

Utrymning av folkmassor

– simulering och verklighet

Daniel Haarala

Mattias Hagelin

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Report 5138, Lund 2005

Utrymning av folkmassor

– simulering och verklighet

Daniel Haarala & Mattias Hagelin

Lund 2005

Utrymning av folkmassor – simulering och verklighet

Crowd Evacuation – Modeling and Reality

Daniel Haarala & Mattias Hagelin

Report 5138

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--5138--SE

Number of pages: 87

Illustrations: Daniel Haarala & Mattias Hagelin

Keywords

Crowd evacuation, computer based evacuation model, Simulex, Steps, Persias.

Sökord

Utrymningssimulering, folkmassor, Simulex, Steps, Persias,

Abstract

The report contains a comparison between computer based modeling of evacuation and evacuation experiments with large crowds. Crowd movement, behavior and management is examined, as well as the evacuation time. The conclusions in this report are based on observations made during the evacuation of a football ground (Swedish).

Författarna svarar för innehållet i rapporten.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2005.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

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

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

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

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

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

Summary

Computer based modeling of the evacuation time is often used in safety dimensioning of buildings. These models seems to be able to describe the evacuation process quite accurately, but when simulating a high number of persons and high person density – crowds – the congruence between simulations and reality can be questioned. In this report, the conditions regarding crowd evacuation and the dimensioning methods are analyzed and the correlation between different calculation methods and reality is evaluated.

The main methodology has been a comparative analysis between observations of crowd movements and simulations of the same course of events by using the evacuation models Simulex and Steps. The observations have been conducted after three games in the Swedish football Premier Division -“Allsvenskan”. Evacuation time, walking velocities, inter – person distances, crowd density and flow rates through exits have been examined with the video analysis model Persias. As the observations have been conducted during football games, the study have been concentrated on describing crowd evacuation and management, the dimensioning of sports grounds (in Sweden and Great Britain), evacuation strategy and safety organization. The examination of these areas is based on literature studies.

The analysis indicates that the model Steps shows good correspondence with reality, but a word of warning should be said about the discovered grid paradox which reveals great differences when the grid size is changed, as discussed in the report. Simulex tends to over predict the evacuation time vastly. The models have advantages and disadvantages and they are discussed in the report. Conducted manual calculations show that this method is quite useful. It should be taken into consideration that the configuration of the exits, the high density and number of people must be similar to the one that this study is based upon if the results are to be applied.

Sammanfattning

Vid utrymningsdimensionering används ofta datormodeller för att beräkna utrymningstiden. Dessa ter sig kunna beskriva ett utrymningsförlopp ganska väl, men vid simuleringar med högt personantal och hög persontäthet – folkmassor – råder oklarheter om deras överensstämmelse med verkligheten. I denna rapport analyseras de förhållanden som råder vid utrymning av folkmassor, de dimensioneringsmetoder som används och hur väl olika beräkningsmetoder klarar att återge evakueringstiden korrekt.

Den huvudsakliga arbetsmetoden har varit en jämförande analys mellan fältmätningar - observationer då en avsevärd folkmassa förflyttar sig - och simuleringar av detta förlopp i utrymningsmodellerna Simulex och Steps. Fältmätningarna har utförts på Malmö stadion efter tre matcher i fotbollsallsvenskan. Vid dessa har utrymningstid, gånghastigheter, avstånd mellan personer, persontäthet och personflöde genom dörr undersökts med hjälp av videoanalysprogrammet Persias. Då fältmätningarna utförts i samband med fotbollsmatcher har särskild vikt lagts vid att beskriva läktarutrymning, utrymningsdimensionering av läktare (i Sverige och Storbritannien), evakueringsstrategi och säkerhetsorganisation. Denna beskrivning baseras på litteraturstudier.

Analysen indikerar att beräkningsmodellen Steps visar god överensstämmelse med verkligheten, men ett varningens finger bör lyftas angående den i rapporten diskuterade *gridparadoxen* som innebär att ändringar i modellens rutnätsystem kan ge upphov till monumentala förändringar av resultatet. Simulex å andra sidan tenderar att överskatta utrymningstiden rejält. Det finns för- och nackdelar med de båda modellerna och dessa analyseras i rapporten. Utförda handberäkningar tyder på att det är ett tillvägagångssätt som går att använda sig av. Det bör dock beaktas att utgångarnas placering, persontätheten och personantalet skall vara snarlika den i försöksuppställningen för att slutsatserna från rapporten skall kunna tillämpas.

Innehållsförteckning

Förord.....	1
1 Inledning.....	3
1.2 Syfte	4
1.3 Målsättning	5
1.4 Metodbeskrivning.....	5
1.5 Begränsningar	6
2 Teori	7
2.1 Utrymning – grundläggande begrepp.....	7
2.2 Utrymningsdimensionering	15
2.3 Exempel på evakueringsplan på idrottsarena	21
3 Datormodeller	25
3.1 Simulex.....	25
3.2 Steps.....	32
3.3 Persias.....	38
4 Metod	41
4.1 Fältmätningar	41
4.2 Simuleringar	46
4.3 Handberäkningsmetod	54
5 Analys	55
5.1 Fältmätningar – utrymningstider	55
5.2 Fältmätningar – videoanalys.....	56
5.3 Simuleringar – resultat	66
5.4 Handberäkningar - resultat	74
5.5 Visuella observationer	74
6 Diskussion.....	77
6.1 Felkällor.....	77
6.2 Handhavande av simuleringsmodellerna	79
7 Slutsatser	81
7.1 Jämförelse mellan de utvärderade modellerna.....	81
7.2 Dimensioneringsmetoder – tillämpning av analysen.....	83
7.3 Fortsatta studier	84
8 Referenslista	85
9 Appendix.....	89
Appendix A - Personflödesberäkningar.....	89
Appendix B - Känslighetsanalyser	90
Appendix C – Handberäkningar	93

Förord

Denna rapport är framtagen inom ramen för kursen Brandtekniskt projektarbete. Kursen omfattar 10 poäng och ges av avdelningen för Brandteknik vid Lunds tekniska högskola. Enligt kursmålet skall studenterna visa förmågan att tillämpa de kunskaper och färdigheter som förvärvats under utbildningen till brandingenjör och självständigt analysera och redovisa en omfattande uppgift på ett vetenskapligt metodiskt sätt. Projektarbetet avslutar utbildningen till Brandingenjör.

Under arbetet har ett antal personer varit behjälpliga. Mot dessa vill undertecknade rikta ett särskilt tack:

- Håkan Frantzich, Universitetslektor, Brandteknik, för handledning.
- Peter Thompson, Programutvecklare, Simulex, för engagerad hjälp med programförståelse och idéuppslag.
- Marcus Andersson, Brandingenjör och svensk representant för Steps, för utlåning av Steps och hjälp med programförståelse.
- Henrik Bergqvist, Säkerhetsansvarig, Malmö FF, för hjälp vid fältmätningar och insikt om evakueringsstrategi och säkerhetsorganisation.
- Per-Erik Isberg, Universitetsadjunkt, Statistiska institutionen vid Lunds Universitet för statistisk vägledning.
- Johan Cedervall, Vaktmästarbiträde, för hjälp med implementering av ritningar.
- Johan Wickenberg, Brandingenjör, för korrekturläsning.
- Tomas Carlén med familj, för hjälp vid fältmätning och en underbar middag.
- Daniel Nilsson, Doktorand, Brandteknik för hjälp med konvertering av videoinspelningar.
- Anders Lind för generös utlåning av sin kajak under teambuildingvecka i Sarek.

Daniel Haarala och Mattias Hagelin

Lund, 2004-12-17

1 Inledning

Inledningskapitlet skildrar övergripande den nuvarande situationen vid utrymning av folkmassor och de problem som finns på ämnesområdet. Vidare beskrivs de frågeställningar som rapporten har för avsikt att svara på och den metod som används för att angripa problemställningarna.

1.1 Bakgrund

Utrymning av folkmassor i samband med till exempel läktarolyckor är ett forskningsområde som är eftersatt i Sverige. Detta härrör möjligen från de uppenbara problem som det innebär att utföra fullskaleförsök med så stora personantal samt den tacknämliga frånvaron av inträffade incidenter. Även om situationer med utrymning av många personer är en sällsynt företeelse så är det uppenbart att det är viktigt att man vid utrymningsprojekteringen har god kunskap om de speciella omständigheter som inträffar då väldigt många personer ska evakuera samtidigt. Detta särskilt med tanke på de förödande konsekvenser en misslyckad utrymning skulle kunna få vid till exempel en läktarbrand.

Idag används huvudsakligen två metoder vid projekteringen av utrymnings säkerheten i byggnader; förenklad dimensionering och dimensionering genom beräkning. Den senare av dessa grundar sig på att jämföra tiden som det tar innan ett brandtillbud orsakar farliga omständigheter för personerna i byggnaden med utrymningstiden. Detta utförs vanligtvis genom datorstödd simulering av troliga brandförlopp i den aktuella byggnaden och simuleringar av utrymningen. Det finns ett flertal datorbaserade utrymningsmodeller som med olika metoder beskriver evakueringen av en byggnad genom att till exempel redovisa den totala utrymningstiden och ge en grafisk animation av utrymningsförloppet. Dessa modeller har vid försök visat sig överensstämma ganska väl med en verklig utrymningsituation (*Levein, 2000*).

Vid utrymningssimulering av stora lokaler med många personer finns det dock skäl att ifrågasätta resultaten. Det saknas nämligen underlag som utröner hur väl utrymningsmodellerna klarar att beskriva komplicerade situationer som till exempel omfattande köbildning och extremt hög persontäthet. Det förefaller som att breda dörrar inte påverkar resultatet i den utsträckning man tidigare antagit. En faktor som tycks ha större betydelse är utformningen av omgivningen i anslutning till utgången.

Eftersom datorbaserade utrymningsmodeller används vid dimensionering av nya anläggningar är det av stor vikt att känna till begränsningarna hos modellerna och hur väl de klarar av att beskriva en utrymningssituation. Huvudfrågeställningen i denna rapport är följaktligen om datormodeller skildrar evakueringsförloppet av en stor folkmassa på ett riktigt sätt. Här belyses främst den totala utrymningstiden, men jämförelser görs även mellan utrymningsmodellernas grafiska framställning av evakueringsförloppet och en verklig utrymningssituation. Det är även möjligt att utföra handberäkningar för att bedöma utrymningstiden och därför undersöks även denna metod.

Resultatet av en utrymningssimulering är i hög grad beroende av de indataparametrar som datormodellerna baseras på. Den andra frågeställningen blir följaktligen hur indata bör behandlas vid simulering av stora folkmassor.

För att få en bakgrundsförståelse för den situation som råder inom ämnesområdet ”utrymning av folkmassor” idag undersöks de faktorer som påverkar utrymning i allmänhet och utrymning av folkmassor i synnerhet. Den avslutande frågeställningen är hur utrymningsdimensionering utförs och vilken strategin är vid hantering av stora folkmassor.

1.2 Syfte

Studien avser att jämföra beräknade förflyttningar med visuella observationer av en plats där ett stort antal personer är i rörelse. Syftet är att ge en uppfattning om hur väl två olika beräkningsprogram klarar av att beskriva utrymningsförlopp med stora personantal. Sätillvida överrensstämelsen är bristfällig skall riktlinjer ges för hur modellerna skall användas för att förbättra slutresultaten.

För att få insikt i de problem som är kopplade till ämnesområdet görs en övergripande sammanställning av befintlig kunskap om hur stora folkmassor beter sig i utrymningssituationer och de viktigaste faktorerna som påverkar evakueringsförloppet. Eftersom de genomförda försöken koncentrerats på läktarutrymning syftar rapporten till att allmänt redogöra för hur utrymningsdimensionering av läktare genomförs i Sverige och internationellt, samt hur begreppet ”crowd management” hanteras.

1.3 Målsättning

Denna studie ämnar svara på frågan om de i Sverige mest använda utrymningsmodellerna Simulex och Steps klarar av att beskriva utrymningen av stora personantal på ett korrekt sätt och vid behov ge råd om hur programmen bör användas för att få ett slutresultat som bättre överrensstämmer med verkligheten.

Då fältmätningarna i detta arbete baserar sig på studier av utrymningsituationer på en arena i samband med sportevenemang är det naturligt att resultatet företrädesvis bör tillämpas vid dimensionering och analyser av anläggningar av motsvarande typ med liknande åskådarkonfiguration. Förhoppningen är dock att resultatet blir användbart till fler typer av stora lokaler med hög persontäthet.

1.4 Metodbeskrivning

Huvudfrågeställningen undersöks med hjälp av fältmätningar. Dessa utförs på arrangemang där en avsevärd folkmassa förflyttar sig. Förflyttningsförloppet analyseras med hjälp av videoinspelningar som bearbetas digitalt och behandlas av ett PC-baserat mätprogram. Därigenom erhålls uppgifter om aktuella gånghastigheter och avstånd mellan personer. Därtill analyseras evakueringsförloppet i stort med särskild hänsyn till folkmassans beteende vid för utrymningen kritiska punkter som utgångar och vid av byggnadskonfigurationen framtvingade riktningsförändringar. Dessutom mäts den totala utrymningstiden.

De faktorer som anses vara betydelsefulla för återskapandet av utrymningsituationen i simuleringarna analyseras där det är praktiskt genomförbart. Dessa faktorer är personflöde genom dörrar och persontäthetens inverkan på gånghastigheter. Gånghastigheten hos en individ beror av avståndet till framförvarande person och detta samband undersöks.

De ovan nämnda förflyttningsscenarierna återskapas sedan i de två utrymningsmodellerna Simulex och Steps. Därefter modifieras olika indataparametrar för att få bästa möjliga överrensstämmelse med den verkliga situationen. De kritiska punkter som analyserats i det verkliga förflyttningsförloppet studeras även i utrymningsprogrammets grafiska framställning av evakueringen.

Genomgången av utrymning, folkmassors beteende, dimensionering och ”crowd management” baseras på litteraturstudier och en intervju.

1.5 Begränsningar

Den tid som funnits tillgänglig för denna studie omfattar totalt 20 arbetsveckor under sommaren och hösten 2004. För arbetets genomförande har inte något ekonomiskt stöd funnits tillgängligt. Av detta följer en del begränsningar i studiens omfattning.

Försöken bygger på studier av folkmassor i rörelse efter avslutat evenemang på idrottsanläggningar, närmare bestämt när slutsignalen i aktuell match ljudit och publiken samlad börjat bege sig mot utgångarna. Några utrymningsförsök i egentlig mening med samlad evakuering i samband med utrymningslarm har ej genomförts. Detta med hänsyn till de uppenbara svårigheter som finns i att genomföra fullskaleförsök med tusentals personer inblandade.

Läsaren av denna rapport bör vara medveten om att försöken är utförda på idrottsarenor och resultaten är att betrakta som specifika för dessa typer av anläggningar. Detta till trots är ambitionen att slutsatserna från denna rapport skall kunna appliceras även på andra typer av lokaler med mycket hög persontäthet.

Utrymningsförloppet delas vanligtvis upp i tre moment; varseblivningstid (ofta benämnt detektionstid), besluts- och reaktionstid samt förflyttningstid (även kallat gångtid eller evakueringstid). I jämförelsen mellan de utförda fältmätningarna och simuleringarna beaktas endast begreppet *förflyttningstid*.

Antalet försök som genomförts på Malmö stadion uppgår till tre försök. Endast utrymningsmodellerna Simulex och Steps utvärderas. Det är enbart utrymning från ståplatssektioner som analyserats. Ambitionen är att kvantitativt beskriva om datormodellerna kan återge utrymningsförloppet korrekt, men endast kvalitativt granska *varför* modellerna inte gör det om så är fallet.

2 Teori

I detta kapitel ges en övergripande sammanställning av den kunskap som finns om utrymning och som är intressant för det ämnesområde som studien avser att granska närmare, det vill säga utrymning av stora folkmassor. Det är svårt, och kanske inte meningsfullt, att exakt kvantifiera vad som menas med folkmassa, men definieras i denna rapport som en samling av en större mängd personer med avsevärd persontäthet. I denna studie består försöksuppställningen som betraktas som en folkmassa av cirka 5000 personer med en persontäthet som under utrymningsförloppet uppgår till cirka fyra personer per kvadratmeter. Teoridelen inriktar sig medvetet på att särskilt beskriva de förhållanden som råder vid den typ av verksamhet som försöken är utförda på; publik på läktare vid idrottsevenemang.

2.1 Utrymning – grundläggande begrepp

För att beskriva och förenkla utrymningsförloppet delas det vanligtvis upp i tre delar; varseblivningstid, besluts- och reaktionstid och förflyttningstid (*Frantzich, 1994*). Varseblivningstiden är den tid som förflyter från det att olyckskedet, till exempel en brand, startar tills det att personen ifråga uppfattar detta. Reaktions- och beslutstiden är tidsåtgången från det att personen uppfattat faran tills det att personen påbörjar en förflyttning mot en utrymningsväg. Förflyttningstiden är den tid det tar sedan en person beslutat sig för att utrymma lokalen från den aktuella platsen tills personen befinner sig på en säker plats utanför byggnaden.

$$t_{\text{utrymning}} = t_{\text{varseblivning}} + t_{\text{beslut och reaktion}} + t_{\text{förflyttning}} \quad \text{Ekvation 2.1}$$

Ekvation 2.1 Utrymningstiden består av summan av tiden för varseblivning, beslut och reaktion samt förflyttning.

Det som utrymningsforskningen koncentrerat sig på de senaste 30 åren är att arbeta fram metoder för att beskriva tidsåtgången för de olika faserna (*Frantzich, 2000*). I denna rapport är det förflyttningstiden som undersöks. Förflyttningstiden är i förhållande till de övriga faserna relativt enkel att bestämma då den baseras på personernas förflyttningsförmåga, som är väldokumenterad. Vid hög persontäthet och väldigt höga personantal är det dock oklart om modellerna stämmer med verkligheten eftersom få sådana undersökningar gjorts.

Det är viktigt att poängtera att man i verkligheten inte kan separera de olika faserna i utrymningsförloppet och presentera dem efter varandra på en tänkt tidsaxel, faserna går in i varandra (*Frantzich, 2000*). Det är naturligtvis så att beslutsfattande sker under förflyttningsfasen vad gäller exempelvis val av utrymningsväg. Även om arbetet begränsas till att utreda förflyttningstiden är det därför viktigt att även känna till vad som påverkar varseblivnings-, besluts- och reaktionstiderna. Detta beskrivs i kapitel 2.1.2, 2.1.3 och 2.1.4.

2.1.1 Utrymningsbegrepp

Nedanstående fackuttryck är allmänt vedertagna utrymningsbegrepp som används i rapporten.

Utrymningsväg

En utgång som genom en dörr, port eller fönster leder direkt till det fria eller till en trappa, korridor eller tunnel inom egen brandcell, som leder till det fria (BBR 5:223).

Nödutgång

Utrymningsväg som i vanliga fall inte används för passage (*Brandskyddshandboken, 2002*).

Säker plats i det fria

Gata eller motsvarande utanför en byggnad (*Brandskyddshandboken, 2002*).

Kritiska förhållanden vid utrymning

Omgivningsförhållanden i en brandmiljö som anger den tidpunkt när utrymning senast skall vara avklarad. Kritiska förhållanden beskrivs med hjälp av gränsvärden för temperatur, värmestrålning, sikt och upptagen dos av giftiga produkter (BBR 5:361).

Gångavstånd till en utrymningsväg

Sträckan mellan en plats i en brandcell och en utrymningsväg (BBR 5:331).

Personflöde genom dörr

Beskriver antalet personer som kan passera genom en dörr per tidsenhet. Personflödet beror av den fria dörrbredden, som kallas *passagemåttet* (BBR 5:341). Personflödet brukar uppskattas till 1-1,2 personer per sekund och meter (passagemått) beroende på aktuell gånghastighet och persontäthet (*Brandskyddshandboken, 2002*).

Gånghastighet

Hastigheten med vilken personer förflyttar sig i utrymningsförloppet. Beror av persontäthet och om förflyttningen är horisontell eller i trappa. Vid dimensionering används hastigheter mellan 0,5 och 1,3 meter per sekund (*Brandskyddshandboken, 2002*).

2.1.2 Beteende vid utrymning

Utrymning är ett skeende som för de evakuerande personerna präglas av stress på grund av att situationen är okänd och faran ofta är av stegrande natur (*Frantzich, 2000*). Hur personerna upplever situationen och handlar är beroende av många faktorer. Beteendemönstret vid ett utrymningsförlopp kan beskrivas med hjälp av tre faser, inom vilka det fattas en mängd beslut (*Canter, 1980, 1990*):

- Förståelse och tolkning av situationen.
- Förberedelse.
- Genomförande.

Olika verksamheter renderar i olika beteendesequenser. Detta beror på att gruppdynamiken är avgörande för vilka beslut som fattas. Faktorer som social anknytning och förlitan till auktoriteter (formella och informella ledare) är avgörande för vilka beslut som fattas (*Frantzich, 2000*).

I det inledande skedet av utrymningen är det vanligt att stor osäkerhet, oro och missförstånd uppstår, vilket leder till ineffektiva handlingar. I detta stadium är informationsförmedlingen av stor vikt, om utrymningslarm eller auktoritetspersoner tydligt talar om vad gruppen förväntas göra kommer beslutsfattandet hos individerna att ske snabbare och mer rationellt (*Sime och Kimura, 1988*). Besluten leder fram till olika åtgärder, till exempel ytterligare informationssökning, bekämpande av den uppkomna faran, hjälpa eller varna andra, rädda egendom eller ägodelar, leta efter familjemedlemmar och vänner som befinner sig i andra delar av byggnaden, ringa och meddela eventuell försening på grund av det inträffade, kalla på hjälp eller utrymning. Åtgärden kan också bestå i att inte göra någonting alls. Detta är ett vanligare fenomen än att personer i nödsituationer hänger sig åt ett panikartat beteende, förutsatt att panikbeteende definieras som "vidtagande av åtgärder som ökar faran" eller "om personer tillfogar andra eller sig själva skada genom sitt agerande" (*Sime, 1980*).

Personer som utrymmer handlar alltså oftast, sett till sammanhanget, rationellt och tenderar att hjälpa varandra. I de sällsynta situationer där panik uppstår, är det förknippat med djup oro och ångest för att inte kunna ta sig ut; personerna upplever att möjligheten att utrymma minskar samtidigt som hotet från faran ökar och det råder konkurrens om möjligheten att komma bort från riskområdet (*Handbok utrymning, 1994*). Panikkänslor kan smitta av sig på andra och masspanik utbryta, men detta anses som extremt sällsynt (*Sime, 1980*). Problemet med att motivera människor att utrymma är mycket större än att förhindra panik. Den

felaktiga panikmyten skapar ofta problem då den allmänt uppfattas som sann och ansvariga därför felaktigt planerar sin verksamhet som om panik är det största bekymret vid en katastrofsituation (*Handbok utrymning, 1994*). Det bör dock påpekas att i de utrymnings-scenarier som undersöks i denna rapport finns förutsättningar för paniksituationer. Dessa förutsättningar är stort personantal, hög persontäthet, potentiellt snabba händelseförlopp, få evakueringsvägar i förhållande till personantal och lång förflyttningstid (*Abrahamsson, 1998*). Dessutom torde den på förhand upptrissade stämningen som generellt råder bland publiken på en idrottsarena ytterligare öka risken för panik.

I fallet med läktarutrymning finns det en stor risk att en fördröjning i utrymningsförloppet uppstår om de formella ledarna (speaker, publikvärdar med flera) inte förmår att initiera en evakuering. Eftersom det rör sig om en stor grupp där personerna inte känner varandra kommer personerna att först tveka för att sedan formera mindre grupper inom vilka åtgärdsbeslut tas. Denna fördröjning beror av att personerna inte vill ta risken att "göra bort sig" inför gruppen genom att utse sig själv till ledare och föreslå åtgärder. Det är därför av mycket stor vikt att auktoritetspersoner tar kommandot och i klartext talar om vilka åtgärder som bör vidtagas (*Frantzich, 2000*).

2.1.3 Faktorer som påverkar utrymningsbeteendet

Det finns många faktorer som påverkar evakueringsförmågan och beteendet hos personer som befinner sig i en nödsituation. Faktorerna beskrivs ingående av Frantzich (*2000*). Här nedan listas de variabler som påverkar utrymningen med en kort redogörelse. För varje variabel beskrivs situationen som generellt gäller vid utrymning av stora folkmassor, med särskild inriktning på försöksuppställningen läktarutrymning vid idrottsevenemang.

Antal personer och deras fördelning i byggnaden

Utrymningstiden är i hög grad beroende av hur många som vistas i byggnaden och var de befinner sig. Då många personer ingår i utrymningsförloppet kan köbildning uppstå om ett stort antal använder sig av samma utgång. Detta fördröjer utrymningen. Persontätheten inverkar på samma sätt, hög persontäthet i en del av byggnaden leder till ökad köbildning. Utrymning av folkmassor från en ståplatsläktare representerar i detta sammanhang ett extremfall, då både personantalet och persontätheten är avsevärd.

Rörelseförmåga

Rörelseförmågan hos utrymnande beror både på yttre faktorer som byggnadskonfiguration och persontäthet, men också av personberoende variabler som ålder, rörelsehinder eller annat handikapp. Personer äldre än 65-70 år eller yngre än fem år har lägre gånghastighet än andra. Rörelsehindrade har lägre gånghastighet och kan ha svårt vid öppnande av dörrar eller andra svåra passager. Rörelsehindrade kan också medföra en sänkning av gånghastigheten hos personer i närheten genom att blockeringar uppstår. Syn- och hörselskada påverkar också utrymningsförmågan negativt. I försöksuppställningen ingår en population med stor

variation i rörelseförmågan, med till exempel ett flertal rullstolsburna personer och människor i alla åldrar.

Sociala relationer

Beteendet vid en utrymning påverkas i hög grad av om personen som skall utrymma är ensam eller ingår i en grupp och den gruppdynamik som råder i gruppen. Utrymning sker ofta gruppvis, särskilt om personerna i gruppen känner varandra. Grupp beteendet kan leda till ett snabbare beslutsfattande, men om personerna inte känner varandra kan besluts- och reaktionstiden bli längre, på grund av rädslan att göra bort sig. Den studerade gruppen består till största delen av folk som inte känner varandra och då är det extra viktigt att personalen (i detta fall publikvärdarna) agerar korrekt och därmed minskar besluts- och reaktionstiden.

Vakenhet

Sovande människor, personer som tar lugnande medicin och alkoholpåverkade personer har i regel längre varseblivningstid och graden av vakenhet påverkar besluts- och reaktionstiden. I det aktuella fallet kan de flesta anses ha en hög grad av vakenhet, även om det är rimligt att anta att det finns en del alkoholpåverkade personer på området.

Brandgaspåverkan

I de fall anledningen till utrymningen är en eldsvåda, kan förflyttning och beslutsfattande ta längre tid på grund av de förhållanden som uppstår. Nedsatta siktförhållanden verkar menligt på förflyttningförmågan. Koloxid, koldioxid och låga syrehalter inverkar på människors förmåga att fatta beslut och reagera.

Ansvarsrollen

Om de formella ledarna i gruppen (i det studerade fallet ledarorganisationen med säkerhetsansvarige, speaker och publikvärdar) har förmåga att fatta beslut om utrymning och tydligt förmedlar detta inverkar det positivt på besluts- och reaktionstiderna (*Sime och Kimura, 1988*). Med andra ord är välutbildad och samövad personal mycket viktiga i det aktuella utrymningsförloppet.

Motivation

För att personer ska avbryta pågående aktivitet och påbörja utrymning måste de motiveras till detta. Om situationen är otydlig, exempelvis om ett utrymningslarm ljuder utan att några andra indikatorer tyder på fara, kan motivationen att börja utrymma vara låg. Att personer uppfattar rök från en eldsvåda är inte alltid tillräcklig motivation, men även i fall där man ser flammorna kan utrymningsbenägenheten vara liten. Detta är dock mer sällsynt.

Riktad uppmärksamhet

Personer som närvarar vid ett idrottsevenemang har i allmänhet uppmärksamheten riktad mot evenemanget och förväntar sig att få utrymningsindikationer därifrån. I det aktuella fallet kan det betraktas som att en uppmaning till utrymning från centralt håll, till exempel speakern, får större genomslag än om närbelägna matchvärdar anmodar till utrymning.

Lokalkännedom

Om lokalerna är bekanta för dem som utrymmer tenderar besluts- och reaktionstiden förkortas, då osäkerheten om val av utrymningsväg minskar. Personer väljer ofta att gå ut samma väg som de kom in, särskilt om de befinner sig i en okänd miljö. I försöksuppställningen är majoriteten av populationen att betrakta som obekanta med omgivningen, särskilt då det finns många utrymningsvägar som inte tillåts användas i normala fall. Det kan därför vara angeläget att informera om alternativa utgångar vid en utrymning, så att onödig köbildning undviks.

Byggnadens orienterbarhet

Om byggnaden är komplex kan det vara svårt att se utgångar, andra personer eller en eventuell brand. Detta medför en längre besluts- och reaktionstid och sänker motivationen att utrymma då man tvingas utföra undersökningsåtgärder för att ta beslut om utrymning eller utrymningsväg. Byggnaden (läktaren) i försöksuppställningen är enkelt utformad och överblickbarheten är god.

Vägledande markeringar

Tydlig information om utrymningsvägarnas placering gör valet av gångriktning lättare och förbättrar därmed besluts- och reaktionstiden. Tydlighet uppnås genom belysta, standardiserade skyltar som placeras så att de är synliga från olika vinklar och avstånd i en omgivning där annan information inte riskerar bli dominerande. Tydligheten kan förstärkas med målade (företrädesvis lysande eller efterlysande) linjer på golvet, markering av utstickande föremål, trappor, kartor och pilar. På en läktare kan de vägledande markeringarna vara svåra att se på grund av att de är skymda av folkmassan.

Belysning

Då nedsatt belysningsnivå förlänger utrymningstiden bör ordinarie belysningen i vissa fall kunna ersättas av nödbelysning. Användandet av belysta dörrar och skyltar är en åtgärd som inverkar positivt på utrymningstiden.

Utrymningsvägarnas utformning och placering

Om dörrarna som leder till utrymningsvägarna utformas så att de särskiljer sig från omgivningen till färg och form underlättas valet av utrymningsväg. I fallet med läktarutrymning är det fördelaktigt om personal öppnar dörrar i utrymningsvägar, särskilt okända nödutgångar, som annars riskerar bli oanvända i en utrymningssituation. Placeringen av utrymningsvägarna bör vara så att de harmoniserar med verksamheten i byggnaden och det gäller inte bara de vanliga in- och utgångarna, utan även i högsta grad nödutgångarna. Detta på grund av att personer då drar sig för att använda andra utgångar än de som de kom in genom. Det medför att det oftare bildas köer vid in- och utgångarna, något som bör beaktas vid placeringen av dessa.

Utrymningslarm

Ett utrymningslarm kan, genom att minska osäkerheten hos och ge information till de personer som skall utrymma, förkorta besluts- och reaktionstiden, förutsatt att det är tillräckligt informativt med hänsyn till lokalens besökare. Ett talat utrymningslarm, som anger att utrymning skall ske och varför, anses generellt förkorta besluts- och reaktionstiden mer än ett konventionellt larm med ljud- och ljussignaler (*Bayer och Rejnö, 1999*). Vid en läktarutrymning som initieras av en speaker på anläggningen, bör meddelandet alltså informera om vad som skett och vad publiken förväntas göra. Det kan också vara aktuellt att försäkra publiken om eventuella kompensationer och schemaomläggningar av aktiviteten, samt var återsamlingsplats för vänner och familjer som kommit från varandra är belägna (*Managing crowds safely, 2000*). Positiva instruktioner är att föredra framför negationer, exempelvis; ”använd den gröna utgången” istället för ”använd *inte* den röda utgången”. Det är viktigt att informationen presenteras kortfattat, sakligt, lugnt och bestämt och att budskap som kan uppfattas som alarmerande undviks. För mycket information i meddelandet kan blockera de viktigaste budskapen så att de inte uppfattas av mottagarna. Informationen kan ges via högtalarsystem, tv-skärmar och personal på plats.

Brandberoende

Mängden värme och rök från en eventuell brand påverkar varseblivningstiden, särskilt om det inte finns ett automatiskt system för brandupptäckt. Då återstår endast personernas sinnen för att upptäcka faran. Att brandförloppets utökade omfattning underskattas är ett vanligt fenomen, exemplifierat av branden på fotbollsstadion Valley Parade i Bradford 1985 (*Canter et al, 1989*).

2.1.4 Publikbeteende vid utrymning

Här följer en sammanställning av det beteende och de problemområden som finns vid utrymning av publik på läktare. Det ges även förslag på hur problemen kan avhjälpas enligt riktlinjerna i boken ”*Managing crowds safely*” (2000).

Något som utmärker beteendet vid publika arrangemang är publikens målsättningar med evenemanget. Detta kan resultera i att personer anländer tidigt med ambitionen att få en bra plats. När de väl har fått platsen kan det vara svårt att motivera dem att flytta på sig. Personer kan parkera olagligt utanför arenan för att kunna komma snabbt därifrån efter evenemanget och därigenom blockera utrymningsvägar. Ett annat vanligt fenomen är att personer väntar på vänner och familjemedlemmar i närheten av utgångar och därigenom blockerar dessa. I allmänhet väljer personer den närmsta utgången vid utrymning snarare än att följa instruktioner om vilken utgång som är lämpligast att använda.

Publikens erfarenhet och lokalkännedom inverkar också på beteendet. Personer och grupper av personer som är obekanta med evenemanget tenderar att behöva mer assistans och vägledning av personalen. Dessa personer är också benägna att följa med publikens riktning,

huvudvägar och samlingsplatser och därigenom skapa en ojämn personfördelning. Personer med dålig lokalkännedom är generellt omedvetna om alternativa utrymningsvägar och gångvägar och kommer att använda sig av de tydligaste eller mest välbekanta vägarna, snarare än de som är närmast eller ger snabbast utrymningstid. Omvänt gäller att personer bekanta med omgivningen kan använda sig av genvägar snarare än att gå den angivna vägen. Problemet kan avhjälpas med ritningar av lokalen på baksidan av biljetter, på skyltar inne i och utanför lokalen samt medelst en genomtänkt placering av vägledande markeringar. Vad gäller utomhusarenor kan sägas att de kan uppfattas olika beroende på ljusförhållandena. Personer som anländer till arenan i dagsljus kan bli desorienterade vid utrymning i mörker, även om arenan har god belysning.

Publikens förväntningar på evenemanget inverkar också på dess beteende. Till exempel kommer förekomsten av fyrverkerier och rökeffekter på ett evenemang att leda till att publiken reagerar långsammare vid en brand. Om ett välordnat kösystem finns upprättat på evenemanget är det troligt att publikens beteendemönster påverkas i en för utrymnings-säkerheten positiv riktning. Publikens känslomässiga attityd, såsom upprymdhet, desperation, hysteri och aggression, inverkar också på deras beteende. De som är besvikna över ett evenemangs standard eller resultat (till exempel matchresultat) kan bli aggressiva och ha låg samarbetsvilja.

Gruppdynamik och gruppptryck kan inverka så att ett fåtal personers olämpliga eller rent av olagliga handlingar kan sprida sig till en större skara människor. Frustration över hög persontäthet och köbildningar kan resultera i ett beteendemönster som individer normalt inte skulle hänföra sig till, som till exempel klättring över staket och liknande. Om publikkontrollen fallerar och regler varken åtgärs eller upprätthålls kan initialt små gruppers beteende sprida sig till den större massan och till exempel resultera i okontrollerade publikflöden och överbefolkning av vissa sektorer. Vad gäller auktoritetsfrågan kan individer eller grupper av individer verka som informella ledare och genom sitt agerande påverka den tidiga delen av utrymningsfasen negativt genom att till exempel öppet vädra egna åsikter om falskalarm.

Om information angående tillgängliga utrymningsvägar eller vilka regler som gäller på arenan är otydligt formulerade och delgivna kommer publiken att formulera egna uppfattningar baserade på andra personers agerande eller tidigare erfarenheter. Tydlig skyltning och ett välfungerande informationssystem är därför viktigt. Att förmedla information via högtalarsystem, bildskärmar och personal är effektivt vid en nödsituation. Det är därför viktigt att dessa är lätt identifierbara i omgivningen.

Personer är mer benägna att följa personalens instruktioner vid en utrymning om förhållandet mellan personal och publik är bra. Detta uppnås genom att tillse att bekvämligheten på anläggningen är av god standard med avseende på tillhandahållande av toaletter, mat, dryck och informationsställen. Publikens attityd kan påverkas negativt av det sätt som biljett- och säkerhetskontroller utförs.

2.1.5 Övriga faktorer som påverkar utrymningen

Förutom de faktorer som påverkar beteendet vid utrymningen, finns det ett antal byggnadstekniska faktorer som påverkar tidsåtgången av en utrymning. Bland dessa kan nämnas (*Brandskyddshandboken, 2002*):

- Antal tillgängliga utrymningsvägar, deras fördelning och utformning.
- Gångavstånd till och inom utrymningsväg.
- Förekomsten av trappor.
- Sprinkleranläggning.

Räddningstjänstens inverkan är ytterligare en faktor som påverkar utrymningsförloppet, men oftast i ett sent skede.

Av de faktorer som benämns i detta kapitel är det framförallt de som inverkar på förflyttningstiden som avses undersökas med stöd av empiri i denna rapport. Bland dessa faktorer är gånghastighet, persontäthet samt personflöde avgörande. Dessa faktorer undersöks för publik- läktarsammanhang.

2.2 Utrymningsdimensionering

För att säkerställa att utrymningen är godtagbar finns det olika metoder. Metoderna används företrädesvis vid projektering av ny byggnad, men kan också användas för att verifiera utrymningsförhållanden på en befintlig byggnad vid tillsynsverksamhet eller vid framställande av riskanalyser. I Sverige tillämpas två metoder för att dimensionera utrymnings säkerheten; förenklad och analytisk dimensionering (*Brandskyddshandboken, 2002*). Dessa beskrivs under rubrikerna 2.2.1 och 2.2.2 i form av fallstudier av idrottsarenor eftersom försöken utförts på ett sådant objekt. För jämförelse med utländska dimensioneringsmetoder visas ett exempel på hur dimensionering av idrottsarenor utförs i Storbritannien under rubriken 2.2.3.

2.2.1 Förenklad utrymningsdimensionering av idrottsarena

Förenklad dimensionering baseras på förbestämda, exakta regler som har sitt ursprung i tidigare byggnormer. Reglerna, som finns angivna i Boverkets byggregler (BBR), anger i detalj hur byggnaden skall konfigureras i avseende på utrymnings säkerheten med hänsyn till verksamhet som bedrivs och hur anläggningen är utformad. Exempel på sådana regler kan vara hur många utrymningsvägar och vilken bredd de skall ha i förhållande till förväntat personantal (*Brandskyddshandboken, 2002*).

Idrottsarena klassas i detta sammanhang som samlingslokal eftersom den inrymmer mer än 150 personer eller anses som publik lokal där personerna inte har god lokalkännedom (*BBR 5:241*). Av detta följer en mängd bestämmelser, varav de viktigaste kortfattat presenteras här.

Utrymningsvägarnas bredd dimensioneras utifrån det maximala antalet personer som kan förväntas befinna sig på arenan. Då personantalet överstiger 150 skall passagemåttet i utrymningsvägen vara minst 1,2 meter och den totala bredden av alla utrymningsvägar skall vara minst en meter per 150 personer. I händelse av att en utrymningsväg blockeras skall de övriga utrymningsvägarnas totalbredd vara en meter per 300 personer (*BBR 5:371*). På en arena med enbart sittplatser dimensioneras maximala personantalet till antalet tillgängliga sittplatser eller persontätheten 1,7 personer per kvadratmeter. För lokaler med stå- och sittplats är den dimensionerande persontätheten 2,5 personer per kvadratmeter (*BBR 5:371*). Om arenan är avsedd för fler än 1000 personer skall det finnas fyra utrymningsvägar, som skall vara väl fördelade (så långt ifrån varandra som möjligt) i lokalen. Läktare inom arenan skall ha tillgång till två av varandra oberoende utrymningsvägar som båda antingen leder direkt till det fria eller till utrymningsväg inom byggnaden (*BBR 5:371*).

Det maximala gångavståndet till närmaste utrymningsväg får vara 30 meter då persontätheten betecknas som hög och personerna i byggnaden inte kan antas ha god lokalkännedom. Avståndet mäts för det mest ogynnsamma fallet (*BBR 5:331*). Dörrar skall vara försedda med panikregel eller dörrhandtag (*BBR 5:342*). Samlingslokalen skall vara försedd med utrymningslarm, allmänbelysning, nödbelysning och en skylt som anger högsta antalet personer som får vistas i lokalen samtidigt (*BBR 5:371*). Sittplatser på läktare bör inte anläggas i en större lutning än 1:12. Avsatser högre än 0,5 meter skall förses med räcke för att förhindra fall. Bänkradernas längd bör inte överstiga 40 sittplatser om utrymning kan ske åt två håll (annars 10 sittplatsers bredd) och bör vara ordnade i bänkfält för enkel utrymning. Mellan bänkrader skall det finnas ett fritt passagemått på 0,45 meter. I gångar med sittplatser på båda sidor skall bredden vara minst en meter (*BBR 5:371*).

2.2.2 Analytisk utrymningsdimensionering av idrottsarena

Analytisk dimensionering används då den förenklade dimensioneringen medför begränsningar i byggnadens utformning i avseende på till exempel arkitektur eller verksamhet. Dimensioneringsmetoden kan leda till en minskning av brandskyddet, men genom beräkningar visas att byggnadens säkerhet ändå kan anses som godtagbar (*Brandskyddshandboken, 2002*). Dimensioneringen utförs genom att den kalkylerade utrymningstiden (ekvation 2.1 sidan 7) jämförs med en beräknad tid till kritiska förhållanden enligt ekvation 2.2 på nästa sida. Utrymningen skall vara avslutad innan tiden till kritiska förhållanden uppnåtts.

$$t_{\text{kritiska förhållanden}} > t_{\text{utrymning}} \quad \text{Ekvation 2.2}$$

Ekvation 2.2 Dimensioneringsvillkoret vid analytisk dimensionering är att utrymning skall vara avslutad innan tiden till kritiska förhållanden uppnås.

Utrymningstiden är summan av utrymningsförloppets tre faser; varseblivningstid, besluts- och reaktionstid samt förflyttningstid (*Frantzich, 1994*). Svårigheten är att finna korrekta värden och antaganden för beräkningen av de olika tidsfaserna.

Varseblivningstiden beror av förekomsten av automatiskt brandlarm, om personer ser brand eller annan fara, vilka som finns i byggnaden och deras sociala relation, lokalens överblickbarhet och personernas benägenhet att reagera på faran. Varseblivningstiden kan variera mellan fåtalet sekunder och flera minuter och är svår att uppskatta om det inte finns ett detektions- och larmsystem tillgängligt (*Frantzich, 2000*).

Besluts- och reaktionstiden är ofta längre än de övriga två faserna och är även den som är svårast att uppskatta (*Frantzich, 2000*). Tidsåtgången beror av alla de faktorer som tas upp i kapitel 2.1.3.

Förflyttningstiden är oftast enklast att bestämma och kan beräknas med enkla formler som redovisas i kapitel 4.3 eller med hjälp av datormodeller. Förflyttningstiden påverkas både av yttre faktorer som gångavstånd, utrymningsvägarnas egenskaper och hjälputrustning och av personrelaterade faktorer som fördelning och rörelseförmåga. Förflyttningstiden styrs till hög grad av antalet personer i lokalen och köbildning vid till exempel utgångar (*Frantzich, 2000*).

Vid analytisk dimensionering är det av yttersta vikt att beräkningarna styrks genom en dimensioneringskontroll. Därför skall känslighets- och osäkerhetsanalyser utföras och beräkningar och antaganden redovisas utförligt med stöd av väldokumenterade modeller och allmänt vedertagen forskning så att en bedömning av resultatens riktighet kan göras. Dimensioneringen kan ofta resultera i att väldigt långa gångavstånd till utrymningsvägar vid en första anblick anses som acceptabla. Gångavståndens längd bör dock begränsas till maximalt 60 meter, då längre avstånd medför att upplevelse av oro lätt uppstår bland de utrymmande personerna (*Brandkyddshandboken, 2002*).

Vid en analytisk dimensionering av en idrottsarena kan det ofta te sig att den tillgängliga tiden för utrymning är väldigt lång. Detta beror på att tiden till kritiska förhållanden generellt baseras på påverkansfaktorer som uppstår av ett tänkt brandförlopp. Idrottsarenor är ofta kala ur brandbelastningssynpunkt och deras stora rumsvolymer medför en lång tid till kritiska förhållanden uppstår (*Abrahamsson, 1998*). Visserligen kan arenor med läktare av trä eller förekomsten av så kallade tifon (fyrverkerier, stora mängder pappers- och tygmateriäl medhavda av publiken i syfte att stötta sina egna) medföra att brandbelastningen blir högre, men de stora personrelaterade skadorna uppkommer oftare på grund av en andra orsaker (*Abrahamsson, 1998*). På nästa sida listas några av de hotbilder (förutom brandrisken) som

finns på en idrottsarena vid ett evenemang och som kan föranleda utrymning (*Guide to Safety at Sports Grounds, 1997*).

- Läktarkollaps.
- Kemikalieutsläpp.
- Publikupplopp och aggressivt eller farligt publikbeteende, till exempel mellan rivaliserande supportrar och polis, kastning av föremål.
- Publikdynamiska beteenden såsom böljningar och svängningar av människomassor och rusning som resulterar i klämning och nedtrampning inom publik eller mot barriärer.
- Bombhot.
- Extrema och oväntade väderfenomen.
- Avsevärd trängsel på grund av felande insläppsräknare eller storskalig biljettförfalskning.

Att uppskatta tid till kritiska förhållanden för ovanstående hotbilder är förenat med stora osäkerheter och kan inte enkelt göras. Därför kan det argumenteras för att analytisk dimensionering inte är tillämplig på denna typ av lokaler, men det skall då ihågkommas att inte heller förenklad dimensionering tar dessa faktorer i beaktande. Det kan till exempel vara mer relevant att ansätta tid till kritiska förhållanden med utgångspunkt i faktorer som persontäthet vid utrymning och kötid snarare än att dimensionera utifrån ett tänkt brandscenario.

I normalfallet är det varseblivningstiden och reaktions- och beslutstiden som dominerar tidsåtgången i utrymningsförloppet, men i fallet med läktarutrymning är persontätheten och personantalet så högt, att förflyttningstiden kan bli mest tidskrävande då omfattande köbildning är i det närmaste oundvikligt. Bedömningar av varseblivningstiden är vanskliga att uttala sig om, och måste uppskattas från fall till fall. Överblickbarheten är generellt sett mycket god, även om det sannolikt finns situationer då faran kan skymmas av publikhavet. Reaktions- och beslutstiden för offentlig miljö föreslås till en minut då personer ser branden (*Frantzich, 2000*), men upptrissad stämning och riktad uppmärksamhet kan medföra att utrymningsmotivationen är låg och denna tid är i så fall lågt skattad. Besluts- och reaktionstiden kommer förmodligen i hög grad att vara beroende av personalens agerande och därför måste bedömningar av denna funktion ges stor vikt vid uppskattningen av tidsåtgången.

Förflyttningstiden är normalt sett enkel att bestämma. Eftersom personantalet är högt och betydande köbildning förväntas uppstå på flera ställen samtidigt kan beräkningar med hjälp av datormodeller vara att föredra framför handberäkningar (*Abrahamsson, 1998*). Problemet är dock att modellerna inte är verifierade för extremt höga personantal, något som denna rapport avser åtgärda.

Då det höga personantalet medför en risk för omfattande köbildning i ett hotfyllt händelseförlopp med paniksituationer som följd kan det vara en fördel att ha planen att tillgå som en tillfällig utrymningsplats, det skall dock tilläggas att denna inte är att betrakta som säker plats (*Guide to Safety at Sports Grounds, 1997*).

2.2.3 Utrymningsdimensionering av idrottsarena utomlands

I Sverige har vi varit förskonade från allvarliga läktartragedier i samband med idrottsevenemang. Det kan vara en anledning till att svensk forskning på området är eftersatt. Det finns få allmänna råd och riktlinjer för dimensionering av idrottsarenor och organisation kring sådana. Det är därför intressant att se hur problemet behandlas i Storbritannien, som drabbats av ett tiotal läktarkatastrofer det senaste seklet, exemplifierat av tragedierna på arenorna Valley Parade i Bradford 1985 och Hillsborough i Sheffield 1989.

I Storbritannien ges riktlinjer för dimensionering av säkerheten på idrottsarenor i handboken ”Guide to Safety at Sports Grounds” (1997). Rekommendationerna i boken är inte lagstadgade i sig, men många av råden styrks av brittisk lagstiftning. Handboken är avsedd som ett stöd för ledning, arkitekter och ingenjörer vid utformning och bruk av arenor med avseende på hur många personer som maximalt kan medges befinna sig på anläggningen. I Storbritannien är alltid objektsinnehavaren ansvarig och denne kan följa riktlinjerna för att trygga säkerheten.

Riktlinjerna kan i viss mån jämföras med en kombination av de svenska dimensioneringsmetoderna, men är långt mer detaljstyrd och tar upp fler aspekter. Huvudinriktningen i handboken är att fastställa hur många personer som får vistas på arenan samtidigt. Detta bestäms genom att räkna ut:

- Maximalt antal personer som kan släppas in på arenan under en timme.
- Maximalt antal personer som säkert kan vistas på arenan.
- Maximalt antal personer som kan utrymma under normala förhållanden.
- Maximalt antal personer som kan nödutrymma säkert.

Sedan väljs den *lägsta* av dessa personantal som det högsta publikantalet arenan får ha. Beräkningarna utförs genom att tillämpa en mängd förutbestämda och exakt angivna formler, som modifieras av multiplikationsfaktorer som bestäms utifrån aktuell arenas förhållanden. Multiplikationsfaktorerna sätts inom intervallet noll och ett och kan därför resultera i personantal mellan noll och det maximala som ursprungsformlerna anger. Formlerna innehåller många faktorer som kan påverka riskbilden och utrymnings säkerheten.

Handboken ger exakta riktlinjer för ett stort antal områden. Exempel på dessa är:

- Ledningens ansvar och ledningsstruktur.
- Riskbedömningar.
- Detaljutformning av publikvårds- och säkerhetsorganisationen.
- Omhändertagning och segregering av supportrar.
- Vandalismreducering.
- Hänsynstagande till funktionshindrad publik.
- Publikcirkulation.
- Informationsförmedling.
- Brandsäkerhet.
- Kommunikationer.
- Övervakning.
- Elektriska och mekaniska installationer.
- Försäljning av biljetter, alkohol och förplägnad.
- Försörjning av media.
- Alternativa användningsområden.
- Underhåll.
- Inspektioner.
- Tester.
- Dokumentationer.

Utformningen av insläpps och utrymningsförfarande, byggnadskonstruktioner, trappor, ramper, gångvägar, sitt- och ståplatsområden och publikbarriärer är angiven med stor noggrannhet i alla avseenden.

Vad som kan sägas vara särskilt intressant i sammanhanget är att den tillgängliga utrymningstiden är fastställd till mellan maximalt 2,5 och 8 minuter beroende på risknivån. Vid jämförelse med den svenska förenklade dimensioneringsmetoden så finns det relativt stora skillnader. Personflödes hastigheten genom passager är satt till mellan cirka 1,2 och 1,8 personer per breddmeter och minut och persontätheten beräknas till maximalt 4 personer per kvadratmeter (stående publik) att jämföras med de svenska antagandena i kapitel 2.2.1. Gånghastigheten beaktas ej i uträkningarna. Vägen mellan en plats som anses som början av vägen till utgången inom byggnaden och utgången får inte på något ställe vara avsmalnande. På detta sätt anses ett jämnt utrymningsflöde uppnås.

Metoden ger vid en första anblick intrycket att vara så detaljstyrd att inga avvikelser och individuella avsteg är möjliga. Men formlerna är utformade så att det finns gott om utrymme för enskilda bedömningar, vilka kan leda till variationer i säkerheten.

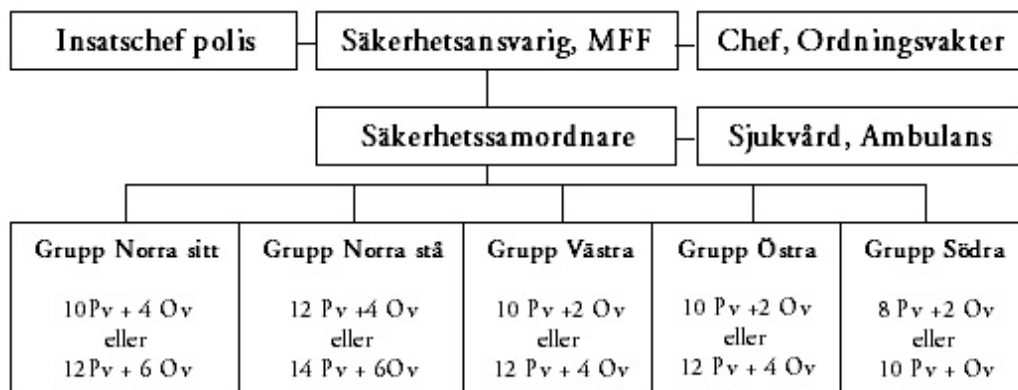
2.3 Exempel på evakueringsplan på idrottsarena

För att ge ett exempel på hur utrymningsorganisationen ser ut vid större publika arrangemang på idrottsarenor i Sverige redovisas här en resumé av Malmö FF:s evakueringsplan vid matcharrangemang. Evakueringsplanen är upprättad enligt Svenska fotbollsförbundets direktiv, som i sin tur följer riktlinjer från UEFA (Union of European Football Associations) och FIFA (Fédération de Internationale de Football Association).

2.3.1 Organisation, personal och resurser

Personalresurserna består av 50-60 publikvärdar, 14-24 ordningsvakter, varierat antal poliser och en ambulans, med en ambulanssjukvårdare och en sjuksyster, i beredskap. Variationerna i antal matchvärdar och ordningsvakter beror av den riskklass som bedöms från centralt håll för varje evenemang. Dessutom finns det arenapersonal (50 st) från Malmö fritidsförvaltning som efter inlägg har till uppgift att bevaka utgångarna och i nödfall öppna dessa och vägleda publiken ut från arenan.

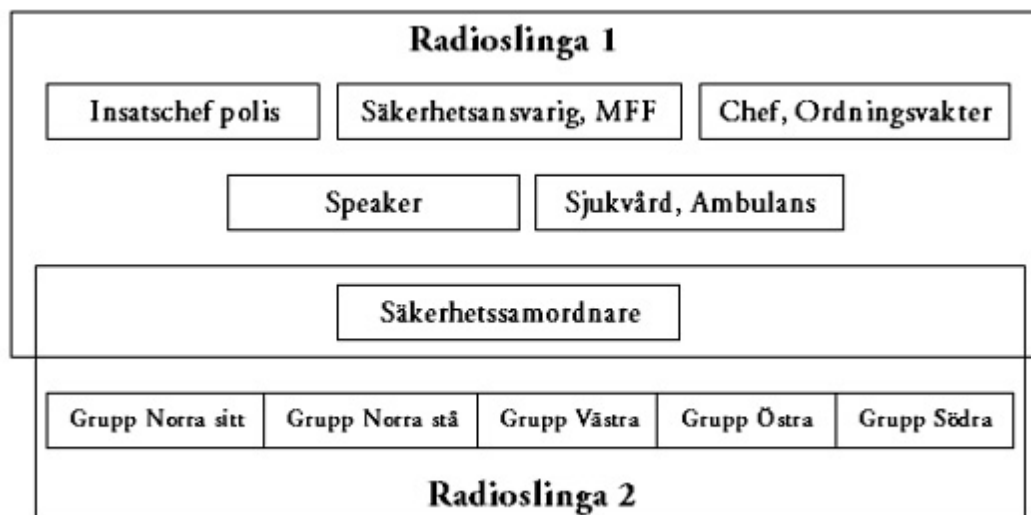
Organisationsstrukturen (se figur 2.1) är hierarkisk, med publikvärdarna indelade i fem grupper som alla lyder under varsin gruppchef. Säkerhetssamordnaren är ansvarig för sambandet mellan gruppcheferna och den säkerhetsansvarige, som i sin tur arbetar med polisen och chefen för ordningsvakterna.



Pv = Publikvärd
Ov = Ordningsvakt

Figur 2.1 Schematisk figur av strukturen hos säkerhetsorganisationen på Malmö Stadion.

Kommunikationsvägarna sker genom radioförbindelse som är uppdelad på två nät enligt figur 2.2. Säkerhetsansvarige har radiokontakt med polis, räddningstjänst, chef för ordningsvakter, speaker och säkerhetssamordnaren som alla lyssnar på samma nät. Säkerhetssamordnaren har radiokontakt med publikvårdsgruppcheferna och ordningsvaktgruppernas chef. Denne står i radioförbindelse med sina ordningsvaktgrupper. Säkerhetsansvarige har därutöver telefonkontakt med chefen för arenapersonalen.



Figur 2.2 Sambandsnäten hos säkerhetsorganisationen på Malmö Stadion.

Publikvårdarna är stationerade till läktarnas in- och utgångar samt vid nödgrindar som de i fall av evakuering är instruerade att öppna. De skall även uppmana publiken att utrymma. Publikvårdare i läktaruppgångar har till uppgift att visa publiken snabbaste vägen ut. Varje publikvårdsgrupp är utrustad med första förband, handbrandsläckare, brandfilt, megafon och radioset. Publikvårdarna bemannar även en brandpost vid den del av arenan där fyrverkerier och rökgranater är vanligt förekommande. Arenan är utrustad med nödbelysning.

2.3.2 Utbildning, övning och dokumentation

Majoriteten av publikvårdarna har genomgått en publikvårdsutbildning arrangerad av Svenska fotbollsförbundet. Därtill genomförs en årlig intern uppdateringsutbildning i regi av Malmö brandkår, med inriktning på brand och sjukvård.

Det genomförs även en övningsevakuering av stadion varje år innan säsongstart. Testevakueringen genomförs med publikvårdare, ordningsvakter och arenapersonal. Publikvårdarna repeterar testevakueringen praktiskt och teoretiskt ytterligare en gång varje år under sommaruppehållet. Övningarna dokumenteras med avseende på närvaro, typ av övning och resultat. Evakueringsplanen utvärderas och uppdateras årligen baserat på erfarenheter från övningar. Därtill dokumenteras alla incidenter som uppkommer under matcher av publikvårdsgruppcheferna.

2.3.3 Evakueringsstrategi

Utrymningsplanen, som uppdelas i utrymning av hela eller del av arenan, är i hög grad beroende av att sambandet mellan olika arbetsgrupper fungerar och att personalen agerar korrekt.

Händelseförloppet inleds med att publikvärd via sin gruppchef och säkerhetssamordnare rapporterar till säkerhetsorganisationens ledning om aktuell fara. Ledningen gör en bedömning av läget och beslutar om utrymning av hela eller delar av arenan skall ske. Ledningen informerar säkerhetssamordnaren om beslutet och kontakter SOS. Under tiden som beslutet delges nedåt i organisationen spelas ett på förhand inspelat utrymningsmeddelande upp som berättar att arenan måste evakueras och hur detta skall genomföras. Vid fallet med utrymning av del av arena läser speakern upp ett meddelande om hur och var läktaren skall utrymmas. Arenapersonalen öppnar då alla utgångar och publikvärdarna samarbetar med ordningsvakterna för att utrymma sin läktarsektion efter inövat mönster. Publikvärdarna har tillgång till megafon för att ge ytterligare information om utrymning.

I evakueringsplanen framgår hur personalen skall agera för att säkerställa utrymning av sin sektion (vilka dörrar skall öppnas) och hur många personer som maximalt uppehåller sig på vardera sektionen. En bedömning görs även av hur lång tid en utrymning uppskattas ta. Denna bedömning är inte på något sätt verifierad men antas till 15 minuter. Som en del av denna rapport kommer det att utföras en simulering för att kontrollera denna bedömning, mer om detta i kapitel 4 och 5.

3 Datormodeller

I detta kapitel ges en förklaring av de datorprogram som använts i framställandet av rapporten. Störst vikt ligger vid de program som skall utvärderas, Simulex 11.1.3 och Steps 2.0. Redogörelsen syftar till att skapa ytterligare förståelse för hur utrymningssimuleringarna utförs i programmen.

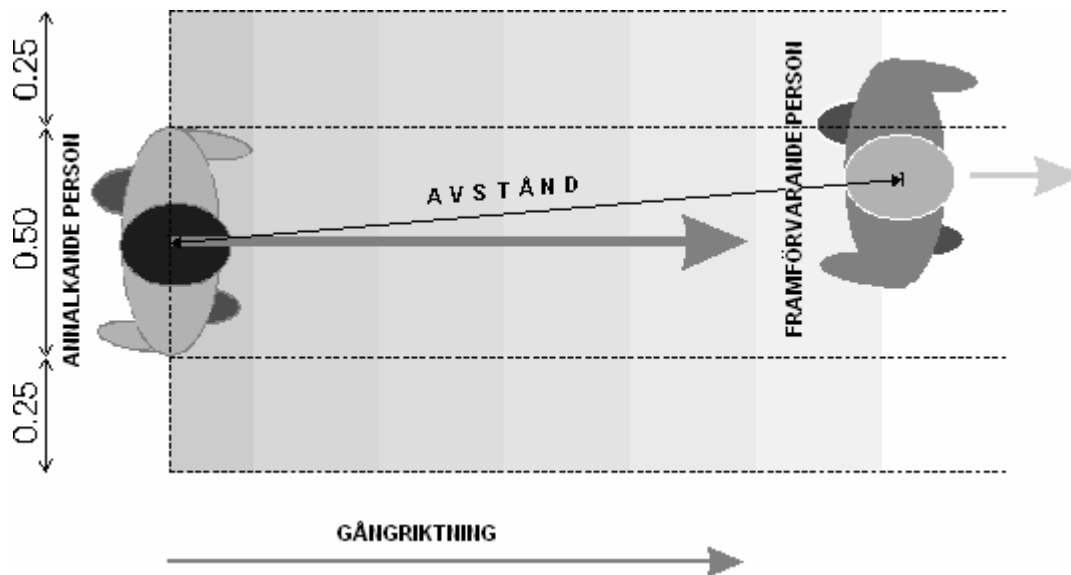
3.1 Simulex

Simulex är ett tvådimensionellt och gridnätsbaserat utrymningsprogram framtaget vid Universitetet i Edinburgh, Skottland, i samverkan med bland annat Institutionen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola. Programmet gör det möjligt att simulera vilka olika typer av situationer som kan tänkas uppkomma vid en eventuell utrymning. Detta görs genom att en CAD-ritning importeras till programmet och att personantal och placering av dessa anges på ritningen. Programmet räknar sedan ut en avståndskarta till de aktuella utgångarna och det finns möjlighet att styra personerna genom att välja vilken utgång dessa ska utrymma genom. Det går också att välja vilka egenskaper personerna i byggnaden ska ha, exempelvis ålder, kön, reaktionstid med mera. Det går dock inte att välja med vilken noggrannhet, alltså gridstorlek, man vill utföra simuleringen i utan gridstorleken för vilken beräkningarna utförs är förutbestämd till $0,2 \times 0,2$ kvadratmeter (*Simulex Technical Reference, 2000*). De beräkningar som utförs ligger senare till grund för att skapa rörelsevektorer hos individerna, vilka är positionerade med en noggrannhet av 0,001 meter. Tidsstegen mellan beräkningarna är även de förutbestämda till 0,1 sekunder.

Beräkningarna som programmet utför under utrymningssimulering bygger till stor del på resultat från studier och försök utförda för olika parametrar (*Thompson, 1994*). De parametrar som är av störst intresse för denna rapport är främst gånghastighet som funktion av avstånd mellan personer och flöde genom öppningar.

3.1.1 Gånghastighet som funktion av avstånd mellan personer

I Simulex definieras avståndet till närmast framförvarande som sträckan mellan kroppens centrum på den annalkande personen och mittpunkten på kroppen på den framförvarande.



Figur 3.1. Definition av avstånd till närmast framförvarande för personer med kroppsbredden 0,5 meter (Thompson, 1994).

I stora folkmassor använder sig Simulex av resultat från studier inom området (Fruin, 1971 och Ando et al, 1988) för att beräkna avståndet till närmaste person. Dessa studier visade att avståndet till de närmaste personerna ofta är ungefär detsamma i alla riktningar. Detta utnyttjas genom att det bildas ett cirkelformat område kring personen där dubbla radien är avståndet till den närmaste personen.

I figur 3.2 visas grundresonemanget i framtagandet av avståndsberäkningar i Simulex. Avståndet i sida beräknas genom Pythagoras sats och avståndet till den närmast framförvarande. Denna förenkling gör att avståndet i sida blir $0,87d$ om avståndet till den närmast framför är d . Utifrån detta resonemang härleds sedan en formel som ger avståndet mellan personer utifrån persontätheten.

$$A = 0,87d^2 \quad \text{Ekvation 3.1}$$

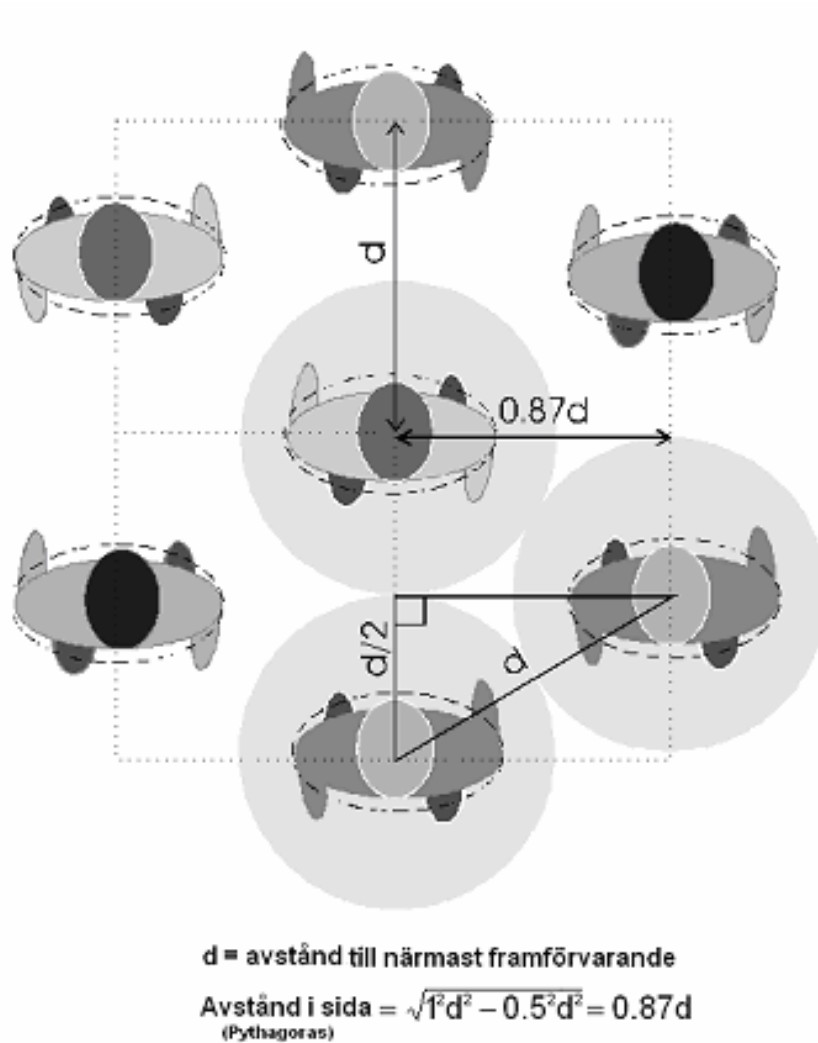
$$D = \text{persontäthet} = \frac{1}{A} = \frac{1}{0,87d^2} \quad \text{Ekvation 3.2}$$

$$d = \sqrt{\frac{1}{0,87D}} \quad \text{Ekvation 3.3}$$

A = Area per person (m^2)

D = Persontäthet (person/m^2)

d = Avstånd till mellan personer (m)



Figur 3.2. Avstånd mellan personer i stora folkmassor (Thompson, 1994).

Ekvation 3.3 är en av grundekvationerna i Simulex och den är avgörande för folkmassors rörelse då den är direkt styrande av bland annat gånghastigheter och flöden genom öppningar. Detta gör den enligt resonemanget att exempelvis gånghastigheten sjunker då persontätheten ökar och avståndet till personerna runt omkring minskar. För att bestämma gånghastigheten som funktion av avstånd och persontäthet använde sig programutvecklarna av utförda försök inom området (Hankin et al, 1958, Fruin, 1971, Ando et al, 1988 och Predtechinskii och Milinskii, 1969). Från dessa försök skapades sedan en anpassad graf som bygger på en sammanställning av försöken.

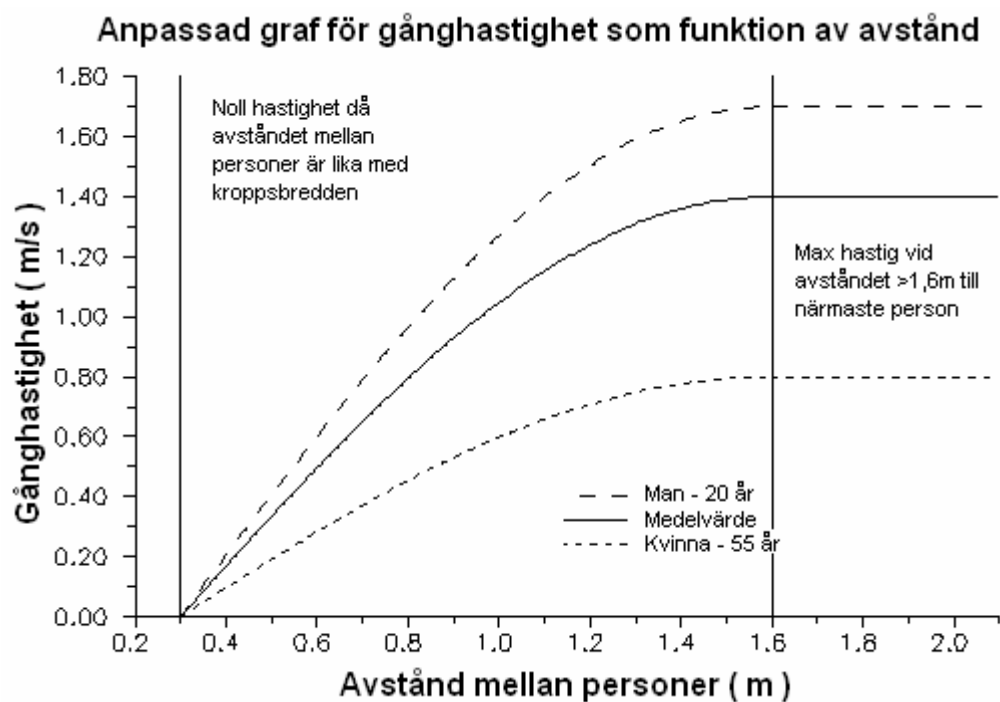
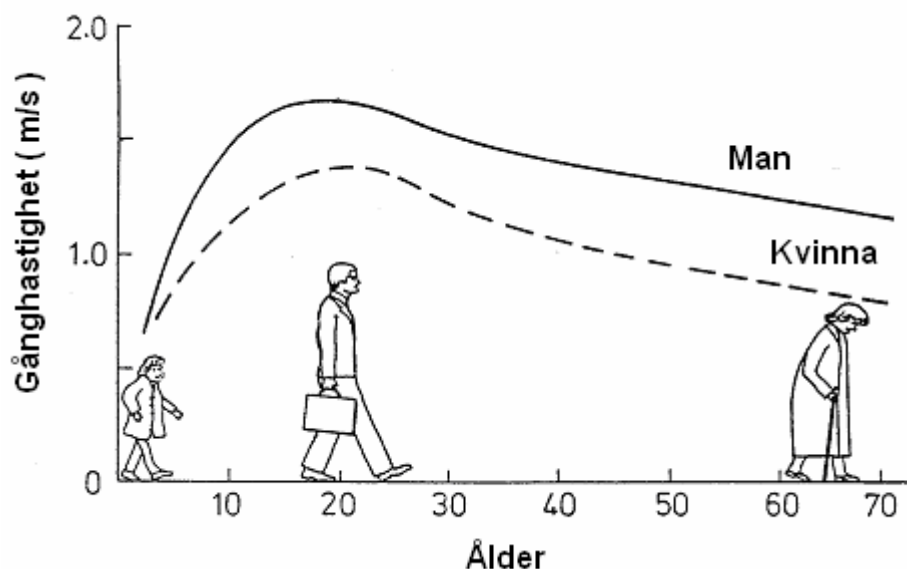


Diagram 3.1. Hastighet som funktion av avståndet i Simulex (Thompson, 1994).

I diagram 3.1 ovan ser man att det finns ett avstånd som ger noll i gånghastighet, vilket i det här fallet motsvarar 0,3 meter. Det motsvarar personers kroppsbredd och kan variera beroende på vilka egenskaper personerna i simuleringen getts. Det finns även ett avstånd där avståndet till personerna runt omkring saknar betydelse för gånghastigheten. I Simulex har detta avstånd satts till 1,6 m. I diagram 3.1 redovisas tre olika grafer som bygger på slutsatser dragna av Ando et al (1998) angående gånghastighet som funktion av ålder och kön. En förenkling av dessa resultat redovisas i figur 3.3.



Figur 3.3. Gånghastighet som funktion av ålder och kön (Ando et al, 1988).

De grafer som finns representerade i diagram 3.1 motsvarar alltså den maximala gånghastigheten 1,7 meter per sekund (män i 18-20 års åldern) och den minimala 0,8 meter per sekund (kvinnor i 70 års åldern).

För att beräkna hastigheterna mellan stillastående och maxhastighet använder sig Simulex av en formel som representerar de anpassade graferna (diagram 3.1).

$$v = V_u \times \sin \left\{ 90 \times \left(\frac{d - b}{t_d - b} \right) \right\} \quad b \leq d \leq t_d \quad \text{Ekvation 3.4}$$

$$v = V_u \quad \text{där} \quad d > t_d$$

v = Hastighet beroende av hindrande person (meter per sekund)

V_u = Normal gånghastighet (meter per sekund)

d = Avstånd mellan personer (meter)

t_d = Avstånd för max gånghastighet = 1.6 (meter)

b = Kroppsbredd = 0.3 (meter)

Ekvation 3.4 är den ekvation som styr gånghastigheter i Simulex och är därför kritisk för den övergripande tillförlitligheten hos programmet. Genom att använda ekvation 3.3 och 3.4 erhålls förhållandet mellan gånghastighet och persontäthet. Detta åskådliggörs i diagram 3.2 nedan.

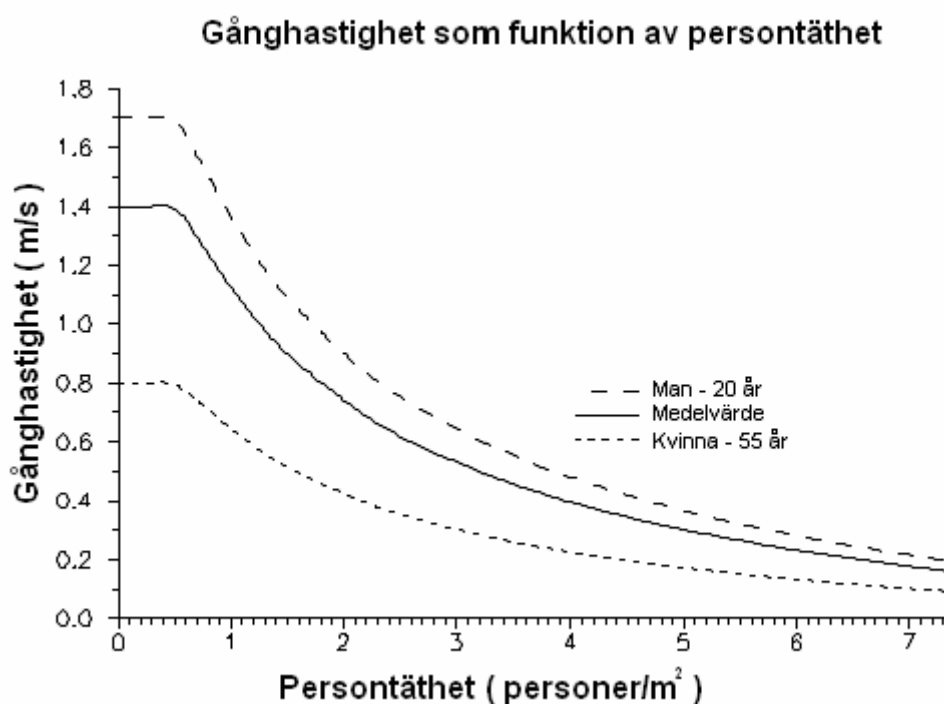


Diagram 3.2. Gånghastighet som funktion av persontätheten.

3.1.2 Personflöde genom öppningar

I Simulex antas att flödet genom öppningar är linjärt proportionellt till bredden på öppningen. Genom att använda ekvation 3.3 och 3.4 får flödet i öppningar utseendet som visas i diagram 3.3 nedan.

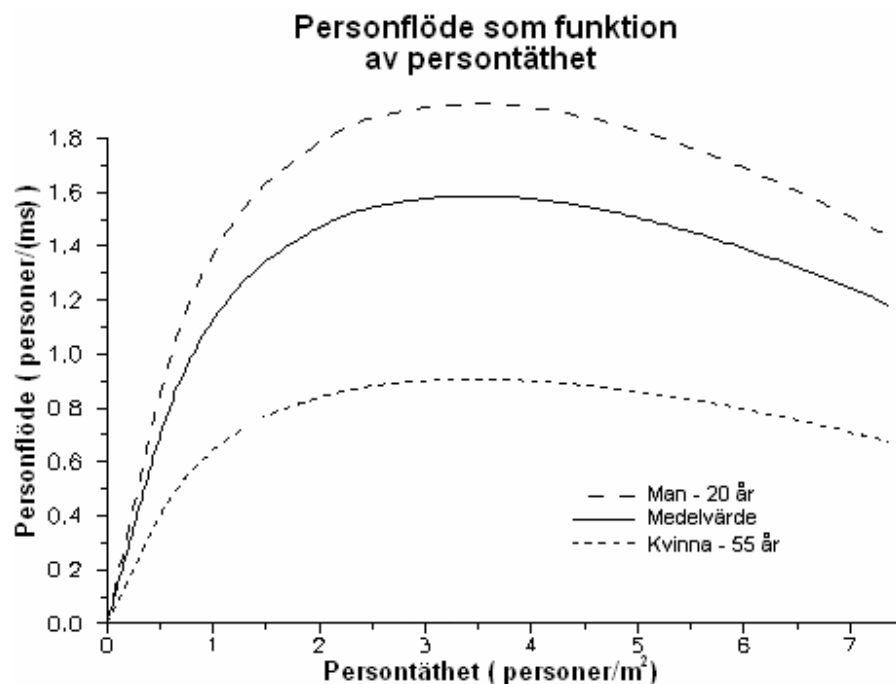


Diagram 3.3. Personflöde som funktion av persontäthet (Thompson, 1994).

Ur diagram 3.3 går att utläsa att det maximala personflödet i Simulex är 1,9 personer per meter och sekund för en vuxen man. På grund av att personflödet styrs direkt av persontätheten får ekvation 3.3 ytterligare vikt och validiteten hos denna har stor betydelse för programmet.

3.1.3 Persontyper och sammansättningar

Som tidigare nämnts så är ekvation 3.4 kritisk för programmets tillförlitlighet. En parameter i ekvationen är kroppsbredd och genom detta får konstruktionen av personer och sammansättningen av dessa betydelse. I Simulex finns möjligheten att välja vilken typ av personsammansättning som önskas hos de personer för vilka en simulering skall utföras och de variablerna kan sedan indirekt påverka resultaten genom kroppsbredden hos individerna. Dessa personsammansättningar är förprogrammerade och ett urval av dessa finns listade i tabell 3.1.

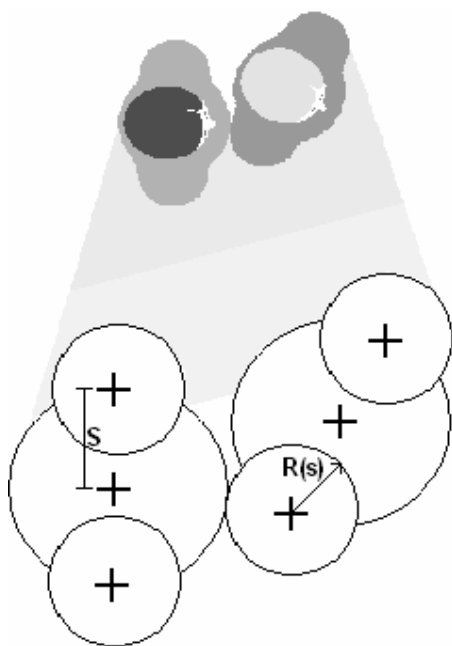
Persontyp	Man (%)	Kvinna (%)	Barn (%)	Äldre (%)
Office Staff	60	40	0	0
Commuters	50	40	10	0
Shoppers	35	40	15	10
School Children	3	7	90	0
All Male	100	0	0	0
All Female	0	100	0	0
All Children	0	0	100	0
Elderly	0	0	0	100

Tabell 3.1. Förprogrammerade personsammansättning i Simulex.

Persontyperna skiljer sig inte bara i storlek utan även i gånghastigheter. Skillnaderna mellan persontyperna finns presenterade i tabell 3.2 och figur 3.4 nedan.

Persontyp	S (m)	R(s) (m)	Medelgånghastighet (m/s)	+/- Varians (m/s)
Man	0.16	0.10	1.35	0.2
Kvinna	0.14	0.09	1.15	0.2
Barn	0.12	0.07	0.9	0.3
Äldre	0.15	0.09	0.8	0.3

Tabell 3.2. Olika persontypers kroppsbyggnad.



Figur 3.4. Kroppsuppbyggnad i Simulex (Simulex Technical Reference, 2000).

Det finns möjlighet att ändra på både personsammansättningarna i grupperna och olika egenskaper hos individerna genom att ange de önskade egenskaperna i programmets ini-fil. De egenskaper som går att ändra på hos en persontyp är bland annat kroppsbyggnad, gånghastighet vid plant och lutande underlag, variation av gånghastigheter hos en persontyp och färg. För persammansättningen finns det möjlighet att skapa nya sammansättningar genom att ange vilka persontyper som skall ingå och hur stor del de ska motsvara i sammansättningen. Personsammansättningen är begränsad till att tio olika persontyper kan ingå i populationen.

3.1.4 Förflyttningsberäkningar och positioner

Vid varje tidssteg i simuleringen beräknas i vilken riktning varje individuell person ska röra sig. Detta görs genom att varje persons omgivande gridcellers avståndsvärde tas i beaktande. Personen väljer alltid att röra sig till den gridcell som innehar det lägsta avståndsvärdet, förutsatt att den inte innehåller något hinder eller att avståndet till annan person då underskrider 0,3 meter. Trots att Simulex är gridnätsbaserat så innehar varje individ en specifik position i planet som inte begränsas av gridnätets upplösning. Till skillnad från Steps blockeras inte celler där en person står för andra individer. Ett antal studier har genom åren hävdats att Simulex använder sig av en rörelsegrid på 0,2*0,2 kvadratmeter, men detta stämmer dock endast till viss del. Beräkningarna baseras visserligen på ett sådant rutnät, men bara som referens för att skapa rörelsevektorer hos individerna och begränsar inte riktningen i vilken personerna skall röra sig och deras positioner. Positionsangivelser fastställs med en noggrannhet av 0,001 meter och påverkas alltså inte av gridnätets upplösning. Genom att personerna har specifika positioner och med hjälp av deras kroppsbyggnad så utförs beräkningar på 440 celler runt varje person (*Thompson, 2004*). Det gör att varje person kan ändra riktning med en exakthet på cirka 2,5 grader för varje tidssteg.

3.2 Steps

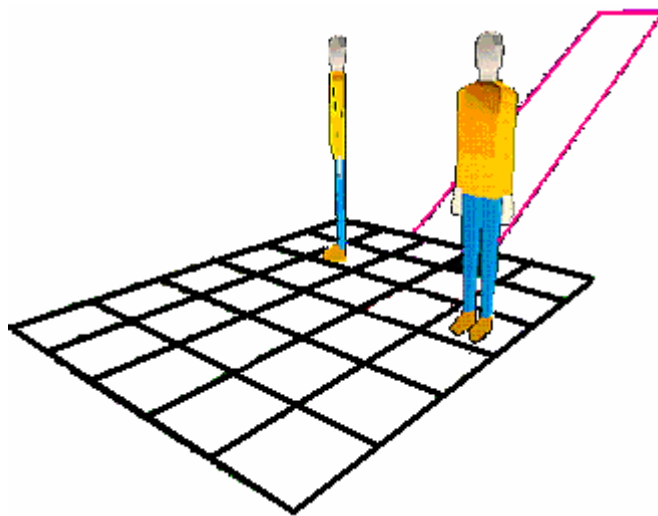
Programmet utvecklades av företaget Mott MacDonald. Från början var avsikten att undersöka olika typer av situationer som kan uppkomma bland fotgängare i normala situationer, som till exempel vid en tunnelbanestation. Det har på senare tid dock blivit mer generellt och kan nu även användas för att simulera utrymningsituationer. Steps har sitt ursprung från fortgående undersökningar av Mott McDonald och den första simuleringversionen presenterades 1997 (*Hoffmann och Henson, 1997*). Beskrivningen om Steps baseras på programmets hjälpfil, den tekniska beskrivningen (*Waterson, 2003*) och intervju med en av företagets representanter (*Andersson, 2004*).

Steps skiljer sig framförallt från de äldre utrymningsprogrammen genom att det är tredimensionellt och därmed ges användaren möjligheten att utföra simuleringar i miljöer som visuellt liknar den verkliga i högre grad än tidigare. Det medför att simuleringarna kan vara lättare att presentera och att en lekman lättare kan förstå resultaten från dessa. Programmet erbjuder även möjligheten att skapa en film över simuleringen i vilken det är möjligt att nyttja flera olika kameravinklar och avstånd.

I programmet finns möjlighet att själv välja vilka värden som önskas för en rad olika parametrar. Det medför att inlärningströskeln är relativt hög i jämförelse med andra liknande program, som exempelvis Simulex.

3.2.1 Geometri i Steps

Den geometri som önskas användas i programmet kan uppföras på två olika sätt, antingen kan den skapas direkt i programmet eller importeras från CAD-ritningar. För att skapa den geometri som önskas användas nyttjas två principiellt olika parametrar, *planes* och *paths* (Waterson, 2003). *Planes* används för alla typer av plan där fotgängare kan förflytta sig som till exempel vanliga golv, men även lutande plan och ibland även trappor. Med *paths* menas gångar och liknande där det inte finns möjlighet för personer att mötas eller gå i bredd. Varje plan delas upp i ett gridnät med en av användaren vald storlek. Detta rutnät används som bas av programmet för att lösa de algoritmer som ligger till grund för hur individerna ska agera i simuleringen. Gridnätet åskådliggörs i figur 3.5.



Figur 3.5. Geometri och gridsystem i Steps.

3.2.2 Egenskaper hos individer/grupper

Individerna i simuleringarna kan i huvudsak ges sex olika typer av egenskaper. Dessa är:

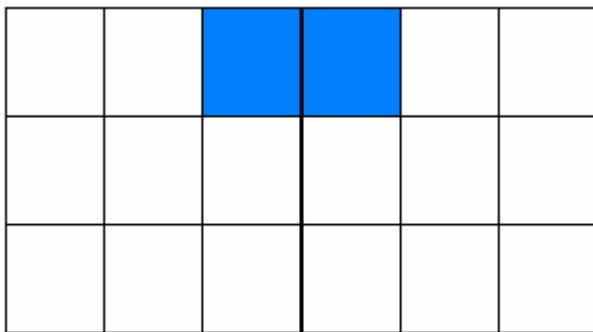
- Maximal gånghastighet.
- Lokalkännedom.
- Tålamod för agerande vid köbildning.
- Samhörighet, inom exempelvis en familj.
- Tid till individen börjar röra sig mot en utrymningsväg .
- Kroppsstorlek.

Dessa egenskaper ges ofta till hela grupper med ett av användaren bestämt antal individer och sammansättning. Det finns dock möjlighet att ge varje individ specifika egenskaper. Det finns även möjlighet att skapa en slumpmässig fördelning för egenskaperna i en grupp individer för att på så sätt skapa en befolkningsgrupp som inte innehar exakt samma egenskaper.

När kroppsstorleken anges i programmet måste användaren ta gridstorleken i beaktande. Då gridstorleken anges ska användaren även ange om beräkningarna ska utföras som "fin grid" eller inte. Om inte beräkningarna utförs som "fin grid" kommer en person att uppta en gridcell och denna kan endast innehålla en person. Om beräkningarna å andra sidan utförs som "fin grid" kommer en person att kunna uppta mer än en gridcell, men fortfarande kan endast en person vistas i samma cell. Det får till följd att då inte "fin grid" används så är storleken på personen egentligen densamma som en gridcell. Om användaren till exempel vill använda sig av en gridstorlek på 0,5*0,5 kvadratmeter så kommer personerna också få den storleken och överskattas. Väljs en mycket liten gridstorlek och alternativet "fin grid" används kommer personerna få de dimensioner som har angetts i programmet och effekten av att endast en person kan befinna sig i en cell får mindre betydelse. Personplacering i gridcellen är cellens mittpunkt, till skillnad från Simulex som anger positionen i exakta kartesiska koordinater på millimetern när.

3.2.3 Avståndsberäkning

Då en simulering startas i STEPS börjar programmet med att beräkna en typ av avståndskarta till samtliga utgångar. Detta görs genom att programmet skapar en tabell med det valda gridnätet som grund. I figur 3.5 nedan ges ett exempel med ett rum som är 6 meter brett och 3 meter långt. Gridstorleken för rummet är en meter och de två färgade cellerna representerar utgångar.



Figur 3.5. Tabell skapad av Steps.

När programmet beräknar avståndet till utgångarna görs detta genom att cellen för utgången får värdet noll. Programmet adderar därefter värdet 1 för varje steg som tas i vågrät och lodrät riktning och $\sqrt{2}$ för diagonala förflyttningar. En blockerad cell ges värdet -1. Varje cell får på det sättet ett specifikt avståndsvärde. Detta åskådliggörs i figur 3.6 nedan.

2	1	0	0	1	2
$1+\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	1	1	$\sqrt{2}$	$1+\sqrt{2}$
$2*\sqrt{2}$	$1+\sqrt{2}$	2	2	$1+\sqrt{2}$	$2*\sqrt{2}$

Figur 3.6. Avståndsberäkning i Steps.

Det sammanlagda avståndsvärdet multipliceras därefter med gridstorleken och ett beräknat avstånd erhålls.

3.2.4 Val av utgång

Då avståndskartan är beräknad ska varje individs väg ut ur geometrin beräknas. Detta görs huvudsakligen i två steg, ett då utgångsvalet görs och ett då vägen till utgången bestäms.

Valet av utgång baseras på ett poängsystem där individen väljer den utgång som har lägst poäng. Om två utgångar får samma poäng slumpas valet mellan dessa. Beräkningarna av utgångarnas poäng utförs för varje tidssteg (anges av användaren, normalvärde 0,1 sekund) och delas in i åtta steg

- Tid för att nå utgång.
- Tid för att köa vid utgång.
- Korrektion av tiden som ej åtgår vid addering av ovanstående tider.
- Tid för att nå slutet av kön.
- Korrektion för individer som kommer att nå utgången innan individen når slutet av kön.
- Beräkning av den verkliga kötiden vid utgång.
- Integrering av tålamodsegenskap.
- Summering av sammanlagd poäng.

Tid för att nå utgång

Med tiden för att nå utgång avses den tid det tar för en individ att nå en utgång då ingen kö har bildats. Denna beräknas genom att avståndet till utgången divideras med individens gånghastighet. Avståndet har sedan tidigare beräknats enligt kapitel 3.2.3 och varje individs gånghastighet har specificerats av användaren.

Tid för att köa vid utgång

Steps beräknar antalet personer som kommer att nå utgången före den aktuella individen. Antalet personer divideras därefter med utgångens personflöde och en uppskattning av kötiden erhålls. Antalet personer som kommer att nå utgången före den aktuella individen

beräknas genom att alla individer som har kortare *tid för att nå utgång* summeras. Personflödet genom utgången är definierat sedan tidigare av användaren.

Korrektion av tiden som ej åtgår vid addering av ovanstående tider

Om *tid för att nå utgång* och *tid för att köa vid utgång* adderas erhålls en tid som överskattar den verkliga tiden eftersom tiden för att gå kösträckan också räknas med. För att korrigera detta beräknar programmet köns längd när individen kommer fram och hur lång tid det skulle ta att gå den sträckan. Detta görs genom antagandet att de individer som kommer att nå utgången före den aktuella personen kommer att stå på de gridceller som har lägst avstånd till utgången. Eftersom programmet har beräknat hur många personer som kommer att nå utgången tidigare och avståndskartan är känd kan antalet celler och placering bestämmas. Avståndet beräknas sedan från den cell individen befinner sig i till den cell närmast kön som individen först kommer att nå. Detta avstånd divideras sedan med den, av användaren, förutbestämda gånghastigheten hos den aktuella individen.

Tid för att nå slutet av kön

Tiden för korrektionen subtraheras från *tid för att nå utgång* för att få *tid för att nå slutet av kön*. För personer som kommer att nå utgången före köbildning kommer denna tid att bli densamma som *tid för att nå utgång*.

Korrektion för individer som kommer att nå utgången innan individen når slutet av kön

I *tid för att köa vid utgång* har ingen hänsyn tagits till hur många personer som kommer att hinna passera utgången innan den aktuella individen når slutet av kön. För att korrigera för detta beräknar Steps hur många personer som kommer att nå utgången före det att den aktuella individen når den på samma sätt som vid *tid för att köa vid utgång* fast med *tid för att nå slutet av kön*. Det erhållna personantalet divideras sedan med utgångens personflöde för att få fram hur lång kötid som försvunnit fram till dess att den aktuella individen når slutet av kön.

Beräkning av den verkliga kötiden vid utgång

Tiden för korrektionen subtraheras från *tid för att köa vid utgång* för att få *verklig kötid vid utgång*.

Integrering av tålmodsegenskap

En individs *tålmod* definieras i programmet som ett värde mellan 0 och 1 och är ett mått på hur angelägen en person är att lämna en kö för att söka en alternativ utgång eller väg. Individer med högt *tålmod* accepterar att stå i kö länge än vad en otålig person gör. Personer med en *tålmodsegenskap* över 0,5 anses som tålmodiga och personer under 0,5 som otåliga. En justeringskoefficient för kötiden beräknas utifrån *tålmodsegenskapen* enligt ekvation 3.5 på nästa sida.

$$C_{\text{justerad kö}} = 1 - C_{\text{tålmod}} (0,5 - \text{tålmod}) / 0,5 \quad \text{Ekvation 3.5}$$

$C_{\text{tålmod}}$ är en av användaren bestämd koefficient mellan 0 och 1 som anger hur pass medvetna individerna i simuleringen är av fenomenet att personer kan tänkas lämna kön för att finna en alternativ utgång eller väg. Ur ekvationen går att utläsa att en person med *tålmod* över 0,5 kommer att göra att $C_{\text{justerad kö}}$ kommer att öka och en otålig person kommer att få koefficienten att minska. $C_{\text{justerad kö}}$ multipliceras sedan med *den verkliga kötiden vid utgång* och en ny kötid erhålls, *uppskattad kötid vid utgång*.

Sammanlagd poäng

Den slutliga poängen beräknas genom att *tid för att nå slutet av kön* och *uppskattad kötid vid utgång* adderas. För användaren finns här en möjlighet att styra individernas bedömningsförmåga och förståelse för situationen genom att en två koefficienter läggs till i formeln, se ekvation 3.6.

$$T_{\text{total}} = T_{\text{tid för att nå slutet av kön}} \cdot C_{\text{gång}} + T_{\text{uppskattad kötid vid utgång}} \cdot C_{\text{kö}} \quad \text{Ekvation 3.6}$$

Genom att välja låga värden för $C_{\text{gång}}$ och $C_{\text{kö}}$ så minskar T_{total} och blir lägre än det egentliga. Det leder till att individer väljer denna utgång på grund av att den har lägre poäng än en annan, men i själva verket så tar det längre tid att utrymma den vägen. Detta är modellens justering för det faktum att personer egentligen inte kan bedöma tiden för olika alternativ så exakt som det redovisade poängsystemet medger.

Lokalkännedom

Med *lokalkännedom* menas i hur hög grad individerna i en grupp är medvetna om de utgångar som finns. Lokalkännedomen kan väljas mellan 0 och 1. Om lokalkännedomen sätts till 0 för en grupp individer för en utgång vet ingen av dessa om den aktuella utgången. Väljs istället lokalkännedomen 1 känner alla till utgången.

3.2.5 Vägen till utgången

När den utgång som skall användas har bestämts så ska individen förflytta sig dit. Varje individ har åtta möjliga förflyttningsriktningar från varje cell till en intilliggande cell. Det gör att individer under rörelse endast har möjlighet att göra riktningförändringar med vinkeln 45 eller 90 grader i Stepssimuleringar. Varje intilliggande cell har sedan tidigare ett beräknat avståndsvärde (se kapitel 3.2.3) och valet genomförs på så sätt att förflyttning sker till den cell som har lägst avståndsvärde. På så sätt förflyttar sig individen hela tiden den kortaste vägen mot målet. Om en eller flera av de åtta aktuella cellerna är blockerade görs förflyttningen istället till den cell som har lägst avståndsvärde så till vida att den har lägre värde än den cell

som individen befinner sig i. Om ingen av cellerna har lägre avståndsvärde eller om samtliga kringliggande celler är blockerade avvaktar individen och står stilla.

Hänsyn till minskning av gånghastighet på grund av persontäthet eller avstånd till andra tas ej. Personerna förflyttar sig mellan celler med sin maximala gånghastighet och tvärstannar följaktligen om omgivande celler är blockerade. Sedan förflyttar de sig framåt i den takt omgivande celler blir lediga. Konsekvensen av detta blir att simuleringar av trånga och långa korridorer med hög persontäthet inte kommer att ge ett med verkligheten överrensstämmande resultat. Användaren måste då kompensera de förenklingar som modellen baseras på med att minska gånghastigheterna.

3.2.6 Gånghastighet och personflöde genom utgångar

På grund av att Steps beräkningar av individernas positioner är strängt baserat kring simuleringens gridnät så tas ingen hänsyn till hur gånghastigheten varierar med avståndet till framförvarande personer. Det gör att personerna rör sig med den angivna gånghastigheten så länge någon av de åtta kringliggande gridcellerna har ett lägre avståndsvärde och inte är blockerad (*Andersson, 2004*).

Personflödet genom utgångar anges manuellt av användaren när egenskaperna för utgångarna anges. Standardalternativ finns, och dessa baseras på experimentellt framtagna dimensionerande flöden i vilka persontäthet, gånghastighet och passagemått. Detta är egentligen i det enda avseende som modellen beaktar persontäthets- avstånds- och hastighetssamband, men detta i en för utrymningsresultatet mycket viktig aspekt. Personflödet genom dörrar kommer att inverka på hastigheten i kön, enligt resonemanget i kapitel 3.2.5. Kommande version av programmet kommer att i högre grad att använda sig av beräkningar för avstånds- persontäthets- hastighetssamband.

3.3 Persias

Persias är utvecklat vid Universitetet i Edinburgh och är ett program som gör det möjligt att analysera rörelser inom ett känt område som tidigare filmats. De rörelser som kan vara av intresse att analysera kan till exempel vara gånghastigheter i olika typer av miljöer och situationer, avstånd mellan individer och liknande. Noggrannheten hos mätningarna i Persias anges vara +/- 5 % av det verkliga värdet (*Thompson, 1994*).

Analysen går till så att den area där analysen skall utföras mäts upp och filmas av en stationär kamera. Filmutrustningen får efter detta inte flyttas förrän all data samlats in. Den rörelse som skall analyseras filmas och därefter konverteras filmen till AVI-format om inte digitalkamera använts vid filmningen och formatet redan är AVI. Filmen öppnas i Persias och analysen startas genom att den tidigare uppmätta arean markeras på filmen och dess

proportioner anges i programmet. Analysen utförs sedan genom att, i det här fallet, två personer markeras med en T-formad markör. Därefter spelas filmen fram i ett tidssteg som väljs av användaren och samma personer markeras igen. Tidssteget kan väljas från 0,06 sekunder och i denna analys har tidssteg om 0,24 sekunder använts. Denna procedur upprepas så länge personerna är kvar i den uppmätta rutan. Persias kan utifrån markörernas förflyttning i den kända arean och det kända tidssteget beräkna bland annat hastigheten hos båda markörerna, avstånd mellan dessa och vilka riktningsförändringar som gjorts.

4 Metod

Utredningsmetoden som använts är jämförelse mellan tre fullskaliga utrymningsituationer och beräkningar med datormodellerna Simulex och Steps samt handberäkningar. Det bör påpekas att utrymningsituationerna inte är evakueringsförsök i egentlig mening, då utrymningen inte initierats av utrymningslarm eller liknande. Effekterna av detta diskuteras vidare i kapitel 6.

4.1 Fältmätningar

Fältmätningarna har utförts vid tre tillfällen. Samtliga är utförda på Malmö Stadion i samband med allsvenska matcher under hösten 2004. De matcher under vilka fältmätningarna genomfördes redovisas i tabell 4.1 nedan. Tidsangivelserna gäller för de tidpunkterna då mätningarna genomfördes.

Benämning	Match	Tidpunkt	Väder	Resultat
Match 1	Malmö FF – Djurgårdens IF FF	2004-09-20, 21.00	Regn, blåst, 13°C	2-0
Match 2	Malmö FF – Hammarby IF	2004-09-26, 21.00	Uppehåll, 14°C	4-3
Match 3	Malmö FF – Landskrona BOIS	2004-10-18, 21.00	Skurar, 9°C	0-1

Tabell 4.1 Matcherna under vilka fältmätningarna utförts.

Resultaten i matcherna kan tyckas av ringa akademiskt intresse, men de visade sig i högsta grad inverka på utrymningens förlopp, då förlustmatchen genererade märkbart snabbare utrymning. Detta beror på att utrymningen då verkställdes än mer samlat eftersom färre var intresserade av att stanna kvar för att hylla laget.

Försöken dokumenterades med hjälp av två videokameror. En stationär digital videokamera användes för inspelning av en yta precis utanför utgången i syfte att registrera information av gånghastighets-, personflödes-, och avståndsmätningar mellan personer samt total utrymningstid. Den andra kameran som användes var en rörlig videokamera för registrering

utrymningsvägen från sittplatssektionen som ligger på etaget ovan område A. Detta medför vissa komplikationer för mätningarna av personflödet och simuleringarna, men har beaktats i analysen.

Det har inte utförts några kvantifieringar av populationen förutom i avseende på antal, men det kan konstateras att variationen i ålder, kön och rörelseförmåga är stor. Viss information av sammansättningen kan dock fås av medlemsfördelningen i supporterklubben, där 18 % uppges vara kvinnor.

Fältmätningarna har som sagts genomförts vid tre tillfällen. Av dessa har utrymningstiden mätts samtliga gånger, men i avseende på mätning av gånghastighet och personflöde har endast de två senare mätningarna kunnat användas. Det första mättillfället präglades av tekniska problem och extrema väderförhållanden som i praktiken innebar att filmningen av försöksytan inte kunde hållas stationär, en förutsättning för mätningarna av gånghastighet.

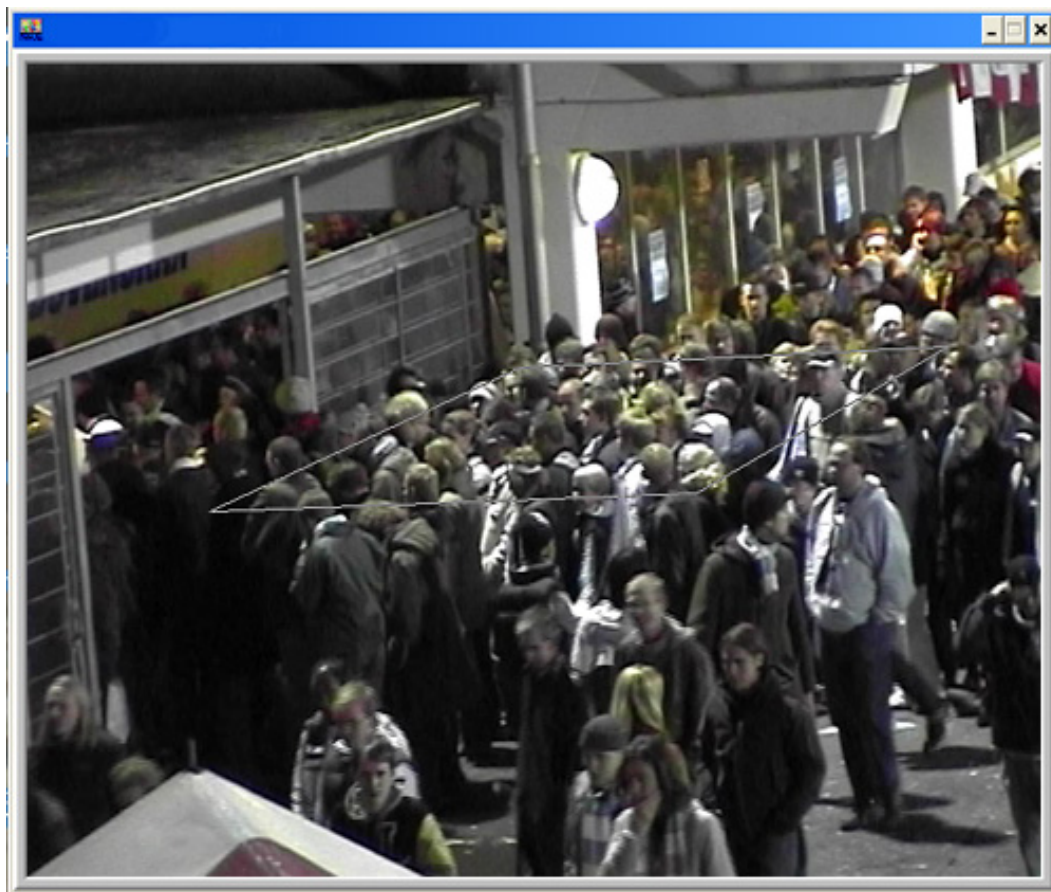
4.1.1 Mätning av utrymningstiden

Utrymningstiden har mätts med tidtagning på plats och kontroll av denna på videoinspelningarna. Tidtagningen startades då majoriteten av åskådarna påbörjade förflyttning mot utgångarna och avslutades då samtliga lämnat område A. Initieringen av utrymningen befarades initialt vara differentierad över tiden och därmed svårbestämd men det visade sig att de som stod närmast utgångarna påbörjade utrymningen i det närmaste momentant vid slutsignalen i matchen. En försumbar del av publiken valde att lämna arenan före slutsignalen och längre bort från utgångarna påbörjades förflyttningen med viss förskjutning i tid. Detta har beaktats individuellt för varje mättillfälle vid simuleringarna.

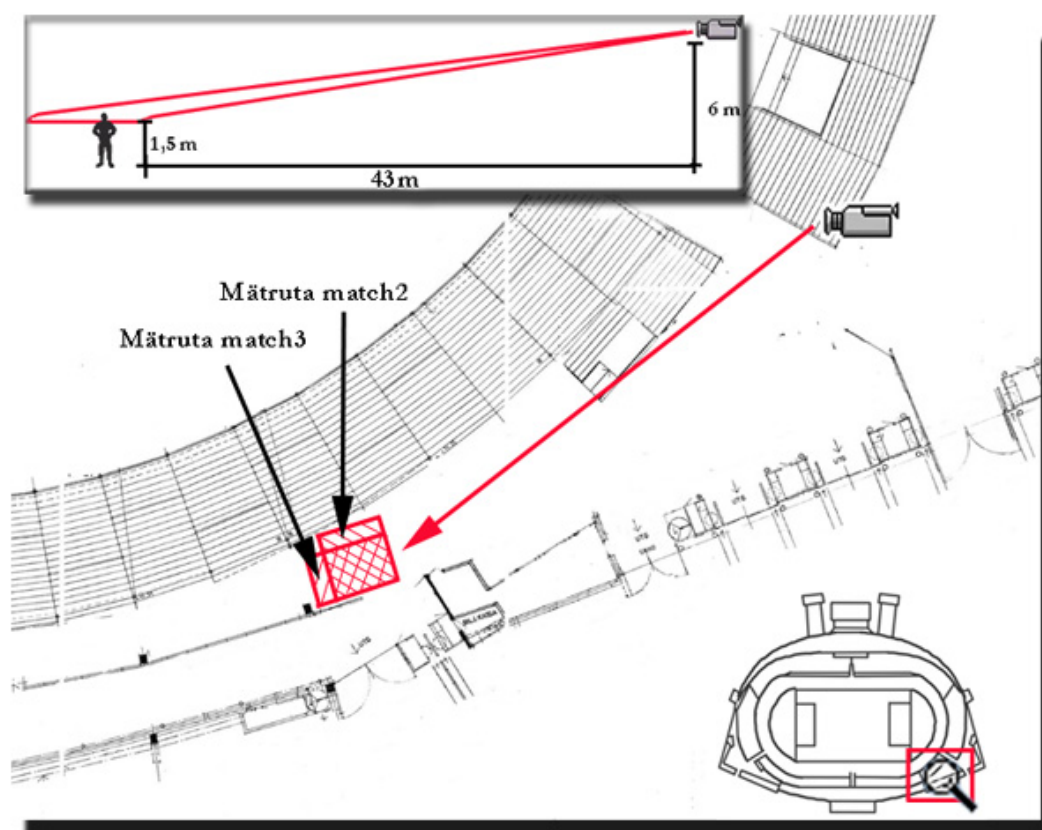
4.1.2 Mätning av gånghastigheten

Mätningarna av gånghastigheter har genomförts med hjälp av datorprogrammet Persias, som beskrivs i kapitel 3.3. En bild från mätningen vid match 3 visas i figur 4.2.

Ytan som filmades var belägen i direkt anslutning till utgång 1, innanför utgången. Denna mättes upp till 5*4 meter vid match 2 och 6*3 meter vid match 3, schematiskt beskrivet i figur 4.3. Anledningen till ändringen i ytstorleken var att underlätta mätningarna något och anpassa ytan till det ställe där det största personflödet var beläget. Detta torde dock inte ha någon inverkan på mätresultaten. Placeringen av kameran var enligt figur 4.3 43 meter från försöksytan och med en elevation på 6 meter (högst upp på läktaren i kurvan). En förutsättning för mätningarna är att personerna som analyseras är omedvetna om detta. Detta krav får anses vara uppfyllt då kamerapositionen är att betrakta som icke lätt identifierbar.



Figur 4.2 Bild från mätningarna vid match 3.



Figur 4.3 Ritning över mätrutorna och kamerapositionen.

Mätning av gånghastigheter på olika personer utfördes var 10-15:e sekund. Eftersom tidsåtgången för passage genom mättrutan är ungefär 10-15 sekunder kan de typiska gånghastigheterna sägas vara uppmätta för hela utrymningsförloppet. Vid urvalet av personer i folkmassan på vilka gånghastighetsmätning skulle utföras var strävan att välja ut personer som var lätt identifierbara (på grund av till exempel klädsel eller huvudbeklädnad). För varje mätning valdes två personer som följde efter varandra genom försöksytan. Detta för att få en uppfattning om hur avståndet till framförvarande påverkar gånghastigheten. Den bakomvarande personen benämndes konsekvent person 0 och den framförvarande person 1 för att lättare kunna bearbeta mätresultaten.

De uppenbara svårigheterna med denna mätning var att även andra personer i folkmassan påverkade de två utvaldas gånghastighet och att två personer som inledningsvis följde efter varandra successivt skiljdes åt inom försöksytan. För att kompensera denna felkälla kompletterades mätningen med en persontäthet inom mättrutan för varje intervall som mätningar utförts på. På detta sätt fås en uppfattning om hur persontätheten inverkar på gånghastigheter.

Totalt genomfördes 63 mätningar vid match 2 och 50 mätningar vid match 3. Detta medför att antalet personer på vilka gånghastigheterna mättes var 226 stycken.

För att kontrollera exaktheten vid mätningarna genomfördes referensmätningar i inomhusmiljö, där kameravinkel, avstånd till mätruta och mätrutans storlek återskapades så att de liknade de förhållanden som förelåg vid mätningarna. Sedan jämfördes den hastighet som mättes upp med hjälp av tidtagning med den som Persias redovisade. Denna mätning utfördes 38 gånger.

För att kontrollera om samma mätning kan ge olika resultat utfördes ett test där samma person analyserades nio gånger. Detta för att ge en uppfattning om hur mycket användaren påverkar mätningarna.

Referensmätningarna användes sedan för att korrigera resultatet från fältmätningarna.

4.1.3 Mätning av personflödet

Personflödet analyserades för utgång 1 som videofilmades stationärt. Mätningen gjordes genom att manuellt räkna antalet som passerade utgången under tiosekundersintervaller. Analysen gjordes en bildruta i taget för större säkerhet i bedömningen.

I mitten av utrymningsskedet uppstår ett betydande flöde av personer som förutom de från område A som passerar genom utgång 1. Därigenom minskar personflödet genom dörren innanför utgång 1 något. Personflödet utanför dörren kommer från sittplatsläktaren och

detta är anledningen till att en uppskattning av personflödet endast kunde göras under de två inledande och avslutande minuterna av utrymningen.

Utgång 1 är 4,5 meter bred. Bredden på dörren innanför utgång 1 är tre meter. Motivet till mätningen av personflödet är att få en säkrare uppskattning av detta för handberäkningar och simuleringarna i Steps. Som tidigare nämnt skiljer sig uppfattningen om personflödet om man jämför de svenska dimensioneringsantagandena och de brittiska (1 respektive 1,2-1,8 personer per breddmeter och sekund). Det råder även osäkerheter om hur bredare öppningar påverkar det maximala personflödet. Ett ytterligare skäl att utföra personflödesmätningar är att de förbättrar uppskattningen av hur många personer som väljer utgång 1. Därför genomfördes även mätningar under den tid då utgång 1 är delvis blockerad av personer från sittplatsläktaren. Dessa kan dock inte sägas vara representativa för hur personflödet är generellt genom en utgång.

4.2 Simuleringar

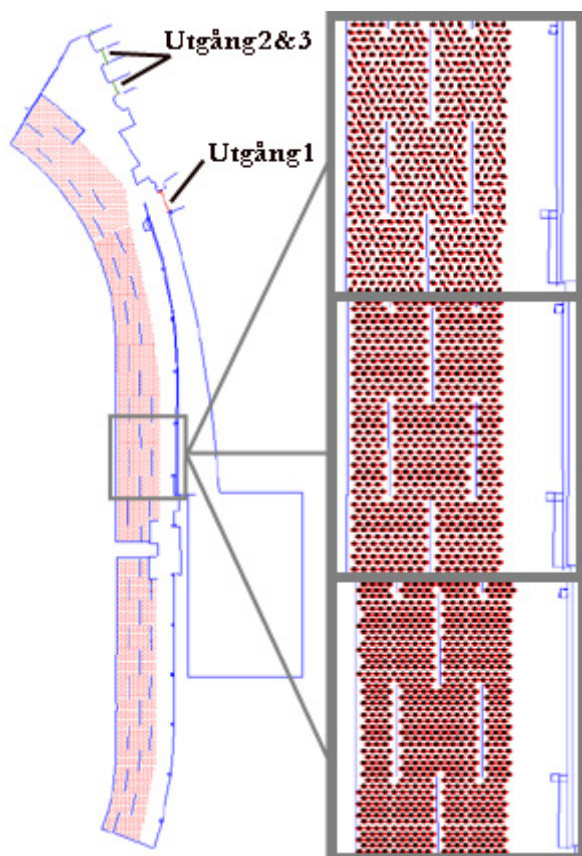
Strävan vid simuleringarna har varit att efterlikna de förhållanden som rådde vid de olika fältmätningstillfällena. Detta gäller då främst indataparametrar som personantal, personfördelning, storlek och gånghastighet hos individerna, val av utgång och fördröjning i igångsättande av utrymning bland vissa delar av publiken.

En förenkling i simuleringarna har varit att den läktarlutning som finns har ansatts till att vara en plan yta. Detta på grund av att det inte varit praktiskt möjligt att återskapa lutningen i simuleringarna. Effekterna av detta diskuteras vidare i kapitel 6.

De känslighetsanalyser som utförts är en utredning som beskriver hur ändringar i de antagna indataparametrarna, för vilka viss osäkerhet råder, påverkar sluttiden.

4.2.1 Simulering med Simulex

Den persontäthet som fanns vid mätningarna på Malmö Stadion kunde inte enkelt återskapas vid simuleringarna i Simulex då modellen har begränsningar avseende på möjlig persontäthet. Om persontätheten är för hög kommer programmet att varna för att problem kan uppstå och därefter placera in personerna horisontellt, uppställda på linjer. Detta inträffar då persontätheten överstiger 4 personer per kvadratmeter enligt utförda testsimuleringar. Simuleringar med ännu högre persontäthet visar att programmet klarar av persontätheter av cirka 4,9 personer per kvadratmeter, men överskrids detta kommer personerna ifråga att stå så tätt att de inte kan röra på sig överhuvudtaget. Riktlinjerna i simuleringarna har därför varit att maximalt applicera persontätheter på omkring 4 personer per kvadratmeter. Denna riktlinje ger även bra överrensstämmelse med den framräknade persontätheten på läktarna.



Figur 4.4 Till vänster: Ritningen som användes i Simulex. Uppe till höger: "Normalfallet" persontäthet understiger 4 personer per kvadratmeter. Mitten höger: Persontäthet på över 4 personer per kvadratmeter, men fortfarande möjligt att simulera. Nere till höger: Persontäthet på över 4,9 personer per kvadratmeter och simulering ej längre möjlig.

Tanken från början var att även simulera det personflöde från sittplatsläktaren som obstruerar utgång 1 under delar av utrymningen. Detta visade sig inte vara meningsfullt eftersom Simulex inte klarade av att återskapa ett sådant flöde genom dörren innanför utgång 1 så att personerna skulle påverkas av den egentliga blockeringen, mer om detta i kapitel 5.3.1.

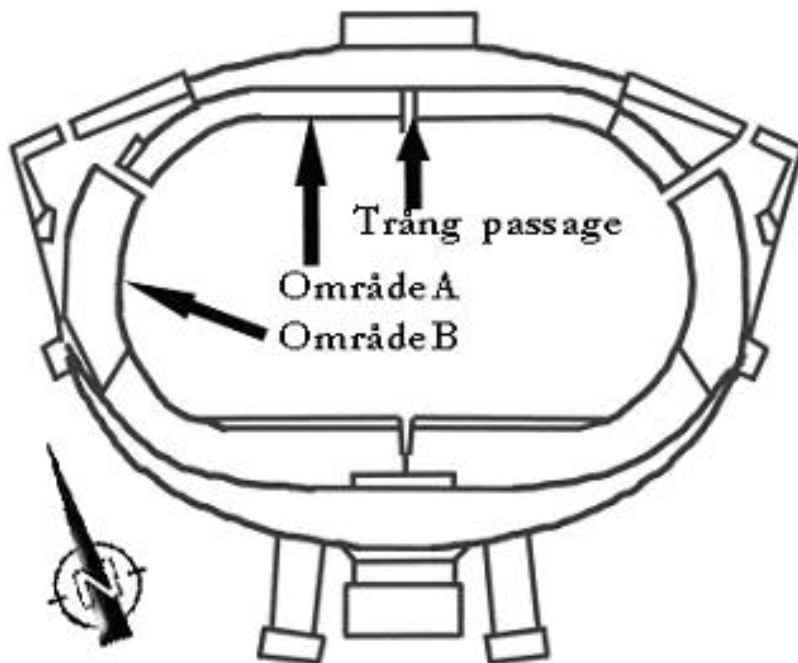
Vid simuleringen med Simulex har följande antaganden gjorts angående indataparametrar:

Antal som finns på område A

Eftersom det inte finns uppgifter på publikandelarna på område A och B (se figur 4.5 på nästa sida) har dessa uppskattats från visuella observationer. Följande antaganden har gjorts:

	Område A	Område B	Totalt antal
Match 1	4000	258	4258
Match 2	5000	735	5735
Match 3	4800	736	5536

Tabell 4.2 De antaganden som utförts angående personfördelning mellan område A och B.



Figur 4.5 Schematisk beskrivning av områdesuppdelning och trång passage på område A.

Publikfördelning med avseende på trång passage

I mitten av område A finns en trång passage. Majoriteten av publiken står på den västra sidan av denna passage och fördelningen har ansatts till att cirka 3/5 står väster om passagen. Det återges i nedanstående tabell:

	Väster om passage	Öster om passage	Totalt publikantal
Match 1	2400	1600	4000
Match 2	3000	2000	5000
Match 3	2900	1900	4800

Tabell 4.3 Publikfördelning med avseende på trång passage.

Val av utgångar

Fördelningen i publiken med avseende på val av utgångar har beräknats från personflödet vid utgång 1 enligt appendix A och visuella observationer som gav ett tydligt intryck att majoriteten väljer den närmsta utgången, utgång 1. Riktlinjen vid simuleringarna har varit att ungefär 3/5 av publiken väljer utgång 1.

	Utgång 1	Utgång 2 eller 3
Match 1	2400	1600
Match 2	3000	2000
Match 3	2900	1900

Tabell 4.4 Val av utgångar.

Populationssammansättning

Personsammanställningen har valts med en strävan att uppnå en blandad population, men om möjligt med en majoritet av män, för att motsvara den aktuella publiken bäst. Av de personsammanställningsstandarder som finns tillgängliga i Simulex ansågs inställningen

”Commuters” - pendlare motsvara detta bäst. Detta motsvarar 50 % män, 40% kvinnor och 10% barn. Egenskaperna för individerna beskrivs närmare i kapitel 3.1.3

Fördröjning i utrymningsinitiering

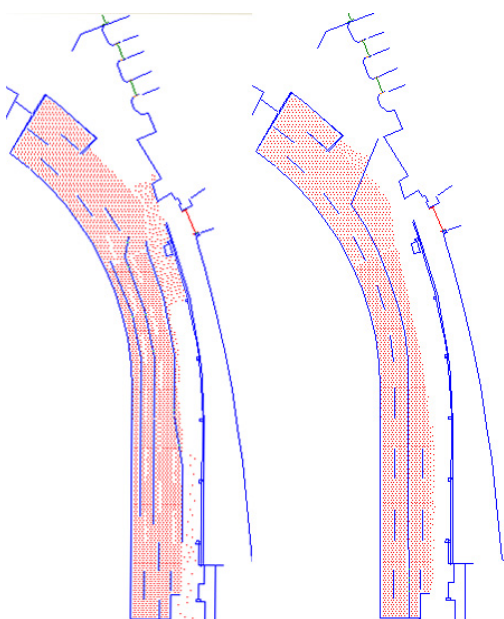
Den fördröjning i igångsättande av utrymning som uppstår, beror på att vissa delar av publiken stannar en stund för att hylla sitt lag. Denna tid varierar liksom antalet personer som stannar. Videoinspelningar från varje match har analyserats för att göra uppskattningar om detta förhållande. Den del av publiken som väljer att stanna är generellt placerad från det trånga passaget och 30-50 meter västerut, samt tio till 20 meter österut. Det finns även personer utspridda över den övriga läktaren som stannar, men detta har frångesetts vid simuleringarna eftersom deras påverkan av den totala utrymningstiden bedömts som ringa.

	Antal, tid	Antal, tid	Antal, tid
Match 1	2200, 0 sekunder	1800, 300 sekunder	-
Match 2	2400, 0 sekunder	2100, 300 sekunder	500, 500 sekunder
Match 3	3200, 0 sekunder	1600, 300 sekunder	-

Tabell 4.5 Fördröjning i utrymningsinitiering.

För att analysera hur ovanstående parametrar inverkar på slutresultatet har en känslighetsanalys utförts. Förändringar har även gjorts för att kontrollera om det går att få snabbare simuleringstider än de som tagits fram. Känslighetsanalyserna återfinns i appendix B. Förutom dessa utfördes nio extra simuleringar av de tre ursprungliga scenarierna (tre vardera) för att kontrollera om samma indatafil kan rendera i olika resultat.

I två av känslighetssimuleringarna användes en metod som bestod i att försöka valla in personerna mot utgångarna genom att använda barriärer i ritningen enligt figur 4.6.



Figur 4.6 De invallningsmetoder som prövats. Test 12 till vänster och test 13 till höger.

4.2.1 Simulering med Steps

Vad gäller publikfördelning och fördröjning i utrymningsinitiering gjordes samma antaganden som i simuleringarna med Simulex. Eftersom Steps ger fler valmöjligheter angående indataparametrar har fler antaganden gjorts i dessa simuleringar.

Personflöde genom utgångar

I Steps visade det sig till skillnad från Simulex vara meningsfullt att simulera det extra personflöde som uppstår på grund av de som evakuerar från sittplatsläktaren ovan område A. Detta återskapades förenklat genom att ansätta en yta med 1475 personer (antaget publikantal på sittplats) och en gång som ansluter till utgång 1 i enlighet med ritningar. Därför ansattes personflödet genom utgång 1 till det enligt mätningarna maximala 1,5 personer per breddmeter och sekund. Utgångarna 2 och 3 antogs ha ett personflöde av 1,2 personer per meter och sekund.

Personegenskaper och sammansättning

Följande antaganden har gjorts om kroppsstorlekar, gånghastigheter och sammansättning:

Persontyp	Bredd (meter)	Djup (meter)	Höjd (meter)	Gånghastighet (meter/sekund)	Andel (%)
Man	0,52	0,32	1,80	1,35	50
Kvinna	0,46	0,28	1,66	1,10	20
Barn	0,38	0,24	1,40	0,90	10
Genomsnitt	0,50	0,30	1,75	1,30	20

Tabell 4.6 Personegenskaper och sammansättning i Steps.

Kroppsstorlekar och gånghastigheter motsvarar de som Simulex använder sig av för motsvarande persontyper. För den del av läktaren där huvuddelen av klacken står har personsammansättningen modifierats något, andelen barn har ersatts av persontypen män. Detta på grund av att det är svårt för barn att observera matchen i klacken då persontätheten är avsevärt högre där. Därför har inga barn antagits stått i klacken. Klackens position är främst från och med den trånga passagen och 30-50 meter västerut, beroende på åskådarantal.

Lokalkännedom

I simuleringarna förutsattes alla känna till utgång 1, 40 % antogs känna till utgång 2 och lika stor andel antogs känna till utgång 3. Detta innebär inte att 40 % kommer att välja utgång 2 och 3 enligt beskrivningen i kapitel 3.2.4. Därför redovisas det faktiska antalet som valt respektive utgång i analyskapitlet, kapitel 5.3.2.

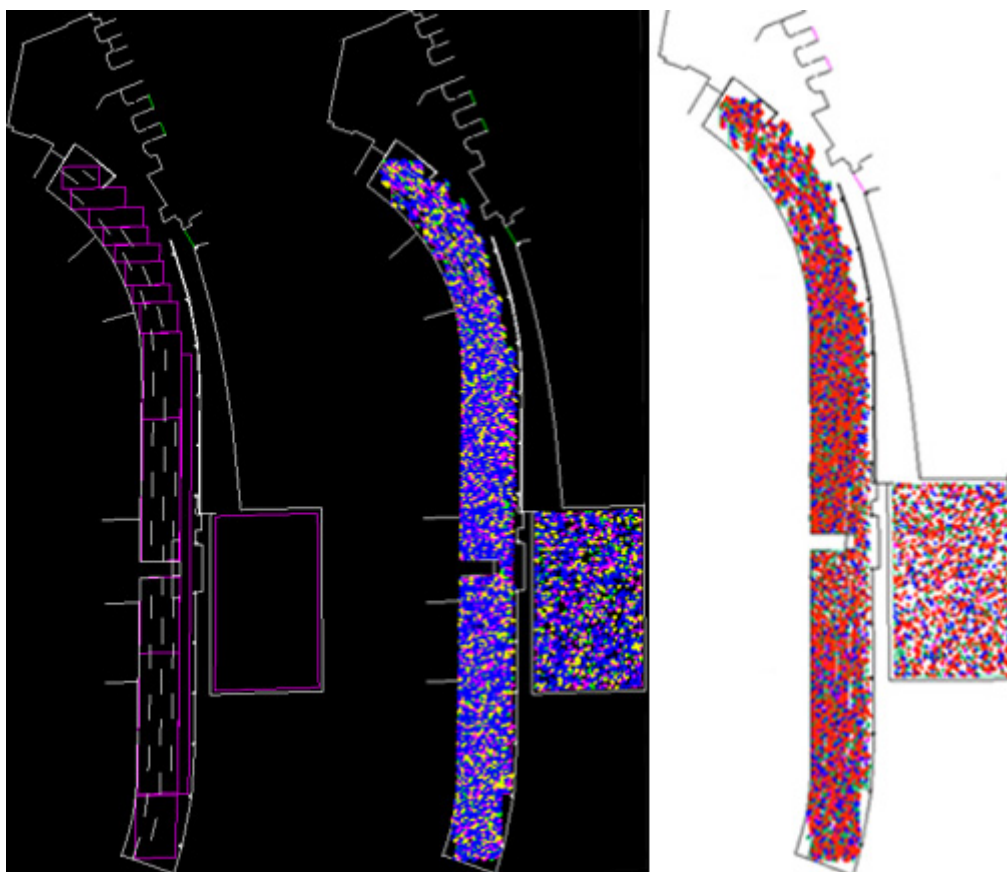
Intelligens och tålmod

Koefficienterna $C_{g\ddot{a}ng}$ och $C_{k\ddot{o}p}$, som beskrivs i kapitel 3.2.4 har ansatts till 1,0. Detta innebär att personerna utför korrekta avvägningar av vilken väg som är snabbast, förutsatt att de känner till mer än en utgång. Koefficienten $C_{t\ddot{a}lamod}$ har satts till 0, vilket innebär att tålmodsparemetern ej beaktas.

Gridnät

Det gridnät som valts är de av Steps rekommenderade 0,5*0,5 meter, ej fin grid. Känslighetsanalyser av detta antagande skulle sedermera komma att uppdaga häpnadsväckande insikter om modellens uppbyggnad.

Personerna placeras in i rektanglar som är rätvinkliga mot ritningens kanter enligt figur 4.7. Detta innebär en förenkling, men den torde ha marginell inverkan på slutresultatet.

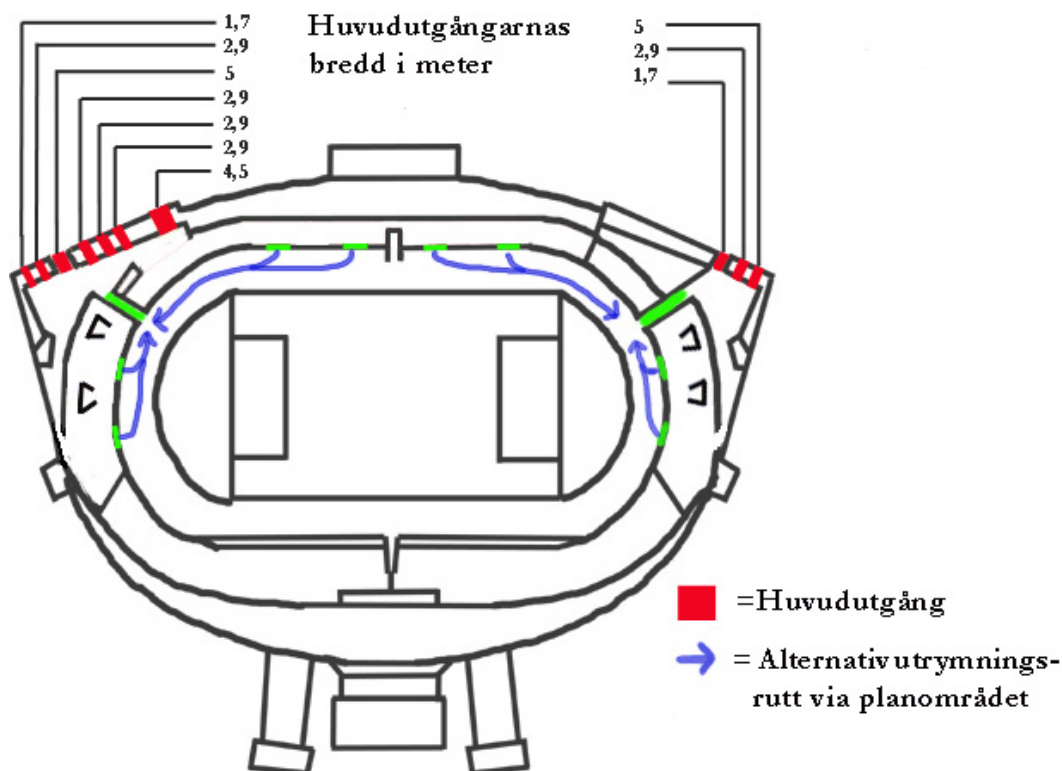


Figur 4.7 Till vänster beskrivs de ytor på vilka personerna placeras in. Bilden i mitten och till höger åskådliggör hur bilderna bearbetats för en tydligare grafisk framställning.

De känslighetsanalyser som utförts på simuleringarna med Steps beskrivs i appendix B.

4.2.2 Simulering av utrymning av Malmö stadion

En eventuell utrymning sker enligt evakueringsplanen beskriven i kapitel 2.3. Till skillnad från situationen i fältmätningarna öppnas då samtliga utgångar och grindar mot planen av publikvårdsorganisationen. Det totala antalet utgångar uppgår då till tio stycken med en total bredd av 32,4 meter. Det är då maximalt 11200 personer från ståplats som använder dessa utgångar. De generella principerna för utrymningen beskrivs i figur 4.8. Förutom de alternativa utrymningsrutterna används naturligtvis de ordinarie utrymningsvägarna som vanligt.

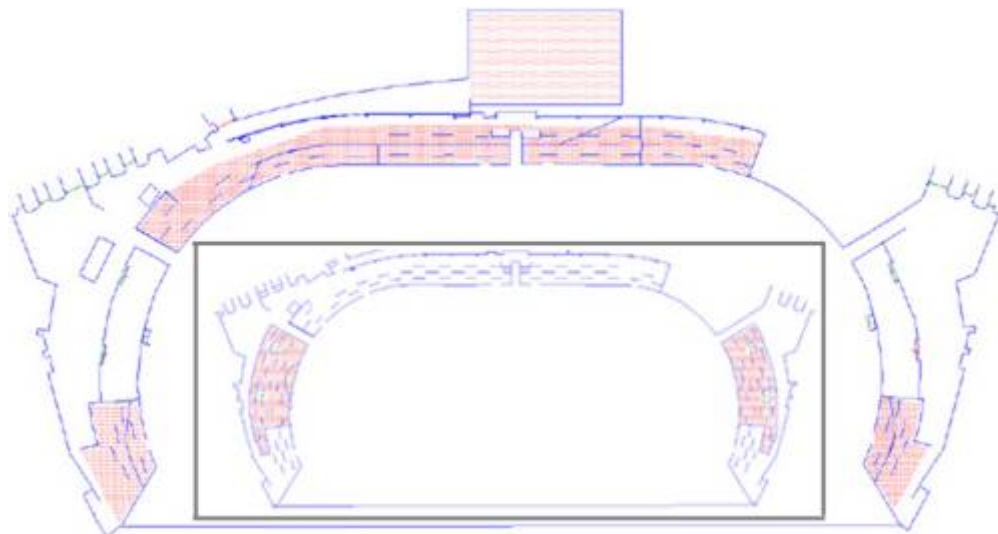


Figur 4.8 Tillgängliga utrymningsvägar vid utrymning.

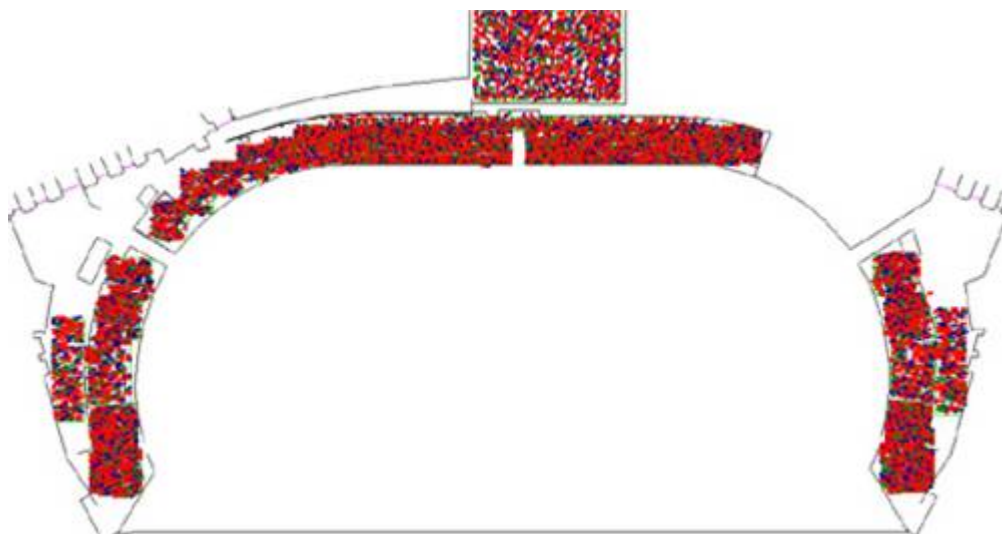
Utrymningen har simulerats i jämförelsesyfte för att få en uppfattning om storleksordningen på förflyttningstiden i en verklig utrymningssituation. Simuleringarna har utförts i Simulex och Steps på det maximala åskådarantalet för de aktuella ståplatssektionerna, 11200 personer och schematiskt för sittplatsläktaren ovan norra ståplats som rymmer 1475 personer. Simuleringen av sittplatssektionen gjordes som tidigare nämnts för att efterlikna det ytterligare personflödet som uppstår vid utgång 1, men har egentligen endast betydelse vid simuleringarna i Steps.

Det är endast förflyttningstiden som analyseras och därför har inga antaganden om varseblivningstid och besluts- och reaktionstid gjorts. Alla påbörjar utrymning samtidigt. Personantalet har antagits vara det maximala för varje sektion. Detta innebär 5200 personer på område A (Norra ståplats), 3000 på område B (Västra ståplats), 3000 på Östra ståplats (Sektionen på högra kortsidan i figur 4.8) samt de 1475 personerna på Norra sittplatsläktaren som förenklat simulerats. Antaganden om persontyper och personsammansättning har utförts som i tidigare simuleringar för respektive program. Personfördelningen på respektive sektion har utförts enligt samma ingångsvärden som i övriga simuleringar. Val av utgång (Simulex) respektive lokalkännedom (Steps) har utförts så att alla känner till samtliga utgångar. Detta antagande baseras på det faktum att publikvårdsorganisation och speaker i högre grad anger vilka utrymningsvägar som kan användas i en utrymningssituation. För att erhålla en verklighetstrogen fördelning med avseende på användande av utgångar i Simulex har läktarna delats in i sektioner enligt figur

4.9. Antaganden rörande personflöden genom dörrar i Steps är likadana som för de ordinarie scenarierna.



Figur 4.9 Utrymning av Malmö Stadion i Simulex. Infälld bild i mitten av ritningen visar hur del av västra och östra läktarna simulerats som plan två.



Figur 4.10 Utrymning av Malmö Stadion i Steps.

Personinsättningen i Steps har enligt figur 4.10 modifierats något för att få plats med alla individer. Då simuleringarna i Steps endast utförts tvådimensionellt har de förbindelsegångar som finns mellan västra och östra läktarna och utrymningsvägarna antagits vara plana. Egentligen är de utformade som korta trappor. Detta är en förenkling som inte torde ha nämnvärd inverkan på slutresultatet då det framförallt är personflödet genom utgångarna som är avgörande för utrymningstiden.

4.3 Handberäkningsmetod

En utrymningsberäkning enligt handberäkningsmetod genomförs för de tre scenarierna för att utröna om denna metod är tillämpbar på stora folkmassor. Det är endast förflyttningstiden som beräknas. Några modifieringar för köbildningar inne i lokalen och differentierad fördröjning i påbörjandet av utrymningen är inte möjlig att genomföra med denna metod. Eventuell köbildning vid den trånga passagen har dock beaktats i uträkningarna.

Beräkningen utförs enligt ekvation 4.1 och 4.2 (*Brandskyddshandboken, 2002*):

$$t_{\text{Utrymning}} = t_D + t_G$$

$$t_D = N/Bf \quad \text{Ekvation 4.1}$$

$$t_G = L/v \quad \text{Ekvation 4.2}$$

$t_{\text{Utrymning}}$	= Total utrymningstid
t_D	= Passagetid genom en dörröppning (sekunder)
N	= Antal personer (Per dörr)
B	= Bredd i förbindelse (meter)
f	= Flödeskonstant (personer/meter*sekund)
t_G	= Gångtid (sekunder)
L	= Kortaste gångavstånd till dörröppning (meter)
v	= Gånghastighet (meter/sekund)

Flödeskonstanten och gånghastigheten sätts enligt gällande dimensioneringsråd i Sverige och resultatjämförelse görs med korrigering enligt de uppmätta resultaten i fältmätningarna och de brittiska rekommendationerna. Beräkningarna frånser gångtiden, eftersom den eller de personer som står närmast utgångarna i praktiken står bredvid utgången.

5 Analys

Kapitlet innehåller en analys av simuleringarna och fältmätningarna. Resultatet av undersökningen presenteras.

5.1 Fältmätningar – utrymningstider

Detta är resultatet av de tre utrymningstidtagningarna:

Match 1:	Tidsåtgång:	10 minuter och 42 sekunder.
	Totalt personantal:	4258 personer.
Match 2:	Tidsåtgång:	13 minuter och 30 sekunder.
	Totalt personantal:	5735 personer.
Match 3:	Tidsåtgång:	10 minuter och 49 sekunder.
	Totalt personantal:	5536 personer.

Match 2 och match 3 borde ha likartad utrymningstid sett till personantalet. Skillnaden beror av slutresultatet i matchen, som i match 3 gav upphov till att populationen hade mer bråttom att lämna arenan. Det kan därmed argumenteras för att resultatet av utrymningen i match 3 kommer att uppvisa större likhet med simuleringarna, eftersom personerna i simuleringen går målmedvetet mot utgångarna när de börjat utrymma. I jämförelsen mellan simulering och fältmätning har det dock tagits hänsyn till den större fördröjningen av utrymningsinitieringen inom vissa grupper av populationen vid match 2. Match 1 var även det en vinstmatch och viss fördröjning noterades, dock inte i lika stor omfattning som vid match 2, på grund av de rådande väderomständigheterna (regn och blåst).

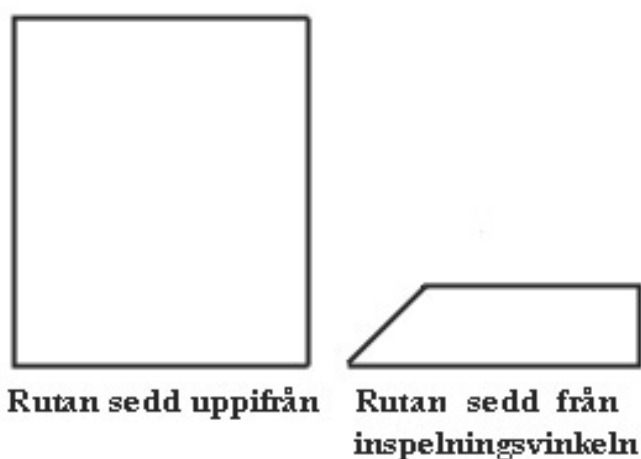
5.2 Fältmätningar – videoanalys

Videoanalysen består av mätningar som beskriver hur gånghastigheten påverkas av persontäthet och avstånd till framförvarande, samt en analys av personflödet genom dörren innanför utgång 1. De referensmätningar som genomförts ligger till grund för de korrigeringar av mätvärden som utförts.

5.2.1 Referensmätningar

För att analysera personers gånghastighet som funktion av avståndet till närmast framförvarande person när de lämnar stadion har programmet Persias använts. Analys har genomförts vid 63 tillfällen vid match 2 och 50 tillfällen vid match 3 och innefattar sammanlagt 226 personers gånghastigheter vid i genomsnitt 36 tillfällen.

För att kontrollera Persias validitet vid den inspelningsvinkel med vilken mätningarna vid match 2 och match 3 utfördes, genomfördes tre olika typer av referensmätningar. Dessa utfördes på så sätt att en person gick med en känd hastighet genom en känd mätruta. Skillnaden mellan försöken är riktningen med vilken personen går, samt gånghastigheten hos personen. Riktningsskillnaden analyserades på grund av att programmets känslighet för dimensionerna hos mätrutan är olika beroende av med vilken vinkel inspelningen skett. Om inspelningen gjorts med en liten vinkel kommer mätrutans lodräta utsträckning vid videoanalysen att förminskas i proportion till den vågräta. Det ger upphov till att rörelser i lodrät riktning överskattas i förhållande till vågräta förflyttningar. Detta visas schematiskt i figur 5.1. På grund av detta resonemang genomfördes således ett försök då en person gick i lodrät riktning genom mätrutan och ett i vågrät riktning.



Figur 5.1 Figuren visar hur små felmätningar i lodrät led får större konsekvenser än motsvarande i vågrät riktning.

Personens gånghastighet mättes genom att förflyttningstiden genom mätrutan mättes med hjälp av tidtagning. Genom att mätrutans vågräta och lodräta sträcka är känd, samt förflyttningstiden genom den, kunde genomsnittshastigheten beräknas.

Därefter jämfördes de beräknade gånghastigheterna med de medelhastigheter som beräknats från Persias resultat. Resultaten från de två försöken finns redovisade i diagram 5.1 och diagram 5.2.

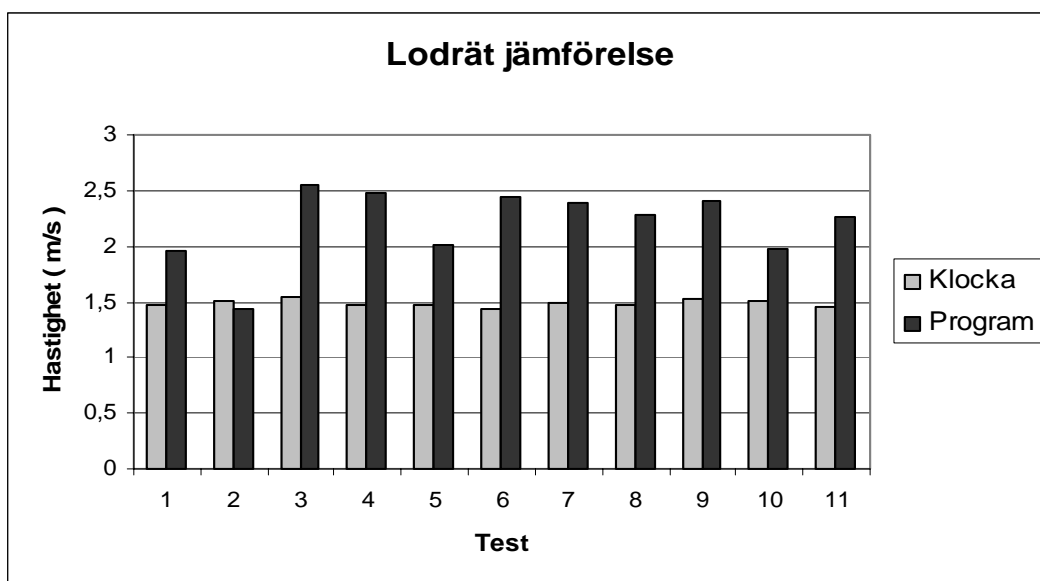


Diagram 5.1 Jämförelse mellan medelhastigheter beräknade i Persias och uppmätta hastigheter i lodrät riktning.

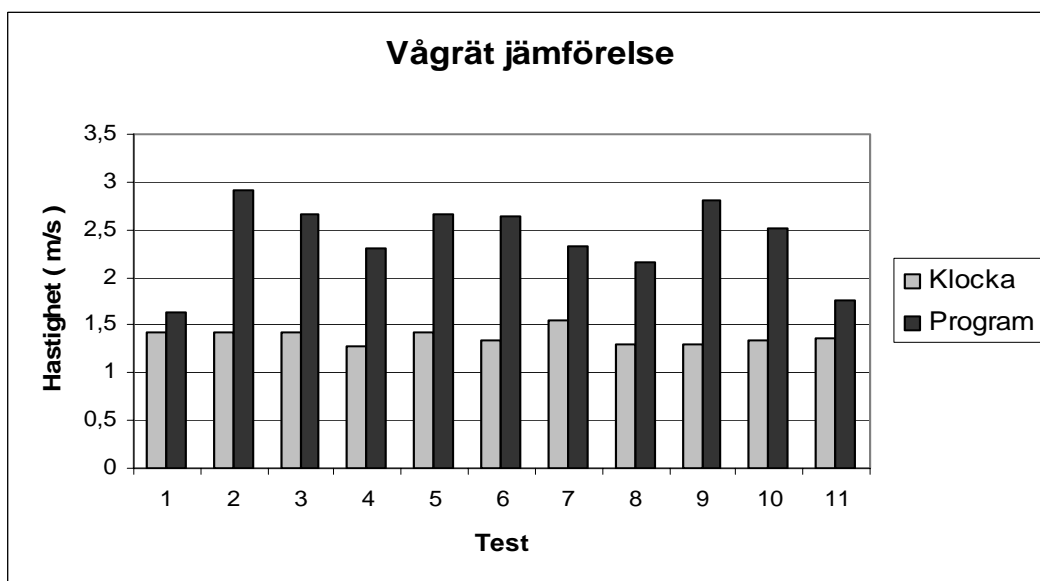
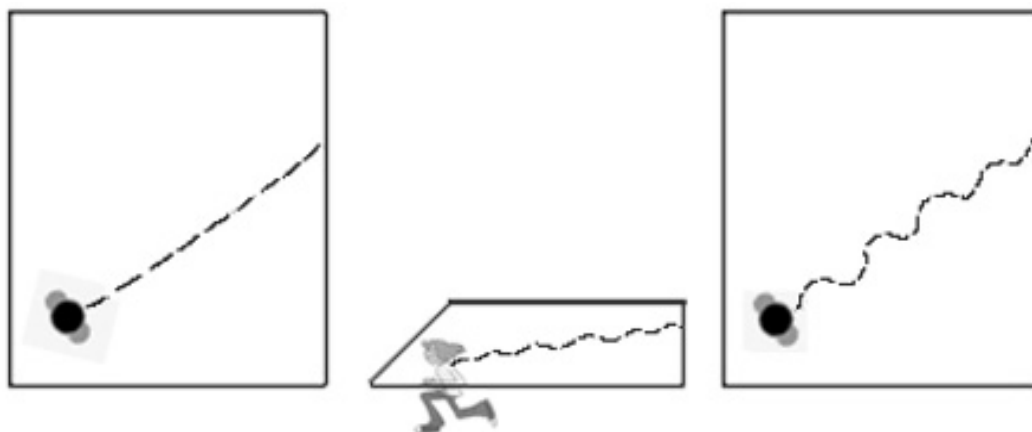


Diagram 5.2 Jämförelse mellan medelhastigheter beräknade i Persias och uppmätta hastigheter i vågrät riktning.

I diagram 5.1 och diagram 5.2 framgår det tydligt att Persias överskattar gånghastigheter i både lodrät och vågrät riktning. Den genomsnittliga överskattningen i det lodräta försöket är 60 % och i det vågräta 74 %. Denna överskattning av gånghastigheterna beror på den beräkningsgång programmet har. Genom personens förflyttningssträcka, beräknad utifrån förflyttningen av markören under ett tidssteg beräknar Persias hastigheten för det tidssteget. Det leder till att förflyttningen av markören är avgörande för resultaten och rörelsemönstret hos den person vars gånghastighet ska analyseras är av stor betydelse. Om exempelvis en

person tenderar att röra sig mycket i vertikal riktning (exempelvis genom en "guppig" gångstil) under sin förflyttning i vågrät riktning kommer Persias att överskatta förflyttningssträckan och därigenom hastigheten eftersom hastigheten inte anges som en vektor utan endast som storhet. Fenomenet beskrivs i figur 5.2

Det faktum att Persias överskattar förflyttningssträckan på grund av rörelsemönstret hos personen bygger till stor del på den använda inspelningsvinkeln. Om inspelningen hade skett rakt ovanför mätrutan hade rörelsemönstret saknat betydelse eftersom de vertikala rörelserna inte hade uppfattats vid videoanalys.



Figur 5.2 Till vänster beskrivs hur personens förflyttning ser ut. När denna förflyttning registreras i Perias (mitten) inverkar personens rörelsemönster så att skenbara rörelser i lodrät riktning (exempelvis genom guppig gångstil) ger upphov till en längre förflyttningssträcka än den verkliga (höger). Detta leder till att hastigheter kan överskattas.

Huruvida denna felkälla har övervägts vid andra studier eller ej är oklart. Några sådana resonemang har inte förts i tidigare rapporter. Det är möjligt att man ofta använt sig av en mer förlåtande inspelningsvinkel och inte reflekterat över detta problem. Men inspelningsvinkeln finns ej registrerad i tidigare rapporter och det är därför möjligt att problemet förbisetts. Detta skulle i sådana fall leda till att den gängse uppfattningen om gånghastigheter vid köbildning är felaktiga och överskattade. För vidare diskussion om detta, se kapitel 6.

I diagram 5.9 och 5.10 som presenteras på sidan 62 kan det skönjas att överrenstämmelsen med Simulex hastighets- persontäthetssamband faktiskt är bättre då hastigheten *inte* korrigeras i enlighet med referensätningarna. Detta kan ses som en ytterligare indikation på att det kan föreligga felaktigheter i detta samband.

Förutom de två tidigare nämnda försöken genomfördes även ett försök då personen gick med lägre hastighet i vågrät riktning för att försöka återskapa de gånghastigheter som var aktuella vid indataupptagningen vid match 2 och match 3. Resultaten från försöket finns redovisas i diagram 5.3 nedan.

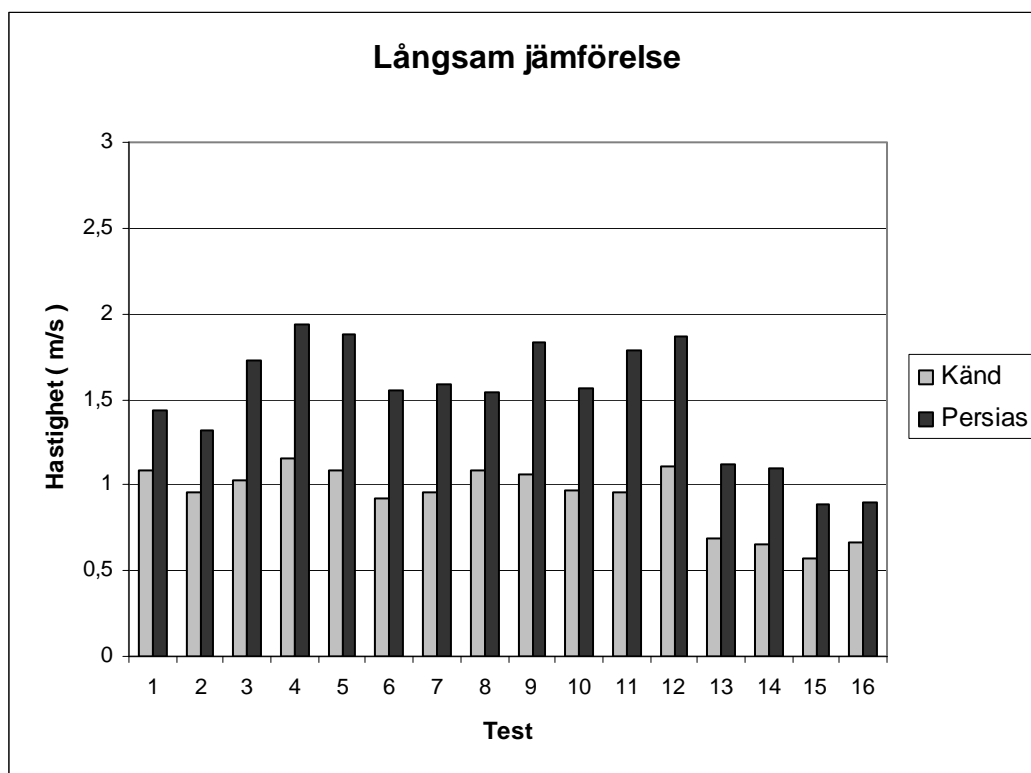


Diagram 5.3 Jämförelse mellan medelhastighet beräknade i Persias och uppmätta hastigheter med långsam gånghastighet.

Diagram 5.3 visar även det att gånghastigheterna överskattas i samtliga tester. Överskattningen är i genomsnitt 60 % och alltså mindre än det tidigare försöket i vågrät riktning som hade en genomsnittlig överskattning på 74 %. Förmodligen har det sin förklaring i att personer tenderar till att röra sig mindre upp och ner under förflyttning i lägre hastigheter.

Som ytterligare en osäkerhet vid analysarbete i Persias bedömdes användarens förmåga att placera markören på samma plats på personen vid samtliga mätningar. För att undersöka detta genomfördes samma mätserie nio gånger. Differensen från mätseriens medelvärde redovisas i diagram 5.4 på nästa sida.

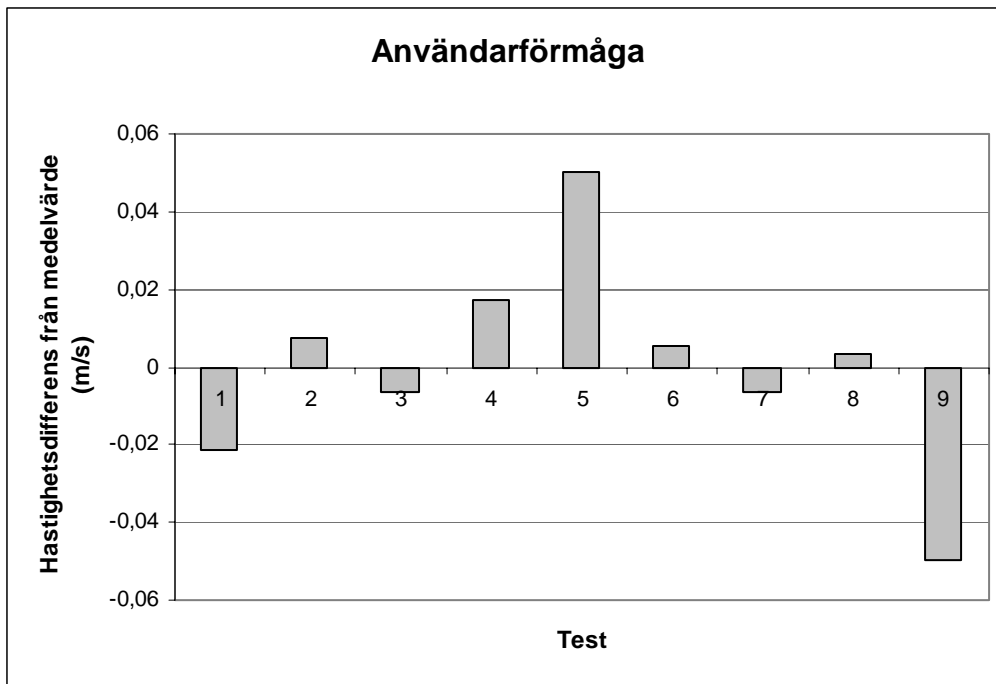


Diagram 5.4 Användarförmåga redovisad som avvikelse från mätseriens medelvärden.

Mätseriens medelvärde beräknades till 0,61 m/s med en standardavvikelse på 0,03 m/s. Det visar att förmågan att sätta markören på samma ställe på personen är hög hos användarna. I diagram 5.4 går det att utläsa att den största avvikelsen från medelvärdet är cirka 0,05 m/s vilket inte alls motsvarar den osäkerhet som anbringas av inspelningsvinkeln.

5.2.2 Gånghastigheter och avstånd

Analysen av gånghastigheterna vid match 2 och match 3 genomfördes dels för varje persons hastighet vid varje tidssteg och dels för varje persons medelhastighet. Analysen genomfördes genom att andelen hastighetsmätningar som befinner sig inom det hastighetsområde vilket är möjligt i Simulex beräknades. Det hastighetsområde som är möjligt i Simulex bygger på ekvation 3.4 (sidan 27) och de antaganden som görs i Simulex enligt diagram 3.3 (sidan 28), med avgränsningen att samtligas kroppsbredd ansatts till att vara 0,3 meter.

Resultaten från analysen av varje persons hastighet vid varje tidssteg redovisas i tabell 5.1 och diagram 5.5.

Match	Antal mätningar	Antal mätningar i intervallet	Andel i intervallet
2	2324	750	0,323
3	1703	638	0,375
2 och 3	4027	1388	0,345

Tabell 5.1 Hastigheter beräknade från Persias i jämförelse med hastighetsintervall i Simulex.

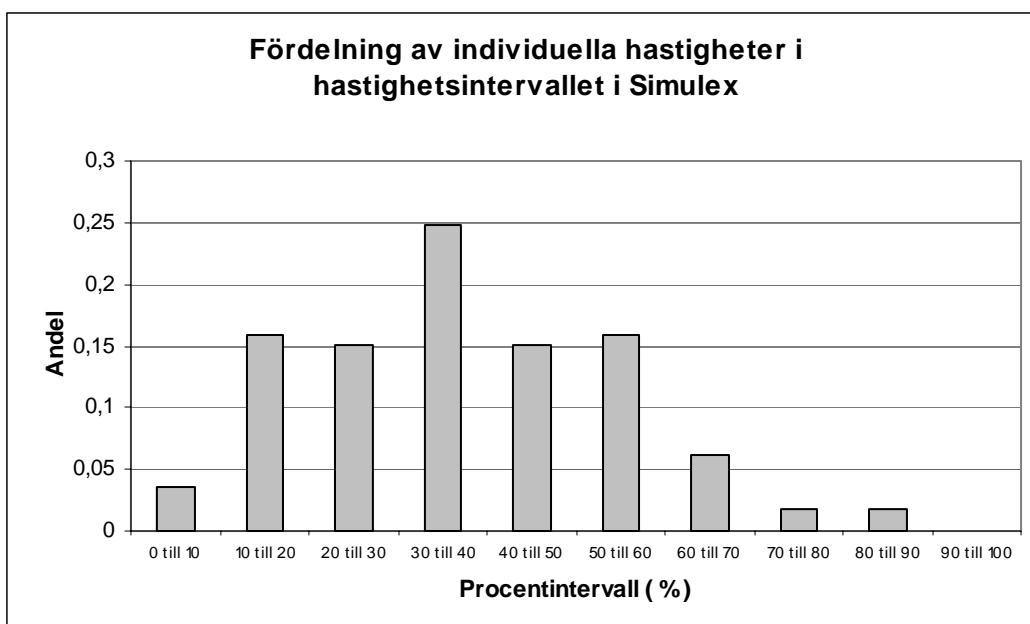


Diagram 5.5 Hastigheten uppmättes ett antal gånger på varje person under förflyttningen genom mätrutan. Ur diagrammet kan läsas att för en fjärdedel av personerna låg 30-40% av mätningarna inom Simulex hastighets – avstånsintervall.

I tabell 5.1 kan utläsas att den sammanlagda andelen hastighetsmätningar som befinner sig i intervallen endast är 34 %. Det kan förklaras på två sätt, antingen genom att hastighetsvärdena för varje tidssteg är överskattade på grund av inspelningsvinkeln eller på grund av att det hastighetsintervall som finns i Simulex inte stämmer överens med hur hastigheten beror av avståndet till personerna närmast i folkmassor med hög persontäthet. Enligt ekvation 3.4 (sidan 27) så ska gånghastigheterna vara noll då avståndet till den närmast framförvarande personen är lika med kroppsbredden. Med ansatsen att samtligas kroppsbredden är 0,3 meter gör det att personerna ska stå stilla vid detta avstånd. Genom att analysera varje persons hastighetsvärden noggrannare visade det sig att så inte var fallet, som visas i diagram 5.6 nedan.

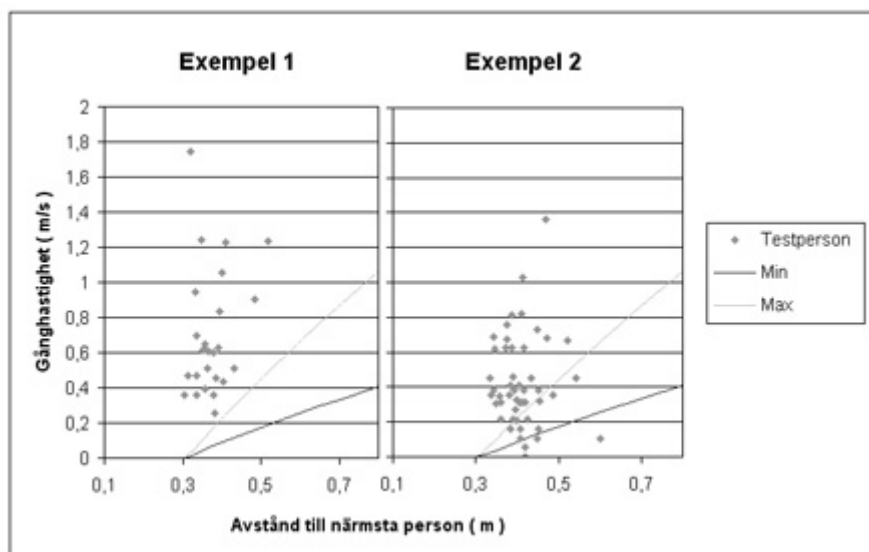


Diagram 5.6 Analyserad persons hastigheter vid varje tidssteg i jämförelse med lägsta och högsta hastigheter i Simulex.

I diagram 5.6 går det att utläsa att personerna i de aktuella fallen inte står stilla då avståndet till den närmast framförvarande är 0,3 meter utan att den i stället varierar ganska kraftigt med en topphastighet på strax över 1,7 m/s. Visserligen visar referensmätningarna att genomsnittshastigheterna överskattas med mellan 60 och 74 %, men resultaten tyder ändå på att en viss förflyttning sker även fast avståndet är 0,3 meter.

För att korrigera för den överskattade genomsnittshastigheten har en analys av personernas genomsnittshastighet mot ekvation 3.4 (sidan 27) genomförts. Personernas medelhastighet korrigerades genom att endast 65 % av den totala genomsnittshastigheten för varje person jämfördes med ekvation 3.4. Jämförelsen visas i diagram 5.8 nedan.

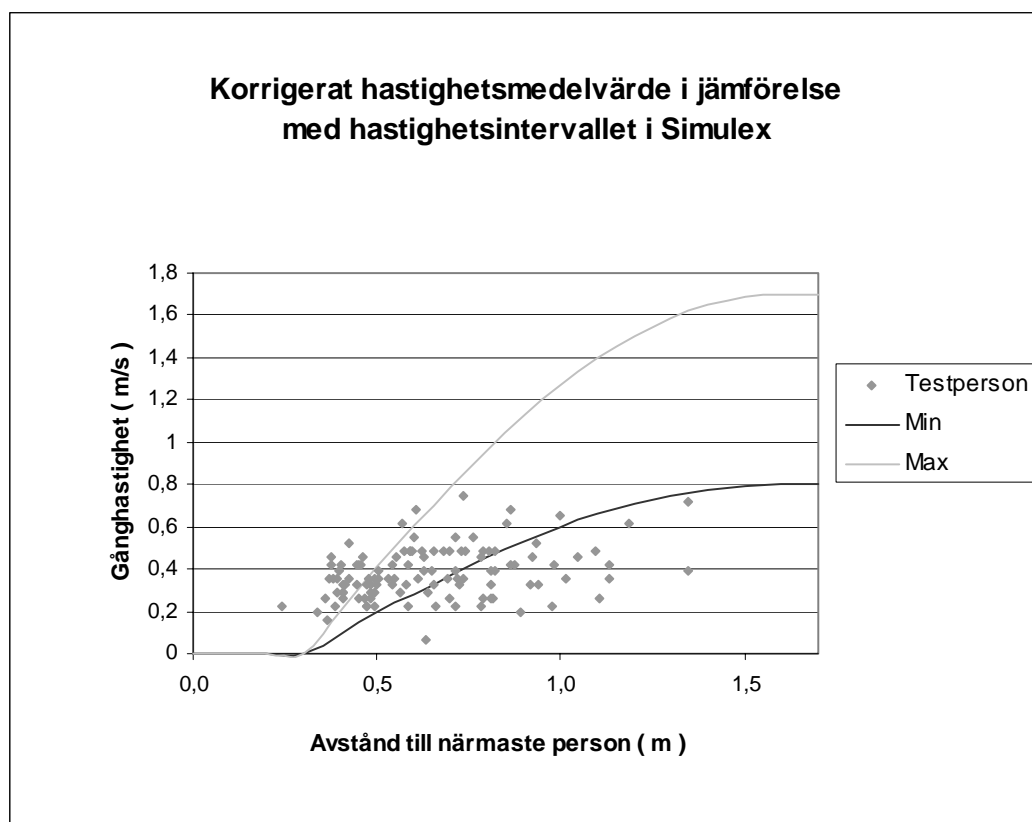


Diagram 5.7 Jämförelse mellan korrigerade medelhastigheter och hastighetsintervall i Simulex.

Analysen av diagram 5.7 visar att 45 % av medelhastigheterna befinner sig inom hastighetsintervallet som används i Simulex. Det är en förbättring från de tidigare mätningarna, men fortfarande är det en stor andel som ligger utanför intervallet. De värden som befinner sig under de lägsta hastigheterna, Min-kurvan, kan förklaras med att personerna inte går med deras högsta möjliga hastighet utifrån avståndet till närmast framförvarande person, utan det är istället andra faktorer som styr deras gånghastighet. De värden som befinner sig över de högsta hastigheterna, Max-kurvan, är dock svårare att förklara. Det borde vara persontätheten, och därigenom avstånden mellan personerna, som är den styrande faktorn för gånghastigheten, men så tycks inte vara fallet. Istället tycks det vara så att det antagandet att personer stannar då avståndet till den framförvarande understiger kroppsbredden inte stämmer överens med verkligheten vid hög persontäthet.

5.2.3 Gånghastigheter och persontäthet

För att undersöka om persontätheten har större betydelse för gånghastigheten än avståndet till den närmast framförvarande personen beräknades först de persontätheter som var aktuella i mätrutan under försöken vid match 2 och match 3. Denna analys genomfördes genom att personantalet i mätrutan räknades vid de tillfällen analys av gånghastigheter utfördes. Från personantalet beräknades sedan persontätheten för mätrutans kända area. Under de tidsintervaller analys av de båda matcherna genomförts varierar persontätheten enligt diagram 5.8 nedan.

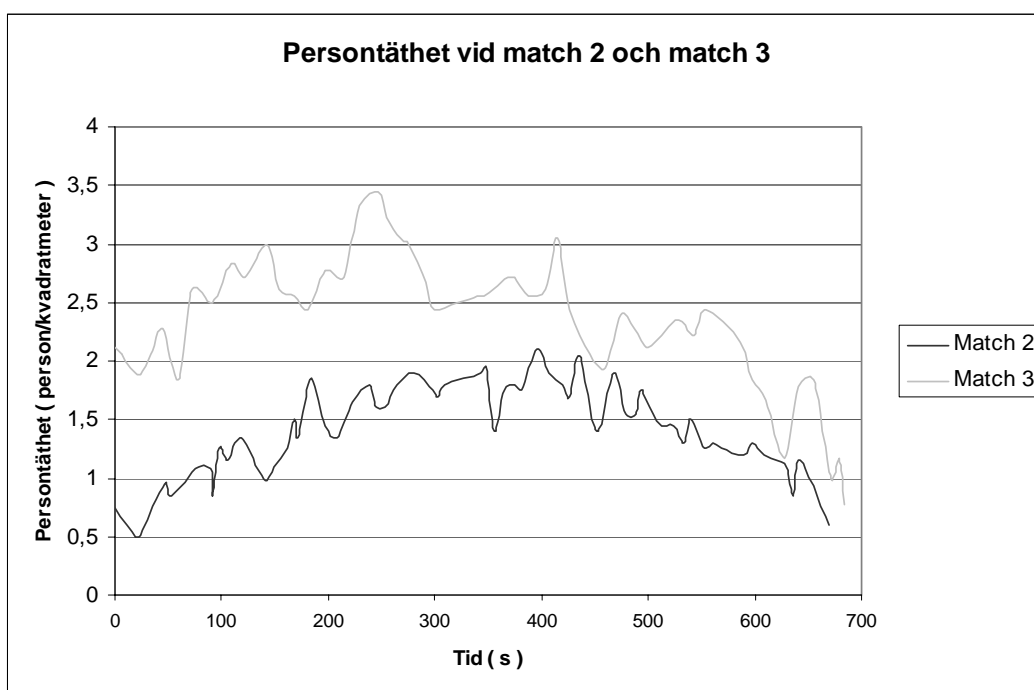


Diagram 5.8 Persontäthet under gånghastighetsanalys vid match 2 och match 3.

Därefter jämfördes de sedan tidigare kända gånghastigheterna som funktion av persontätheten med det gånghastighetsintervall Simulex använder sig av, diagram 3.2 (sidan 27). Jämförelsen redovisas i diagram 5.9.

Resultatet från jämförelsen i diagram 5.9 visar att 69 % av de uppmätta gånghastigheterna ligger inom det möjliga i hastighetsintervallet i Simulex. De utförda referensmätningarna, kap 5.2.1, visade dock att gånghastigheten överskattades med cirka 65 % vid gånghastighetsanalysen i Persias. För att korrigera för detta utfördes även en jämförelse mellan de korrigerade gånghastigheterna och hastighetsintervallet i Simulex, se diagram 5.10.

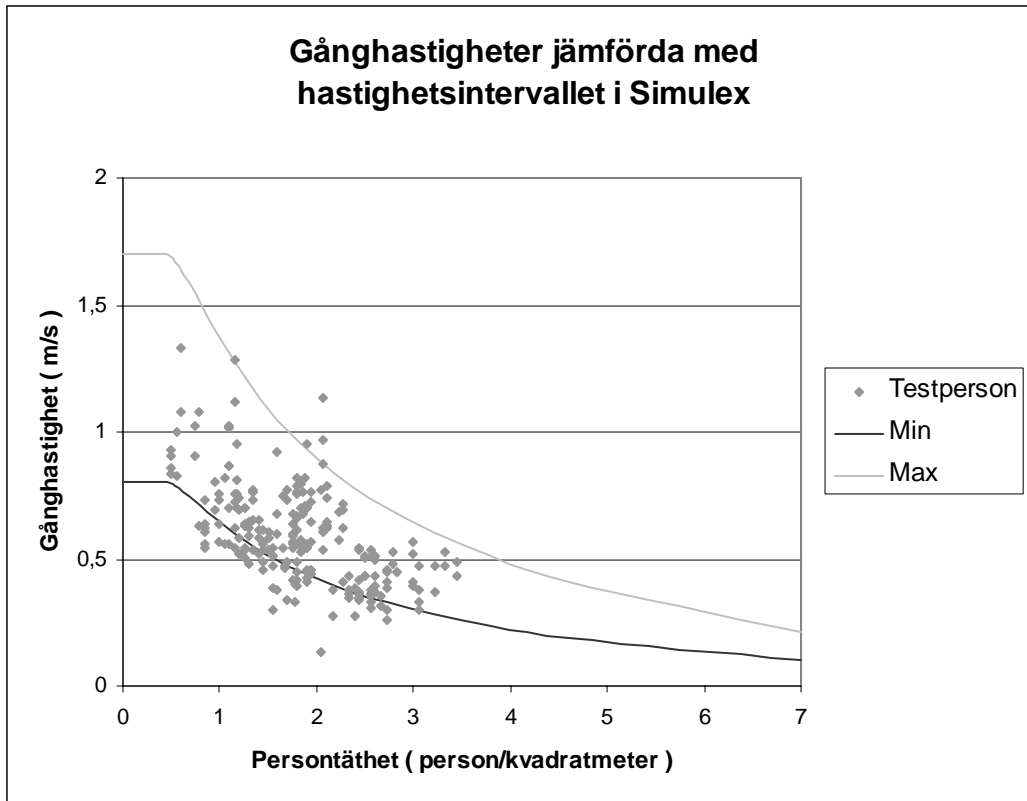


Diagram 5.9 Jämförelse mellan uppmätta gånghastigheter som funktion av persontäthet och det hastighetsintervall som används av Simulex.

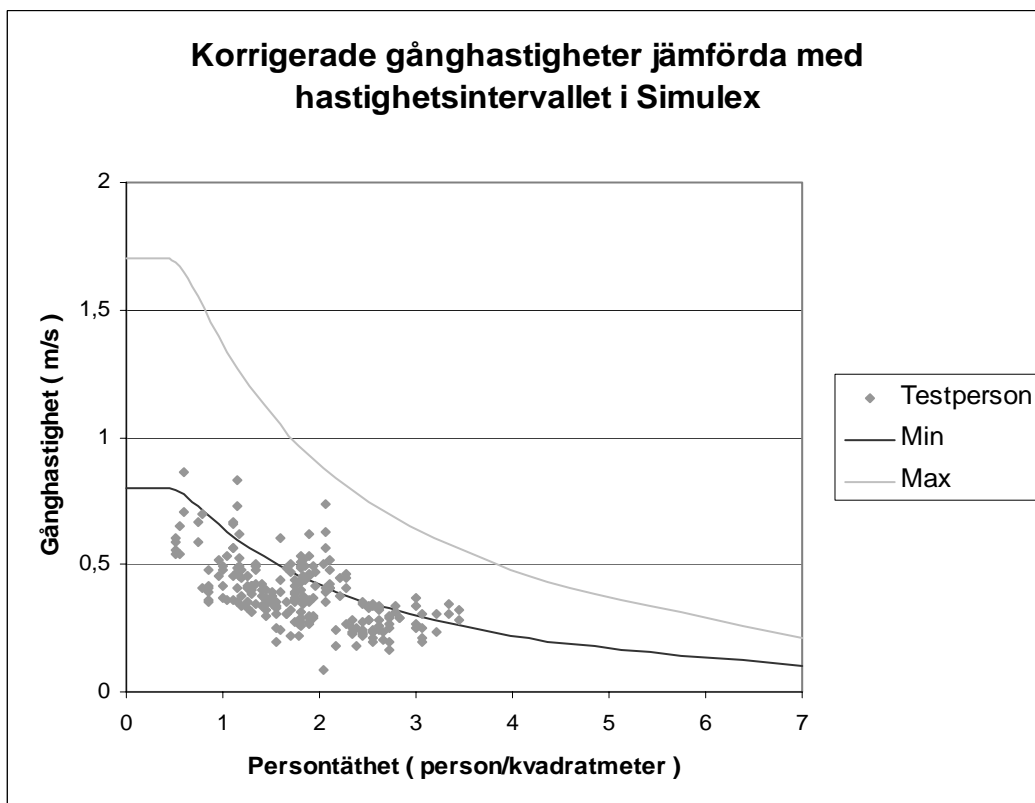


Diagram 5.10 Jämförelse mellan uppmätta gånghastigheter som funktion av persontäthet och det hastighetsintervall som används av Simulex.

Diagram 5.10 på föregående sida visar att de korrigerade gånghastigheterna tycks stämma sämre överens med hastighetsintervallet än de som redovisades i diagram 5.9. En närmare analys av diagram 5.10 visar att 49 % av de korrigerade gånghastigheterna befinner sig i intervallet, vilket är en bättre överensstämmelse än då gånghastigheterna som funktion av avståndet till personen närmast framför analyserades i kapitel 5.2.2. Dessa resultat tyder på att det är svårt att säga att det endast är personen framför den analyserade personen som styr gånghastigheten. Persontätheten i individens närhet tycks istället bidra till personers gånghastigheter i högre utsträckning än vad den framförvarande personen gör. Självklart kan inte en individ ha en högre gånghastighet än den framförvarande under en speciellt lång tid utan att dessa ska kollidera, så avståndet till den framförvarande personen måste även det ha betydelse. Resultatet att gånghastigheten i större grad beror av persontätheten än avståndet till personen framför kan istället förklaras med att det är svårt att ange vilken person som är framför den person vars gånghastighet skall analyseras vid hög persontäthet.

Som tidigare nämnts på sidan 56 är det märkligt att överensstämmelsen är bättre då hastigheten inte korrigeras i enlighet med referensmätningarna (jämför diagram 5.9 och 5.10). Detta kan bero på att man tidigare inte tagit hänsyn till de felaktigheter som inspelningsvinkeln medför, men det kan inte fastställas att så är fallet.

5.2.4 Personflödesanalys

Analysen av personflödet har genomförts vid tre tillfällen, två på match 2 och en på match 3. Tidpunkterna valdes så att analysen utfördes då högsta möjliga persontäthet uppstod vid utgång 1, men innan personerna från sittplatsläktaren inverkar på personflödet genom utgången. Dessutom gjordes två analyser av personflödet då personer från sittplatsläktaren obstruerar utgången (benämns som *blockerad* i tabell 5.1) för att ge säkrare uppskattning om personfördelningen avseende på val av utgång.

Tidsintervall (Sekunder)	Personflöde (Personer)/(10*Sekund)	Dörrbredd (Meter)	Flödeskonstant (Personer)/(Meter* Sekund)
Match 2 (45-55)	44	3	1,47
Match 2 (60-70)	45	3	1,50
Match3 (45-55)	44	3	1,47
Match 2, <i>blockerad</i> (270-280)	31	3	1,03
Match 3, <i>blockerad</i> (300-310)	32	3	1,07

Tabell 5.2 Analys av personflöde genom utgång 1 vid fältmätningar.

Personflödesanalysen används senare till att underlätta antaganden om val av utgång. De personflöden som uppmätts ger en fingervisning om att de svenska rekommendationer som finns eventuellt underskattar personflödet.

5.3 Simuleringar – resultat

Här presenteras de utrymningstider som simuleringarna i Simulex och Steps resulterade i. Vidare görs generella beskrivningar av de problem som uppstått. Även resultatet från känslighetsanalyserna redovisas.

5.3.1 Analys av simuleringar i Simulex

Simuleringarna av de tre scenarierna i Simulex resulterade i utrymningstider enligt tabellen här nedan. I den högra kolumnen jämförs simulerad tid med den som uppmättes i fältmätningarna.

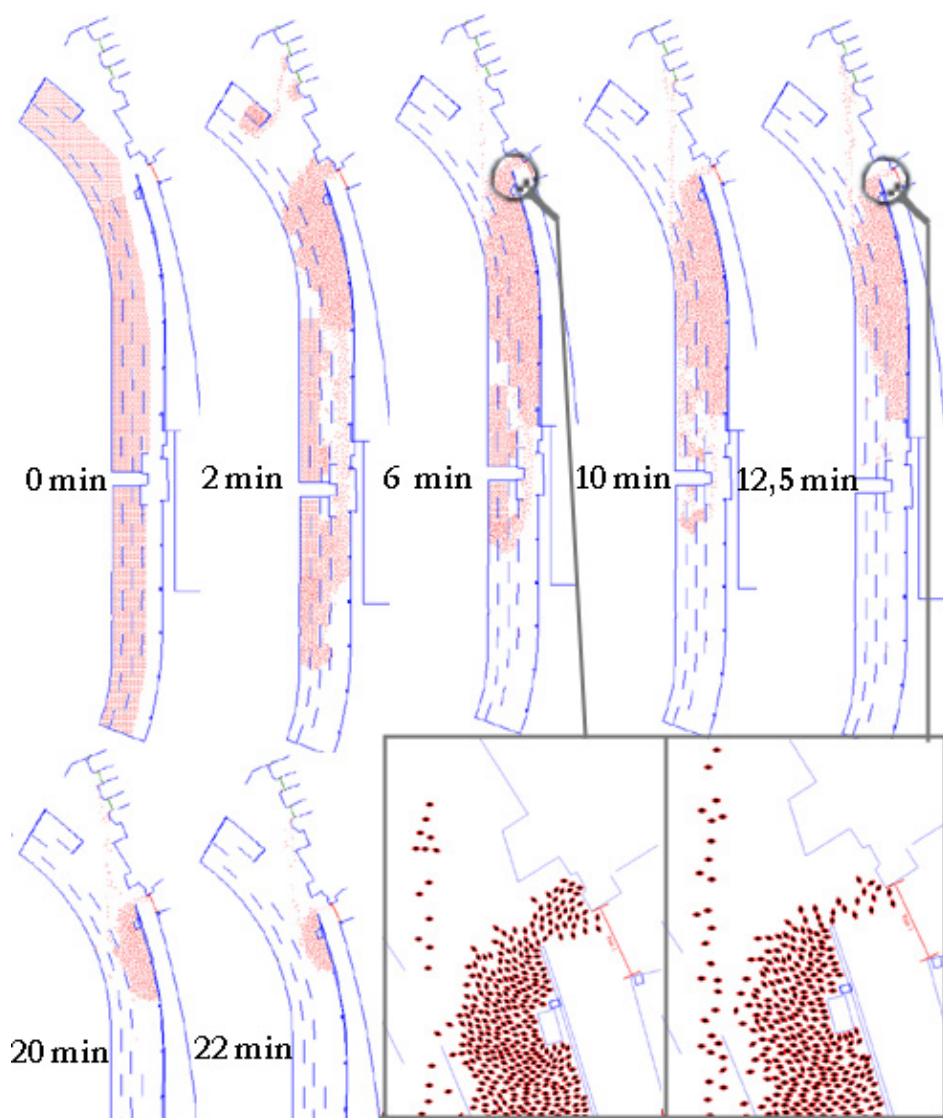
Match	Simulerad tid (min:sek)	Jämförelse med aktuell tid (min:sek)
1	19:11	+8:26
2	24:25	+10:55
3	22:30	+11:41

Tabell 5.3 Resultatet av simuleringar i Simulex.

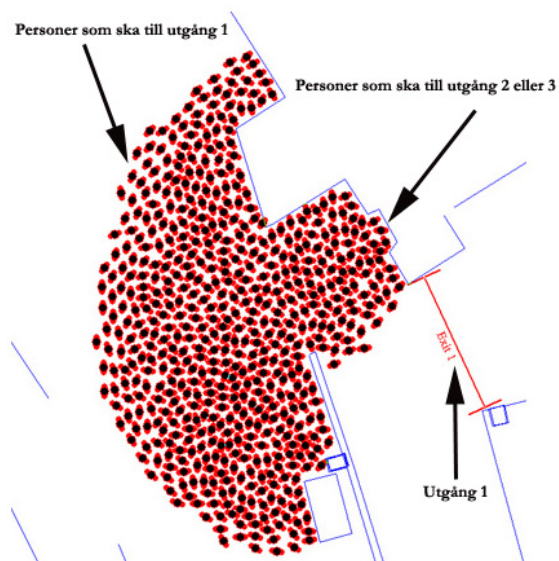
I figur 5.3 på nästa sida visas en simuleringsssekvens från simuleringen av match 3. Denna kan anses vara typisk för de simuleringar som utförts. Som tabellen åskådliggör så överskattades tiderna gravt i Simulex. Detta beror främst på det fenomen som visas nere till höger i figur 5.3 Problemet består i att endast en bråkdel av utgångens bredd nyttjas. Simulex klarar inte av att återskapa det förhållande som råder i verkligheten, då personerna i högre grad nyttjar hela bredden av utgång 1 och den dörr som finns innanför utgången.

Förklaringen till problemet hänvisas till de förhållanden som uppstår då ett stort antal personer skall genomföra en skarp sväng vid ett hörn, vilket är fallet i samtliga simuleringar som utförts. Det hela beror enligt programutvecklaren (*Thompson, 2004*), på det faktum att personer längst fram i kön svänger kraftigt vid hörn och därmed blockerar personer bakom dem på ett onaturligt sätt. I Simulex (och inte i Steps för den delen heller) tar personer inte hänsyn till dem som står bakom dem (hänsyn tas endast till dem rakt framför till 90° i sida). Det är högst troligt att resultaten blivit annorlunda om jämförelsen gjorts i en för Simulex gynnsammare situation där utgångarna är belägna i folkmassans huvudsakliga gångriktning. I skrivande stund utförs förändringar i beräkningsalgoritmerna (för framtida versioner av programmet) som är avsedda att ta hänsyn till ovanstående parametrar.

Ett annat problem som uppstod frekvent vid simuleringarna var att personer som hade utgång 2 eller 3 som slutdestination ”knuffades” in mot utgång 1 och därmed blockerade den utgången (visas i figur 5.4). Problemet uppkommer främst då personer med olika val av utgångar blandas i kön mot utgångarna. I de fall då grupper med olika val av utgångar hade åtskiljda geografiska placeringar och fördröjningstider undveks detta problem.



Figur 5.3 Simuleringssekvens från Simulex. Nere till höger visas hur en bråkdel av dörröppningen används.



Figur 5.4 Personer som ska till olika utgångar blockerar varandra.

Resultatet av de känslighetsanalyser som utförts redovisas i appendix B.

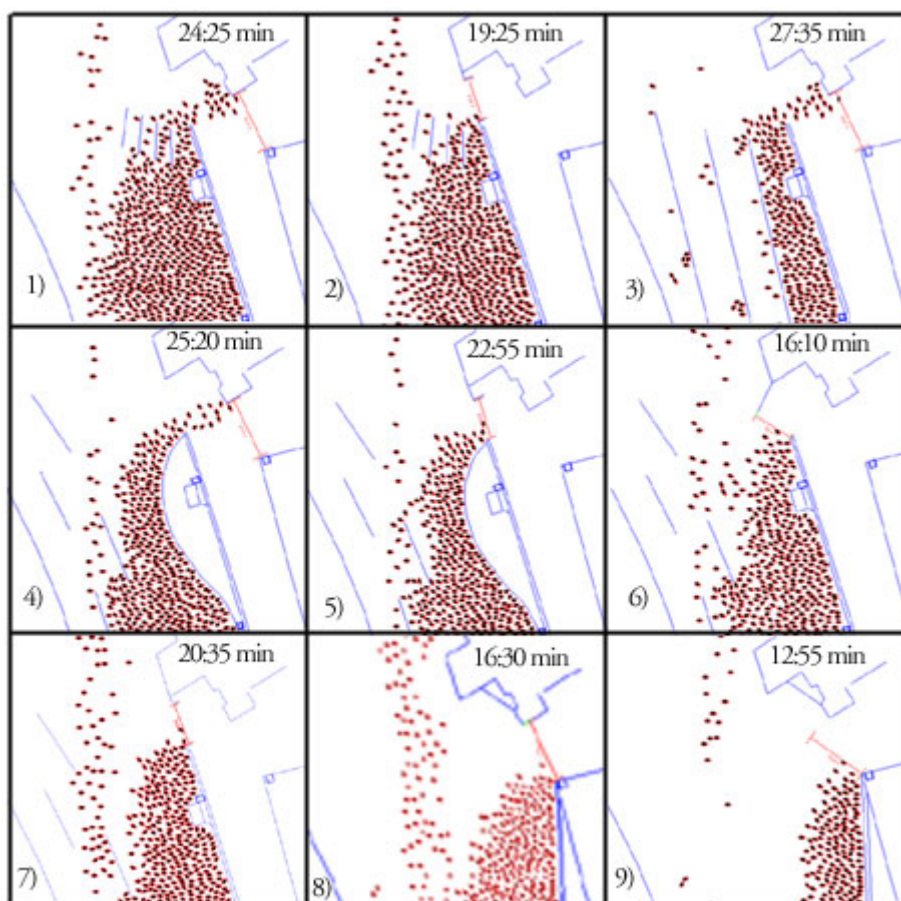
De upprepade simuleringarna av samma indatafil gav exakt samma resultat. Detta kan tyckas självklart, men det kontrollerades då det fanns frågetecken om fördelningen av fördröjningstider och gånghastigheter kunde ge upphov till skillnader i likadana simuleringar. Däremot har simuleringar av samma indatafil visat sig ge olika resultat vid simuleringar på olika datorer. Om detta beror på operativsystem, processor eller några andra egenskapskillnader har inte utforskats vidare i denna analys.

De huvudsakliga slutsatserna från känslighetsanalysen är att:

- Även om ambitionen är att placera in personerna likadant kan en viss skillnad i resultat uppstå då inplaceringen återupprepas manuellt.
- Valet av persontyper har en markant inverkan på resultatet.
- Tiden blir kortare om fler personer står närmare utgången.
- Det är inte säkert att avsaknaden av fördröjningstid kommer att förkorta den totala utrymningstiden (jämför test 11 och 18, appendix B). Detta beror på att det då kan uppstå viss blockering vid utgångarna, dock inte lika tydligt som i figur 5.4.
- Kortare tider än de som uppnåddes i huvudsimuleringarna går att få, men detta sker till följd av grova förenklingar i jämförelse med den verkliga utrymningen.

Då det uppdagades att Simulex gravt överskattat utrymningstiden gjordes några försök med mer eller mindre radikalt förändrad utgångskonfiguration. Detta går egentligen utanför studiens avgränsningar men det ansågs ändå vara av intresse att pröva några av de gängse metoder som kan användas för att få bättre överensstämmelse med verkligheten.

När man väl börjar ändra på byggnadskonfigurationen finns det naturligtvis ett obegränsat antal varianter att prova. Detta testförsök har begränsats till att simulera match 2 med 9 olika ändringar av utgångskonfigurationen. I den matchen var den verkliga utrymningstiden 10 minuter och 49 sekunder. I figur 5.5 visas de ändringar och de resultat de gav upphov till. Som visas i figuren har ändringar gjorts med avseende på utgångsvinkel och placering, användande av barriärer och även extrema förändringar av väggen till höger på bilden (simulering 4, 5, 8 och 9). Resultatet visar att man trots extrema förändringar inte kan undkomma de tidigare upptäckta problem som uppstår när folkmassan ska genomföra en tvär sväng.



Figur 5.5 Simuleringar i Simulex med ändrad utgångskonfiguration.

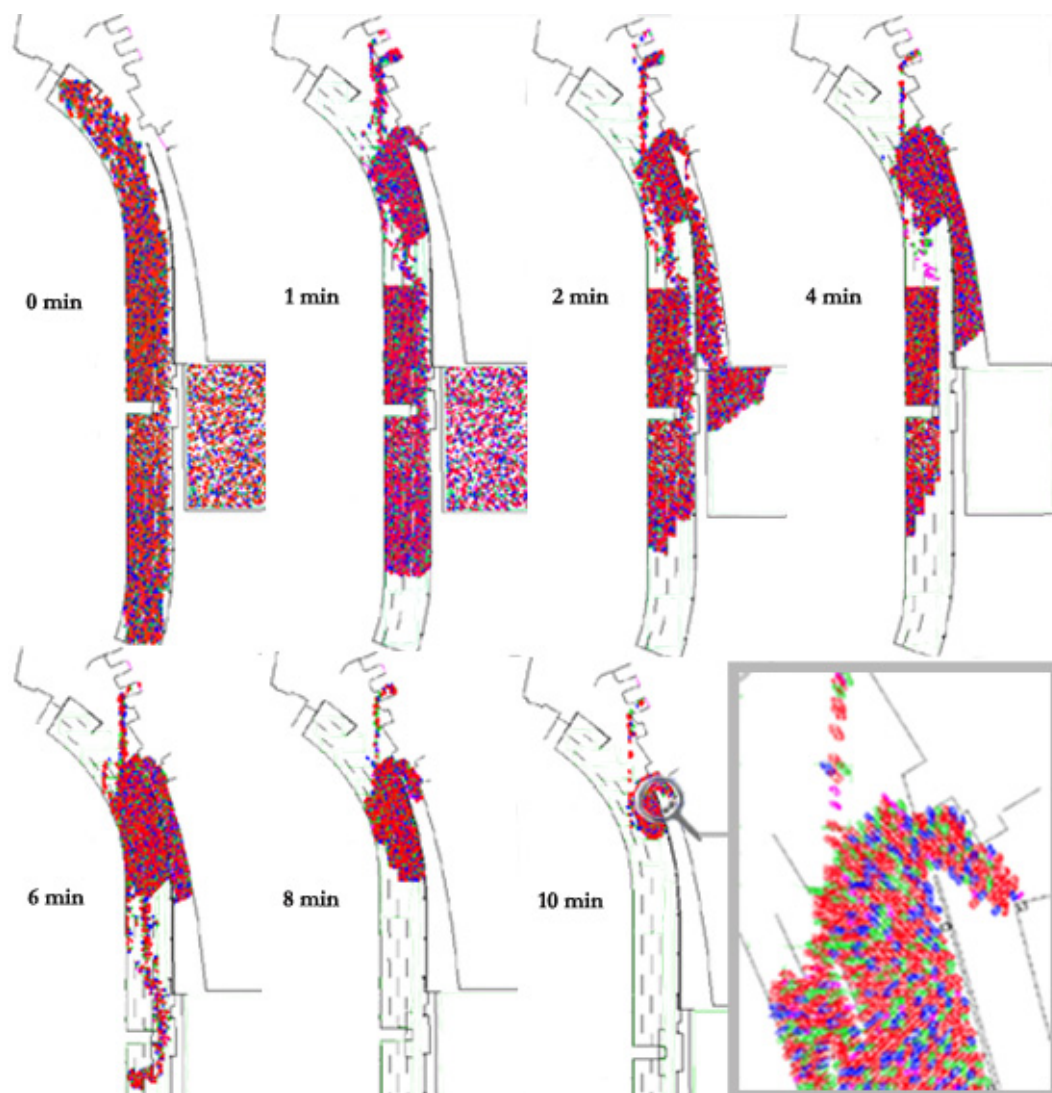
5.3.2 Analys av simuleringar i Steps

Resultatet av de tre scenarierna återges i tabellen här nedan. I den tredje kolumnen från vänster jämförs beräknad tid med den i fältmätningarna uppmätta.

Match	Simulerad tid (min:sek)	Jämförelse med aktuell tid (Sekunder)	Fördelning av val av utgångar. Personer från sittplatsläktaren ej medräknade. (Utgång 1 / 2 eller 3)
1	11:11	+29	66% / 34%
2	12:06	+84	62% / 38%
3	11:06	+17	65% / 35%

Tabell 5.4 Resultat av simuleringar i Steps.

Som synes är överensstämmelsen med verkliga utrymningssituationen god. I figur 5.6 visas en simuleringsskvens från match 3 som kan anses vara representativ för de utförda simuleringarna. Att programmet bättre klarar av beskriva flödet genom utgångarna får anses vara den huvudsakliga anledningen till att modellen ger bättre överensstämmelse med den verkliga utrymningstiden än vad Simulex gör. Dessutom medför den metod som används angående val av utgångar att blockeringar inte uppstår samt att flödet mot utgångarna 2 och 3 blir mer verklighetstroget.



Figur 5.5 Simuleringssekvens från Steps. Nere till höger visas hur dörröppningens fulla bredd utnyttjas, till skillnad från motsvarande scenario i Simulex.

Resultatet av känslighetsanalysen redovisas i appendix B. Känslighetsanalysen har utförts så att endast en variabel ändrats per simulering. Detta för att se i vilken riktning resultaten påverkas av respektive variabel. I känslighetsanalysen har indataparametrarna i huvudsak ändrats väsentligen för att provocera fram resultat som tydligt visar vilken inverkan den enskilda parametern har på utrymningstiden.

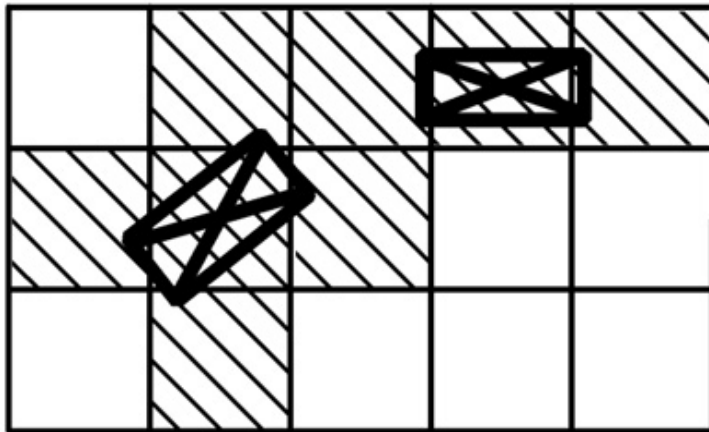
Av känslighetsanalysen framgår följande generella slutsatser:

- Om inte personflödet från sittplats återskapas kommer utrymningstiderna att underskattas.
- Val av personflöde genom dörröppningar är avgörande för resultatet.
- Ändring på storleken av personerna eller en ökning av antalet män ger ingen alls påverkan på sluttiden.
- Gånghastighetens inverkan är märkbar men inte särskilt stor, så länge den sätts inom rimliga gränser. Att använda sig av en gånghastighet som motsvarar den som råder i en kösituation (0,6 m/s) är ingen lyckad idé eftersom detta antagande bygger på att personerna befinner sig i kö hela tiden, vilket de inte gör i verkligheten.
- Valet av utgångar påverkas av många faktorer på grund av att dessa uträkningar baseras på många olika indata (beskrivs i kapitel 3.2.4). Fördelningen av utgångsval har en avgörande inverkan på resultatet.
- Fördröjningen av utrymningsinitieringen har nästan ingen inverkan på resultatet alls.
- Val av gridnätets storlek och användandet av läge ”fin grid” är uteslutande den viktigaste parametern att beakta vid simuleringar med Steps. Känslighetsanalysen av gridnätet åskådliggör också de grova förenklingar som beräkningarna i modellen baseras på. Detta diskuteras vidare här nedan.

Gridparadoxen

Gridnätets uppbyggnad beskrivs i kapitel 3.2.3. Att inte använda sig av alternativet ”fin grid” resulterar i att personerna i själva verket endast upptar en yta som är lika stor som varje cell i gridsystemet. Detta medför givetvis grava fel om man utför simuleringar med tät grid utan att använda sig av alternativet ”fin grid”. Omvänt blir uppenbart resultatet underligt om gridnätet är för grovt. I simuleringarna av respektive scenario har gridnätet varit av storleken 0,5*0,5 kvadratmeter och alternativet ”fin grid” har inte använts (enligt programmets rekommendationer). Härefter ligger förklaringen till att personstorlekarna inte påverkat resultatet överhuvudtaget. Varje individ har upptagit ytan 0,5*0,5 kvadratmeter oavsett storlek.

Alternativet ”fin grid” innebär att en person kan uppta mer än en gridcell. Faktumet att flera personer inte kan stå i samma cell kvarstår dock. Detta är förklaringen till att personantalet på läktaren inte kunde återskapas med alternativet fin grid markerat. För att exemplifiera detta kan man tänka sig att en person med bredden 0,52 meter och djupet 0,32 meter i värsta fallet kan uppta fem celler (med en storlek av vardera 0,5*0,5 meter) och som bäst upptar tre celler, schematiskt beskrivet i figur 5.7 på nästa sida.



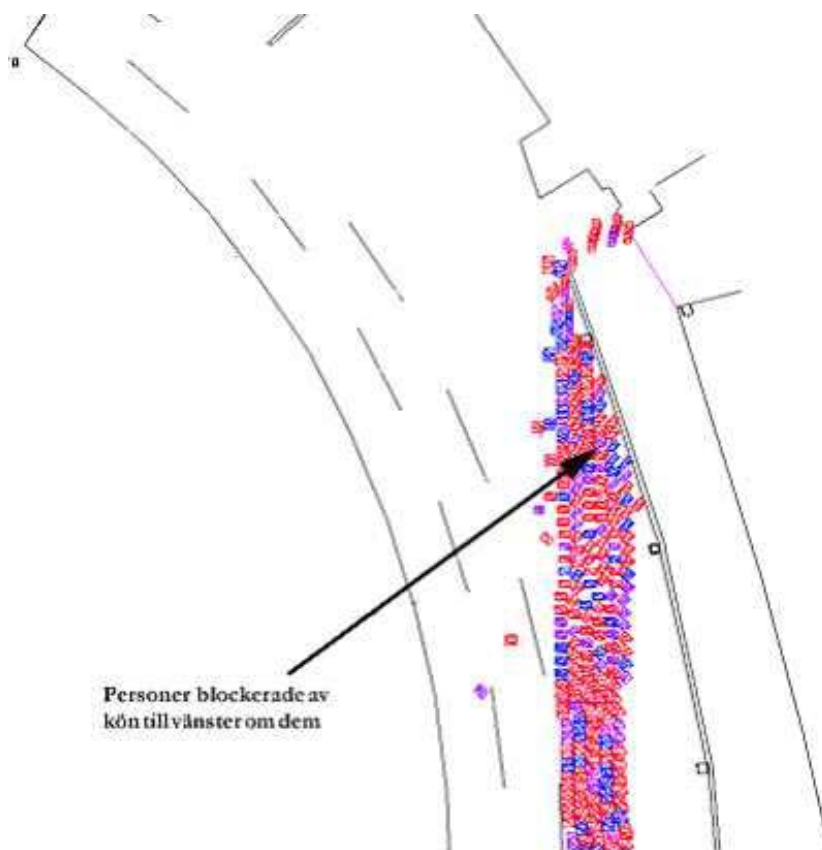
 = Gridceller anspråkstagna av personer.

Figur 5.7 Schematisk beskrivning av hur en person med bredden 0,52 meter och djupet 0,32 meter upptar mellan tre och fem celler med inställningen "fin grid". Endast en person kan befinna sig i en cell. Utan inställningen "fin grid" upptar en person ytan av en cell,

Lösningen torde vara att använda sig av ett väldigt tätt gridsystem, förslagsvis 0,01*0,01 kvadratmeter. Datorkapaciteten medgav dock som bäst ett gridsystem på 0,05*0,05 kvadratmeter, men resultatet av denna simulering visar att det kan uppstå allvarliga fel då en sådan grid används. Simuleringen av det scenariot avbröts då utrymningstiden uppgick till 45 minuter och en bråkdel utrymt och övriga befanns vara blockerade av oförklarliga skäl.

Vid simuleringar med ett gridnät på 0,2*0,2 kvadratmeter och användning av alternativet "fin grid" uppvisades stora likheter med simuleringarna i Simulex. Resultatet blev faktiskt ännu sämre än i Simulex, efter 1240 sekunder hade 2814 personer utrymt. I figur 5.8 åskådliggörs hur flödet genom utgång 1 drastiskt minskar och hur personerna inte längre går förbi varandra utan snarare följer i fotspåren på framförvarande. Personer blockeras av den kö som uppstår och kan inte längre "smita emellan" för att gå mot en alternativ utgång. Det förefaller som att personerna går tätare intill varandra och inte lämnar utrymme för förflyttningar i sidled. Den dynamiska rörelsen i folkmassan återskapas inte då fint gridsystem används. Problemet att personflödet genom utgången minskas så drastiskt kan förmodligen förklaras enligt resonemanget i kapitel 5.3.1, personer tar inte hänsyn till dem som står bakom dem.

Gridparadoxen innebär att simuleringar med grövre gridnät uppvisar större likhet med personströmningarna i en folkmassa än en simulering med finare gridnät. Det förefaller som att personerna erhåller en större rörelsefrihet vid simuleringar med grövre gridnät. Detta kan bero på att riktningförändringar endast kan göras i 45 eller 90 graders vinkel, vilket innebär en begränsning när gridnätets storlek minskar.



Figur 5.8 Simulering med tätare gridnät uppvisar stora likheter med simuleringar i Simulex.

5.3.3 Analys av utrymningssimuleringar på Malmö Stadion

Resultatet av simuleringarna var för Simulex 11 minuter och 34 sekunder och för Steps 7 minuter och 56 sekunder. Tillvägagångssättet och indatan till simuleringarna finns beskrivna i kapitel 4.2.2. Tendensen att Steps resulterar i kortare förflyttningstider kan alltså skönjas även här. Då Steps visat sig resultera i en bättre överensstämmelse vid jämförelser med fältmätningarna så torde slutsatsen vara att så även är fallet här. En förflyttningstid av under 8 minuter kan tyckas strida mot resultatet av fältmätningarna, men det skall påpekas att fler utgångar finns tillgängliga liksom fler alternativa utrymningsrutter. Om dessa kommer att användas i lika stor utsträckning som antagits i simuleringarna är oklart, men goda förutsättningar finns om publikvårdsorganisationen fungerar som beskrivet i kapitel 3.2.

Det bör tydliggöras att det endast är förflyttningstiden som undersökts, vilket inte skall förväxlas med den totala utrymningstiden. En uppskattning om de två andra delarna av utrymningsförloppet, varseblivningstid och besluts- och reaktionstid, kan lämpligen utföras genom att studera resultatet av de utrymningsövningar som hålls årligen och jämföra med vedertagna uppfattningar av dessa tider. Detta ligger dock utanför avgränsningen av denna rapport. Vidare har inte utrymningen av sittplatssektionerna analyserats överhuvudtaget, men om en bedömning skall göras så torde utrymningen av dessa knappast ta längre tid än

utrymningen av ståplats, då dessa sektioner tömms långt tidigare än ståplatssektionen enligt observationer vid fältmätningarna.

5.4 Handberäkningar - resultat

Vid handberäkningarna har den modell som beskrivs i kapitel 3.3 använts. I beräkningarna har ett antagande om personfördelning och val av utgång gjorts. Två tredjedelar av den population som befinner sig på område A antages välja utgång 1. Detta motsvarar det antagande som gjorts vid simuleringsanalysen. Vidare har gångtiden frånsetts, eftersom den person som står närmast utgången i praktiken står i utgången. Den faktor som skiljer de olika beräkningar åt är flödeskonstanten. Uträkningarna redovisas i appendix C.

	Svenska dimensioneringsråd (f= 1.0)	Brittiska dimensioneringsråd (f=1.8-1.2)	Baserat på mätningar (f=1.5)	Verklig tid (min:sek)
Match 1	13:20	7:24-11:10	8:53	10:42
Match 2	16:40	9:15-13:53	11:10	13:30
Match 3	16:10	8:57-13:25	10:44	10:49

Tabell 5.5 Förflyttningstider baserade på handberäkningar i jämförelse med utrymningstiden vid fältmätningarna. $f = (\text{Personer}) / (\text{Meter} * \text{Sekund})$. Tiderna som presenteras i tabellen är angivna i minuter och sekunder.

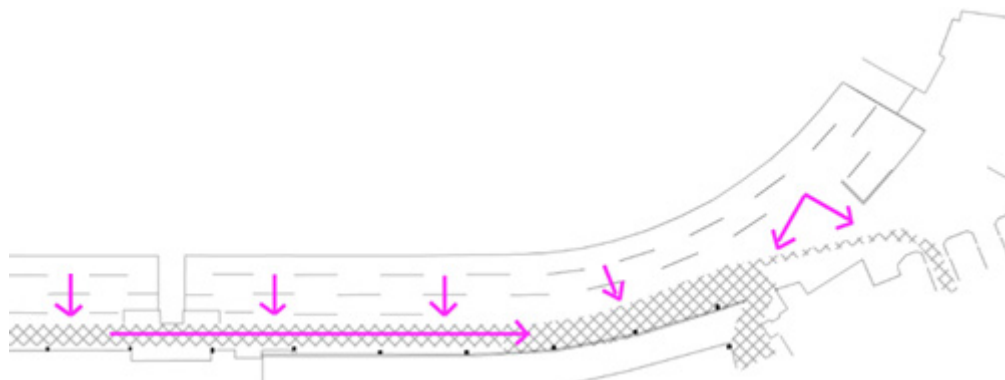
Resultatet, som beskrivs i tabell 5.5, påverkas till stor del av antagandet om att tre femtedelar väljer utgång 1. Detta antagande är liksom i simuleringarna en uppskattning och de framräknade tidernas exakthet skall därmed beaktas. Dock ger tidernas storleksordning en fingervisning om att flödeskonstanten genom en öppning som är tre meter bred ligger närmare de engelska råden och de aktuella fältmätningarna än de svenska dimensioneringsråden.

5.5 Visuella observationer

Den mest påfallande observationen var att majoriteten använde sig av utgång 1. Detta vägval är knappast fördelaktigt ur en tidsaspekt för dem som utrymmer, men vägvalet härrör förmodligen från det faktum att det är den utgång som ligger närmast. Det bör påpekas att utgång 1 inte är den väg som används när personerna går in på läktaren, då används entréer belägna vid utgång 2 och 3. Det är dock inte alls säkert att personer känner till att dessa kan användas som utgångar, eftersom de är stängda vid inläppet (personer släpps in genom vändkors belägna bredvid utgångarna 2 och 3).

En annan observation är att folkmassan i relativt låg utsträckning använder sig av bredden på läktaren för att snabbare komma fram. De är snarare benägna att ställa sig i den kö som bildas på platån bakom läktarna, inte helt olik figur 5.8. I jämförelse med denna figur är

dock personflödet bredare vid själva dörröppningen. En schematisk beskrivning av folkmassans rörelsemönster visas i figur 5.9.



Figur 5.9 Schematisk beskrivning av det rörelsemönster hos folkmassan som visuellt observerats.

Den köbildning som uppstår vid den tidigare nämnda trånga passagen mitt på område A påverkar i likhet med simuleringarna inte alls den totala utrymningstiden.

6 Diskussion

Kapitlet innehåller en diskuterande jämförelse mellan simuleringarna och fältmätningarna och tar upp de felkällor som har inverkat på resultatets validitet. En diskussion förs även angående behandling av indataparametrar vid simulering.

6.1 Felkällor

De huvudsakliga felkällorna vid utförandet av simuleringarna kommer av de svårigheter som finns i att korrekt uppfatta ett utrymningsförlopp som innefattar väldigt många personer. Den stora mängden personer medför dock en minskning av varje enskild individs påverkan på förloppet och detta är huvudargumentet för de generaliseringar som antagits vid simuleringarna. Den största felkällan vid gånghastighetsanalysen består i de resultat referensmätningarna uppvisade.

6.1.1 Videoanalys

Den huvudsakliga felkällan vid mätningen av gånghastigheter uppdagades vid de referensmätningar som utfördes efter att fältmätningarna genomförts. Den grava överskattningen av gånghastigheterna förefaller dock vara relativt generell och därför kan resultatet användas i jämförelser med tidigare studier, men kan inte anses tillföra ny kunskap om gånghastighetens beroende av avståndet till framförvarande. En intressant fråga är dock huruvida tidigare studier har kontrollerat överensstämmelsen. Referensmätningar av det slag som utförts i denna rapport tycks inte ha förekommit tidigare. Är det möjligt att tidigare studier också överskattat gånghastigheten?

Överskattningen av gånghastigheterna kommer av den snäva kameravinkel som använts. Då mätningar utförs kommer den skenbara vertikala förflyttningen hos personer (i klartext: de

”guppar” när de går) att medföra att vertikala positionsförändringar registreras trots att personerna går i en rak vågrät linje. Felet blir större med en snäv kameravinkel; ändringar i storleksordningen milimetrar vid videoanalysen renderar i faktiska positionsförflyttningar med upp till en halv meter. I några av de tidigare studier som granskats anges 40-50 meter som längsta avstånd, men elevationen är ej redovisad. Det är alltså möjligt att tidigare analyser inte beaktat denna avgörande felkälla. Slutsatsen torde vara att man bör filma mätytan rakt uppifrån för att undvika registreringar av rörelser som härrör från guppig gångstil. Tyvärr uppdragas då ett annat problem som kortfattat innebär att en felkälla uppstår när personer ”svajar” från sida till sida när de går. Detta understryker vikten av att utföra en validering vid varje försöksuppställning.

Mätningarna av relationen mellan två individers avstånd mellan varandra och gånghastigheter är svåra att utföra då persontätheten är hög och gånghastigheterna är låga. De två individer på vilka mätningarna utförs påverkas i stor utsträckning av andra personer i närheten.

Sambandet mellan persontäthet och gånghastighet är enklare att mäta och därför visade dessa mätningar bättre korrelation. De kan därför anses beskriva den verkliga situationen bättre, även om en förenklad beräkning utförs för att överföra detta resultat till ett gånghastighets-avståndsberoende.

Den analys av personflödet genom utgången som utförts är genomförd i relativt begränsad utsträckning. Resultatet av denna ger en fingervisning om att personflödet är större än de som anges i de svenska dimensioneringsråden, men de framtagna siffrorna kan knappast användas som underlag vid dimensionering då de vilar på en förhållandevis mager empiri.

6.1.2 Simuleringar

Det faktum att den evakueringsituation som studerats inte kan tillskrivas vara en riktig utrymning medför vissa tveksamheter angående de utrymningstider som presenterats. Det går inte att fastställa om en verklig utrymning skulle resultera i snabbare eller långsammare utrymningsförlopp. Det kan å ena sidan argumenteras för att personerna får mer bråttom att utrymma om de upplever en fara, men det kan å andra sidan uppstå effekter som att personerna dröjer sig kvar på grund av att de är nyfikna på händelseutvecklingen.

Huvudinriktningen vid simuleringarna har varit att återskapa de förhållanden som rådde vid varje studerad evakuering snarare än att försöka simulera ett verkligt utrymningsförlopp. Det finns dock en skillnad mellan simuleringarna och de studerade utrymningsförloppen, personerna i den absoluta slutfasen förloppet har mer bråttom ut i simuleringarna än i den verkliga situationen. Det är möjligt att simuleringarna här beskriver ett riktigt utrymningsförlopp bättre än det studerade vilket därmed skulle förkorta den uppmätta tiden något, men sett till den totala tiden går det inte att dra sådana slutsatser.

Den förenkling som gjorts angående läktarens geometriska utformning (läktarlutningen har frånsetts vid simuleringarna) kan förvisso ha viss inverkan på resultatet, men då lutningen är moderat (13 centimeter per steg) och trappstegen är breda (40 centimeter) torde påverkan i rörelsefrihet och gånghastighet vara försumbar. Läktarlutningen verkar dock medföra att personerna är mer benägna att först gå mot den plana ytan bakom läktaren för att sedan gå mot utgångarna. Om detta förhållande skulle kunnat återskapats i simuleringarna hade de snarare förlängt de beräknade tiderna och därmed hamnat ännu längre från de uppmätta.

Publikfördelning, fördröjning i utrymningsinitiering och val av utgångar har inte kunnat återskapats exakt som i mätningarna då detaljerat underlag för detta är svårt att inhämta på grund av det stora antalet personer som ingår i utrymningsförloppet. Känslighetsanalyserna påvisar att dessa parametrar (förutom fördröjning) är viktiga för slutresultatet och häri ligger förmodligen de största felkällorna vid simuleringarna. Det bör dock påpekas att även om de för Simulex mest gynnsamma indata används, så kommer tiden fortfarande att överskattas gravt. För Steps del innebär ändringar som påverkar parametern val av utgång tidsdifferenser i storleksordningen +/- 100 sekunder om utgångsantaganden är någorlunda korrekta. Detta skall betänkas då man drar slutsatser av denna undersökning.

6.2 Handhavande av simuleringsmodellerna

Känslighetsanalyserna av simuleringarna har i huvudsak utförts för att provocera modellerna i syfte att upptäcka i vilken riktning utrymningstiden ändras då olika indataparametrar modifieras. Det är med andra ord inte meningsfullt att använda dessa analyser som ett underlag för att korrigera den alltför långa utrymningstiden i Simulex, men de är viktiga för att veta vilka parametrar som är särskilt betydelsefulla att beakta vid simuleringar.

I Simulex är det av yttersta vikt att fördela personer och val av utgångar så att blockeringar inte uppstår. Tyvärr kolliderar denna ambition med att återskapa utrymningsförloppet på ett verklighetstroget sätt, valet av utgångar görs i verkligheten mer dynamiskt. Eftersom personer påverkas av varandra i större utsträckning i Simulex än i Steps så inverkar valet av persontyper, egenskaper och sammansättning märkbart. Det är därför viktigt att denna parameter återges korrekt. I programmets ini-fil går det att ändra dessa egenskaper och detta bör utnyttjas om man på förhand har stor kännedom om personsammansättningen i lokalen. Möjligheten att i samma fil ändra färg på personer är ett verktyg som kan användas för att underlätta identifiering av olika persontyper och därmed felsökning, särskilt då simulering utförs på ett stort personantal.

Ett varningens finger måste höjas för den typ av handhavande som utforskats i kapitel 5.3.1 (sidan 68). Då byggnadskonfigurationen ändras frångås ambitionen att återge verkligheten i simuleringarna. Vad är det då som avgör när man "ändrat tillräckligt mycket"? Vid utrymningsdimensionering har man vanligtvis inte tillgång till fullskaliga försök från aktuell byggnad, som varit fallet i den här rapporten, och denna avvägning blir därför vansklig. De

metoder som prövats är ingalunda fulltäckande, men de indikerar att det måste till extrema modifieringar i förhållande till verkligheten för att utrymningstiden skall närma sig den verkliga. Om byggnadskonfigurationen medför att folkmassan måste utföra en tvär sväng under evakueringen kommer detta förlopp inte kunna återskapas korrekt i Simulex. Enda sättet att undgå detta problem tycks då vara att inte alls återskapa dessa svängar i simuleringarna. Detta innebär ett väldigt stort avsteg från försöket att modellera utrymningsförloppet som det ser ut i verkligheten. Det är därför rimligare att pröva andra program eller handberäkningar om man misstänker att simuleringarna i Simulex inte återger verkligheten på ett trovärdigt sätt.

I Steps är det viktigt att simuleringarna utförs utan alternativet fin grid markerat och med ett gridsystem enligt grundinställningarna, annars kommer den i rapporten nämnda gridparadoxen att ge upphov till mycket konstiga resultat. Följden av detta är att personstorlekar inte har någon inverkan alls på resultatet. Så länge gånghastigheten hos personerna sätts inom rimliga nivåer har den ingen större inverkan på utrymningstiden. Det är till exempel inte rimligt att använda den gånghastighet som gäller vid kösituationer. Viktigare är att personflödet genom en utgång övervägs noggrant med stöd av vedertagen praxis. Denna parameter är, i likhet med en verklig utrymningssituation avgörande för resultatet. Vad gäller valet av utgångar får till exempel parametrar som lokalkännedom, tålamod och koefficienterna $C_{\text{gång}}$ och $C_{\text{kö}}$ stor inverkan om de ges extremt höga eller låga värden. Här bör valet av parametrar göras omsorgsfullt och det är av stor vikt att kontrollera resultatet med stöd av känslighetsanalyser.

Känslighetsanalyserna av Steps kan ge sken av att programmet har en tendens att underskatta utrymningstiden, men det är viktigt att poängtera att jämförelser bör göras med avseende på resultatet av test 3 snarare än den verkliga utrymningstiden vid match 3 och att programmet provocerats genom insättande av extrema indataparametrar. Detta för att tydligt kunna åskådliggöra i vilken riktning resultatet ändras med aktuell parameter.

7 Slutsatser

I detta kapitel presenteras de slutsatser som dragits och hur resultatet av rapporten kan tillämpas. Avslutningsvis ges förslag på framtida studier inom ämnesområdet.

De slutsatser som dragits är främst inriktade på att beskriva *om* modellerna går att använda vid dimensionering av utrymning av folkmassor och vilka parametrar som är viktiga att beakta. Det bör påpekas att alla slutsatser är specifikt inriktade på simulering av folkmassor och med den utgångskonfiguration som funnits vid de aktuella fältmätningarna. Det är mycket troligt att resultaten från simuleringarna blivit annorlunda om utgångarna inte varit placerade så att en riktningsförändring måste göras för att gå ut genom dem. Slutsatserna borde dock vara i högsta grad tillämpbara vid simuleringar av lokaler där personantalet och persontätheten leder till att omfattande köbildning uppstår och utgångar eller andra trånga passager är placerade så att betydande riktningsförändringar krävs för passering av dessa.

7.1 Jämförelse mellan de utvärderade modellerna

Analysen indikerar att Simulex inte återger utrymningen av stora folkmassor korrekt. Den simulerade utrymningstiden är i storleksordningen dubbelt så lång som den uppmätta. Steps visar god överensstämmelse med den verkliga situationen. Anledningen till att Steps återger utrymningsförloppet bättre är tvådelad. För det första återskapas personflödet genom utgångarna på ett sätt som bättre motsvarar den verkliga situationen. För det andra medger modellens beräkningssystem för personernas val av utrymningsvägar att detta återskapas på ett riktigt sätt. Det bör tilläggas att om utgångarna varit belägna i publikens huvudsakliga strömningsriktning och inte tvingat fram stora riktningsförändringar precis innan utgångarna, så hade möjligen resultaten i Simulex varit bättre överensstämmande med verkligheten.

Det bör dock införas en brasklapp angående den i analysen upptäckta gridparadoxen som återfinns i modellen Steps. Om förflyttningarna verkligen baseras på korrekta beräkningsmetoder borde ett tätare gridsystem rimligtvis resultera i bättre överrensstämmelse och inte i de diametrala försämringar som påträffats vid sådana simuleringar. Därför bör simuleringar utföras med gridnätstorleken 0,5*0,5 kvadratmeter och utan alternativet ”fin grid”.

Handberäkningarna påvisar att denna metod är i högsta grad tillämpbar för att fastställa förflyttningstiden vid utrymning av folkmassor. Detta gäller då byggnaden inte är komplex och köbildning uteslutande förväntas uppstå vid utgångarna.

Vid simuleringarna har följande konklusioner gjorts om de respektive datormodellernas för- och nackdelar i en jämförelse med varandra.

- Simulering i flera våningsplan mycket enklare att utföra i Simulex.
- Simulex baseras på ett långt mer omfattande forskningsunderlag vad gäller personers rörelse och påverkan av varandra och gör färre förenklingar än Steps på detta område.
- Simulex tar hänsyn till kroppsstorlekar, gånghastighets – avståndssamband, riktningförändringar och påverkan mellan personer i långt större utsträckning än vad Steps gör. I Steps påverkar kroppsstorlekar inte resultatet alls vid simulering i normalt gridnät och tycks då närmast vara en renodlat grafisk funktion.
- Antalet antaganden som användaren måste göra är långt fler i Steps vilket är positivt såtillvida användaren har god kännedom om förutsättningarna hos det scenario som skall beräknas och djupgående kunskaper om utrymning. Annars kan detta ge upphov till stora felkällor.
- Inlärningströskeln är högre vid användande av Steps.
- Beräkningsmetoden och inställningarna för val av utgångar är långt bättre i Steps och många av de problem som uppstår vid simuleringar i Simulex undviks därmed. Det bör understrykas att utgångsvalet i Steps påverkas av många olika indataparametrar och det är inte möjligt att detaljerat ange hur många som skall använda sig av en viss utgång, till skillnad från Simulex.
- Steps visar långt bättre överrensstämmelse med verkligheten vid simulering av utrymning av folkmassor.
- Ett ovarsamt handhavande av indataparametrar i Steps kan medföra att utrymningstiden underskattas

7.2 Dimensioneringsmetoder – tillämpning av analysen

Av de dimensioneringsmetoder som finns tillgängliga kan inte förenklad dimensionering anses vara tillämpbar vid dimensionering av de lokaler som lyfts fram i denna analys. Detta på grund av att skillnaderna mellan de samlingslokaler dimensioneringsmetoden är avsedd för och de lokaler som omnämns i denna analys är väldigt stor. Den brittiska dimensioneringsmetod som redovisas i rapporten har förvisso vissa likheter med förenklad dimensionering, men skillnaden ligger i att den brittiska metoden är särskilt anpassad till läktare och därför kan användas med ett bättre resultat. Förvisso är den dimensionerade tiden åtta minuter mer eller mindre tagen ur luften men om denna tid är relevant eller ej avser inte denna analys att utreda närmare.

Då återstår analytisk dimensionering och de utrymningsberäkningar som ligger till grund för denna dimensioneringsmetod. Av de utvärderade modellerna för utrymningsberäkning visade sig Steps och handberäkningar återge utrymningsförloppet bäst i de studerade scenarierna. De båda beräkningsmetodernas riktighet vilar dock till hög grad på de uppskattningar som görs angående val av utgångar och personflöde genom dessa. Därför måste stor vikt läggas vid att fastställa dessa parametrar korrekt. Det bör återigen påpekas att det endast är förflyttningstiden som belysts i denna analys, men förflyttningstidens andel av den totala utrymningstiden tycks öka med antalet utrymmande personer.

Oavsett vilken metod man väljer att använda sig av vid dimensionering av läktare är den springande punkten frågeställningen om vilken tid utrymningsberäkningarna ska jämföras med. Att enbart räkna på ett brandscenario utesluter en rad händelseutvecklingar som kanske är minst lika troliga, exempelvis bombhot, läktarkollaps eller livshotande trängsel. Att definiera tid till kritiska förhållanden för sådana händelser är vid första anblick omöjligt, men kanske är det inom detta område som ytterligare studier behöver utföras.

Följande rekommendationer bör beaktas av den som vill utnyttja resultatet av analysen:

- Vid utrymningsmodellering av folkmassor med Steps måste den tidigare nämnda gridparadoxens inverkan särskilt beaktas. Ändringar i gridnät kan ge upphov till allvarliga fel.
- Framgångsrikt användande av handberäkningar förutsätter att byggnadens komplexitet är enkel.
- För att slutsatserna av analysen skall kunna tillämpas krävs att förutsättningarna liknar de som studerats med avseende på personantal, persontäthet och utgångskonfiguration. Analysen är tillämplig på stora lokaler där folkmassan måste genomföra en kraftig sväng någonstans i byggnaden.

Utrymningssimulering av folkmassor i Simulex renderar i resultat som ligger så långt från verkligheten att förändringar i indataparametrar inte kan kompensera för detta. Det är främst utgångskonfigurationen som inverkar menligt på Simulex resultat. Omvänt gäller att det är okänt vilket resultat Steps presenterat om utgångarna varit annorlunda. Kanske underskattas utrymningstiden då på grund av de förenklingar som görs angående personers påverkan av varandra.

7.3 Fortsatta studier

Det kan skönjas en tendens att rekommendationerna för dimensionerande personflöde genom utgångar är lågt uppskattad i Sverige. Detta gäller då persontätheten är avsevärd. Personflödet är då avgörande för utrymningstiden och därför skulle fortsatta undersökningar av detta kunna tillföra mycket.

En undersökning liknande den här, fast på en lokal med annorlunda placering av utgångarna (förslagsvis i folkmassans huvudsakliga gångriktning), skulle i kombination med denna studie kunna ge värdefull information om modellernas tillförlitlighet. Om man vill utföra undersökningar liknande denna är det framförallt på två punkter som förbättringar i undersökningsmetoden bör övervägas:

- Vid analyser av gånghastigheter och avstånd mellan personer med hjälp av mätverktyget Persias bör man utföra referensmätningar med likadan inspelningsvinkel för att utröna vilken påverkan guppig eller svajig gång har.
- Då utrymningsförloppet dokumenteras bör samtliga utgångar filmas eller på annat sätt övervakas. Detta ger värdefull information om valet av utgångar.

8 Referenslista

Abrahamsson, Marcus, 1998. *Scenariotänkande vid brandsyn – utrymning av samlingslokaler*. 1998 års utgåva. Karlstad: Räddningsverket, Räddningstjänstavdelningen.

Ando, K - Ota, H - Oki, T, 1988, *Forecasting the Flow of People*. R.R.R. Railway Research Review, (45) 8, pp 8-14.

Bayer, Klas – Rejnö, Tobias, 1999. *Utrymningslarm Optimering genom fullskaleförsök*. Rapport 5053. Brandteknik, Lunds tekniska högskola.

BBR, Boverkets byggregler, 2002.BFS 1993:57 med ändringar tom BFS 2202:XX. Karlskrona: Boverket.

Brandskyddshandboken, 2002. Rapport 3117. Lund: Brandteknik, Lunds tekniska högskola.

Canter, David, 1980. *Fires and Human Behaviour*. Chichester: J Wiley & Sons.

Canter, David – Comber, Miriam – Uzzell, David L, 1989. *Football in its place: an environmental psychology of football grounds*. London: Routledge.

Canter, David, 1990. *Fires and Human Behaviour*. London: Fulton Publ.

Frantzich, Håkan, 1994. *En modell för dimensionering av förbindelser för utrymning utifrån funktionsbaserade krav*. Rapport 1011. Lund: Brandteknik, Lunds tekniska högskola.

Frantzich, Håkan, 2000. *Tid för utrymning vid brand*. 2001 års utgåva. Karlstad: Räddningsverket, Räddningstjänstavdelningen.

Fruin, John J, 1971, *Designing for Pedestrians: A Level-Of-Service Concept*. Highway Research Record. Brooklyn: Polytechnic Institute of Brooklyn, New York.

Fruin, John J, 1971, *Pedestrian Planning and Design*. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners.

Guide to Safety at Sports Grounds, 1997. Fjärde utgåvan. London: The Stationary Office.

Hankin, B.D - Wright, R.A, 1958, *Passenger Flows in Subway*. Vol. 9, Operational Research Quarterly. Oxford: Pergamon Press.

Handbok utrymning, 1994, Karlstad: Räddningsverket, Befolkningsskyddsavdelningen.

Hoffmann, N.A - Henson, D.A, 1997, *Simulating Transient Evacuation and Pedestrian Movements in Stations*. Malaysia: International Conference on Mass Transit Management, Kuala Lumpur.

Levein, Magnus, 2000. *Utvärdering av datorbaserade utrymningsmodeller*. Rapport 5070. Lund: Brandteknik, Lunds tekniska högskola.

Managing crowds safely, 2000. Andra utgåvan. Norwich: Health & Safety Executive.

Predtechenskii, V.M. och Milinskii, A.I., 1978, *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*. , New Delhi: Amerind Publishing Co.Pvt.Ltd.

Sime, Jonathan, 1980. *The Concept of Panic. Fires and Human Behaviour*. Chichester: J Wiley & Sons.

Sime, Jonathan – Kimura, Masatomi, 1988. *The Timing of Escape: Exit choice behaviour in fires and building evacuation. Safety in the Built Environment*. London: E&F.N Spoon.

Simulex Technical Reference, Evacuation modelling software, 2000. St Albans: Integrated Environmental Solutions (IES-facet).

Thompson, Peter, 1994. *Developing New Techniques for Modelling Crowd Movement*. Edinburgh: University of Edinburgh.

Waterson, Dr N.P - Pellissier, E, 2003, *The STEPS Pedestrian Microsimulation Tool – A Technical Summary*. Croydon: Mott MacDonald, Croydon.

Intervjuer:

Andersson, Marcus, Svenskt representant för Steps, Brandskyddslaget, 2004-12

Thompson, Peter, Programutvecklare, Simulex, IES Limited, 2004-12

9 Appendix

Appendix A - Personflödesberäkningar

Personflöde: 1,50 under de inledande 2 och avslutande 2 minuterna för varje scenario.
1,05 under resterande tid av utrymningen.

Match	Beräkning	Väljer utgång 1	Andel av publiken
1	$1,5 \cdot 3 \cdot 240 + 1,05 \cdot 3 \cdot (642 - 240)$	2346	56%
2	$1,5 \cdot 3 \cdot 240 + 1,05 \cdot 3 \cdot (810 - 240)$	2876	58%
3	$1,5 \cdot 3 \cdot 240 + 1,05 \cdot 3 \cdot (649 - 240)$	2368	49%

Riktlinjen för andel av publiken som väljer utgång 1 vid simuleringarna har ansatts till 3/5.

Appendix B - Känslighetsanalyser

Beskrivning av utförda känslighetsanalyser i Simulex och deras resultat:

Test	Beskrivning	Min:sek
1	Fördröjning satt till 50 sekunder +/- 50 sekunder. Alla går till närmsta utgång.	21:55
2	Som ovan, men insättning av personerna gjordes om manuellt, med strävan att efterlikna test 1.	22:15
3	Som test 2.	22:10
4	Som test 2.	22:05
5	Som test 1, men 2/5 går till utgång 2 eller 3.	22:45
6	Som test 5, men insättning av personerna gjordes om manuellt, med strävan att efterlikna test 5.	24:10
7	Som test 6.	35:00
8	Som test 1, men med persontypen "office staff"-kontorspersonal.	21:25
9	Som test 8, men insättning av personerna gjordes om manuellt, med strävan att efterlikna test 8.	21:25
10	Som test 1, men med persontypen "all male"- bara män.	27:45
11	Som test 18, men utan fördröjning.	21:00
12	Efterliknar simuleringen av match 2, men med utgångskonfigurationen ändrad, personerna vallas in mot respektive utgång genom barriärer i ritningen, se figur 4.6.	49:25
13	Som test 12 men med modifierad invallning, se figur 4.6	15:05
14	Som test 19, men utan fördröjning.	30:15
15	Efterliknar simuleringen av match 3, men med utgångskonfigurationen ändrad, personerna vallas in mot respektive utgång genom barriärer i ritningen.	16:05
16	Som test 15 men med modifierad invallning.	18:10
17	Som simuleringen av match 1, men större andel (2800) står väster om passaget.	15:20
18	Som simuleringen av match 2, men större andel (3200) står väster om passaget.	72:40
19	Som simuleringen av match 3, men större andel (3200) står väster om passaget.	17:10

* = Blockering enligt figur 5.4 uppstod.

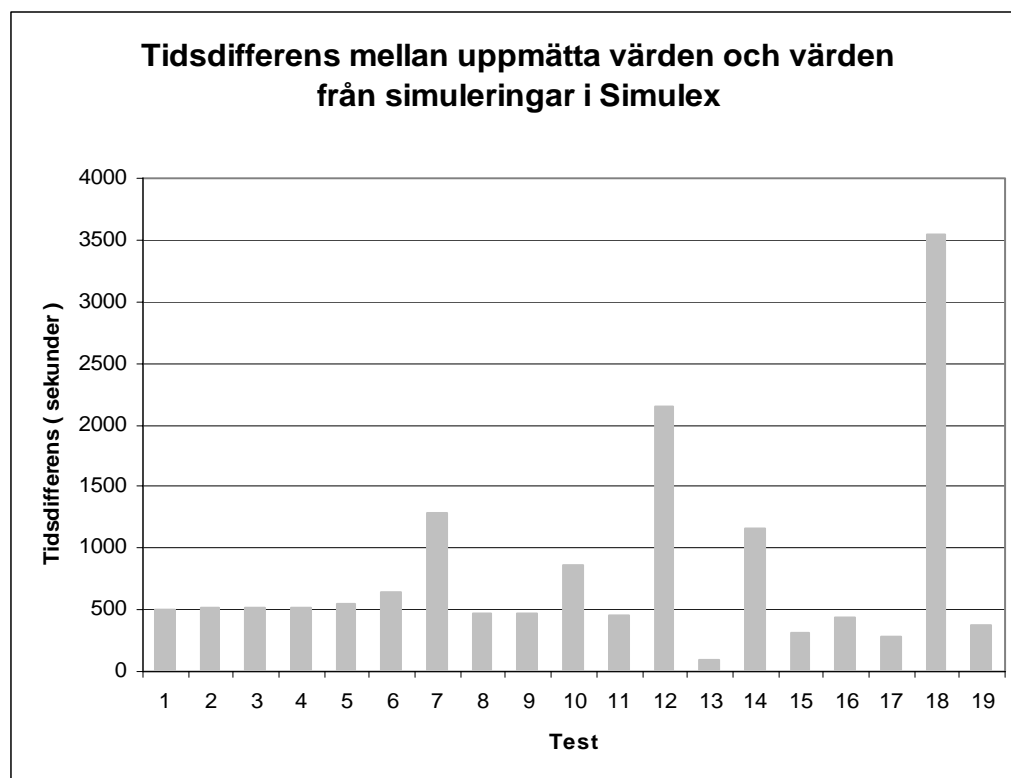


Diagram B.1 Skillnaden mellan känslighetsanalyser i Simulex och uppmätt tid.

Beskrivning av utförda känslighetsanalyser i Steps och deras resultat:

Test	Beskrivning	Min:sek	Fördelning, val av utgångar i % (1 / 2 eller 3)
1	Som simulering av match 1, men utan inverkan från personer på sittplatsläktaren, istället personflöde i utgång 1: 1,2 Personer / ms.	9:27	69 / 31
2	Som simulering av match 2, men utan inverkan från personer på sittplatsläktaren, istället personflöde i utgång 1: 1,2 Personer / ms.	10:29	66 / 34
3	Som simulering av match 3, men utan inverkan från personer på sittplatsläktaren, istället personflöde i utgång 1: 1,2 Personer / ms.	9:16	62 / 38
4	Som test 3, men med personflöde 1,0 Personer / ms på samtliga utgångar.	11:03	62 / 38
5	Som test 3, men med personflöde 1,8 Personer / ms på samtliga utgångar.	8:23	72 / 28
6	Som test 3, men med personsammansättningen 70% män, 15% kvinnor, 5% barn och 10% medelsnitt.	9:15	62 / 38
7	Som test 3, men med en i gånghastighet av 0,6 m/s.	17:08	86 / 14
8	Som test 3, men med en höjning av gånghastigheten med 0,2 m/s för varje persontyp.	9:30	63 / 37
9	Som test 3, men med en sänkning av gånghastigheten med 0,2 m/s för varje persontyp.	9:12	62 / 38
10	Som test 3, men med 5 centimeter större kroppsstorlek i bredd och djup på varje persontyp.	9:15	62 / 38
11	Som test 3, men med 5 centimeter mindre kroppsstorlek i bredd och djup på varje persontyp.	9:15	62 / 38
12	Som test 3, men andelen som känner till utgång 2 och 3 är 50 %.	8:35	56 / 44
13	Som test 3, men andelen som känner till utgång 2 och 3 är 30 %.	10:42	71 / 29
14	Som test 3, men samtliga påbörjar utrymning utan fördröjning.	9:17	62 / 38
15	Som test 3, men samtliga personer är har lägsta möjliga tålamod.	9:08	61 / 39
16	Som test 3, men samtliga personer har högsta möjliga tålamod.	14:56	100 / 0
17	Som test 3, men koefficienten $C_{gång}$ satt till 0.	11:15	60 / 40
18	Som test 3, men koefficienten $C_{kö}$ satt till 0.	14:56	100 / 0
19	Som test 3, men gridnätssystem av storlek 0,2*0,2 meter.	8:20	56 / 44
20	Som test 3, men gridnätssystem av storlek 0,2*0,2 meter och läge "fin grid" valt.	20:40	95 / 5
21	Som test 3, men med läge fin grid på gridnätssystemet.	-**	-
22	Som test 3, men gridnätssystem av storlek 0,05 * 0,05 meter och läge fin grid.	-***	-

* = Endast 2814 personer fick plats på läktarna.

** = Simuleringarna avbröts då antalet personer uppgick till en bråkdel av den egentliga siffran.

*** = Cirka 3300 personer fick plats på läktarna, men simuleringarna avbröts då en bara en bråkdel lyckats utrymma efter 45 minuter.

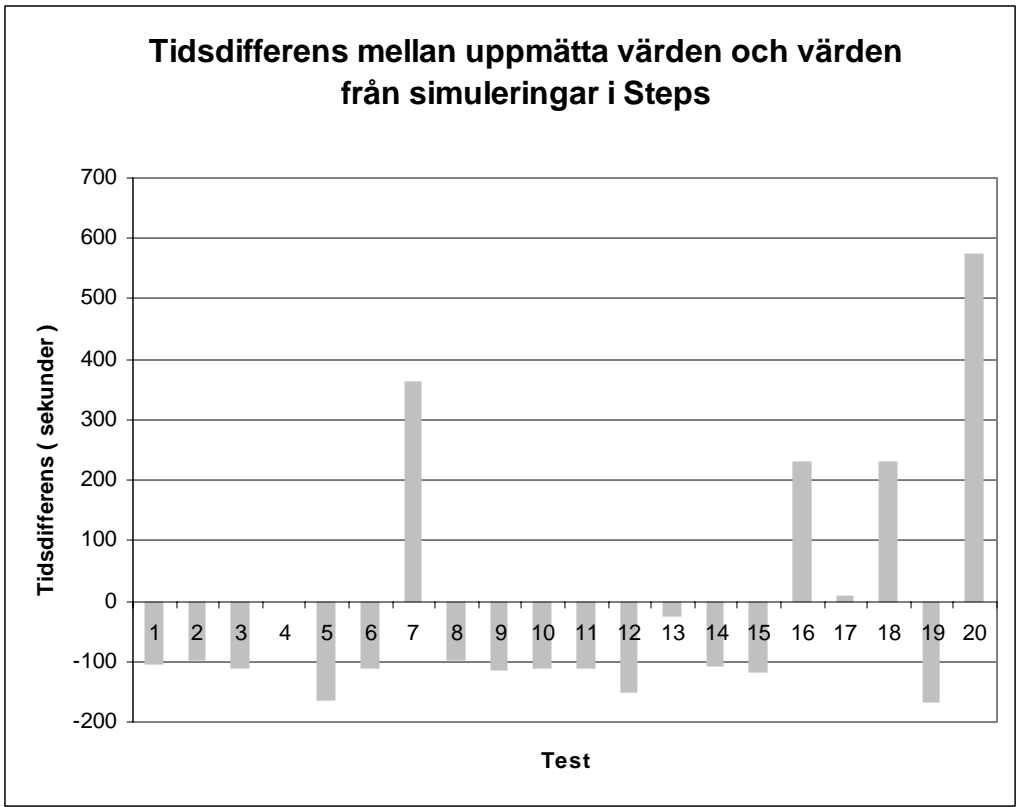


Diagram B.2 Skillnader mellan känslighetsanalyser i Steps och uppmätt tid.

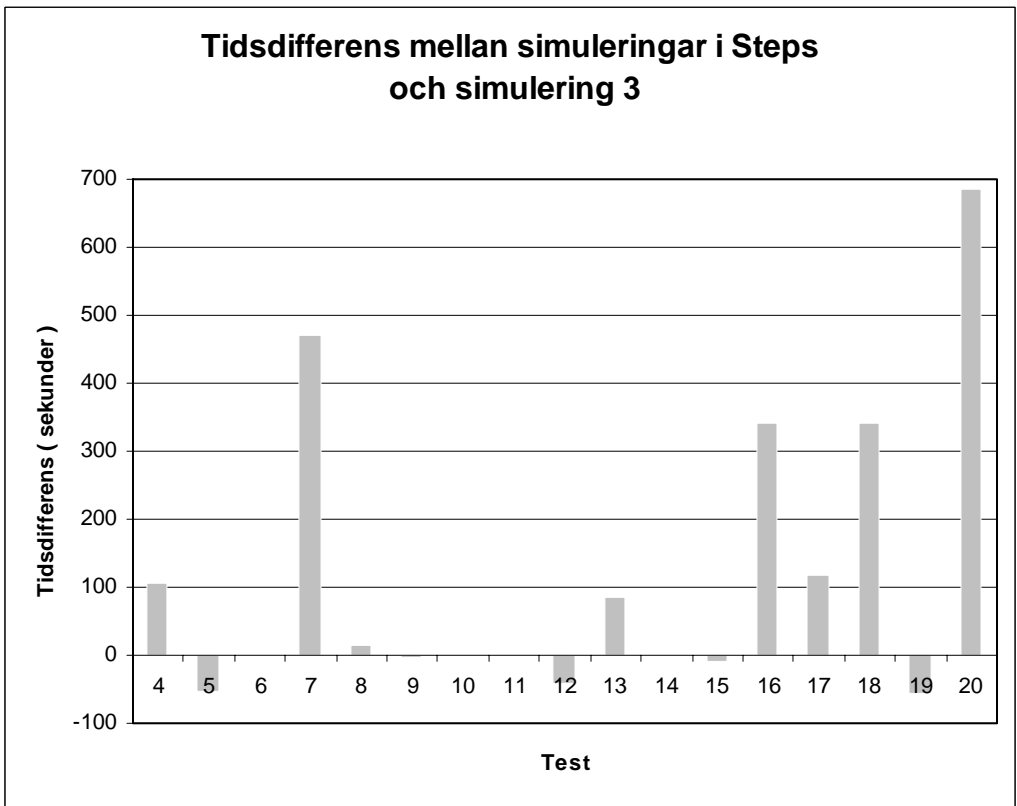


Diagram B.3 Skillnad mellan test 3 och övriga känslighetsanalyser utförda på samma scenario.

Appendix C – Handberäkningar

Handberäkningar utförda enligt ekvation 3.1: $t_d = N/Bf$

Antagande: 3/5 av personerna i område A väljer utgång 1.
2/5 av personantalet står bortom det trånga passaget på område A.
Gångtid fränses.

Uppskattning av personantal och fördelning:

N= Totalt personantal på område A

N1= Antal personer som väljer utgång 1.

N2= Antal personer som väljer utgång 2.

N3= Antal personer som väljer utgång 3.

NT= Antal personer som passerar det trånga passaget på mitten av område A.

	N	N1	N2	N3	NT
Match 1	4000	2400	800	800	1600
Match 2	5000	3000	1000	1000	2000
Match 3	4800	2900	950	950	1900

Dörrbredd:

B1: Bredd på utgång 1 = 3 meter

B2: Bredd på utgång 2 = 2.9 meter

B3: Bredd på utgång 3 = 2.9 meter

BT: Bredd på trångt passage = 2.2 meter

Flödeskonstant:

Enligt svenska dimensioneringsråd: 1.0 (f1)

Enligt brittiska dimensioneringsråd: 1.2-1.8 (f2 och f3)

Enligt utförda fältmätningar: 1.5 (f4)

Tid för passage, t_D :

Match 1:

t_D	N1	N2	N3	NT
F1	800	276	276	727
F2	667	230	230	606
F3	444	153	153	404
F4	533	184	184	485

Märk väl: Den längsta tid som respektive beräkning resulterar i blir den dimensionerande, i detta fall kolumn N1.

Match 2:

t_D	N1	N2	N3	NT
F1	1000	345	345	910
F2	833	287	287	758
F3	555	192	192	505
F4	667	230	230	606

Match 3:

t_D	N1	N2	N3	NT
F1	967	327	327	655
F2	805	273	273	546
F3	537	182	182	364
F4	644	218	218	437