väljer att stanna på en utrymningsvåning och $Pers_{byter}$ är antalet personer som byter från hiss till trappa om kötiden överstiger den maximalt accepterade kötiden [pers].

4.5.2 Kostnadsvariabler

Den totala kostnaden för hissutrymningen beror till stor del av antalet hissar och storleken på hisschaktet. De krav som ställs på utrymningshissar är inkluderat i priset. Totala kostnaden ges av Ekvation 18 nedan:

$$K_{Htot} = n_H \cdot (K_H + Z \cdot A_{Hisschakt} \cdot K_{Schakt}) \quad \text{Ekv. 18}$$

Där K_{Htot} är den totala kostnaden för hissutrymningen, n_H är det totala antalet hissar, K_H är kostnad per hiss, $A_{Hisschakt}$ är hisschaktets storlek i [m²], Z är djupet på stationen i [m] och K_{Schakt} är schaktkostnad i [kr/m³]. Kostnad för trappor ges av Ekvation 19 nedan:

$$K_{Ttot} = n_T \cdot K_T + n_{trapphus} \cdot Z \cdot A_{Trappschakt} \cdot K_{Schakt} \quad \text{Ekv. 19}$$

Där K_{Ttot} är den totala kostnaden för trapputrymningen, n_T är det totala antalet trappor, K_T är kostnaden för en trappa, $n_{trapphus}$ är antalet trapphus och $A_{Trappschakt}$ är trappschaktets storlek i [m²]. Kostnaden för utrymningsvåningar har räknats in i trappschaktet och utgörs här endast av kostnaderna som tillkommer för brandklassning, se Ekvation 20 nedan. Enda kostnaden är således förknippade med brandklassade dörrar i klass EI60-S₂₀₀ med dörrstängare och övriga

installationer. Antar en utrymningsvåning var 11:e meter som för station Sofia (Stockholms läns landsting, 2018).

$$K_{UVtot} = K_{UV} \cdot n_{trapphus} \quad \text{Ekv. 20}$$

Där K_{UVtot} är den totala kostnaden för utrymningsvåningarna, K_{UV} är kostnaden för utrymningsvåning per trapphus och $n_{trapphus}$ är antalet trapphus. Den totala kostnaden som berör utrymningsdelarna från undermarksanläggningen utgörs av Ekvation 21 nedan. Här beräknas summan av kostnaderna för hissutrymning, trapputrymning och utrymningsvåning.

$$K_{tot} = K_{Htot} + K_{Ttot} + K_{UVtot} \quad \text{Ekv. 21}$$

5 Undersökning av fall

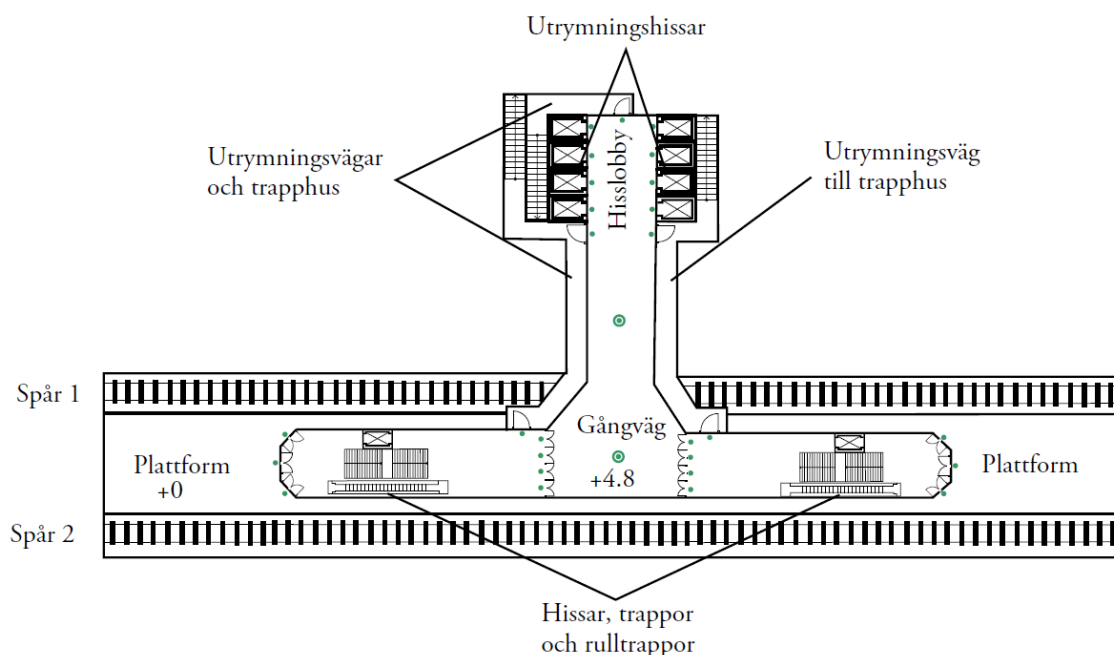
Med hjälp av modellen ovan kan det nu identifieras vilka ingående variabler och dess osäkerheter som har störst påverkan vid en utrymning från en undermarksanläggning. Detta kommer göras bland annat genom att undersöka ett antal fall. Andersson och Jönsson (2011) anser att vid en utrymningssimulering av en byggnad med utrymningshissar bör åtminstone tre fall simuleras:

- Ett fall där de uppskattade andelarna av personer som väljer mellan hiss och trappa tillämpas enligt rimliga antaganden
- Ett fall där samtliga individer i byggnaden antas använda hiss som utrymningsväg
- Ett fall där samtliga individer i byggnaden antas använda trappa som utrymningsväg

För att kunna göra jämförelser mellan fallen krävs ett referensfall. Då det finns relativt mycket information tillgänglig kommer station Sofia och dess utformning och uppskattade andelar personer som väljer hiss nyttjas som referensfall. Utöver dessa tre fall kommer det även undersökas ett fall där social påverkan leder till att mycket få personer är villiga att ta hiss, enligt 4.3.1. För samtliga fall utöver referensfallet kommer det anges vilka variabler som justeras och på vilket sätt, där övriga variabler är lika. I detta kapitel anges vilka förutsättningar som antas gälla för varje fall. För att se respektive falls fullständiga ingående variabler hänvisas till Bilaga B.

5.1 Referensfall - station Sofia

Station Sofia väljs som referensfall då detta är ett verkligt projekt och att det då finns god tillgång till information gällande bland annat djup, antal hissar, hisskapacitet och trappbredd. Tillsammans med de antaganden och förutsättningar beskrivna enligt 4.2 kan då modellen tillämpas. Figur 10 nedan visar en ritning över stationen. För förtydligande så går rulltrapporna från spårnivå till stationsnivå, det vill säga upp till hisshallen. Eftersom modellen utgår från att personerna redan befinner sig i hisshallen är dessa inte med i beräkningarna. Populationen i station Sofia förutsätts ha en bred åldersfördelning samt inkluderar personer med nedsatt rörelseförmåga eller bakomliggande sjukdomar som kan påverka personers förmåga att gå i trappor.



Figur 10 Schematisk ritning över station Sofia. Bild tillhandahållen av Axel Mossberg (2021).

De ingående variablerna som är specifika för referensfallet presenteras i Tabell 6 nedan. Notera att p_{UV} är en variabel vilken är beroende av djupet. Då station Sofia är belägen 100 meter under mark samt utrymningshissar finns tillgängliga antas omkring 10–15 % ha svårt att nå det fria på grund av deras kondition, ålder och rörelseförmåga. För resonemang kring variabeln se 4.3.3.

Tabell 6 Ingående variabler för referensfallet station Sofia.

Variabler	Beteckning	Storlek/Fördelning	Enhet
Förutsättningar			
Djup på hisshallen	Z	100	m
Antal personer i hisshallen	$Pers_{tot}$	2400	personer
Andel som behöver utrymningsvåning	p_{UV}	Likformig(10;15)	%
Hissutrymning			
Antal hissar	n_H	8	hissar
Area på hisschakt	$A_{Hisschakt}$	15	m^2
Hisskapacitet	Kap_H	32	personer
Hiss hastighet	v_H	4	m/s
Öppningstid hissdörr	$t_{Hdö}$	1,2	s
Stängningstid hissdörr	t_{Hds}	3,0	s
Trapputrymning			
Antal trappor	n_T	2	trappor
Area på trappschakt	$A_{Trappschakt}$	42	m^2
Trappbredd	$bredd_T$	2	m
Antal trapphus	$n_{trapphus}$	1	trapphus
Persontäthet i trappan	D	Likformig(1,5;2)	$pers/m^2$

5.2 Fall 1: Hiss som enda utrymningsväg

Fall 1 utgår från att hissarna i referensfallet nu är den enda tillgängliga utrymningsvägen. Det förväntas att alla de som tidigare i referensfallet nyttjat trapporna nu kommer ta hiss. Utrymningsplatser finns i detta fall ej tillgängliga utan alla förutsätts ha möjlighet att ta hiss. De variabler som ändrats utifrån referensfallet presenteras i Tabell 7 nedan.

Tabell 7 Ingående variabler för Fall 1: Hiss som enda utrymningsväg.

Variabel	Beteckning	Storlek/Fördelning	Enhet
Hissutrymning			
Andel som tar hissen	p_H	100	%
Trapputrymning			
Antal trappor	n_T	0	trappor
Andel som väljer trappa	p_T	0	%
Andel som väljer utrymningsplats	p_{UP}	0	%

5.3 Fall 2: Trappa som enda utrymningsväg

Fall 2 utgår från att trappor är den enda tillgängliga utrymningsvägen. Personer som ej kan ta trapporna, *prörelsehindrade*, antas nyttjar utrymningsplatserna i hisshallen istället. Dessa antas utgöra 8–11 % av populationen enligt tidigare, där resterande 89–92 % nyttjar trapporna. De variabler som ändrats utifrån referensfallet presenteras i Tabell 8 nedan.

Notera att personer som har svårt att gå i trappor och som tidigare kunde ta hiss nu tvingas ta trappa. Således verkar det troligt att andelen som avviker till utrymningsvåning, p_{UV} , troligtvis vore ännu högre i detta fall jämfört med referensfallet. Här ansätts därför en höjning av p_{UV} med 5 procentenheter. De variabler som ändrats utifrån referensfallet presenteras i Tabell 8 nedan.

Tabell 8 ingående variabler för Fall 2, trappa som enda utrymningsväg.

Variabel	Beteckning	Storlek/Fördelning	Enhet
Hissutrymning			
Antal hissar	n_H	0	hissar
Andel som tar hissen	p_H	0	%
Trapputrymning			
Andel som väljer trappa	p_T	Likformig(89;92)	%
Andel som behöver utrymningsvåning	p_{UV}	Likformig(15;20)	%

5.4 Fall 3: Fler byter till trappa

Fall 3 utgår från att personer, på grund av social påverkan, inte är särskilt villiga att använda hiss som utrymningsväg. I referensfallet bedömdes det mer sannolikt att personer är villiga att vänta länge, utstå höga persontätheter och dylikt för att ta hissen. I detta kapitel undersöks hur resultatet påverkas om social påverkan medför att personer inte är villiga att vänta på hissarna och således gärna byter till trappa. Den variabel som ändrats utifrån referensfallet är p_{byter} och presenteras i Tabell 9 nedan.

Tabell 9 ingående variabler för Fall 3, väldigt många byter från hiss till trappa.

Variabler	Beteckning	Storlek/Fördelning	Enhet
Trapputrymning			
Andel som byter till trappa pga social påverkan	p_{byter}	Likformig(85;95)	%

6 Resultat

Resultatet presenterar en fullständig tabell över referensfallets värden. Därefter presenteras en jämförelse mellan alla fall över de variabler som valts ut för jämförelse. För fullständigt resultat av samtliga fall se Bilaga C.

6.1 Referensfall - station Sofia

Simuleringen har gjorts med 1000 iterationer vilket ger konvergens på 3 % med konfidensintervall 95 %. Detta innebär att fler iterationer inte kommer att ge ett annorlunda resultat, varvid fler iterationer inte varit befogade. Enligt modellen och de fördelningar som har angivits ovan presenteras resultaten med deras väntevärde och 95 % konfidensintervall i Tabell 10 nedan. Vissa variabler, markerade med *, har inte räknats fram i modellen utan har beräknats direkt utifrån valda sannolikhetsfördelningar. Utrymningstid syftar här till den tid som det tar för samtliga utrymmande att ta sig upp från hisshallen till marknivå. Den bortser därför från till exempel varseblivningstid och förberedelsetid. Detta behandlas vidare i diskussionen, se kapitel 7.

*Tabell 10 Resultat från Monte Carlo-analys av referensfallet station Sofia. Presenteras med dess väntevärde och konfidensintervall med två värdesiffrors noggrannhet. Variabler som direkt avgörs av valda sannolikhetsfördelningar har markerats med *.*

Variabel	Väntevärde (95 % KI)	Enhet
Hissutrymning		
Förväntat antal personer i hiss	26 (23–28)*	<i>pers</i>
Restid för hiss	110 (100–120)	<i>s</i>
Andel som tar hiss	84 (78–90)	<i>%</i>
Personflöde via hissar	1,9 (1,7–2,0)	<i>pers/s</i>
Tid för hissfyllning	29 (24–36)	<i>s</i>
Tid för hisstömning	23 (19–29)	<i>s</i>
Trapputrymning		
Andel som väljer trappa	15 (10–21)	<i>%</i>
Specifikt personflöde i trappor	0,78 (0,64–0,94)	<i>pers/(ms)</i>
Personflöde via trappor	2,7 (2,2–3,2)	<i>pers/s</i>
Kötid till trappor	140 (90–200)	<i>s</i>
Tid för trappstigning	650 (530–790)	<i>s</i>
Personer som inväntar räddningstjänsten		
Andel som väljer utrymningsplats	0,7 (0,4–1,1)	<i>%</i>
Beräknade variabler		
Total utrymningstid via hiss	18 (16–20)	<i>min</i>
Total utrymningstid via trappa	13 (11–16)	<i>min</i>
Total utrymningstid	18 (16–20)	<i>min</i>
Antal personer i utrymningsplatser	17 (9–27)	<i>pers</i>
Antal personer i utrymningsvåning	46 (27–67)	<i>pers</i>
Antal personer som inväntar hjälp	63 (36–94)	<i>pers</i>
Total kostnad för hiss	190 (170–220)	<i>mkr</i>
Total kostnad för trappor	50 (44–55)	<i>mkr</i>
Total kostnad	250 (220–270)	<i>mkr</i>

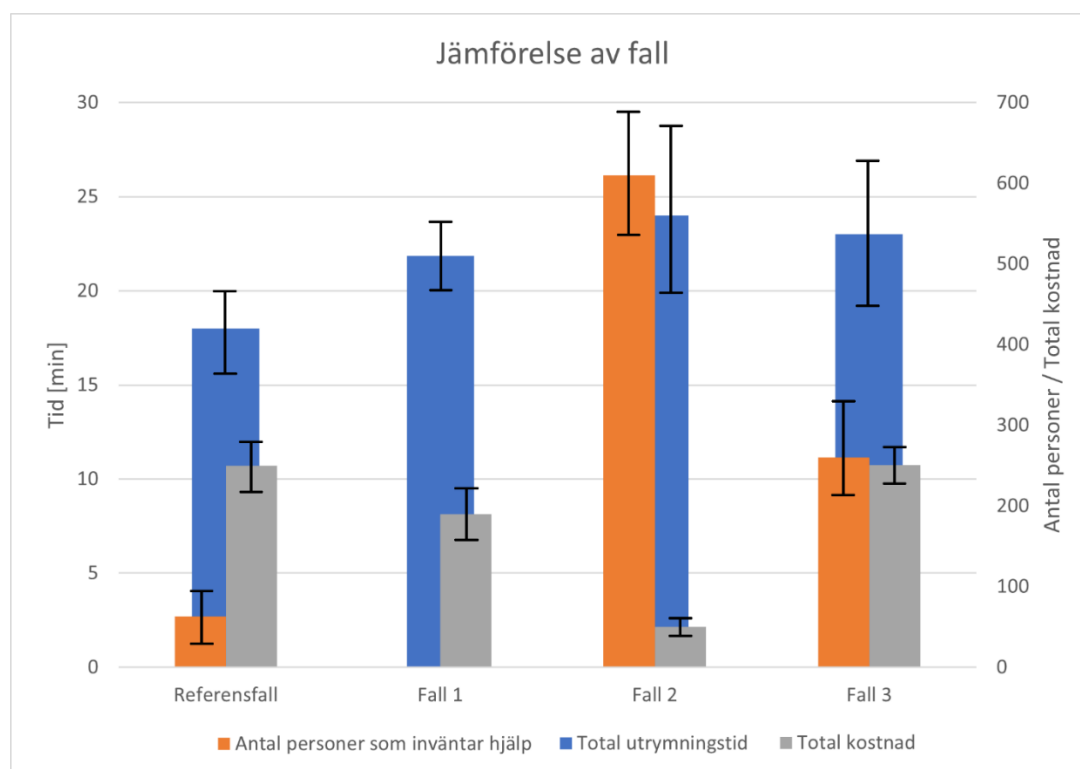
6.2 Jämförelse mellan olika beräkningsfall

Nedan jämförs resultaten från de undersökta fallen enligt kapitel 5. I tabellen presenteras total utrymningstid, antal personer som inväntar räddningstjänsten samt den totala kostnaden med deras väntevärde och 95 % konfidensintervall.

Tabell 11 Väntevärde och 95 % konfidensintervall för variabler i de undersökta fallen.

Variabler	Enhet	Referensfall	Fall 1 - Hiss	Fall 2 - Trappa	Fall 3 – Social påverkan
Total utrymningstid	Min	18 (16–20)	22 (20–24)	24 (20–29)	23 (19–27)
Totalt antal personer som inväntar hjälp	Pers	63 (36–94)	-	610 (540–680)	260 (210–320)
Total kostnad	Mkr	250 (220–270)	190 (170–220)	50 (45–56)	250 (220–270)

I Figur 11 nedan presenteras total utrymningstid, antal personer som inväntar räddningstjänsten samt den totala kostnaden i ett stapeldiagram med deras väntevärde och 95 % konfidensintervall. Det kan ses att utrymningstiden är som kortast då en blandning av hissar och trappor används i Fall 1 och Fall 2, med den längsta utrymningstiderna där många använder trapporna i Fall 2 och Fall 3. Antalet personer som inväntar hjälp ökar kraftigt ju fler som använder trapporna då andelen som ej klarar att nå marknivå från hisshallen är konstant. Även om personer inte är särskilt villiga att använda hissar (Fall 3) halveras antalet personer som inväntar hjälp gentemot om endast trappor finns (Fall 2). De högsta kostnaderna fås för fallen där utrymningshissar används. För att se respektive falls fullständiga beräknade variabler hänvisas till Bilaga C.

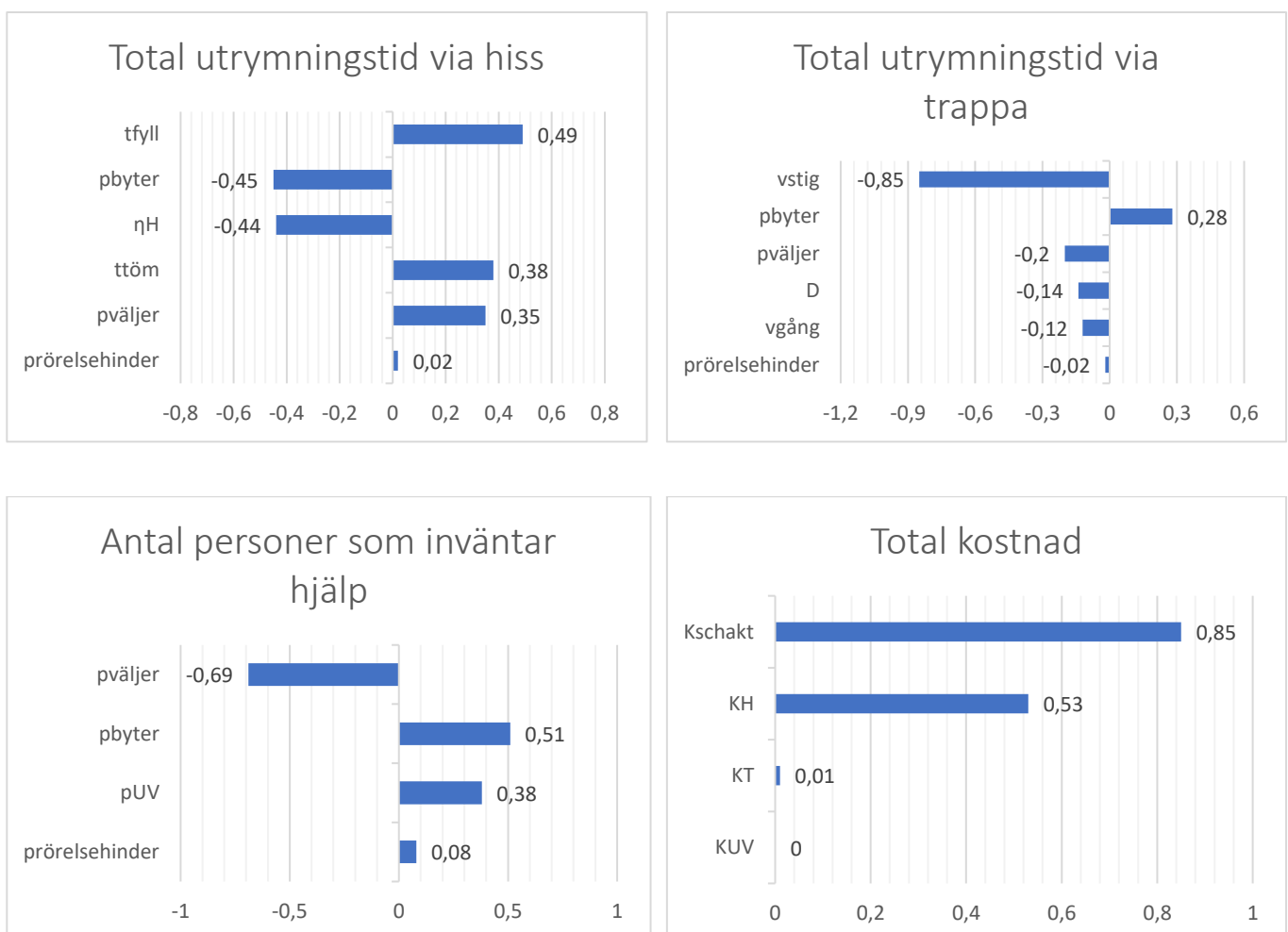


Figur 11 Stapeldiagram över väntevärde och 95 % konfidensintervall för beräknade variabler i de undersökta fallen.

6.3 Känslighetsanalys

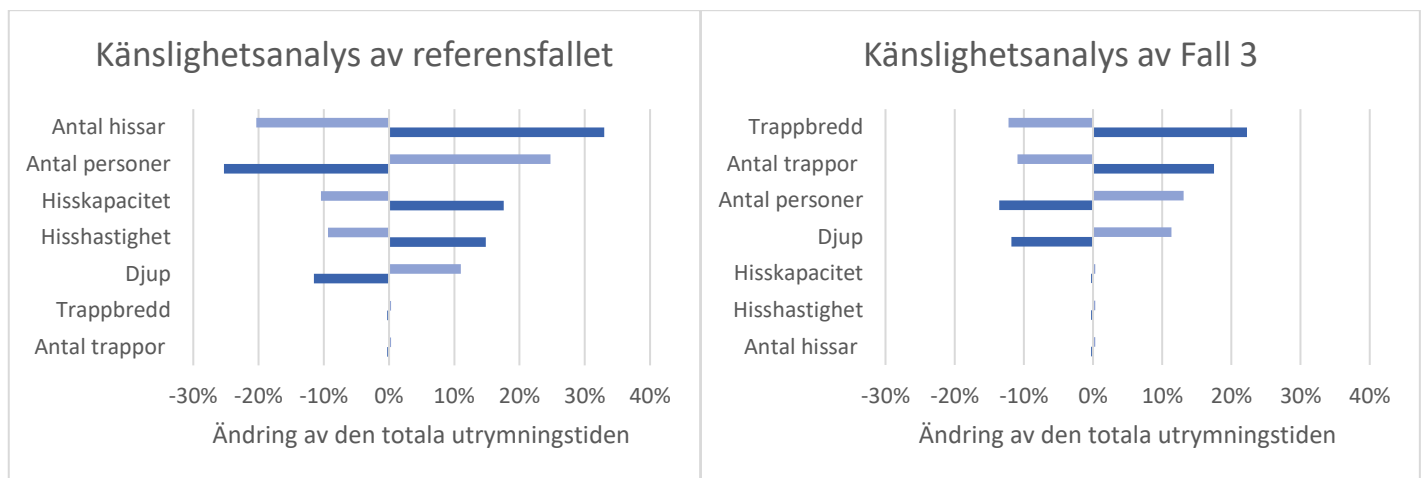
För att undersöka hur fördelningarna av ingående variabler påverkar resultatet för referensfallet görs en känslighetsanalys. Regressionskoefficienter bestäms med hjälp av @Risk som gör en stegvis multipel linjär regression. Koefficienterna anger till vilken grad som resulterande utdata beror på de ingående variabelernas variationer, och har ett värde mellan -1 och 1. Regressionskoefficienterna för samtliga intressanta utdata parametrar i referensfallet med station Sofia presenteras nedan i tornadodiagram. Tornadodiagram gör det lätt att visuellt jämföra olika koefficienter och avgöra vilken indata som påverkar resultatet mest.

I Figur 12 nedan kan det ses vilka ingående variabler som hade störst påverkan på den totala utrymningstiden via hiss respektive trappa, antalet personer som inväntar hjälp samt den totala kostnaden. Det kan ses att utrymningstiden via hiss var främst beroende av fyllningstiden, hur många som tar hissen och inte byter samt personkapaciteten i hissarna. Utrymningstiden i trapporna är främst beroende på stighastigheten i trappan för de utrymmande, följt av andelen som väljer att ta trappan (antingen direkt eller de som valde bort hiss). Gällande antalet personer som inväntar hjälp berodde detta främst på hur många som tog trappan, följt av andelen rörelsehindrade som ej var villiga att ta hissen utan istället ville vänta i hisshallen. Kostnaderna var främst beroende av de uppskattade schaktkostnaderna, följt av kostnaderna förknippade med utrymningshissarna.



Figur 12 Känslighetsanalys från @Risk som visar regressionskoefficienterna för intressant utdata.

För variabler vilka ej har getts en sannolikhetsfördelning som till exempel djup och antal personer görs en enklare känslighetsanalys. Varje variabel justeras var för sig till 25 % större eller 25 % lägre än deras väntevärde, som sedan jämförs med den procentuella ändringen av den totala utrymningstiden. Denna känslighetsanalys har gjorts för både referensfallet (till vänster) och Fall 3 (till höger) vilka endast skiljer sig på så vis att personer är mer eller mindre villiga att använda hiss, se Figur 13 nedan. Beroende på vilken utrymningsväg som är avgörande för den totala utrymningstiden kan detta leda till att vissa variabler inte påverkar. I Figur 13 kan det ses att ett minskande antal hissar hade en större negativ inverkan på den totala utrymningstiden än ett ökande antal hissar hade en positiv inverkan i referensfallet. Denna asymmetriska påverkan kan även ses gällande hisskapaciteten och hisshastigheten. För känslighetsanalysen av Fall 3, där få väljer att ta hiss, kan det ses att trapporna istället är avgörande. På liknande sätt som hissarna fanns en asymmetrisk påverkan på utrymningstiden för en ändring av trappbredden och antalet trappor.

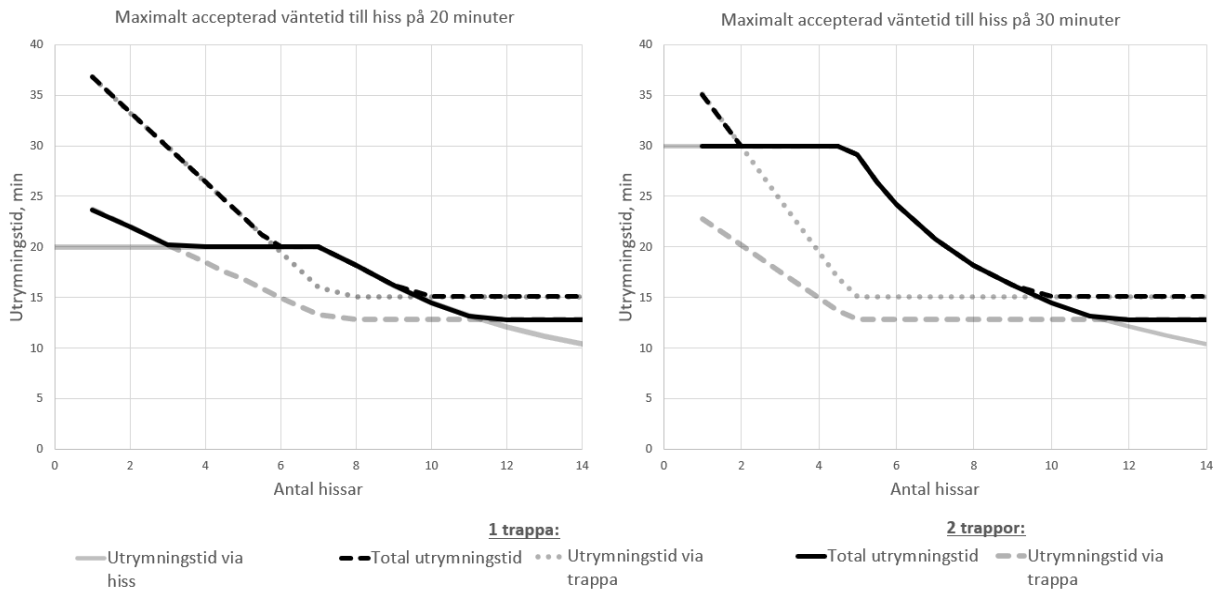


Figur 13 Känslighetsanalys av de variabler vilka ej tillskrevs sannolikhetsfördelningar i modellen. Samtliga variabler har justerats med +/- 25 % samt hur stor procentuell påverkan detta hade på den totala utrymningstiden (x-axeln). I figuren representerar mörkblått - 25 % och ljusblått + 25 %.

Utöver detta undersöktes även hur antalet hissar och trappor i referensfallet påverkade den totala utrymningstiden. Då det råder stora osäkerheter gällande den maximalt accepterade kötiden till hissarna jämförs referensfallet (30 minuter) med än ännu kortare accepterad kötid (20 minuter) i Figur 14 nedan.

I Figur 14 kan det ses att den totala utrymningstiden, enligt antaganden i kapitel 4 ovan, bestäms av den längsta utrymningstiden i hiss eller trappa. Till vänster i figurerna kan det ses hur den totala utrymningstiden, beroende på antalet trappor, avgörs av utrymningstiden via trapporna. Detta är fallet då när antalet hissar minskar, och väntetiden till hissarna överstiger den maximala, ökar antalet personer som byter från hiss till trappa linjärt. Ju färre trappor som finns ju längre blir utrymningstiden via trapporna, varvid denna effekt tar vid fortare. Till höger i figurerna kan det ses hur den totala utrymningstiden planar ut. Detta då det återigen är utrymningstiderna via trapporna som i stället är avgörande, vilka inte påverkas av ett ökande antal hissar eller ej. Skillnaden mellan den totala utrymningstiden beror då på om det finns en eller två trappor. Detta då kötiden in till trappan halveras om antalet trappor dubblas. Däremot påverkas inte den totala tiden det tar att gå från hisshallen till marknivå av antalet trappor.

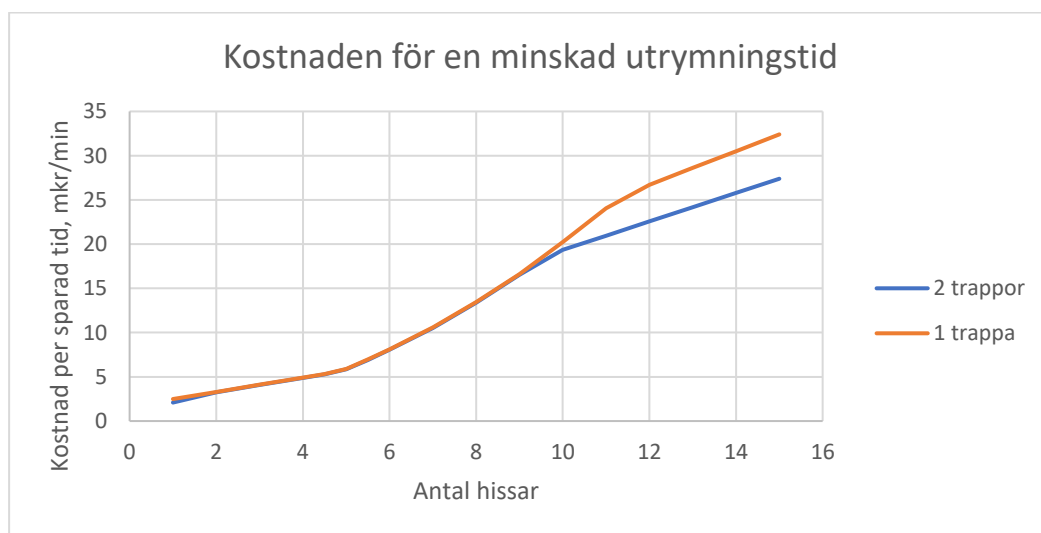
Total utrymningstid beroende på antal hissar och trappor



Figur 14 Hur antalet hissar, antalet trappor och den maximalt accepterade kötiden till hiss påverkar den totala utrymningstiden från station Sofia.

I Figur 14 ovan kan det ses hur den maximalt accepterade väntetiden påverkar den totala utrymningstiden. Med en längre accepterad väntetid blir effekten av en ökad väntetid på grund av för få hissar ännu större. Om personer inte är särskilt villiga att vänta på hissarna är antalet hissor inte lika avgörande för den totala utrymningstiden, utan istället avgör personflödet via trapporna.

Då hissarna är förknippade med stora kostnader är det även av intresse att undersöka kostnaden gentemot den totala utrymningstiden. Detta görs genom att beräkna en kvot mellan den totala utrymningstiden och den totala kostnaden där antalet hissor varierar. Jämförelsen görs för referensfallet station Sofia i Figur 15 nedan. Det kan ses att kostnaden per minut inledningsvis växer svagt, för att sedan övergå till en exponentiell tillväxt som slutligen ökar linjärt. Kostnaden skiljer sig beroende på om det finns en eller två trappor på slutet då den lägsta möjliga totala utrymningstiden avgörs av kötiden in till trapporna, se Figur 14 ovan.



Figur 15 Hur kostnaden för en sparad minut av utrymningstiden ökar med antalet hissor. Grafen visar kvoten mellan den totala kostnaden dividerat med den totala utrymningstiden.

7 Diskussion

Nedan diskuteras de källor som arbetet baseras på, modellen, antaganden som gjorts och allmänna diskussionspunkter som uppkommit under arbetets gång.

7.1 Källor

Inledningsvis utfördes en litteraturstudie för att hitta problemområden, relevanta variabler samt data för att konstruera modellen. Det erhöles information från flera olika typer av källor. Några källor var av äldre karaktär, där information valdes som fortfarande ansågs aktuell och relevant att tas med. En hel del av informationen som fanns grundade sig i försök utförda ovan mark i höghus eller där trapputrymning skedde i nedåtgående riktning. Dessa har använts till viss del men modifierats genom egna antaganden som motiverats för att passa till undermarksanläggningar med uppåtgående utrymning.

En del av den data som hittats har varit beroende av enkätundersökningar, vilka har tveksam validitet. Hur resultatet från dessa källor hade sett ut i fysiska försök, experiment eller i verkliga utrymningssituationer är svårt att veta. Generellt har personer svårt att uppskatta tid, vilket skulle kunna resultera i att man över- eller underskattar hur lång tid man i verkligheten skulle ha benägenhet att till exempel vänta i en utrymningssituation. Också det faktum att det kan vara svårt att veta när man fyller i en enkät hur man skulle reagera i en stressad situation, vilket ofta uppstår vid utrymning. På grund av dessa felkällor har resultat och slutsatser från enkätundersökningar generellt undvikts.

I de VR-försök som använts har deltagarna befunnit sig ensamma vid utrymningsscenarioet. Detta innebär att social påverkan inte tagits hänsyn till. Detta skulle kunna skilja sig en del från verkligheten där ett stort antal personer skulle utrymma samtidigt. Social påverkan skulle kunna inverka på valet av utrymningsväg på så vis att man ser hur andra gör och gör likadant. I modellen har detta förenklats på så vis att personer tenderar att ta samma utrymningsväg som de först tänkte sig. Undantaget är de som inledningsvis väljer att ta hiss, vilka har möjlighet att byta utrymningsväg om kötiden överstiger den maximalt accepterade kötiden. För dessa personer har det inkluderats möjligheten att byta utrymningsväg på grund av social påverkan. Men att påbörja trapputrymning för att ångra sig och gå ner för att ta en hiss istället tas ej hänsyn till. Andelen som är villiga att vänta på hissen kan kraftigt bero på om andra väntar eller ej. Om en stor grupp personer väljer bort hiss skulle detta kunna leda till att ännu fler personer väljer bort hiss. Det verkar därför sannolikt att antingen väldigt många väljer att vänta på hiss eller väldigt få, vilket är en av anledningarna till att Fall 3 med social påverkan utfördes.

I många av de experiment som utförts, oavsett om det är verkliga, VR eller enkäter, har det ofta varit studenter eller yngre vuxna som deltagit. Detta sker ofta naturligt av att flera av experimenten utförs via universitet. Däremot kan resultatens giltighet för allmänbefolkningen ifrågasättas, då studenternas fysik och kondition samt riskuppfattning sannolikt skiljer sig från äldre och personer med nedsatt rörelseförmåga. Det kan till exempel förväntas att en yngre grupp av försökspersoner i samband med tester av utrymning är mer vana vid utrymningsövningar (till följd av utrymning av skolor och lokaler som testas frekvent) än äldre. Därav kan de ta situationen på mindre allvar. I modellen har det tagits hänsyn till att en del av de sambanden som nyttjas, främst från försök, inte har en bred demografi. Däremot har en del förenklingar gjorts som avgränsning.

7.2 Modellen

I modellen antas det att vid utrymning från undermarksanläggningar kommer en stor andel personer kunna tänka sig välja hiss som utrymningsväg. Detta har ansetts rimligt utifrån att man vet att trapputrymning i uppåtgående riktning kräver en fysisk ansträngning, samt att det finns ett talat meddelande som uppger om att hissarna är utrymningshissar. Ett problem som uppstår för de utrymmande är att det inte framgår hur djupt man befinner sig på grund av avsaknaden av fönster. Detta kan leda till att personer underskattar den fysiska ansträngning som trapputrymning medför. Problemet blev tydligt i VR-försök av Mossberg et al. (2021) som visade att personer som inte fick information om djupet på station Sofia (cirka 100 meter) via informationsskyltar invid trapporna uppskattade djupet till 3-30 meter under mark, med ett medelvärde på 11 meter. Höghus skiljer sig på så vis att personer sannolikt nyttjat hissen för att ta sig upp och är därför medveten om vilken våning man befinner sig på från början vid en utrymning. Enligt resonemang i 4.3.1 medför detta att personer förväntas vara mer villiga att använda hissarna, då de nyttjade dessa som väg in. Personer som ankommer till en djup undermarksanläggning för första gången har inte nödvändigtvis tagit hissen ned, utan kan ha anlänt via tåg eller tunnelbana. Detta skulle kunna inverka negativt på deras villighet att välja hiss som utrymningsväg. I modellen antas antalet personer som aldrig använt hissarna i en djup undermarksanläggningen vara begränsad. Med hänsyn till de tekniska installationer som finns har det bedömts vara rimligt att en hög andel personer således är villiga att ta hissen.

Beroende på vart undermarksanläggningen är geografiskt placerad och verksamheterna i närområdet kan populationerna se väldigt annorlunda ut. Exempelvis kan närheten till en flygplats innebära att resenärer har med sig bagage vilket tar upp plats i hissarna. Närheten till skola eller förskola kan innebära att man behöver ta hänsyn till att det kommer finnas fler barn och ungdomar. Detta kommer påverka resultatet och är något som användare av modellen själva behöver ta hänsyn till.

Andelen rörelsehindrade i hisshallen baseras på data från nationella folkhälsoenkäter där uppskattningsvis cirka 11 % av befolkningen har nedsatt rörelseförmåga. Dessa data utgår från hela Sveriges befolkning under de senaste 15 åren. Det finns osäkerheter i hur stor andel av populationen som förväntas vistas i undermarksanläggningar som är rörelsehindrade. Således nyttjades nationell statistik för att konservativt ta höjd för möjligheten att det kan finnas stora andelar rörelsehindrade inom anläggningen. Andelen rörelsehindrade skulle kunna bero på vart undermarksanläggningen är placerad geografiskt i Sverige eller vilken typ av verksamhet som bedrivs i undermarksanläggningen.

I en utrymningssituation är kontrollen över situationen i form av kötid till hiss eller att fastna i hiss de största orosmomenten hos de utrymmande. Vid en utrymning hade de köande fått se personerna framför sig gå in i hissarna och åka upp, samtidigt som andra hissar är på väg ner. Att se flödet av personer röra sig och aktivt komma längre fram i kön skulle kunna bidra till att man har en högre motivation till att invänta hiss. Om personflödet istället är för lågt finns det risk att personer upplever det som poängglöst att vänta på hiss, och därmed byter till trappa istället. I modellen har det inkluderats en maximal kötid, vilken påverkas av personflödet. Men i modellen har det inte inkluderats till exempel hur andelen personer som är villiga att använda hiss beror på om kötiden

är 4 minuter eller 8 minuter. Denna villighet att vänta på hissarna undersöktes istället med hjälp av referensfallet och Fall 3.

Modellen ger förslag på indata kopplat till utrymning och anläggningarnas utformning. Det innehåller en del begränsningar då en del av dessa variabler är svåra att kvantifiera. Framför allt är kostnadsvariablerna svåra att ge exakta siffror på, och har därmed valts att presenteras med vida fördelningar. Detta utifrån att det kan variera mycket beroende på till exempel hissarnas utseende, design och funktioner. Kostnader för schakt för ventilation, el och VVS inkluderas inte i kostnaden för hissar. Endast direkta kostnader förknippade med hissarna har inkluderats.

För att hantera denna osäkerhet kan användare själva tillföra den indata som gäller exakt för dennes projekt. Till exempel kan användarna själv uppskatta och lägga till kostnader för förvaltning, drift och underhåll och livscykelkostnader beroende på deras anläggning och vilka hissar som väljs. En del av variablerna ges dock i ett format som användare kanske inte har tillgång till. Till exempel schaktkostnad, vilken anges i tkr/m³, där man kan tänka sig att man normalt får ett totalt belopp som förslag från entreprenören. Detta går dock att ange i modellen genom att själv beräkna priset i tkr/m³.

Den totala utrymningstiden via trapporna var främst beroende av stighastigheten i trapporna enligt känslighetsanalysen. Stighastigheten i trappor påverkas mycket av trappans utformning, antal trappsteg och vilplan. Utformningen av trappan i modellen har helt fått byggas på den data som varit tillgänglig. Här har dock källor från olika försök med olika trappor tagits, vilket i sig kan ge viss felmarginal vid sammanslagning. I litteraturen anges det att hastigheten i trappor har stor påverkan av tidigare nämnda faktorer. På grund av begränsad information har detta inte inkluderats i modellen.

Utöver tiden det tar att ta sig från hisshallen via trappor eller utrymningshissar tillkommer även tid för förflyttningen till hisshallen från vagn, plattform eller liknande. Troligtvis vore utrymningstiden något högre om tiden det tar att gå till hissarna vid den första hissesan även beaktades, men denna skillnad bedöms vara försumbar för större personantal och därmed längre utrymningstider.

Nyttjandegraden av hissarna är tänkt att beskriva hur det totala antalet personer kan minska då dessa fylls med till exempel rullstolar eller bagage. Notera att tiden för fyllning respektive tömning per person samt nyttjandegraden förutsätts vara negativt korrelerade. Detta innebär att det vid höga personantal i hissen är troligast med en kort total fyllningstid samt att det vid låga personantal i hissen är troligast med längre totala fyllningstider.

7.3 Allmänt

Uppmaning till att använda utrymningshissar är väsentligt för att få individer att bryta tidigare inlärd beteenden där de utrymmande aktivt undviker hissar vid brand. Detta kan dock skapa förvirring i att man i vissa byggnader och anläggningar får använda hissar vid utrymning och i andra inte. Det som anses avgörande här är att man får tydliga instruktioner att hissarna är säkra vid brand och att personerna är skyddade från brand och brandgaser i hisshallen och kan vänta där.

Enligt tidigare uppskattas att cirka 10 % av Sveriges befolkning har ett VO₂max under 21,5 mL/min/kg. Dessa hade troligtvis inte klarat av en stigning på 100 höjdmeter om de går i 75 % av deras VO₂max i 15 minuter enligt sambandet från Ronchi et al. (2015). I modellen uppskattades

att de långsammaste individerna, som ändå skulle klara av stigningen, skulle ha en stighastighet på cirka 0,12-0,20 m/s. De allra svagaste individerna med lägst VO_2 max förväntas gå som långsammast, alltså cirka 0,12 m/s. Givet att de jobbar på 75 % av sitt VO_2 max ger en stighastighet på 0,12 m/s en stigtid på strax under 14 minuter samt ett minimum VO_2 max på 22,5 mL/min/kg. Det verkar då rimligt att anta att dessa personer skulle klara av stigningen på 100 höjdmeter. Detta stämmer väl överens med den tröskel kring 21,5 mL/min/kg som identifierades ovan. Beroende på om stigtiden i trappan är lägre än 15 minuter kan hur stor andel personer som orkar gå upp till marknivå påverkas. Tar det istället längre tid är denna andel troligtvis lägre. Tidigare studier pekar på att en stor del av befolkningen hade klarat av stighöjder under 100 meter, men att denna andel börjar minska då djupet överstiger 100 meter.

I modellen har många antaganden och förenklingar gjorts. Syftet med modellen är att undersöka vilka variabler som främst påverkar utrymningshissars effektivitet som utrymningsväg från djupa undermarksanläggningar. För att resultatet från detta arbete ska vara giltigt är det därför kritiskt att samtliga ingående variabler som kan påverka resultatet har inkluderats. Vidare finns det antaganden gällande hur dessa variabler påverkar varandra och därmed resultatet. Utöver granskningar från experter inom området har inte modellen i dagsläget validerats med fullskaleförsök eller andra modeller. Således finns osäkerheter gällande huruvida modellen är tillräckligt realistisk för att kunna dra slutsatser eller ej. Eftersom modellen är en enklare sannolikhetsmodell över de utrymmandes beslutsprocess vid en utrymning från en djup undermarksanläggning kan denna ändras efter behov eller i samband med framtida forskning.

8 Slutsatser

Baserat på resultaten och diskussionen ovan kan ett antal slutsatser dras, och frågeställningarna angivna under 1.3 besvaras.

- *Personers villighet att ta utrymningshissarna är den faktor som främst avgör deras effektivitet.* Utrymningshissarnas effektivitet som utrymningsväg är kraftigt beroende på de utrymmandes villighet att nyttja dessa. Sannolikt hade fler personer varit villiga att använda hiss om kötiderna till dessa hålls korta, varvid personflödet via hissarna behöver vara högt. Resultatet visar att de faktorer som främst påverkar kötiden till hissarna är personkapaciteten, samt tiden det tar för personer att gå in och ut ur hissarna. I samband med framtida forskning och bättre kunskaper om andelen utrymnande som förväntas ta hiss som utrymningsväg kan modellen användas för att hitta ett lämpligt antal hissar för en djup undermarksanläggning.
- *Varje undermarksanläggning har ett optimalt antal hissar och trappor.* För att minimera utrymningstiden är en kombination av utrymningshissar och trappor lämplig enligt jämförelsen av fallen. Utrymningstiden minskar med ett ökande antal hissar, men effekten avtar när antalet hissar blir stort. Beroende på vilka kötider till hiss som accepteras samt social påverkan kommer fler utrymningshissar att ha en begränsad påverkan på den totala utrymningstiden. Om väldigt många personer tar trapporna är det istället personflödena via dessa som är avgörande för den totala utrymningstiden.
- *Möjligheten för självutrymning via utrymningshissar har en stor påverkan på antalet personer som når det fria.* Givet att personer är villiga att välja hissarna som utrymningsväg kommer nästan alla utrymnande nå marknivå. Även om personer inte alls är villiga att använda hissarna leder de till att antalet personer som inväntar hjälp minskar. Om personer inte är särskilt benägna att välja hiss, utan byter till trappa, kommer antalet personer som kommer behöva nyttja utrymningsvåningarna öka. Denna andel börjar öka från dess att djupet överstiger 100 meter beroende på människors fysiska förmåga att gå i trappor. Vice versa sjunker denna andel också kraftigt då djupet understiger 100 meter, då förväntas istället en hög andel av populationen klara av att utrymma hela vägen till marknivå.

Att dra slutsatser kring kostnaderna bör göras med försiktighet på grund av att information om kostnaderna var mycket begränsad. En slutsats som kan dras är att kostnadseffektiviteten för varje sparad minut på utrymningstiden ökar kraftigt ju fler hissar som installeras. Detta antyder att varje undermarksanläggning skulle kunna, ur utrymningssynpunkt, ha ett optimalt antal hissar.

Notera att modellen vid denna tidpunkt inte har validerats med andra modeller eller något fullskaleförsök, utan endast genom granskningar av experter och rimlighetskontroller.

9 Förslag på framtida studier

Detta arbete har varit ett försök till att både ge verktyg och förståelse för utrymningshissars utrymningseffektivitet i undermarksanläggningar. Det finns fortfarande ett behov av att fylla kunskapsluckor inom området då ämnet kan förväntas bli alltmer aktuellt i framtiden. Förslag på framtida studier och forskningsområden:

- *Tillämpning av modellen i höghus.* Modellen som tagits fram i arbetet utgår strikt från undermarksanläggningar där antaganden kring sannolikheter har modifierats för att utgå från just utrymning från under marknivå. En vidareutveckling av modellen för tillämpning av höghus hade varit kompletterande, och framför allt intressant. Att kunna se vilka skillnader som uppstår då en hög byggnad blir ännu högre eller lägre gentemot en byggnad belägen under mark som placeras högre eller lägre på olika djup. Detta skulle kräva ytterligare antaganden kring hur man tror folk agerar när utrymningsavståndet till säker plats blir längre och längre – oavsett om det sker under eller över marknivå. Framför allt krävs fler fysiska experiment och försök som komplement till tidigare studier i VR.
- *Social påverkan.* I studien har det beaktats att social påverkan kan ha effekt vid utrymning. Ett intressant framtida studieområde hade varit att faktiskt få en källa som kan styrka effekten, i vilken utsträckning detta kan ske och i vilket sammanhang den sociala påverkan har effekt. Exempelvis utifrån detta projekt om det inverkar på att personer byter från hiss till trappa eller att man i grupp har desto högre tålamod att invänta hissar i jämförelse av att vänta själv.
- *Försök med väntetid, fyllningstid, tömningstid och nyttjandegrad.* Ett problem som uppstod vid konstruerandet av modellen är begränsade antal studier eller försök för nämnda variabler. Fyllningstid och tömningstid fann man enstaka försök på, men hade behövt utvecklas för att kunna dra ytterligare slutsatser. Ett förslag till framtida studie är att undersöka alla dessa variabler. Framför allt uppmuntras till försök av väntetid i grupp, då det ofta förekommer försök av utrymning där man oftast befinner sig själv.
- *Jämförelser av utrymning via rulltrappor eller utrymningshissar.* Flera undermarksanläggningar som inte ligger på för stora djup nyttjar rulltrappor som vertikal transportlösning. Det vore intressant att undersöka när utrymningshissar utgör ett mer attraktivt val av utrymningsväg gentemot rulltrappor. Detta med hänsyn till kostnader, total utrymningstid och personer som når det fria - men även vid vilka djup, personantal etcetera. Detta skulle kunna visa huruvida utrymningshissar har ett bredare användningsområde än för endast djupa undermarksanläggningar.

Referenser

- About ScienceDirect. (2021, 10 18). Retrieved from ScienceDirect:
<https://www.elsevier.com/about>
- Aleksandrov, M., Rajabifard, A., Kalantari, M., Lovreglio, R., & González, V. C. (2018). People Choice Modelling for Evacuation of Tall Buildings. *Fire Technology*, Volume 54, 1171-1193.
- Altandk. (2021, Oktober 26). Retrieved from <https://www.altandk.se/artikler/vad-kostar-en-hiss-fraan-altan-dk-las-mer-om-priset-paa-hissar-har/>
- Andersson, J., & Jönsson, A. (2011). Utrymning av höga byggnader - En analys av riskperception. Lunds Universitet, Brandteknik och Riskhantering.
- Andrée, K., Jönsson, A., Bengtson, S., & Frantzich, H. (2015). Utformning av utrymningsplats, Rapportnummer 3190. Lund: Lunds tekniska högskola, Institutionen för bygg- och miljöteknologi, Avdelningen för brandteknik.
- Andrée, K., Nilsson, D., & Eriksson, J. (2016). Evacuation experiments in a virtual reality high-rise building: exit choice and waiting time for evacuation elevators. . *Fire and Materials*, Volume 40 (4), 554-567.
- Arias, S., Mossberg, A., Nilsson, D., & Wahlqvist, J. (2021). A Study on Evacuation Behavior in Physical and Virtual Reality Experiments . *Fire Technology*.
- Boverket. (2011). Boverkets allmänna råd (2011:27) om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd.
- Boverket. (2011). Konsekvensutredning - för revidering (BFS 2011:26) av avsnitt 5 Brandskydd i Boverkets byggregler, BBR (BFS 2011:6).
- Boyce, K. (2017). Safe evacuation for all - Fact or Fantasy? Past experiences, current understanding and future challenges . *Fire Safety Journal*, Volume 91, 28-40.
- Bukowski, R., & Jensen, R. (2012). Addressing the Needs of of People Using Elevators for Emergency Evacuation. *Fire Technology*, 48, 127-136.
- Canter, D., Breaux, J., & Sime, J. (1980). Domestic, Multiple Occupancy, and Hospital Fires. In D. Canter, *Fires and Human Behaviour* (pp. 117-136). John Wiley & Sons Ltd.
- Carmody, J., Huet, O., & Sterling, R. (1994). Life Safety in Large Underground Buildings. *Tunneling and Underground Space Technology*, 9(1), 12-29.
- Chen, X., Ye, J., & Jian, N. (2010, December). Relationships and Characteristics of Pedestrian Traffic Flow in Confined Passageways. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2198, pp. 32-40.
- Ding, N., Chen, T., & Zhang, H. (2017). Experimental Study of Elevator Loading and Unloading Time During Evacuation in High-Rise Buildings. *Fire Technology*, Vol 53, 29-42.

- Ekblom-Bak, E., Ekblom, Ö., Andersson, G., Wallin, P., Söderling, J., Hemmingsson, E., & Ekblom, B. (2018). Decline in cardiorespiratory fitness in the Swedish working force between 1995 and 2017. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Vol 29(2), 232-239.
- Engstrand, A., & Näslund, J. (2014). *Utrymning med hiss från tunnelbanestationer under mark*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.
- Folkhälsomyndigheten. (2021, December 1). Nationella folkhälsoenkäten, nationella och regionala resultat. Retrieved from http://fohm-app.folkhalsomyndigheten.se/Folkhalsodata/pxweb/sv/B_HLV/
- Frantzich, H. (1992). *Utrymningsvägars fysiska kapacitet. Sammanställning och utvärdering av kunskapsläget*. Avdelningen för Brandteknik, Lunds Universitet.
- Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2013). Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: A Review of Accidents and Empirical Research . *Fire Technology*, Volume 49, 451-475.
- Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2016). Evacuation of a Metro Train in an Underground Rail Transportation System: Flow Rate Capacity of Train Exits, Tunnel Walking Speeds and Exit Choice . *Fire Technology*, Volume 52, 1481-1518.
- Fridolf, K., Norén, J., & Delin, M. (2014). Undermarksanläggningar utmaning för både brandskyddsprojektörer och utrymmande människor. *Bygg & teknik* 6(14), 36-41.
- Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*, Ch 8 - The theory of affordances. Boston: Houghton Mifflin Company.
- Haghani, M., & Sarvi, M. (2016). Human exit choice in crowded built environments: Investigating underlying behavioural differences between normal egress and emergency evacuations . *Fire Safety Journal*, Volume 85, 1-9.
- Hartson, R. H. (2003). Cognitive, Physical, Sensory, and Functional Affordances in Interaction Design. *Behaviour and Information Technology*, Vol 22(5), 315-338.
- Heyes, E., & Spearpoint, M. (2012). Lifts for evacuation - Human behaviour considerations. *Fire and Materials*, Volume 36 (4), 297-308.
- Kindblom, P. (2018). *Utrymningshissar*. Statens fastighetsverk.
- Kinsey, M. (2011). *Vertical Transport Evacuation Modelling*. University of Greenwich. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/234033221_Vertical_Transport_Evacuation_Modelling
- Kinsey, M. J., Galea, E. R., & Lawrence, P. J. (2012). Human Factors Associated with the Selection of Lifts/Elevators or Stairs in Emergency and Normal Usage Conditions. *Fire Technology*, Volume 48 (1), 3-26.
- Kletz, T. (2001). *Learning from accidents* (3 ed.). Elsevier Ltd.

- Klote, J., Deal, S., Levin, B., Groner, N., & Donoghue, E. (1993). Workshop on Elevator Use During Fires. National Institute of Standards and Technology.
- Koo, J., Kim, Y. S., Kim, B., & Christensen, K. M. (2013). A comparative study of evacuation strategies for people with disabilities in high-rise building evacuation . *Expert Systems with Applications*, Volume 40(2), 408-417.
- Lam, J. H., Yuen, J. K., Lee, E. W., & Lee, R. Y. (2014). Experimental study on upward movement in a high-rise building. *Safety Science*, Vol. 70, 397-405.
- Latané, B., & Darley, J. M. (1968). Bystander intervention in emergencies: diffusion of responsibility. *Journal of Personality and Social Psychology*, Volume 8(4), 377-383.
- Liao, Y. J., Lo, S. M., Liu, S. B., & Liao, G. X. (2014). A Study on People's Attitude to the Use of Elevators for Fire Escape. *Fire Technology*, Volume 50, 363-378.
- Lovreglio, R., Fonzone, A., & dell'Olio, L. (2016). A mixed logit model for predicting exit choice during building evacuations . *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 92, 59-75.
- LUBsearch & Electronic Resources. (2021, 10 18). Retrieved from Lund University Libraries: <https://libguides.lub.lu.se/lubsearchandelectronicresources/lubsearch>
- Mossberg, A., & Nilsson, D. (2018). Användande av utrymningshissar vid utrymning av tunnelbanestation, BSL 2018:02. Brandskyddslaget.
- Mossberg, A., Nilsson, D., & Wahlqvist, J. (2021). Evacuation elevators in an underground metro station: A Virtual Reality evacuation experiment . *Fire Safety Journal*, Volume 120.
- Palisade Risk Analysis. (2021, 12 01). Retrieved from Palisade: https://www.palisade.com/risk/risk_analysis.asp
- Papakonstantinou, D., Benardos, A., Kallianiotis, A., & Menegaki, M. (2016). Analysis of the crowd evacuation modeling approaches for the case. *Procedia Engineering*, 165, 602-609.
- Pauls, J. L. (1983). Effective-Width Model for Evacuation Flow in Buildings. *Proceedings of Engineering Applications Workshop*, Bethesda, MD (pp. 215-232). Boston: Society of Fire Protection Engineers.
- Pauls, J. L., Fruin, J. J., & Zupan, J. M. (2005). Minimum Stair Width for Evacuation, Overtaking Movement and Counterflow - Technical Bases and Suggestions for the Past, Present and Future. *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 57-69.
- Philpot, R., & Levine, M. (2021). Evacuation Behaviour in a Subway Train Emergency: A Video-based Analysis . *Environment and Behavior*.
- Psykologilexikon. (2021, 11 22). Retrieved from Psykologiguiden: <https://www.psykologiguiden.se/psykologilexikon/?Lookup=social+p%C3%A5verkan>
- Region Stockholm. (2021, Oktober 21). Nya tunnelbanan. Retrieved from <https://nyatunnelbanan.se/tilldelade-kontrakt/>

- Region Stockholm, Förvaltning för utbyggd tunnelbana. (2021, November 4). Retrieved from <https://nyatunnelbanan.se/sv/faq-djupa-stationer>
- Rohlén, P., & Wahlström, B. (1996). Tunnelbaneolyckan i Baku, Azerbajjan . Statens räddningsverk.
- Ronchi, E., Norén, J., Delin, M., Kuklane, K., Halder, A., Arias, S., & Fridolf, K. (2015). Ascending evacuation in long stairways: Physical exertion, walking speed and behaviour. (TVBB-3192; Vol. 3192). Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Ronchi, E., Reneke, P., & Peacock, R. (2016). A conceptual fatigue-motivation model to represent pedestrian movement during stair evacuation. *Applied Mathematical Modelling*, 40, 4380–4396.
- Sano, T., Ronchi, E., Minegishi, Y., & Nilsson, D. (2018). Modelling pedestrian merging in stair evacuation in multi-purpose buildings. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 85, 80-94.
- Seer, S., Bauer, D., Brändle, N., & Ray, M. (2008). Estimating Pedestrian Movement Characteristics for Crowd Control at Public Transport Facilities. Conference on Intelligent Transportation Systems, 11th International IEEE. Beijing, China.
- Shields, T. J., Boyce, K. E., & McConnell, N. (2009). The behaviour and evacuation experiences of WTC 9/11 evacuees with self-designated mobility impairments . *Fire Safety Journal*, Volume 44(6), 881-893.
- Shiwakoti, N., Tay, R., Stasinopoulos, P., & Woolley, P. J. (2017). Likely behaviours of passengers under emergency evacuation in train station. *Safety Science*, Volume 91, 40-48.
- Siikonen, M.-L., & Sorsa, J. (2011). Elevator Evacuation Algorithms . KONE Corporation.
- Sime, J. (1985). Movement toward the Familiar - Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting. *Environment and Behaviour*, Volume 17(6), 697-724.
- Song, X., Z, Z., Peng, G., & Shi, G. (2017). Effect of authority figures for pedestrian evacuation at metro stations . *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 465, 599-612.
- South Korea Daegu Subway Station – Arson. (2021, 09 29). Retrieved from Railssystem: <http://www.railsystem.net/south-korea-daegu-subway-station-arson/>
- Stockholms läns landsting. (2018). Miljökonsekvensbeskrivning av anläggningsoptimeringar, Dnr FUT 2016-0026.
- Stockholms läns landsting. (2021, Oktober 26). Entreprenadindelning nya tunnelbanan. Retrieved from https://www.nyatunnelbanan.sll.se/sites/tunnelbanan/files/Entreprenad_SV_O.pdf

- Transportstyrelsen. (2017). Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om personsäkerhet i tunnlår och plattformsråm för tunnelbana och spårvåg - TSFS 2017:119 med ändringar t.o.m. TSFS 2018:10.
- van der Wal, C. N., Robinson, M. A., Bruine de Bruin, W., & Gwynne, S. (2021). Evacuation behaviors and emergency communications: An analysis of real-world incident videos . *Safety Science*, Volume 136.
- Vergheze, J., Levalley, A., B. Hall, C., J. Katz, M., F. Ambrose, A., & B. Lipton, R. (2006). *Epidemiology of Gait Disorders in Community - Residing Older Adults*. 54, pp. 255-261.
- worldatlas. (2021, December 15). Retrieved from <https://www.worldatlas.com/articles/deepest-metro-stations-in-the-world.html>
- Zhou, M., Dong, H., Zhao, Y., Y, Z., & Ioannou, P. A. (2018). Optimal number and location planning of evacuation leader in subway stations . *IFAC PapersOnLine*, Volume 51(9), 410-415.

Bilaga A

Sökprotokoll

Datum: 2021-09-08
Ämne: Är utrymningshissar effektiva i djupa undermarksanläggningar?
Databaser: LUBsearch, ScienceDirect
Sökstrategi, sökord: elevator, lift, evacuat*, egress, escape, “human behavio*”, “exit choice*”, preference*, strateg*, occupant evacuation elevator (OEE), disab*, “refuge point”, “refuge area”, model*, simulat*, “cost-benefit analysis”, “cost benefit analysis”, cost, benefit, “cost effective*”, underground, tunnel*, subway, metro, tube, escalator, stairs

Databas: LUBsearch

Sökning:	Sökstrategi, sökord:	Antal träffar:	Relevanta träffar:
1	(elevator OR lift) AND evacuat*	3,381	
2	Search #1 AND model*	208	
3a	Search #2 AND (underground OR subway OR tram OR tube)	12	2
3b	(elevator OR lift) AND (underground OR subway OR tram OR tube) AND model*	997	0
3c	Search #3b AND simulat*	378	0
4	Egress	22 691	
5	Egress AND (elevator OR lift)	153	4
6a	Escape AND (elevator OR lift)	1565	
6b	Search #6a AND evacuat*	48	6
7	“human behavio*” AND (elevator OR lift)	447	
8	Search #7 AND evacuat*	22	10
9a	“exit choice*” AND (underground OR subway OR tram OR tube)	11	3
9b	(underground OR subway OR tram OR tube) AND evacuat*	11,189	
9c	Search #9b AND escalator	11	4

9d	Search #9b AND disab*	17	3
10	Search #8 AND (elevator OR lift)	6	3
11	occupant evacuation elevator	100	5
12	Disab*	2,180,050	
13	Search #12 AND (elevator OR lift)	784	
14	Search #13 AND evac*	28	
15a	Search #13 AND model*	35	
15b	Search #15a AND evacuat*	10	3
16	Stairs AND modelling	415	1
17	Search #16 AND evac*	94	4
18a	"cost-benefit analysis"	225,676	
18b	"cost benefit analysis"	423,229	
18c	Search #18b Field: Title	22,176	
18d	Search #18c Peer Reviewed	16,589	
18e	Search #18d 2000-2021	12,398	
18f	Search #18e AND method AND building	112	3
18g	Search #18e AND method AND (underground OR subway OR metro OR tube)	7	0
18X	Search #18e Books	54	0
19	Search #18a AND elevator	26	3
20	cost AND benefit	913,904	
21	Search #20 AND (elevator OR lift)	173	
22	Search #21 AND analysis	69	
23	Search #22 AND evacuat*	1	0

Databas: ScienceDirect

Sökning:	Sökstrategi, sökord:	Antal träffar:	Relevanta träffar:
1x	(elevator OR lift) AND evacuat	23	2
1a	(elevator OR lift) AND evacuation	16 481	
1b	Search #1a AND (underground OR subway OR tram)	1592	
1c	Search #1b AND disability	158	3
2	(elevator OR lift) AND egress	2532	
3	Search #2 AND underground	351	9
4a	Escape AND evacuat AND (elevator OR lift)	3 865	
4b	Search #4a AND (underground OR subway OR tram)	721	
4c	Search #4b AND escalator	86	1
5a	“human behaviour” AND (elevator OR lift) AND evacuat	385	
5b	Search #5a AND (underground OR subway OR tram)	137	
6	"exit choice" AND (underground OR subway OR tram OR tube)	83	11
7a	evacuat AND (underground OR subway OR tram) AND escalator	2	1
7b	evacuation AND (underground OR subway OR tram) AND escalator	288	2
8	Occupant evacuation elevator	428	
9	Search #8 AND disability	113	1
10	Disability AND evacuation	8 593	
11	Search #10 AND (elevator OR lift)	1 286	
12	“Refuge point”	16	0
13	“refuge area”	1484	
14	Search #13 AND evacuation	121	2
15	“cost benefit analysis”	48 322	

16	Search #15 AND (elevator OR lift)	2 374	
17	Search #16 AND evacuation	240	
18	Search #17 AND (underground OR subway OR tram)	91	
19	cost AND benefit AND (elevator OR lift)	63 847	
20	Search #19 AND evacuation	3 788	
21	Search #20 AND (underground OR subway OR tram)	690	

Bilaga B

Ingående variabler för samtliga fall

Variabler	Referensfall	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Enhet
Djup på hisshallen	100	100	100	100	<i>m</i>
Antal personer i hisshallen	2400	2400	2400	2400	<i>pers</i>
Andel rörelsehindrade i hisshallen	0,095	0,095	0,095	0,095	%
Hissutrymning					
Antal hissar	8	8	-	8	
Hisskapacitet	32	32	-	32	<i>pers</i>
Hiss hastighet	4	4	-	4	<i>m/s</i>
Nyttjandegrad av hiss	0,80	0,8	-	0,8	%
Andel som först kan tänka sig välja hiss	0,93	-	-	0,93	%
Andel som byter till trappa pga. social påverkan	0,1	-	-	0,9	%
Hissdörr öppningstid	1,20	1,20	-	1,20	<i>s</i>
Hissdörr stängningstid	3	3	-	3	<i>s</i>
Förväntat antal personer i hiss	25,6	25,6	-	25,6	<i>pers</i>
Tid för hissfyllning per person	1,1	-	-	1,1	<i>s</i>
Tid för hisstömning per person	0,9	-	-	0,9	<i>s</i>
Restid för hiss	110,6	110,6	-	110,6	<i>s</i>
Andel som kan tänka sig ta hiss	0,84	1	-	0,17	%
Flöde från hissar	1,6	1,85	-	0,69	<i>pers/s</i>
Maximalt accepterad kötid	20	-	-	30	<i>min</i>
Antal personer som kan ta hissen inom den maximalt accepterade kötiden	1943,9	-	-	411,8	<i>pers</i>

Antal personer som byter från hiss till trappa på grund av lång kötid	75,2	-	-	0,0	<i>pers</i>
Trapputrymning					
Antal trappor	2	-	2	2	
Trappbredd	2	-	2	2	<i>m</i>
Antal trapphus	1	-	1	1	
Andel som väljer trappa	0,15	-	0,91	0,82	<i>%</i>
Persontäthet i trappa	1,75	-	1,75	1,75	<i>pers/m²</i>
Gånghastighet i trappa	0,45	-	0,45	0,45	<i>m/s</i>
Specifikt flöde pga persontäthet	0,79	-	0,79	0,79	<i>pers/(m·s)</i>
Flöde i trapphus	2,68	-	2,68	2,68	<i>pers/s</i>
Kötid för trappa	164	-	811	736	<i>s</i>
Stighastighet i trappa	0,16	-	0,16	0,16	<i>m/s</i>
Total tid att gå upp från hisshall till markplan	634,9	-	634,9	634,9	<i>s</i>
Invänta räddningstjänst					
Andel personer som nyttjar utrymningsplats	0,0071	-	0,095	0,0071	<i>%</i>
Andel i trappan som behöver utrymningsvåning	0,125	-	0,175	0,125	<i>%</i>
Kostnader					
Kostnad per hiss	7200	7200	-	7200	<i>tkr</i>
Kostnad per trappa	833	-	833	833	<i>tkr/våning</i>
Kostnad per UV	40	-	40	40	<i>tkr</i>
Schaktkostnad per m ³	11,4	11,4	11,4	11,4	<i>tkr/m³</i>
Area på hisschakt	15	15	-	15	<i>m²</i>
Area på trappschakt	42	-	42	42	<i>m²</i>

Bilaga C

Beräknade variabler för samtliga fall

Variabler	Referensfall	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Enhet
Utrymning					
Total utrymningstid, hiss	20,0	21,6	-	9,9	<i>min</i>
Total utrymningstid, trappa	15,9	-	-	22,9	<i>min</i>
Total utrymningstid	20,0	-	24,1	22,9	<i>min</i>
Antal personer i utrymningsplatser	17,1	21,6	228,0	17,1	<i>pers</i>
Antal personer i utrymningsvåning	106,9	-	380,1	246,4	<i>pers</i>
Antal personer som inväntar räddningstjänsten	124,0	-	608,1	263,5	<i>pers</i>
Kostnad					
Total kostnad för hissar	133,65			72,9	<i>mkr</i>
Total kostnad för trappor	49,5			49,5	<i>mkr</i>
Total kostnad för utrymningsvåningar	0,7			0,7	<i>mkr</i>
Total kostnad	183,9			123,2	<i>mkr</i>