

# Brannprosjektering av innendørs multifunksjonsanlegg

Nødvendig rømningstid

**Andreas Lein Ungersness**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Harald Landrø, BAT

Medveileder: Lars Erik Sorthe, Multiconsult

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel: Brannprosjektering av innendørs multifunksjonsanlegg – Nødvendig rømningstid	Dato: 10.06.2013		
	Antall sider (inkl. bilag): 143		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Andreas Ungersness			
Faglærer/veileder: Harald Landrø			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Lars Erik Sorthe			

Ekstrakt:

Det har de siste årene blitt mer vanlig å bygge multifunksjonsanlegg, eller et anlegg tilrettelagt for flere ulike bruksområder. Flere bruksområder medfører en utforming som kan endres fra arrangement til arrangement. For å tilfredsstille krav i forskriften til rask og sikker rømning, må de ulike utformingene og deres påvirkning på rømningsforholdene vurderes spesielt. Denne rapporten tar derfor for seg forhold som kan påvirke nødvendig rømningstid i multifunksjonsanlegg.

Rapporten er begrenset til å behandle nødvendig rømningstid. Nødvendig rømningstid må alltid vurderes opp imot tilgjengelig rømningstid for å kunne verifisere et byggverks brannsikkerhet.

Det er benyttet to ulike metoder i denne rapporten; litteraturstudium og analyse. Litteraturstudiet gir en oversikt over hvilke faktorer som påvirker den nødvendige rømningstiden. To simuleringsverktøy, Pathfinder og Simulex, har blitt benyttet for å estimere forflytningstiden fra Arena Larvik. Analysen tar ikke hensyn til rømning av personer med funksjonsnedsettelse.

Litteraturstudiet viser at rømningsforholdene på utsiden av et multifunksjonsanlegg også må vektlegges i brannprosjekteringen. Det viser også at personell spiller en særdeles viktig rolle i en rømningssituasjon. Personell må sørge for at personer som har kommet seg ut fra anlegget ikke vil bli stående rett utenfor utgangsdørene. De må ledes videre vekk, slik at personstrømmen ut fra anlegget kan opprettholdes.

Rapporten viser at simuleringsprogrammer er en ypperlig måte å sammenligne ulike areautforminger. Den trekker også fram usikkerhetsmomenter knyttet til programmenes estimat av forflytningstid; to programmer vil sjelden gi samme resultat. Simulex ga gjennomgående en lengre forflytningstid enn Pathfinder.

Stikkord:

1. Nødvendig rømningstid
2. Rømningssimulering
3. Multifunksjonsanlegg
4. Pathfinder, Simulex



# Forord

Denne masteroppgaven utgjør det avsluttende arbeidet på det 5-årige masterprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Oppgaven er skrevet ved Institutt for Bygg, Anlegg og Transport, faggruppe bygnings- og materialteknikk. Fordypningstemaet har vært bygningsmessig brannvern.

Faglig veileder for oppgaven har vært Professor II Harald Landrø.

Multiconsult har fungert som samarbeidspartner til denne oppgaven og har bidratt med forslag til oppgavens innhold og tilgang til simuleringsprogrammet Simulex. Ari Soilammi (Multiconsult/RIF) bidro til at oppgaven ble vinklet mot temaet store innendørs idretthaller. Min eksterne veileder, Lars Erik Sorthe (Multiconsult) har videre hjulpet meg med avgrensing av oppgaven til utforming av rømningsveier i store innendørs idrettsarenaer, hvor rømningssimulering har vært et fokusområde.

I løpet av arbeidet med oppgaven har stipendiat Anders Arnhus bidratt med gode innspill vedrørende temaet nødvendig rømningstid, samt forslag til valg av analyseobjekt. Vestfold Fylkeskommune v/Kjell Robert Kaspersen har bidratt med tegningsgrunnlag av Arena Larvik, som har blitt benyttet som utgangspunkt for simuleringene. I tillegg vil jeg takke Jon Ivar Belghaug Knarud for hans innspill og gode råd underveis i arbeidet med oppgaven.

Trondheim, 10. juni 2013

---

Andreas Ungersness



# Sammendrag

Det har de siste årene blitt mer vanlig å bygge multifunksjonsanlegg, eller et anlegg tilrettelagt for flere ulike bruksområder. Flere bruksområder medfører en utforming som kan endres fra arrangement til arrangement. For å tilfredsstille krav i forskriften til rask og sikker rømning, må de ulike utformingene og deres påvirkning på rømningsforholdene vurderes spesielt. Denne rapporten tar derfor for seg forhold som kan påvirke nødvendig rømningstid i multifunksjonsanlegg.

Rapporten er begrenset til å behandle nødvendig rømningstid. Nødvendig rømningstid må alltid vurderes opp imot tilgjengelig rømningstid for å kunne verifisere et byggverks brannsikkerhet.

Det er benyttet to ulike metoder i denne rapporten; litteraturstudium og analyse. Litteraturstudiet gir en oversikt over hvilke faktorer som påvirker den nødvendige rømningstiden. To simuleringsverktøy, Pathfinder og Simulex, har blitt benyttet for å estimere forflytningstiden fra Arena Larvik. Analysen tar ikke hensyn til rømning av personer med funksjonsnedsettelse.

Litteraturstudiet viser at rømningsforholdene på utsiden av et multifunksjonsanlegg også må vektlegges i brannprosjekteringen. Det viser også at personell spiller en særdeles viktig rolle i en rømningssituasjon. Personell må sørge for at personer som har kommet seg ut fra anlegget ikke vil bli stående rett utenfor utgangsdørene. De må ledes videre vekk, slik at personstrømmer ut fra anlegget kan opprettholdes.

Rapporten viser at simuleringsprogrammer er en ypperlig måte å sammenligne ulike arenautforminger. Den trekker også fram usikkerhetsmomenter knyttet til programmenes estimat av forflytningstid; to programmer vil sjelden gi samme resultat. Simulex ga gjennomgående en lengre forflytningstid enn Pathfinder.





# Summary

Recently it has become more common to build multi-purpose facilities, or facilities suitable for several different applications. These multiple applications result in a design that can be varied between different events. The various designs and their impact on emergency conditions need special attention to satisfy the requirements regarding quick and safe escape in the building codes. This report consider the different matters that may affect the required safe escape time in multi-purpose facilities

The report considers the required safe escape time only. The required safe escape time must always be compared against the available safe escape time to verify the fire safety of a building.

Two different methods are used in this report; a literature study and an analysis. The literature study provides an overview of different factors that may affect the required safe escape time. Two different simulation tools, Pathfinder and Simulex, have been used to estimate the movement time from Arena Larvik. The analysis does not consider the escape of persons with disabilities.

The literature study show a necessary emphasis on the emergency conditions also outside the multi-purpose facility, during fire safety engineering. The study also show that personnel play a very important role during an emergency situation. Personnel must ensure that people who have already escaped the building do not occupy the space right outside the exit doors. The escaped people must be guided away, so that the flow rate of people exiting the building can be maintained.

The report show that simulation tools are an excellent way to compare different arena layouts. It also highlights the uncertainties associated with estimating movement times; two different tools will rarely give the same result. Simulex gave a movement time that was consistently longer than in Pathfinder.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn . . . . .	1
1.1.1	Internasjonale katastrofale ulykker . . . . .	2
1.1.2	Årsaker til ulykkene . . . . .	4
1.2	Problembeskrivelse . . . . .	4
1.3	Målformulering . . . . .	5
1.3.1	Resultatmål . . . . .	5
1.3.2	Suksesskriterier . . . . .	5
1.4	Omfang og begrensninger . . . . .	5
1.5	Rapportens oppbygging . . . . .	6
1.5.1	Litteraturstudium . . . . .	6
1.5.2	Analyser . . . . .	6
1.5.3	Diskusjon og konklusjon . . . . .	6
1.5.4	Definisjoner og forklaringer . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Metode</b>	<b>9</b>
2.1	Litteraturstudium . . . . .	9
2.2	Analyse . . . . .	10
2.2.1	Kvalitativ analyse . . . . .	10
2.2.2	Kvantitativ analyse . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Introduksjon til rømning</b>	<b>11</b>
3.1	Aktuelle krav i TEK 10 . . . . .	11
3.1.1	Risikoklasser . . . . .	11
3.1.2	Brannklasse . . . . .	12
3.1.3	Bæresystemet . . . . .	13
3.1.4	Rømning . . . . .	13
3.2	Generelt om rømning . . . . .	15
3.2.1	Rømningsforhold . . . . .	16
3.2.2	Sikkerhetsmargin . . . . .	17
3.3	Særskilte brannobjekter . . . . .	19

<b>4</b>	<b>Nødvendig rømningstid</b>	<b>21</b>
4.1	Deteksjonstid . . . . .	22
4.1.1	Temaveiledning HO-3/2000 . . . . .	22
4.2	Reaksjonstid . . . . .	23
4.2.1	Anbefalinger fra Byggforsk og DSB . . . . .	24
4.2.2	Rømningsøvelse fra IKEA-varehus . . . . .	25
4.2.3	Alarmtypers påvirkning på reaksjonstiden . . . . .	26
4.2.4	Andre faktorer som påvirker reaksjonstiden . . . . .	27
4.2.5	SFPE Handbook . . . . .	28
4.3	Forflytningstid . . . . .	29
4.3.1	Teori for forflytningstid . . . . .	29
4.3.2	Faktorer som påvirker ganghastigheten . . . . .	31
4.3.3	Utforming av rømningsveier . . . . .	32
4.3.4	Innsnevring . . . . .	33
4.3.5	Observasjoner fra rugbykamp . . . . .	34
4.3.6	Eksterne faktorer . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Simuleringsprogrammer</b>	<b>39</b>
5.1	Simulex . . . . .	39
5.1.1	Prinsipper og antagelser . . . . .	41
5.1.2	Kroppslige dimensjoner . . . . .	41
5.1.3	Personers ganghastighet . . . . .	42
5.1.4	Personers psykologiske egenskaper . . . . .	44
5.1.5	Kjente begrensninger . . . . .	45
5.2	Pathfinder . . . . .	45
5.2.1	Person-profil . . . . .	46
5.2.2	Personers oppførsel . . . . .	48
5.2.3	Generering av rømningsrute . . . . .	49
5.2.4	SFPE-modus . . . . .	50
5.2.5	“Steering” modus . . . . .	51
5.2.6	Kjente begrensninger . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Kvalitativ analyse</b>	<b>55</b>
6.1	Beskrivelse av analyseobjektet . . . . .	55
6.2	Valg av analysemetode og analyseteknikk . . . . .	58
6.3	Fastsetting av beslutningskriterier . . . . .	59
6.4	Fareidentifikasjon . . . . .	60
6.5	Analyse av årsaker og sannsynlighet . . . . .	60
6.6	Brannscenarier . . . . .	62

---

<b>7</b>	<b>Kvantitativ analyse</b>	<b>65</b>
7.1	Fastsetting av deteksjonstid og reaksjonstid . . . . .	66
7.1.1	Deteksjonstid . . . . .	66
7.1.2	Reaksjonstid . . . . .	66
7.2	Generelt om modellen i Pathfinder . . . . .	67
7.3	Fullsatt håndballkamp i Pathfinder . . . . .	68
7.3.1	Beskrivelse av modellen . . . . .	68
7.3.2	Resultater . . . . .	70
7.3.3	Sensitivitetsanalyse av SFPE-modus . . . . .	72
7.4	Fullsatt konsert i Pathfinder . . . . .	74
7.4.1	Beskrivelse av modellen . . . . .	74
7.4.2	Resultater . . . . .	75
7.5	Messe i Pathfinder . . . . .	77
7.5.1	Beskrivelse av modellen . . . . .	77
7.5.2	Resultater . . . . .	78
7.6	Blokkering av rømningsvei . . . . .	79
7.6.1	Resultater . . . . .	80
7.7	Generelt om modellen i Simulex . . . . .	81
7.8	Fullsatt håndballkamp i Simulex . . . . .	82
7.8.1	Beskrivelse av modellen . . . . .	82
7.8.2	Resultater . . . . .	83
7.9	Simulering av fullsatt konsert i Simulex . . . . .	86
7.9.1	Beskrivelse av modellen . . . . .	86
7.9.2	Resultater . . . . .	87
7.10	Simulering av messe i Simulex . . . . .	89
7.10.1	Beskrivelse av modellen . . . . .	89
7.10.2	Resultater . . . . .	89
7.11	Tilnærming til Simulex ved å bruke Pathfinder . . . . .	90
7.12	Sammenligning av simulert forflytningstid . . . . .	91
7.13	Estimering av nødvendig rømningstid . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>93</b>
8.1	RSET/ASET . . . . .	93
8.2	Nødvendig rømningstid . . . . .	94
8.2.1	Deteksjonstid . . . . .	94
8.2.2	Reaksjonstid . . . . .	95
8.2.3	Forflytningstid . . . . .	95

8.3	Simuleringsprogrammer . . . . .	95
8.3.1	Generering av modeller . . . . .	95
8.3.2	Simuleringene . . . . .	97
8.3.3	Simuleringsresultater . . . . .	98
8.4	Tanker om simuleringene . . . . .	99
<b>9</b>	<b>Konklusjon og anbefalinger</b>	<b>101</b>
9.1	Konklusjon . . . . .	101
9.2	Anbefalinger . . . . .	102
9.3	Forslag til videre arbeid . . . . .	102
	<b>Referanser</b>	<b>109</b>
	<b>Vedlegg</b>	
<b>A</b>	<b>Oppgavetekst</b>	<b>111</b>
<b>B</b>	<b>Detaljert beskrivelse av simuleringene</b>	<b>115</b>
<b>C</b>	<b>Alternativ fordeling av brannårsaker</b>	<b>125</b>

# Figurer

3.1	VTEK 10: Tilgjengelig og nødvendig rømningstid , gjengitt fra [1] . . .	15
4.1	Tilgjengelig og nødvendig rømningstid, hentet fra [2] . . . . .	22
4.2	Eksempel på dimensjonering av antall sitteplasser i bredden og gangpassasjer i et forsamlingslokale, hentet fra [3] . . . . .	33
4.3	Illustrasjon av “crossed flows” . . . . .	35
4.4	Ideell utforming av utganger fra tribunen ihht. Hoskin . . . . .	36
5.1	Figur som viser den matematiske representasjonen av en kropp i Simulex	42
5.2	Sammenheng mellom ganghastighet og avstand mellom personer i Simulex . . . . .	43
5.3	Figuren viser et eksempel på henholdsvis (a) Triangulærfordeling og (b) normalfordeling . . . . .	44
5.4	Figur som viser cylinderen som representerer en person i Pathfinder .	47
5.5	En persons planlagte rømningsrute og waypoints i Pathfinder, gjengitt fra [4] . . . . .	49
5.6	Sammenheng mellom ganghastighet og persontetthet i Pathfinder . .	52
6.1	Tegningsgrunnlag fra Vestfold Fylkeskommune . . . . .	56
6.2	Figuren viser det tilgjengelige forflytningsarealet på nivå 1 og 2. På nivå 1 er dette skravert med rødt (a) og på nivå 2 er dette skravert med blått (b). . . . .	58
6.3	Årsaker til brann i næringsbygg, laget på bakgrunn av tall fra DSB [5]	61
7.1	Figuren viser modellen som ble brukt i Pathfinder samt plassering av ramper og trapper . . . . .	68
7.2	Figuren viser modellen som ble brukt som utgangspunkt for iterasjonsprosessen i Pathfinder . . . . .	69
7.3	Figuren viser et situasjonsbilde (a) før endringen og (b) etter endringen	71
7.4	Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid, for ulike modus, ved simulering av SimID: 130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	72

7.5	Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid for sensitivitetsanalyse av SimID: 130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs . . . .	73
7.6	Figuren viser de to modellene som ble brukt til simulering av fullsatt konsert i Pathfinder. (a) Ståplasser på spilleflaten og (b) sitteplasser på spilleflaten . . . . .	75
7.7	Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid, for ulike modus, ved simulering av SimID: 130-newdoor-1800gangpassasje-v3 . . . . .	77
7.8	Figuren viser to ulike reolutforminger for et messescenario, henholdsvis (a) messe-v1 og (b) messe-v4 . . . . .	78
7.9	Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid, for ulike modus, ved simulering av SimID: messe-v4 . . . . .	79
7.10	Figuren viser et av DXF-underlagene som ble benyttet i Simulex . . .	82
7.11	Figuren viser skjermdump av nedre del, tribune nord, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer gjennom tunellene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter fra tribuner til utgangsdører. . . . .	84
7.12	Figuren viser skjermdump av øvre del, tribune nord, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer i de tre trappeløpene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter seg fra tribuner til utgangsdører. . . . .	84
7.13	Figuren viser skjermdump av nedre del, tribune nord, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer gjennom tunellene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter seg fra tribuner til utgangsdører. . . . .	85
7.14	Figuren viser skjermdump av øvre del, tribune øst, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer i trappeløpene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter seg fra overkant av tribunen til utgangsdører. . . . .	85
7.15	Figuren viser modellen som ble benyttet ved simulering av en fullsatt konsert i Simulex (stående personer på spilleflaten) . . . . .	86
7.16	Figuren viser skjermdump fra simulering av fullsatt konsert i Simulex, med ståplasser på spilleflaten. Øvre del av figuren viser kødannelser ved tunellene, mens nedre del viser personstrømmer i tunnelene. . . .	87
7.17	Figuren viser skjermdump fra simulering av fullsatt konsert i Simulex, med sitteplasser på spilleflaten. Øvre del av figuren viser kødannelser ved tunellene, mens nedre del viser personstrømmer i tunnelene. . . .	88



---

7.18	Figuren viser skjermdump fra simulering av SimID test38.sittende der personer låste seg fast. Denne skjermdumpen ble gjort etter 4.0 min av simuleringen. De fastlåste personene forholdt seg på samme måte til simuleringen ble avbrutt etter nesten 47 min. . . . .	88
7.19	Figuren viser skjermdump fra simulering av messe i Simulex, SimID: test20.messe. En kan se at den dårlige reolutformingen skaper store kødannelser der det er smalt. . . . .	89
7.20	Figuren viser skjermdump fra simulering av messe i Simulex, SimID: test23.messev2. Kødannelser oppstår her først ved tunellene. . . . .	90
7.21	Figuren viser forflytningstid for ulike simuleringsprogram/modus . . .	91



# Tabeller

1.1	Noen katastrofale hendelser i tilknytning til store folkemengder. Der andre kilder ikke er angitt er tabellen gjengitt fra [6]	3
3.1	Risikoklasser, gjengitt fra [7]	12
3.2	Brannklasser, gjengitt fra [7]	13
3.3	Tålegrenser for personer under rømning, gjengitt fra [8]	17
3.4	Kritisk tilstand for mennesker, gjengitt fra [9]	17
4.1	Responstid i minutter for røykdetektorer og sprinklere montert i tak/himling, utdrag fra [10]	23
4.2	Veiledende reaksjonstider for noen virksomheter, gjengitt fra [2]	24
4.3	Ganghastigheter, gjengitt fra [2]	31
4.4	Fordeler og ulemper ved bruk av delvis evakuering, gjengitt fra [11]	36
5.1	Simuleringsprogrammer for forflytning ved rømning	39
5.2	Ulike kroppstyper i Simulex, gjengitt fra [12]	41
5.3	Fordeling av kroppsfasonger for ulike brukertyper, gjengitt fra [12]	43
5.4	“Default”-parametre i personprofilen til Pathfinder	48
6.1	Egenskaper ved analysebyggverket	57
6.2	Rømningstider fra noen spanske fotballstadioner [13]	59
6.3	Aktuelle farekilder ved analyseobjektet	60
7.1	Rampenes plassering og bredde	67
7.2	Fordeling av personer ved simulering av håndballkamp	69
7.3	Resultater fra simulering av fullsatt håndballkamp i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.1.	70
7.4	Resultater fra sensitivitetsanalyse av parametre i SFPE-modus	73
7.5	Fordeling av personer ved simulering av fullsatt konsert og ved bruk av ståplasser	74

---

7.6	Fordeling av personer ved simulering av fullsatt konsert og ved bruk av sitteplasser . . . . .	74
7.7	Resultater fra simulering av fullsatt konsert med ståplasser på spilleflaten i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.2. . . . .	76
7.8	Resultater fra simulering av fullsatt konsert med kun sitteplasser i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.2. . . . .	76
7.9	Resultater fra simulering av messescenarioer i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.3. . . . .	78
7.10	Simuleringsmodeller som ble benyttet for brannscenario der en av rømningsveiene var blokkert . . . . .	79
7.11	Resultater fra simulering av blokkert utgang, og ikke blokkert utgang, i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.4. . . . .	80
7.12	Resultater fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.5. . . . .	83
7.13	Resultater fra simulering av fullsatt konsert i Simulex. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.6. . . . .	87
7.14	Resultater fra simulering av messe i Simulex. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.7. . . . .	89
7.15	Resultater ved bruk av persontype kontorarbeidere på messeutføring i Pathfinder . . . . .	90
7.16	Benyttet persontall i simuleringene . . . . .	92

# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Innendørs idrettsanlegg gjør det mulig å bedrive idrettsaktiviteter året rundt, uavhengig av vær og vind. Idretter som håndball, basketball og volleyball har i lang tid vært utført innendørs i forholdsvis små idrettshaller. I de senere år har også fotball blitt flyttet inn under tak. Fotball krever større plass og dette medfører en økning av dimensjonene på anlegget.

Når et stort innendørs idrettsanlegg blir bygget skal det gjerne kunne benyttes til mer enn en spesialidrett. Flerbrukshaller kan benyttes til mange ulike idrettsaktiviteter. I de største anleggene kan også flere aktiviteter bli utført på samme tid.

I visse tilfeller kan idrettsanleggene bli benyttet til andre formål enn alminnelig idrett. Anlegg som blir benyttet til konserter, messer og motorsport, i tillegg til vanlige idretts- og sportsarrangementer blir gjerne kalt multifunksjonsanlegg. Telenor Arena på Fornebu er et slikt anlegg. Arenaen har en oppgitt kapasitet på 15 000 personer for idrettsarrangement og 23 000 personer for konserter [14]. Under en fotballkamp vil spilleflaten være forholdsvis tom under selve arrangementet. Dette er i sterk kontrast til en konsert hvor spilleflaten vil bestå av scene, publikum og diverse elektrisk utstyr. Under noen konsertarrangementer kan det også foregå salg av alkohol. I forbindelse med messer kan spilleflaten deles opp i mange “korridorer” av til dels brennbart materiale. Avhengig av type arrangement vil derfor slike multifunksjonsanlegg ha ulike rømningsforhold.

Andre store multifunksjonsanlegg i Norge er Oslo Spektrum, Håkons Hall på Lillehammer, Vikingskipet på Hamar, DNB Arena i Stavanger og Arena Larvik. I

forbindelse med søknad om vinter-OL i Oslo i 2022 kan det være behov for å bygge en til to store arenaer [15]. I følge Oslo2022 trengs det blant annet to ishockeyhaller hvorav den største må ha plass til 10 000 tilskuere. Etter at et eventuelt OL er over, skal denne hallen brukes som en fleridrettshall.

Kapittel 11 i *Forskrift om tekniske krav til byggverk* (TEK 10) behandler sikkerhet ved brann. Ved prosjektering og utførelse av byggverk skal det legges til rette for rask og sikker rømning.

*“Byggverk skal prosjekteres og utføres for rask og sikker rømning og redning. Det skal tas hensyn til personer med funksjonsnedsettelse.” (TEK 10, § 11-11 (1)) [7]*

Store innendørs multifunksjonsanlegg er bygget for å kunne ta imot et stort antall mennesker. De største arenaene i Norge kan som nevnt ta imot over 20 000 mennesker. Hvis det oppstår en brann i et slikt byggverk, kan den potensielt utgjøre en stor risiko. I byggverk beregnet for mange personer setter TEK 10 krav til selve rømningsveiene.

*“I byggverk med mange personer eller hvor flukt- og rømningsveiene kan være lange og ha retningsendringer, skal rømningsveiene ha god belysning og være merket slik at rømning kan skje på en rask og effektiv måte. Store byggverk og byggverk beregnet for et stort antall personer, samt byggverk beregnet for virksomhet i risikoklasse 5 og 6, skal ha ledesystem.” (TEK 10, § 11-12 (3)) [7]*

### 1.1.1 Internasjonale katastrofale ulykker

Når store mengder med personer samles kan det i noen tilfeller få uønskede konsekvenser. I løpet av historien har det oppstått flere katastrofale ulykker der menneskeliv har gått tapt. Dickie oppgir følgende grunner til flertallet av slike katastrofale hendelser [6];

1. Utilstrekkelig planlegging
2. Oppstemt folkemengde
3. Manglende kontroll/ledelse av folkemengden

#### 4. Mangel eller feil ved konstruksjon

Noen katastrofale ulykker, der en stor folkemengde var samlet, er gitt i Tabell 1.1. Tabellen tar for seg noen av de største hendelsene, i løpet av de siste 110 årene, der store folkemengder forårsaket tap av menneskeliv. Av tabellen kan en se hvor og når, samt på hvilken type arena, ulykkene forekom. Kun dødsfall er nevnt, men det må påpekes at det i tillegg var mange skadde utover antall døde.

Tabell 1.1: Noen katastrofale hendelser i tilknytning til store folkemengder. Der andre kilder ikke er angitt er tabellen gjengitt fra [6]

År	Sted	Arena	Døde	Kommentar
1902	Glasgow, UK	Stadion	26	Sviktende konstruksjon
1903	Chicago, USA	Teater	602	Nødevakuering
1943	London, UK	T-banestasjon	173	Inntreden <sup>a</sup>
1946	Bolton, UK	Stadion	33	Under arrangement
1961	Rio de Janeiro, Brasil	Sirkus	250	Nødevakuering
1964	Lima, Peru	Stadion	318	Opptøyer
1967	Kayseri, Tyrkia	Stadion	40	Opptøyer
1968	Buenos Aires, Argentina	Stadion	73	Utvandring <sup>b</sup>
1971	Glasgow, UK	Stadion	66	Utvandring
1974	Kairo, Egypt	Stadion	48	Under arrangement
1979	Cincinnati, USA	Utendørs konsert	11	Inntreden
1982	Moskva, Russland	Stadion	340	Utvandring
1989	Sheffield, UK	Stadion	96	Under arrangement
1990	Mekka, Saudi Arabia	Fotgjengertunnel	1425	Inntreden/utvandring
1991	New York, USA	Innendørs arena	9	Inntreden
1992	Bastia, Korsika	Stadion	10	Sviktende konstruksjon
1994	Henyang, Kina	Togstasjon	50	Ombordstigning
1994	Mekka, Saudi Arabia	Hellig grunn	250	Under seremoni
1996	Guatemala City, Guatemala	Stadion	84	Inntreden [16]
2000	Harare, Zimbabwe	Stadion	12	Utvandring [17]
2001	Johannesburg, Sør-Afrika	Stadion	43	Inntreden [18]
2001	Accra, Ghana	Stadion	126	Utvandring [19]
2012	Port Said, Egypt	Stadion	74	Opptøyer [20]

<sup>a</sup>Inntreden tilsvarer en vanlig forflytning av personer på vei inn til arrangementet

<sup>b</sup>Utvandring tilsvarer en vanlig forflytning av personer ut av stadion, ved arrangementets slutt

Bare et fåtall av de nevnte ulykkene forekom som et direkte resultat av en brann. Selv om dette er tilfelle, er allikevel forståelse av personers oppførsel og årsaken til disse ulykkene viktig. På denne måten kan en forhindre framtidige tragedier

under rømningsfasen ved en eventuell brann. Av Tabell 1.1 kan en se at katastrofale ulykker ikke bare oppstår under rømning fra en arena. Ulykker kan også oppstå når personer skal komme seg inn på arenaen, samt under selve arrangementet. I tillegg til de hendelsene som er nevnt i tabellen har det forekommet store tragedier på grunn av brann i nattklubber. Så sent som i 2013 omkom 239 personer på en nattklubb i Santa Maria, Brasil [21].

### 1.1.2 Årsaker til ulykkene

Zhang m. fl. har undersøkt årsaken til ulykker som har oppstått på stadioner i perioden 1903-2005. De vanligste årsakene har vært ihjeltramping og knusing på grunn av panikk. Disse har stått for 79% av ulykkene og 90% av dødsfallene i denne perioden [22]. Ulykkene har forekommet i områder der publikum har stått tilnærmet rolig, i tilknytning til smale rømningsveier.

Fruin har også undersøkt årsaker til noen av dødsfallene i Tabell 1.1. I New York (1991) døde 9 personer på grunn av kvelning da de forsøkte å komme seg inn på en basketballkamp [23]. Alt for mange personer hadde dukket opp for å se en kjendis-kamp i en gymsal. En av gymsalens nedre innganger befant seg i bunnen av en trapp, der døren bare kunne åpnes utover (ihht. brannforskriften). Personer i bunnen av trappen ble klemt ihjel grunnet en trykkende folkemengde fra oven.

De fleste ulykker i folkemengder viser en manglende kommunikasjon fra fremre til bakre del av mengden. Personer i bakre del presser på forover, mens de i front opplever stort ubehag. Lavere persontetthet i bakre del tillater friere bevegelser, mens personer i fremre del er fastklemt. Når fremre rekke kollapser gir dette en falsk oppfatning til bakre del om en fremoverrettet bevegelse. Sikkerhetspersonell forsøker ofte å få en lokal kontroll i front av folkemengden, ved å oppfordre folk til ikke å dytte. Dette er derimot lite effektivt der det bygger opp til å bli en stor ulykke. [23].

## 1.2 Problembeskrivelse

Denne rapporten tar for seg innendørs multifunksjonsanlegg i Norge. I forbindelse med dette har Vestfold Fylkeskommune bistått med plantegning av Arena Larvik. En noe egenmodifisert versjon av denne arenaen har blitt benyttet som analysebyggverk. Denne rapporten vil gi svar følgende spørsmål:



- Hvilke krav stilles til innendørs multifunksjonsanlegg i TEK 10?
- Hvordan oppfører folk seg i rømningssituasjoner?
- Hva påvirker den nødvendige rømningstiden fra innendørs multifunksjonsanlegg?
- Hvordan kan rømning fra innendørs multifunksjonsanlegg simuleres?
- Kan oppførsel implementeres i simuleringsverktøy?

## **1.3 Målformulering**

### **1.3.1 Resultatmål**

Utrede hvordan rømning kan sikres, samt avdekke usikkerhet knyttet til rømningssimuleringer, fra store innendørs multifunksjonsanlegg innen 10. juni 2013.

### **1.3.2 Suksesskriterier**

- Et litteraturstudie skal identifisere forhold som påvirker nødvendig rømningstid
- Begrensninger i to ulike simuleringsverktøy skal identifiseres og vurderes
- Estimering av nødvendig rømningstid for et analyseobjekt skal utføres ved bruk av to ulike simuleringsverktøy

## **1.4 Omfang og begrensninger**

Et multifunksjonsanlegg har gjerne en kompleks utforming og spesielle ventilasjonsforhold. Bestemmelse av tilgjengelig tid til rømning bør derfor bestemmes ved hjelp av en CFD-analyse. Av hensyn til tid ble derfor denne rapporten begrenset til å kun omhandle nødvendig rømningstid.

Rapporten tar for seg faktorer som kan påvirke den nødvendige rømningstiden ved innendørs multifunksjonsanlegg. En god del av disse faktorene kan også være aktuelle for andre typer byggverk, men de er her sett i sammenheng med multifunksjonsanlegg.

I analysedelen av denne rapporten er det ikke tatt hensyn til rømning av personer med funksjonsnedsettelse.

Det har blitt benyttet to ulike simuleringsverktøy for estimering av forflytningstiden. Disse to verktøyene, samt deres resultater, har blitt sammenlignet med hverandre. I simuleringene har det blitt antatt at alle personer befinner seg på tribunen eller plassen sin ved brannstart.

## 1.5 Rapportens oppbygging

### 1.5.1 Litteraturstudium

Denne rapporten har et tredelt litteraturstudium. Første del behandler krav til rømning i lovverket. Andre del behandler nødvendig rømningstid, mens tredje del tar for seg teorien bak to simuleringsverktøy.

En stor del av litteraturen som er benyttet i denne rapporten er skrevet på andre språk enn norsk. Ved bruk av utenlandsk litteratur, er det mulig at nyanser kan ha gått tapt på grunn av oversettelsen.

### 1.5.2 Analyser

Analysen er delt inn i en kvalitativ analyse og en kvantitativ analyse. Den kvalitative analysen inneholder beskrivelse av analyseobjektet og ender med en utvelgelse av scenarioer til den kvantitative delen.

Den kvantitative delen inneholder rømningsanalyser utført i simuleringsprogrammene Pathfinder og Simulex, samt bestemmelse av nødvendig rømningstid.

### 1.5.3 Diskusjon og konklusjon

Rapporten avsluttes med en diskusjon av de ulike begrepene innenfor temaet nødvendig rømningstid. Noen erfaringer ved bruk av de to simuleringsprogrammene blir også trukket frem. Konklusjonen tar for seg hva som har kommet fram av arbeidet med denne rapporten.

#### **1.5.4 Definisjoner og forklaringer**

**mode vs. modus** - Ved bruk av Pathfinder kan en velge mellom to ulike former for å beskrive personers bevegelser. Disse kalles “SFPE-mode” og “steering mode”. Mode kan oversettes til modus, og modus er derfor benyttet videre i denne rapporten. I noen tilfeller blir Simulex også referert til som en modus.

**“Default”** - Ved bruk av “default”-verdier menes det å benytte de opprinnelige parameterverdiene i et program. Dette vil si at en ikke forandrer på noen av de allerede forhåndsdefinerte verdiene i et program.



# Kapittel 2

## Metode

I denne rapporten har det blitt benyttet to ulike metoder. Den første metoden var å utføre et litteraturstudie innenfor temaet nødvendig rømningstid. Deretter ble det utført analyser ved bruk av to ulike simuleringsverktøy.

### 2.1 Litteraturstudium

Litteraturstudiet har hatt til formål å finne relevant litteratur innenfor temaet nødvendig rømningstid. I tillegg har brukermanualer til simuleringsprogrammene Simu-lex 6.0 og Pathfinder 2012 blitt gjennomgått.

Følgende metoder har blitt benyttet for å finne relevant litteratur:

- Bruk av søkemotoren Google
- Bruk av nettbiblioteket ASCE Library og SciVerse gjennom NTNUs nettbibliotek
- Gjennomgang av SINTEF-rapporter og byggforsklader
- Gjennomgang av tidligere masteroppgaver ved NTNU
- Bruk av standarder fra Norsk Standard

Det er forsøkt å benytte litteratur fra kilder som er ansett å være troverdige. Litteraturen anses som troverdig hvis den kommer fra anerkjente forfattere, universiteter og forskningsinstitusjoner. I noen få av tilfellene kommer litteraturen fra litt mindre kjente forfattere og universiteter. Basert på de brukte metodene har allikevel denne

informasjonen blitt ansett som troverdig. Selv om litteraturen er ansett som troverdig, må det påpekes at det kan forekomme feil.

Noe informasjon er innhentet fra nettbaserte nyhetsbyråer. Dette har stort sett vært i forbindelse med innhenting av opplysninger om ulike katastrofale ulykker. Denne informasjonen har blitt ansett som troverdig, da nyhetsbyråene har vært internasjonalt anerkjente.

## **2.2 Analyse**

### **2.2.1 Kvalitativ analyse**

Det ble utført en kvalitativ analyse for å avdekke ulike brannscenarier. Videre dannet denne grunnlaget for valg av analysescenarier til den kvantitative analysen.

### **2.2.2 Kvantitativ analyse**

Den kvantitative analysen ble utført ved hjelp av simuleringsverktøyene Simulex 6.0 og Pathfinder 2012. Verktøyene ble benyttet på en eksempelarena, laget på bakgrunn av Arena Larvik. Valget av simuleringsverktøy ble gjort på bakgrunn av deres tilgjengelighet. Pathfinder har gratis studentlisens i 180 dager, mens samarbeidsbedriften Multiconsult har lisens på Simulex.

Analysen skulle vise de ulike simuleringsverktøyenes estimerte forflytningstid av mennesker ut av en bygning, og om resultatene samsvarte. Implementering av personers oppførsel under rømning ble også forsøkt utført. Dette ble gjort for å kunne vurdere verktøyenes muligheter for dette.

# Kapittel 3

## Introduksjon til rømning

### 3.1 Aktuelle krav i TEK 10

*Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK 10)* ble fastsatt av Kommunal- og regionaldepartementet 26.mars 2010, med hjemmel i plan- og bygningsloven (PBL) [7]. Formålet med denne forskriften er å *sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi*. Forskriften setter altså retningslinjer for hvordan nye byggverk skal utføres. I denne rapporten er fokuset rettet mot nye multifunksjonsanlegg beregnet for 25 000 mennesker.

Med bakgrunn i dette, er det nødvendig å gå igjennom hva forskriften sier om akkurat slike byggverk. Kapittel 11 i forskriften behandler sikkerhet ved brann. I denne rapporten vil i hovedsak de punkter som er spesielt relevante for innendørs multifunksjonsanlegg bli behandlet.

#### 3.1.1 Risikoklasser

Ut fra den trusselen en brann kan innebære for skade på liv og helse, skal byggverket plasseres i risikoklasser etter Tabell 3.1 (TEK 10, § 11-2) [7]. Det finnes seks risikoklasser hvorav klasse 6 stiller de høyeste kravene til sikkerhet. Risikoklasse avhenger blant annet av byggverkets bruksområde og brukernes forutsetning for å rømme bygget.

Et alternativ til å bruke forskriften direkte er å bruke veiledningen. *Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK 10)* er utarbeidet av Direktoratet for byggkvalitet.

Tabell 3.1: Risikoklasser, gjengitt fra [7]

Risikoklasser	Byggverk beregnet sporadisk personopphold	kun for personopphold	Personer i byggverk kjenner rømningsforhold, herunder rømningsveier, og kan bringe seg selv i sikkerhet	Byggverk beregnet for overnatting	Forutsatt bruk av byggverk medfører liten brannfare
1	Ja	Ja	Ja	Nei	Ja
2	Ja/nei	Ja	Ja	Nei	Nei
3	Nei	Ja	Ja	Nei	Ja
4	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja
5	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja
6	Nei	Nei	Nei	Ja	Ja

VTEK 10 forklarer forskriftens krav, utdyper innholdet i dem og gir løsninger for hvordan kravene kan etterkommes i praksis [1].

Et byggverks risikoklasse kan finnes ved å bruke en tabell i VTEK 10. I veiledningen plasseres forsamlingslokaler og idrettshaller i risikoklasse 5 (VTEK 10, § 11-2, Tabell 1) [1]. Et innendørs multifunksjonsanlegg vil passe inn i begge disse kategoriene, og plasseres derfor i risikoklasse 5. Byggverkets risikoklasse skal videre legges til grunn for prosjektering og utførelse for å sikre rømning og redning ved brann.

### 3.1.2 Brannklasse

Byggverkets brannklasse bestemmes ut fra den konsekvens en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø [7]. Brannklasse for hele byggverket, eller deler av byggverket, bestemmes ut ifra Tabell 3.2. Det finnes fire brannklasser, hvorav klasse 4 innebærer en særlig stor konsekvens. Brannklassen legges til grunn for prosjektering og utførelse for å sikre byggverkets bæreevne ved brann.



Tabell 3.2: Brannklasser, gjengitt fra [7]

Brannklasse	Konsekvens
1	Liten
2	Middels
3	Stor
4	Særlig stor

En brann i en stor innendørs idrettshall vil medføre en trussel for et stort antall personer. I følge SINTEF Byggforsk bør man alltid vurdere brannklasse 4 hvis dimensjonerende persontall overstiger 3000 personer [24]. Med bakgrunn i dette vil et innendørs multifunksjonsanlegg plasseres i brannklasse 4. For byggverk i brannklasse 4 må brannsikkerheten verifiseres ved analyse [1]. Preaksepterte løsninger kan allikevel benyttes i den grad prosjekterende påviser at de er relevante og tilstrekkelige.

### 3.1.3 Bæresystemet

Et byggverks plassering i risikoklasse og brannklasse legger grunnlaget for de etterfølgende paragrafene i forskriften. En av paragrafene i forskriften behandler blant annet dimensjonering av bæresystemet:

*Bærende hovedsystem i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres. (TEK 10, § 11-4 (4))*  
[7]

Modellering av brann kan gjøres ved å bruke *NS-EN 1991-1-2 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann* [1, 25]. Bæresystemet til et innendørs multifunksjonsanlegg skal altså kunne motstå et helt brannforløp. Dette vil derimot ikke bli videre behandlet i denne rapporten.

### 3.1.4 Rømning

For byggverk beregnet for mange personer, er det spesielt en paragraf som er sentral for rømning og utforming av rømningsveiene. Denne paragrafen (TEK 10, § 11-12 (3)) ble tidligere nevnt i innledningen til denne rapporten, se Kapittel 1.

Ved arrangementer i et multifunksjonsanlegg vil store deler av publikummet være ukjent med byggverket og dets rømningsveier. Rømningsveiene kan i noen tilfeller være lange og da er det viktig at de har god belysning og er merket på riktig måte. God belysning og merking vil være med på å redusere den nødvendige rømningstiden. Forskriften setter også krav til ledesystem for byggverk i risikoklasse 5 og for byggverk som er beregnet for et stort antall personer. Planlegging og utforming av ledesystem kan gjøres ved hjelp av *NS 3926-1:2009 Visuelle ledesystemer for rømning i byggverk. Del 1: Planlegging og utforming* [26]. SINTEF Byggforsk har også utarbeidet byggforskbladet *Ledesystem for rømning* som kan bidra til utformingen av dette [27].

Forskriften har følgende definisjon av en rømningsvei:

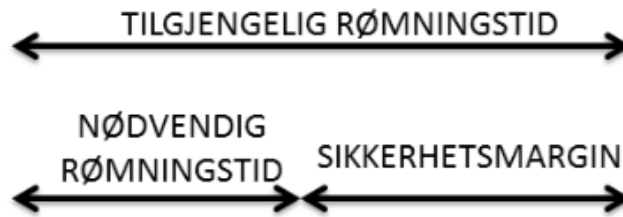
*Rømningsvei skal på oversiktlig og lettfattelig måte føre til sikkert sted. Den skal ha tilstrekkelig bredde og høyde og være utført som egen branncelle tilrettelagt for rask og effektiv rømning. (Tek 10, § 11-14 (1)) [7]*

I VTEK 10 kan en finne krav til fri bredde i rømningsvei. Det skal være minimum 1 cm fri bredde per person [1]. For byggverk i risikoklasse 5 skal fri bredde i rømningsvei i tillegg være minimum 1.2 m. Siden multifunksjonsanlegg er plassert i brannklasse 4 kan disse verdiene kun benyttes hvis det kan verifiseres ved analyse at de er tilstrekkelige.

§ 11-11 i TEK 10 gir generelle krav om rømning og redning fra byggverk. Første ledd i denne paragrafen er gitt i innledningen (se Kapittel 1). I tilknytning til dette leddet blir det i veiledningen tatt opp flere relevante forhold for multifunksjonsanlegg. VTEK 10 poengterer at rømningstiden vil være avhengig av menneskelige, bygningsmessige og branntekniske forhold. Bli det servert alkohol i bygningen, bør det uavhengig av dimensjonerende persontall vurderes om det er nødvendig å gjøre en særskilt analyse av sikkerheten ved rømning [1]. Det må også legges til rette for rømning og redning av personer med funksjonsnedsettelse.

Bestemmelse av rømningsbredde har sterk sammenheng med rømningstid. TEK 10 setter også krav til denne:

*Den tiden som er tilgjengelig for rømning, skal være større enn den tiden som er nødvendig for rømning fra byggverket. Det skal legges inn en tilfredsstillende sikkerhetsmargin. (TEK 10, § 11-11 (2)) [7]*



Figur 3.1: VTEK 10: Tilgjengelig og nødvendig rømningstid , gjengitt fra [1]

## 3.2 Generelt om rømning

En rømningsvei skal som nevnt lede til et sikkert sted. Sikkert sted vil i de fleste tilfeller være utenfor selve bygningen. Den tiden det tar å rømme et byggverk, å komme seg til sikkert sted, blir i VTEK 10 betegnet som nødvendig rømningstid. Tilgjengelig rømningstid er videre definert som tiden fra en brann oppstår til forholdene blir kritiske. Kritiske forhold blir behandlet i punkt 3.2.1. Differansen mellom tilgjengelig og nødvendig rømningstid kalles sikkerhetsmargin. Dette er vist illustrativt i Figur 3.1. Sikkerhetsmarginen må bestemmes på bakgrunn av usikkerheten i beregning av tilgjengelig og nødvendig rømningstid [1].

SINTEF Byggforsk har utarbeidet byggforskblader for å beregne tilgjengelig og nødvendig rømningstid ved brann [28, 2]. SINTEF Byggforsk definerer tilgjengelig rømningstid som *tiden fra brannstart til overskridelse av tålegrenser med hensyn til varme- og røykutvikling*. Nødvendig rømningstid blir videre definert som *tiden fra brannstart til personene i bygningen har kommet fram til sikkert sted*. Sikkerhetsmarginen blir videre tidsdifferansen mellom tilgjengelig og nødvendig rømningstid.

European Guidelines beskriver i sin veiledning en framgangsmåte kalt “engineering approach” for å finne sikkerhetsmarginen ved rømning [29]. Sikkerhetsmarginen er her differansen mellom ASET (Available Safe Escape Time) og RSET (Required Safe Escape Time). ASET defineres som *tiden fra brannstart til tålegrensene for røyk, giftige gasser og varme er overgått*. Denne tiden kan f. eks. finnes ved å simulere ulike brannscenarioer i en FDS-modell (Fire Dynamics Simulator).

Babrauskas m. fl. har skrevet artikkelen “*RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment*”, der bruken av RSET/ASET analyser blir kritisert [30]. Artikkelen fokuserer for det meste på bruken av ioniske og optiske detektorer i eneboliger. En RSET/ASET analyse av detektortyper gir i følge Babrauskas m.fl. et feilaktig bilde av at optiske og ioniske detektorer begge er tilstrekkelige. I noen tilfeller løser

nemlig ioniske detektorer så sent ut at de er helt uten effekt [30].

Ved vurdering av ulike løsninger kan en bruke RSET/ASET til å sjekke om en løsning er godkjent eller ikke. Dette kan gjøres ved å kontrollere variabelen “Margin of Safety”. Denne er gitt ved differansen mellom ASET og RSET. Er “Margin of Safety”  $\geq 0$  er løsningen godkjent, er den derimot  $< 0$  er den ikke godkjent. Babrauskas m.fl fremmer et syn der variabelen “Margin of Safety” skal maksimeres; slik at personsikkerheten økes. [30].

En robot kunne evakuert fra en enebolig på veldig kort tid, men mennesker oppfører seg ikke på samme måte som roboter. Det har vist seg at personer som opplever brann i sitt eget hjem, ofte oppfører seg lite effektivt. Babrauskas m. fl. sier med bakgrunn i dette at RSET ikke har noen øvre grenseverdi. En kan derfor aldri konkludere med at en løsning er god, bare at den er “sikrere”, sammenlignet med en annen løsning. [30].

### 3.2.1 Rømningsforhold

Under hvilke forhold er det så mulig å utføre rømning? SINTEF Byggforsk og European Guidelines har i sine definisjoner av tilgjengelig rømningstid nevnt begrepet tålegrenser. I den tid branncelle eller rømningsvei skal benyttes til rømning av personer, skal det ikke kunne forekomme temperaturer, røykgasskonsentrasjoner eller andre forhold som hindrer rømning [7]. Tilstedeværelse av gasser som karbonmonoksid ( $CO$ ) og blåsyre ( $HCN$ ) kan være farlig, selv i relativt små konsentrasjoner. Blir det for mye karbondioksid ( $CO_2$ ), eller for lite oksygen ( $O_2$ ), i lufta kan dette medføre kvelning. For høy gasstemperatur og for stor varmestråling kan også gjøre at mennesket ikke klarer å rømme. Siktforholdene under rømning kan i tillegg påvirke evakueringstiden.

Tålegrenser for personer under rømning kunne tidligere bli hentet fra en tabell i *NS 3901:1998 Risikoanalyse av brann i byggverk*, se Tabell 3.3 [8]. Denne standarden er nå erstattet av *NS 3901:2012 Krav til risikovurdering av brann i byggverk* [31]. I den nye standarden er det ikke oppgitt en slik tabell og det er dermed opp til prosjekterende å bestemme de ulike grenseverdiene.

Tabell 3.3: Tålegrenser for personer under rømning, gjengitt fra [8]

<b>Varmestråling:</b>	
Intensitet under 6 sekunder	10 kW/m <sup>2</sup>
Samlet strålingsenergi:	60 kJ/m <sup>2</sup> pluss energi fra 1 kW/m <sup>2</sup>
<b>Gasstemperatur:</b>	
	60 °C
<b>Innhold av gasser:</b>	
CO	maks. 2000 ppm
CO <sub>2</sub>	maks. 5 %
O <sub>2</sub>	min. 15 %
<b>Sikt i 2 meters høyde:</b>	
I startbranncelle	min. 3 m
I rømningsvei	min. 10 m

I en SINTEF rapport om effekten av boligsprinkler i omsorgsboliger blir kritiske kriterier for beboere i en brannsituasjon vurdert [9]. Disse kriteriene er her oppsummert i Tabell 3.4. De oppgitte kriteriene for CO-konsentrasjon og temperatur gjelder her for når død inntreffer. Siktforholdene gjelder for en rømningssituasjon.

Tabell 3.4: Kritisk tilstand for mennesker, gjengitt fra [9]

<b>Temperatur:</b>	205 °C i 4 min
<b>Innhold av gasser:</b>	
CO	6400 ppm i 10-15 min
<b>Røyksjikhøyde:</b>	0.7 m
<b>Sikt:</b>	
I brannrom	3 m
I naborom	3 m
I korridor	3 m

### 3.2.2 Sikkerhetsmargin

Det finnes ingen endelige kvantitative kriterier for sikkerhetsmargin [28]. Sikkerhetsmarginen blir derfor basert på skjønnsmessige vurderinger. Sikkerhetsmarginen må alltid være positiv og skal ivareta usikkerhet i beregningene av tilgjengelig rømningstid. SINTEF Byggforsk foreslår at sikkerhetsmarginen som et minimum er større enn to ganger standardavviket for beregnet tilgjengelig rømningstid [28].

Sikkerhetsmarginer kan verifiseres i prosent eller faktorer ut fra normal påkjenning, men kan også verifiseres i tid [2]. For engelske idrettsarenaer brukes tid som en faktor for sikkerhetsmargin, ved at rømning må være avsluttet innen 8 min fra brannstart [2]. Denne formuleringen er noe upresis. Tid fra brannstart til rømning er avsluttet er det samme som nødvendig rømningstid, ikke sikkerhetsmargin. Et krav til nødvendig rømningstid på under 8 min hadde vært en mer passende formulering.

I følge VTEK, som nevnt tidligere, skal sikkerhetsmarginen bestemmes på bakgrunn av usikkerheten i beregning av tilgjengelig og nødvendig rømningstid [1]. Det forutsettes at sikkerhetsmarginen fastsettes før en beregner tilgjengelig og nødvendig rømningstid [32]. En bestemmelse av sikkerhetsmarginens størrelse i etterkant av disse beregningene kunne vist seg å være noe problematisk, spesielt hvis den hadde vært liten.

Metodene for å beregne tilgjengelig rømningstid er temmelig grove og omtrentlige. Dette gjelder spesielt valg av en sprinklerkontrollert branns varmeavgivelseshastighet, samt modeller for beregning av denne. Et byggverks utforming kan medføre at brannen med den største varmeavgivelseshastigheten ikke nødvendigvis blir den dimensjonerende. Usikkerhet i disse beregningene må derfor dekkes av sikkerhetsmarginen. [32].

En metode for å bestemme størrelsen på sikkerhetsmarginen er å sette den lik effekten av et røykventilasjonsanlegg eller sprinkleranlegg. En eventuell svikt i et røykventilasjonsanlegg vil da dekkes av sikkerhetsmarginen. Med andre ord vil alle personene i bygget ha evakuert før tålegrensene er nådd, selv om røykventilasjonen svikter. En kan da si at sikkerhetsmarginen ligger i røykventilasjonen. [32].

I et enkelt og oversiktlig byggverk kan en lav sikkerhetsmargin være forsvarlig. For et mer komplekst bygg, f. eks. et kjøpesenter over flere plan, er det nødvendig å ha en større sikkerhetsmargin. Arenaen som blir benyttet som analyseobjekt i denne rapporten er et forholdsvist enkelt og oversiktlig bygg.

Denne rapporten fokuserer på nødvendig rømningstid, og lite fokus blir rettet mot tilgjengelig rømningstid. Sikkerhetsmarginen skal, som nevnt, dekke usikkerheten ved beregning av begge disse. Det er derfor vanskelig å si noe om sikkerhetsmarginens størrelse for akkurat denne rapportens analyseobjekt.

### 3.3 Særskilte brannobjekter

I byggverk hvor brann kan medføre tap av mange liv dukker det opp et begrep kalt særskilte brannobjekter. I følge § 13 i brann- og eksplosjonsvernloven (BEL) skal kommunen identifisere og føre fortegnelse over byggverk, opplag, områder, tunneler, virksomheter m.m. hvor brann kan medføre tap av mange liv eller store skader på helse, miljø eller materielle verdier [33]. Et idrettsanlegg med tribuner for minst 150 personer anlagt slik at rømning må skje gjennom korridorer, tunneller, dører eller porter er i henhold til brann- og eksplosjonsvernloven et særskilt brannobjekt [24].

Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn (FOBTOT) stiller krav til særskilte brannobjekter. Kapittel 3 og 4 i forskriften behandler krav til organisatoriske og tekniske tiltak, og dokumentasjon av dette. I tillegg til dokumentasjon av den fysiske utførelsen av bygget skal det redegjøres for [24]:

- organisering av brannvernarbeidet
- opplæring, øvelse og informasjon
- rednings- og beredskapsplaner
- vaktordning
- kontroll- og vedlikeholdsrutiner

Dokumentasjon av punktene ovenfor tilhører bruksfasen av byggverket. SINTEF Byggforsk har utarbeidet et eget byggforskblad som behandler dokumentasjon av brannsikkerhet i bruksfasen [34]. Dette byggforskbladet behandler krav til dokumentasjon og utarbeidelse av denne for alle brannobjekter.

FOBTOT § 4-1 behandler personsikkerhet i særskilte brannobjekter. Eier skal utføre en risikovurdering og på bakgrunn av denne sørge for å sikre tilstrekkelig rømningstid for personer. Tilstrekkelig rømningstid kan sikres ved å benytte tekniske tiltak som ledesystemer, brannalarmanlegg, manuelt slukkeutstyr og egnede stasjonære slukkeanlegg.

TEK 10, § 11-12 (4) setter krav til evakueringsplaner. For byggverk i risikoklasse 5 og 6 skal evakueringsplaner foreligge før byggverket tas i bruk.





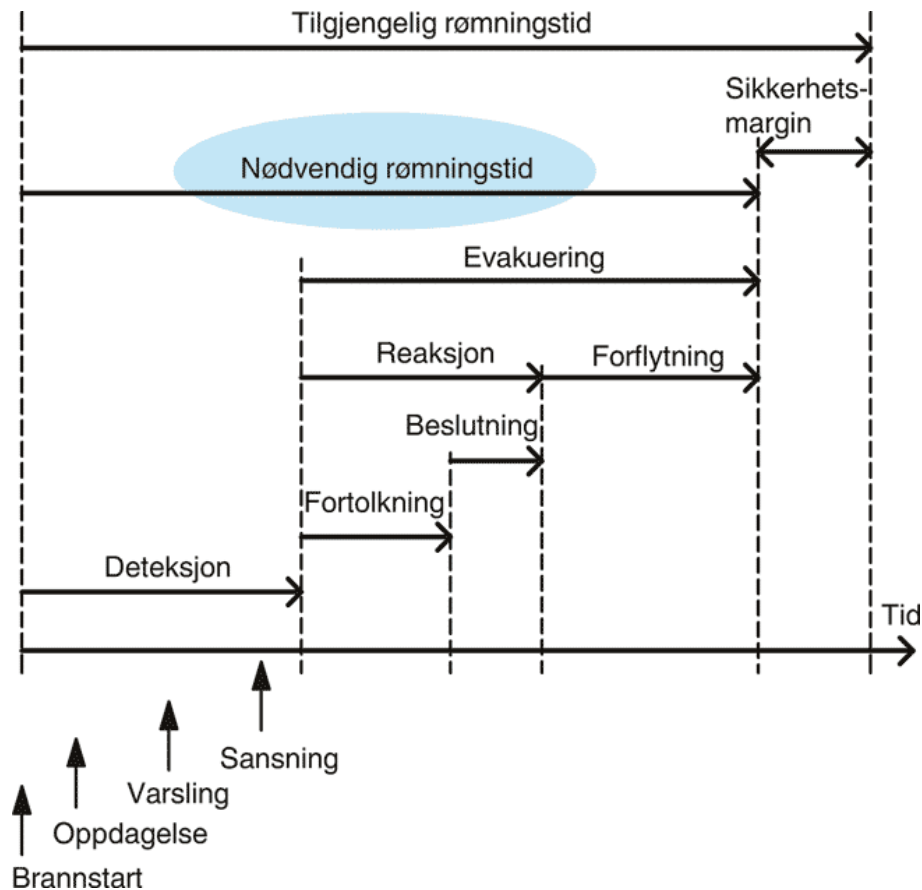
# Kapittel 4

## Nødvendig rømningstid

Nødvendig rømningstid avhenger av flere ulike forhold. Dette kapitlet vil gi en grundig gjennomgang av ulike faktorer en må ta hensyn til ved bestemmelse av denne tiden.

Nødvendig rømningstid kan deles inn i flere ulike faser. Når en brann oppstår må den først detekteres. SINTEF Byggforsk deler videre deteksjonstiden inn i tre deler; en oppdagelsestid, en varslingstid og en sansningstid. Når en brann er detektert kan selve evakueringsprosessen begynne. Evakueringen er videre delt inn i to faser; en reaksjonsfase og en forflytningsfase. Reaksjonstiden er videre delt inn i en fortolkningstid og en beslutningstid. Fortolkning innebærer at en må erkjenne at det har oppstått en brann i bygningen. Beslutningstiden er den tiden som går med på å forberede forflytning og å velge rømningsvei. Etter at en har valgt rømningsvei kan selve forflytningen finne sted. De ulike tidsbegrepene er illustrert i Figur 4.1. Et lignende konsept for å finne nødvendig rømningstid er beskrevet i European Guidelines [29] og av Bjarne Christian Hagen [35].

I denne rapporten vil nødvendig rømningstid være delt inn i de tre delene deteksjon, reaksjon og forflytning. Hver av disse fasene vil så bli gjennomgått en og en. Hovedfokuset vil ligge rundt beregning av selve evakueringstiden.



Figur 4.1: Tilgjengelig og nødvendig rømningstid, hentet fra [2]

## 4.1 Deteksjonstid

Deteksjonstiden er definert som *tiden fra en brann starter til den oppdages, sanses eller detekteres* [2]. Deteksjonstiden kan videre deles inn i tre ulike deler [2];

- oppdagelsestid: tid fra brannstart til brannen oppdages
- varslingstid: tid fra brannen oppdages til den varsles
- sansningstid: tid fra brannen varsles til noen reagerer

### 4.1.1 Temaveiledning HO-3/2000

Detektorer kan utløses på bakgrunn av røyktetthet og på bakgrunn av varme. I *Temaveiledning HO-3/2000 Røykventilasjon* behandles flere ulike detektortyper. Ved bruk av denne veiledningen kan en på bakgrunn av spesifikk brannbelastning og

høyde under taket bestemme tiden til detektoren løser ut. For idrettshaller er det foreslått en spesifikk brannbelastning på under 50 MJ/m<sup>2</sup> omhyllingsflate [10]. I og med at det er multifunksjonsanlegg som behandles i denne rapporten, vil dette tallet være noe lavt. Temaveiledningen foreslår en spesifikk brannbelastning på 50-200 MJ/m<sup>2</sup> omhyllingsflate for teater, skole og kontor. For messer og konsertarrangement vil en spesifikk brannbelastning på 200 MJ/m<sup>2</sup> omhyllingsflate være passende. Foregår det en messe med mye brennbart materiale tilstede vil det være behov for å vurdere en enda større brannbelastning.

Basert på en spesifikk brannbelastning på 200 MJ/m<sup>2</sup> fåes en brannveksttid,  $t_g$ , på 225 s [10]. Denne brannveksttiden betyr at brannen avgir en effekt på 1000 kW etter 225 s. Avhengig av takhøyden og detektortypen kan en så finne deteksjonstiden etter Tabell 4.1 [10].

Tabell 4.1: Responstid i minutter for røykdetektorer og sprinklere montert i tak/himling, utdrag fra [10]

Takhøyde (m)		Brannveksttid, $t_g$			
		75	150	225	300
3	Røykdetektor	0.5	0.5	1.0	1.0
	Temp 68 °C	0.5	1.0	1.5	2.0
6	Røykdetektor	0.5	1.0	1.5	1.5
	Temp 68 °C	1.5	3.0	4.5	3.5
9	Røykdetektor	1.0	1.5	2.0	2.5
	Temp 68 °C	2.5	5.0	7.5	>10
12	Røykdetektor	1.0	2.0	2.5	3.5
15	Røykdetektor	1.5	2.5	3.5	4.5
18	Røykdetektor	1.5	3.0	4.5	5.5
21	Røykdetektor	2.0	3.5	5.5	7.0
24	Røykdetektor	2.5	4.0	6.5	8.5

## 4.2 Reaksjonstid

Reaksjonstiden er definert som *tiden fra brannen er sanset og til rømningforflytning faktisk starter* [2]. Reaksjonstiden kan videre deles inn i en fortolkningstid og en beslutningstid [2];

- fortolkningstid: tid som går med til å erkjenne at det har oppstått en brann i bygningen og gjøre seg opp en oppfatning om hva det vil være lurt å gjøre

Tabell 4.2: Veiledende reaksjonstider for noen virksomheter, gjengitt fra [2]

Virksomhet	Personer ser brannen	Reaksjonstid i minutter
Offentlig miljø, skole, kontor, varehus, butikk	Ja	1
Varehus uten rømningsalarm	Nei	4
Varehus, alarmklokke	Nei	3.5
Varehus, enkel talevarsling	Nei	2
Varehus, informativ varsling	Nei	1
Mindre lokaler med alarmgiver i aktuelt lokale, mindre kino, butikk, kirke	Nei	1
Sykehus <sup>a</sup> , personale, enkelt akustisk signal	Nei	2
Sykehus <sup>a</sup> , personale, enkelt akustisk signal og tekstvarsling	Nei	1
Nattklubb, personale <sup>b</sup>	Nei	1-1.5
Nattklubb, gjester <sup>b</sup>	Nei	3-5

<sup>a</sup>Forutsetter pleieavdeling med god oversikt (enkelkorridor)

<sup>b</sup>Avhengig av type alarmering og organisering

- beslutningstid: tid etter fortolkning som går med til å forberede forflytning og velge rømningsvei

### 4.2.1 Anbefalinger fra Byggforsk og DSB

I følge Byggforskblad 520.385 *Nødvendig rømningstid ved brann*, er reaksjonstiden sterkt knyttet til informasjon om hva som har inntruffet og hva som forventes av de som befinner seg i bygningen. Følgende faktorer påvirker også reaksjonstiden [2];

- kjennskap til rømningsveiene
- fysisk førighet og evne til å forflytte seg raskt
- bevissthetstilstand og oppfattelsesevne
- sosiale roller i en gruppe

Byggforskbladet anbefaler å bruke reaksjonstidene som er gitt i Tabell 4.2. Disse tidene er hentet fra artikkelen *Utrymningsdimensjonering* [36], som igjen er basert på en rapport av Håkan Franzich [37].

I *Veiledning til forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn* er de oppgitte reaksjonstidene mer konservative og veldig generelle. Det står også at reaksjonstiden er avhengig av type aktivitet, alarm og organisasjon. Veiledningen anbefaler følgende [38];

*For offentlige bygg, skoler, varehus eller butikker kan beslutningstiden settes til 1 minutt, forutsatt at brannen er synlig for personene som oppholder seg i bygget. Der publikum ikke ser brannen og hvor det kun er manuell klokkealarm, vil beslutnings- og reaksjonstiden være 5 minutter.*

### **4.2.2 Rømningsøvelse fra IKEA-varehus**

Rapporten *Tid för utrymning vid brann* er skrevet av Håkan Franzich ved Lund Tekniska Högskola. Rapporten er et resultat av et forskningsprosjekt vedrørende påvirkningsfaktorer ved rømning. I prosjektet ble det blant annet utført rømningsøvelser fra tre ulike IKEA-varehus. I forbindelse med disse øvelsene var det en del begrensinger og forutsetninger [37]. Forutsetninger og resultater fra rømningsøvelsene er presentert under.

Personalet ved disse varehusene var godt forberedt for brannsituasjoner, grunnet IKEAs policy. Personalet var ikke klar over at det skulle utføres en øvelse og det kunne derfor antas at de handlet realistisk. Forsøkene ble utført med et variabelt forhold mellom ansatte og kunder. Det var god belysning i varehusene, men det var dårlig oversikt. Gangveier gjennom varehusene var preget av mange retningsendringer.

Ved alle varehusene var det et automatisk brannalarmsystem som sendte signal til sikkerhetsansvarlig ved varehuset og redningstjenesten. Samtidig med dette signalet ble det sendt ut et kort signal via høyttalersystemet. Signalet hadde ikke noen mening for kundene, men det skulle foreberede personalet på at rømningsalarmen kunne bli aktivisert. Etter at årsaken til utløsningen av det automatiske brannalarmsystemet er undersøkt, kan rømningsalarmen utløses manuelt.

Rømningsalarmen ved de ulike varehusene var noe ulike. Det ble avspilt en talemelding ved et av varehusene, mens det ved de to andre ble brukt et tonesignal etterfulgt av en talemelding. Talemeldingene ga informasjon om hva som hadde skjedd og instruksjoner til kundene om hva de skulle foreta seg. Talemeldingen hadde en varighet mellom 25 s og 37 s. Fra talemeldingen begynte til alle kundene kom seg ut av varehusene tok det mellom 2.5 min og 3.5 min.

Ved hjelp av skjulte kameraer og utplasserte funksjonærer kunne reaksjonstiden til de ulike kundene registreres. Reaksjonstidene fra disse øvelsene var ganske korte og dette kan forklares med personalets målbevissthet om å få kundene ut av varehuset. Reaksjonstiden til kundene var betydelig kortere i varehusdelen iforhold til i restaurantdelen og kasseområdet. Gjennomsnittlig reaksjonstid i varehusdelen varierte mellom 26 s og 30 s, mens den for kasseområdet varierte mellom 31 s og 83 s. Reaksjonstiden var betydelig kortere for de som ikke hadde oppmerksomheten rettet mot noe spesielt.

Ved to av varehusene valgte de fleste å bruke kjent rømningsvei; den veien de kom inn. I det siste varehuset var en stor del av kundene i restauranten og de valgte derfor å bruke denne nødutgangen. I et varehus hindret lukkede branndører noen kunder fra å bruke hovedinngangen som rømningsvei. De ble derfor tvunget til å velge en annen rømningsvei.

I et av varehusene var det to nødutganger som utmerket seg. De var helt ordinære nødutganger, men de var plassert slik at de kom i direkte blikkfang for kunder som forflyttet seg langs gangveiene i varehuset.

### 4.2.3 Alarmtypers påvirkning på reaksjonstiden

Håkan Franzich referer til et forsøk utført av Klas Bayer og Tobias Rejnö for vurdering av ulike alarmtyper. Bayer og Rejnö har gjennom et fullskalaforsøk vurdert effekten av ulike alarmtyper [39]. Forutsetninger og resultater fra disse forsøkene er presentert under.

Følgende alarmtyper ble testet i forsøket:

- Alarmklokke
- Sirene
- Alarmklokke og blinkende lys
- Alarmklokke og skilt
- Sirene etterfulgt av talemelding med mannlig stemme
- Sirene etterfulgt av kvinnelig stemme

Forsøkene ble utført ved en kinosal i Malmö. De ulike alarmtypene ble testet tre ganger hver og forsøkene ble dokumentert med video, spørreskjemaer og ved bruk av observatører. Det ble lagt ned en god del arbeid i utforming av selve talemeldingen. Resultatet ble en talemelding bestående av tre deler; en oppmerksomhetsdel, en forklaringsdel og en instruksjonsdel.

Reaksjonstiden i forsøkene ble målt fra utrømningsalarman startet til forsøkspersonen har reist seg opp fra kinosetet eller på et annet vis antyder at denne skal påbegynne rømingen. Ingen av forsøkspersonene visste om rømningsøvelsen. Utrømningsalarman ble startet mellom reklamen og selve spillefilmen for å gjøre det enkelt for personen som igangsatte alarman. Forsøket ble stoppet da alle forsøkspersonene hadde reagert, men ikke nødvendigvis hadde rømt salen.

Spørreundersøkelsene viste at ingen av alarmkombinasjonene utløste høyt stress eller panikkliknende følelser. I 15 % av tilfellene trodde kinobesøkerne at alarman var en slags spøk. Bayer og Rejnö mente dette kunne ha sammenheng med at spillefilmen de besøkende skulle se var en komedie. Det kom også fram at besøkerne ikke hadde hørt fra noen ansatt at det faktisk brant.

Ved to av forsøkene der det kun ble brukt akustiske alarmer, var det to døve kinobesøkere tilstede. Disse påpekte at det i tillegg burde være visuelle signaler tilsted, som f. eks blinkende lamper.

Det viste seg at over 90 % hadde reaksjonstid på under 30 s, med unntak av alarmtypen med talemelding. Ved talemelding lå reaksjonstiden på 35-40 s. Forskjellen kunne forklares med at talemeldingen tok lengre tid å oppfatte. Forsøkene viste at alarmtyper uten talemelding ga noe kortere reaksjonstid, men kinobesøkerne var da mindre sikre på hva de skulle foreta seg.

#### **4.2.4 Andre faktorer som påvirker reaksjonstiden**

For å redusere usikkerhet ved valg av rømningsvei er informasjon om hvor rømningsveiene er plassert viktig. Det anbefales å bruke standardiserte skilter slik at betydningen av skiltene ikke misforstås. Plassering og belysning av skiltene bør gis stor omtanke. Ledesystem i form av malte linjer, ledelys etc. kan komplettere skiltbruken. [37].

Dårlig belysning gjør det vanskeligere å finne rømningsveier og utgangsdører. Belysning kan også benyttes for å tiltrekke oppmerksomhet til viktige skilt og dører. [37].

Dør som leder til rømningsvei bør utformes slik at den lett kjennes igjen som en sikker vei ut. Dette betyr at de må skille seg ut fra omgivelsene, både i form og farge. For at valg av rømningsvei skal forenkles, anbefales det at utgangsdørene åpnes mot det fri. Dette gjør at besøkende personer kan velge ellers ukjente nødutganger. (Det er en tendens til at personer gjerne velger å rømme ut den veien de kom inn). [37].

Personers oppførsel er sterkt avhengig av om de er ensomme eller i en gruppe med andre personer. I store samlinger av personer kan en liten gruppes beslutningstid være lang. Ingen vil ta det første steget i å påbegynne rømning da de fort kan miste kontakten med sin egen gruppe. I slike situasjoner er det viktig at personell reagerer raskt og korrekt, slik at rømning kan påbegynnes. [37].

Grad av våkenhet påvirker personers evne til å oppfatte brann eller rømningssignal. Det samme gjelder personer som er påvirket av beroligende medisin. Oppstår det høye gasskonsentrasjoner av  $CO$  og  $CO_2$  (evt. lav  $O_2$ -konsentrasjon) i lufta vil dette bidra til at reaksjonstiden økes. [37].

Lederroller i en sosial gruppe kan ha en positiv innvirkning på reaksjonstiden. Dette forutsetter at formelle lederroller har mulighet til å iverksette rømning. Under konserter/teateroppvisning er publikums oppmerksomhet rettet mot scenen. Publikum forventer å få en beskjed om eventuell utrømning fra scenen om en eventuell utrømning skal igangsettes. [37].

I mange tilfeller holder personer gjerne på med en aktivitet som kan være vanskelig å avslutte i det en utrømning skal igangsettes [37]. En person som står i kø for å betale noe vil gjerne fullføre denne aktiviteten før en rømning påbegynnes. Det samme kan sies om personer som nettopp har fått servert et måltid på en restarant. De vil gjerne spise før de forlater restauranten.

#### 4.2.5 SFPE Handbook

I SFPEs *Handbook of Fire Protection Engineering* [40] beskrives flere rømningsøvelser der det har blitt forsket på reaksjonstider (Delay Times). I tillegg er det beskrevet en del studier fra virkelige brannscenarier. I etterkant av brannene ble brannofrene intervjuet og på bakgrunn av dette ble det estimert en reaksjonstid. En oppsummering av reaksjonstider fra både øvelser og faktiske branner kan bli funnet i håndboken.



## 4.3 Forflytningstid

Forflytningstid er definert som *tiden det tar for personer å forflytte seg til forutsatt sikkert sted* [2].

I følge Byggforskblad 520.385 *Nødvendig rømningstid ved brann*, er forflytningstiden blant annet avhengig av følgende faktorer [2];

- hvordan personene er fordelt i lokalet
- hvorvidt personene har behov for assistanse eller kan rømme selv
- belysning, ledelys o.l.
- antall rømningsveier og utførelsen av disse

### 4.3.1 Teori for forflytningstid

I Byggforskblad 520.385 *Nødvendig rømningstid ved brann* er det beskrevet en håndberegningmetode for å beregne forflytningstiden. Forflytningstiden er den lengste tiden det tar å gå til rømningsveien,  $t_{gang}$ , og den tiden det tar å passere ut gjennom døra,  $t_{dør}$  [2]. Forflytningstiden kan finnes ved å summere disse tidene;

$$t_{forf} = t_{gang} + t_{dør} \quad (4.1)$$

$t_{gang}$  og  $t_{dør}$  (i sekunder) kan beregnes ved hjelp av Ligning 4.2 og 4.3;

$$t_{gang} = \frac{L}{v} \quad (4.2)$$

$$t_{dør} = \frac{N}{B \times f} \quad (4.3)$$

hvor  $L$  er lengde på rømningsvei (m),  $v$  er ganghastighet (m/s),  $N$  er antall personer som skal passere en dør,  $B$  er døras bredde (m) og  $f$  er beregnet strømningshastighet gjennom en passasje (pers/sm).

Strømningshastigheten gjennom en passasje finnes ved;

$$f = \frac{F}{B} \quad (4.4)$$

der  $F$  er strømningsraten (pers/s). Denne er gitt ved;

$$F = v \times \rho_p \times B \quad (4.5)$$

der  $\rho_p$  er persontettheten (pers/m<sup>2</sup>). Ved å sette inn uttrykkene for  $f$  og  $F$  i Ligning 4.3 får en;

$$t_{dør} = \frac{N}{v \times \rho_p \times B} \quad (4.6)$$

Bredden ( $B$ ) tilsvarer effektiv bredde. Byggforskbladet anbefaler å trekke fra 0.15 m fra virkelig bredde. Bjarne Christian Hagen operer med et identisk uttrykk for tiden det tar å passere et punkt [35];

$$t = \frac{N}{F_c} = \frac{N}{v \times D \times B_e} \quad (4.7)$$

der  $N$  er antall personer som skal passere punktet,  $v$  er forflytningshastigheten (m/s),  $D$  er persontetthet (pers/m<sup>2</sup>) og  $B_e$  er effektiv bredde i rømningsveien (m).

For et tilfelle der det forventes at alle personene i et område begynner å rømme samtidig inn i en del av rømningsveien, kan persontettheten finnes ved [35];

$$D = \frac{N}{A} \quad (4.8)$$

der  $N$  er antall personer og  $A$  er areal for den aktuelle delen av rømningsveien (m<sup>2</sup>).

I en situasjon hvor personene ankommer rømningsveien til forskjellige tidspunkt, må persontettheten beregnes for forskjellige tidspunkt. I multifunksjonsanlegg vil dette være tilfelle.

Byggforsk anbefaler å bruke ganghastighetene som er gitt i Tabell 4.3. Disse verdiene er også hentet fra artikkelen *Utrymningsdimensjonering* [36]. En kan se at høy persontetthet medfører en lavere ganghastighet.

Tabell 4.3: Ganghastigheter, gjengitt fra [2]

Rømningsvei	Ganghastighet (m/s)	Minste bredde <sup>a</sup> (m)	Strømningshastighet (pers/ms)
Lav persontetthet			
Horisontalt	1.3	0.9	
Opp trapp	0.6	0.9	
Ned trapp <sup>b</sup>	0.75	0.9	
Høy persontetthet			
Horisontalt	0.6	0.9	1.2
Opp trapp	0.5	0.9	
Ned trapp <sup>b</sup>	0.5	0.9	1

<sup>a</sup>Ved flere enn 150 personer i branncellen bør bredden være 1.2 m. Av hensyn til tilgjengeligheten bør rømningsveien (korridor o.l.) være minst 1.3 m bred.

<sup>b</sup>Regn med effektiv bredde i trappa, det vil si at trappas totale bredde reduseres med 0.3 m. Det er tatt utgangspunkt i trapper med 26-32 ° stigning. Byggforsk operer kun med effektiv bredde for høy persontetthet i denne tabellen. Det er her antatt at dette også gjelder for lav persontetthet.

For en mer inngående forklaring av forflytningsteori, anbefales det å bruke boken *Brannteknisk rømningsanalyse* av Bjarne Christian Hagen.

### 4.3.2 Faktorer som påvirker ganghastigheten

En faktor som påvirker ganghastigheten er persontettheten. God avstand mellom personer gjør at de kan bevege seg raskt med en normal gangart. På denne måten vil en oppnå den raskeste ganghastigheten. Blir det høyere persontetthet vil ganghastigheten bli mer begrenset og ved for stor persontetthet vil ganghastigheten bli tilnærmet lik null. Det har også vist seg at høy persontetthet er ukomfortabelt, avhengig av kultur, sosial setting og en persons forhold til de rundt seg. [40].

For en persontetthet på mindre enn 0.5 pers/m<sup>2</sup> har det, tradisjonelt sett, blitt antatt at personer kan bevege seg uhindret. Ganghastigheten har da blitt satt til 1.25 m/s. I trapper vil ganghastigheten reduseres noe. Personer som er i dårlig form vil også forflytte seg saktere. [40]. Det samme gjelder personer eldre enn 70 år og yngre enn 5 år [37]. En saktegående person i front av en stor personmengde vil føre til en lav hastighet for hele mengden.

Ved en persontetthet på rundt 4 pers/m<sup>2</sup> står folk så tett at det vil være svært vanskelig å bevege seg. De blir i praksis stående stille og persontettheten må reduseres før forflytningen kan fortsette. [35, 41].

I og med at byggverk tilrettelegges for funksjonshemmede, må denne brukergruppen også tas hensyn til ved rømning. De fleste funksjonshemmede klarer å bevege seg selv, men noen er også avhengig av hjelp til dette. Type funksjonshemming og bruk av hjelpemiddel har stor innvirkning på bevegelseshastigheten.

Boyce m. fl. har utført et forsøk hvor personer med ulike funksjonshemninger har forflyttet seg en horisontal strekning på 50 m. De funksjonshemmede var på forhånd kjent med strekningen og de ble oppfordret til å bruke de hjelpemidlene de normalt brukte. 155 funksjonshemmede deltok i forsøket og 121 av disse kunne bevege seg uten fysisk assistanse fra andre personer. De resterende 34 mottok hjelp fra andre iløpet av forsøket. Gjennomsnittlig bevegelseshastighet lå i de fleste tilfeller noe under 1.25 m/s. Personer med gåstol hadde den laveste gjennomsnittshastigheten (0.57 m/s). Den laveste hastigheten lå så lavt som 0.10 m/s. [42].

Ganghastigheter for blinde og synshemmede har også blitt undersøkt. I et forsøk utført av Sørensen ble gjennomsnittlig ganghastighet på 0.98 m/s [43].

### 4.3.3 Utforming av rømningsveier

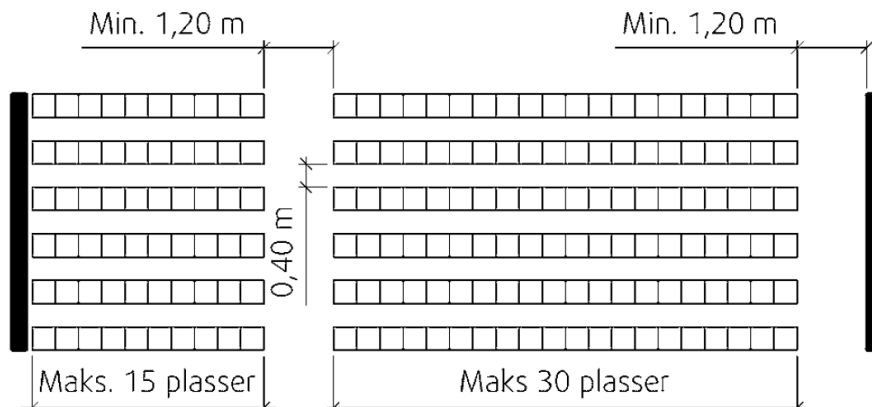
I Byggforskblad 321.036 *Rømning fra bygninger ved brann* defineres rømningsvei slik [3];

Rømningsvei er forbindelsen mellom bygningens brannceller og det fri eller annet sikkert sted, og er spesielt tilrettelagt for rømning ved brann.

I et multifunksjonsanlegg vil det som regel være én stor branncelle bestående av bane/scene og tribuner. En stor del av forflytningen vil derfor foregå innenfor denne branncellen. I følge byggforskbladets definisjon regnes ikke dette som en del av rømningsveien. Denne forflytningen vil likevel være av stor betydning og det er viktig at utformingen av selve branncellen er godt gjennomtenkt.

Ved konserter o.l. kan det brukes løse stoler på gulvet for å øke antall sitteplasser. Byggforskbladet anbefaler i såfall at disse kobles sammen eller festes i gulvet [3]. Dette gjøres for å hindre at stolene veltes i en eventuell panikksituasjon og dermed gjør det vanskelig å rømme.

Byggforsk anbefaler følgende minstekrav til dimensjonering av sitteplasser: Det bør være fri avstand på minst 0.4 m mellom stolradene. Antall sittplasser mellom to passasjer bør ikke overstige 30. Der det er gangpassasje bare på den ene siden,



Figur 4.2: Eksempel på dimensjonering av antall sitteplasser i bredden og gangpassasjer i et forsamlingslokale, hentet fra [3]

bør antall sitteplasser begrenses til 15. Gangpassasjer må ha fri bredde på minst 1.2 m. Samlet bredde på gangpassasjene dimensjoneres med 1 cm per sitteplass. Disse anbefalingene er illustrert i Figur 4.2. [3].

VTEK 10 anbefaler å ha en maksimal avstand på 30 m fra et hvilket som helst sted i en branncelle til nærmeste utgang for byggverk i brannklasse 3 og 5 [1]. I forbindelse med denne anbefalingen er det viktig at det ikke settes opp hindringer som gjør at avstanden overstiges. Ved en eventuell messe må en f. eks. passe på at det legges opp til oversiktlige ruter som tilfredsstillter anbefalingen.

Dør fra branncelle til rømningsvei eller til det fri må slå ut i rømningsretningen eller ha en utførelse som på tilsvarende måte hindrer oppsamling foran døra. Samlet fri bredde på dører til og i rømningsvei må minst være 1 cm per person. I brannceller for et stort antall personer, må det brukes utgangsdører med minimum fri bredde 1.2 m (tilsvarer en 13M dør). [3].

Innganger og utganger bør helst fordeles jevnt rundt hele bygningen [23]. På denne måten kan en unngå høy trengsel rundt en eventuell sentralisert inngang/utgang.

#### 4.3.4 Innsnevring

Personer som ankommer innsnevring i rømningsveier kan oppføre seg ulikt. Oppførselen avhenger i stor grad av trusselen den enkelte opplever under rømningen. En konkurrerende oppførsel oppstår når enkeltpersoner kjemper for deres egne sjanser for å rømme. En konkurrerende oppførsel fører til en ueffektiv rømning. Personer forsøker å presse seg fram og forsøker ikke å unngå kollisjon med andre. En konkurrerende

oppførsel fører ofte til at utgangene blokkeres. [44].

En kø-dannende oppførsel er en slags selvorganisering. Dette skjer når det er liten fare for tap av liv. Ved dannelse av en kø vil personene kunne “strømme” ut av rommet på en ordnet måte. Ved kødannelse oppstår det ingen blokkering av utgangene, noe som gir en mer effektiv rømning. [44].

En oppførsel kalt “herding behavior” kan observeres i rom med to utganger. En av utgangene kan være tett mens den andre ikke blir fullt utnyttet. Det blir gjerne antatt at personer vil fordele seg jevnt over utgangene, men dette er ikke alltid tilfelle. Noen ganger vil folk bevege seg mot utgangen der det er mest folk, fordi de føler at dette er den tryggeste utgangen. [44].

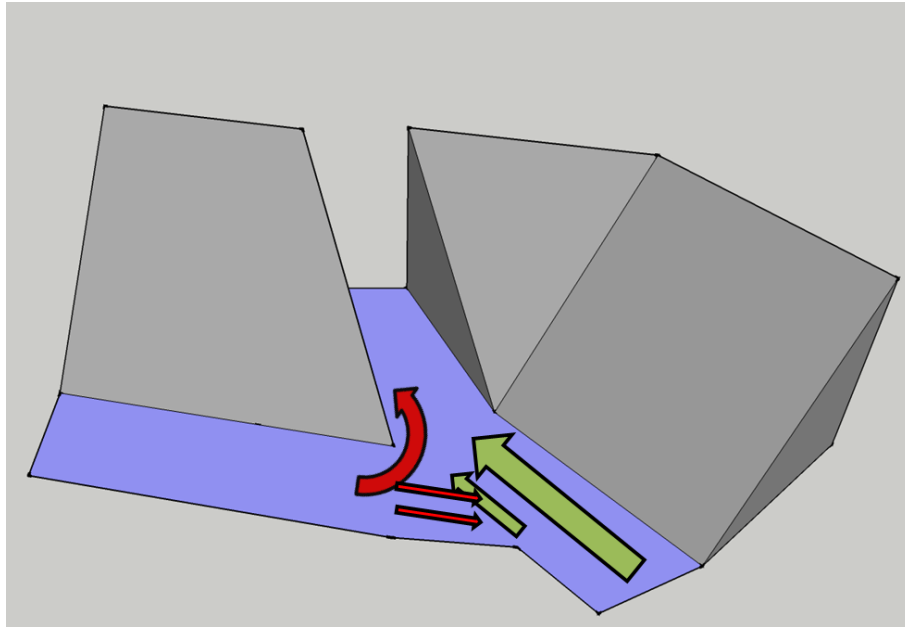
De ulike sosiale oppførselene beskrevet ovenfor er ikke uavhengig av hverandre. Det er gjerne en kombinasjon av disse som oppstår under rømning.

### 4.3.5 Observasjoner fra rugbykamp

Kristin Hoskin har i sin masteroppgave analysert personstrømmer fra utvandring av en utendørs stadion.[11]. Analysene ble gjort ved kampslutt i “Super 12 competition” rugbykamper. Videokameraer ble igangsatt like før kampslutt og disse registrerte personstrømmene gjennom de ulike utgangene, samt utvalgte områder der det på forhånd var ventet opphopning av folk. Registreringene ble ikke gjort ved faktiske rømningssituasjoner, men ved en vanlig utvandring. Noen av funnene fra denne studien er presentert under.

Ett tilfelle der det oppstod problemer var i tilknytning til en utgangstunell. Utgangen var plassert i en sving der to personstrømmer ankom fra hver sin side. De to strømmene ankom med forskjellig vinkel i forhold til utgangstunellen. Personstrømmen som måtte gjøre den minste retningsjusteringen for å gå inn i tunellen oppnådde en slags forkjøringsrett. Den andre strømmen ble da stående omtrent stille. Den stillestående personstrømmen oppdaget så andre utganger med mindre trengsel. For å nå disse utgangene måtte de bevege seg på tvers av den motstående folkemengden som allerede var på vei ut. Dette førte til enda saktere forflytning for begge personstrømmer. Hoskin kalte dette “crossed flow crowd movement” [11].

I Figur 4.3 er dette forsøkt illustrert på bakgrunn av Hoskins bilder og figurer. Personer fra høyre, grønne piler, behøvde bare å gjøre en liten retningsjustering for å komme inn i tunnelen. Personer fra venstre, røde piler, måtte derimot gjøre en stor



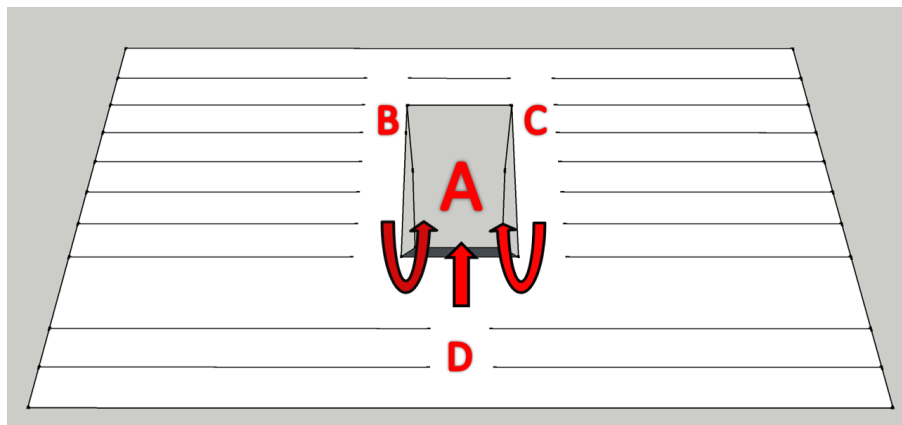
Figur 4.3: Illustrasjon av “crossed flows”

retningsendring. De “røde” måtte i praksis vike for de “grønne” og forsøkte derfor å finne alternative utganger ved å gå mot den “grønne strømmen”.

En person med gåstav benyttet seg av en trapp for å komme ut fra stadionen. Noen andre personer bidro denne med assistanse ned trappen. Denne “gruppen” med personer beveget seg veldig sakte nedover. Gruppens størrelse gjorde også at det oppstod vanskeligheter for andre personer å passere. Dette førte til en ganske redusert forflytningshastighet, der den til tider var mindre enn 0.4 m/s. Hoskin anbefaler å benytte utganger som er utformet på samme måte som i Figur 4.4. Bredden på A må være bred nok til å kunne ta imot personstrømmene fra B, C og D. Både vinkler og bredde på gangpassasjene må være slik at strømmene fra B, C og D er like, samt at ingen strøm må vike for de andre.

Utenfor stadionen ble det observert at personer ikke holdt seg til de tiltenkte gangveiene. Istedenfor å holde seg på gangveien, gikk personer ut i veien der det var saktegående biltrafikk. På utsiden av stadionen viste personer mindre hensyn til hverandre enn de gjorde på innsiden. Oppførselen på innsiden var mer strukturert og det virket som om personene fokuserte på å komme seg ut på en mest mulig effektiv måte.

Ved en annen utgang, enn den beskrevet over, ble personstrøm observert og simulert ved hjelp av Simulex32. Det ble observert en maksimal personstrøm på 1.88 pers/ms effektiv bredde. Ved simulering ble det oppnådd en maksimal per-



Figur 4.4: Ideell utforming av utganger fra tribunen ihht. Hoskin

sonstrøm på 0.82 pers/ms. Den maksimale, observerte personstrømmen ble oppnådd raskt og var i følge Hoskin noe høy, men ikke utenfor forventet område [11].

Som et alternativ til en fullstendig evakuering har Hoskin vurdert fordeler og ulemper ved bruk av delvis evakuering. En delvis evakuering går ut på å evakuere de mest sårbare tribunesonene først. Deretter kan de nærliggende sonene evakueres, om nødvendig. Fordeler og ulemper ved bruk av en delvis evakuering i henhold til Hoskin er gitt i Tabell 4.4.

Tabell 4.4: Fordeler og ulemper ved bruk av delvis evakuering, gjengitt fra [11]

Fordeler	Ulemper
De mest utsatte persongruppene kan bli flyttet fra faresonen raskere	Krever en bedre opplæring av personale
Det oppstår mindre initiell forstyrrelse for mesteparten av publikum	Mer kompleks enn en fullstendig evakuering
Personer i nærliggende soner kan forberedes på å forflytte seg, og dermed kan deres reaksjonstid reduseres	Innebærer at en må gi ulike beskjeder til ulike deler av publikum
Personer kan initielt bli evakuert til andre områder av stadionen. Dermed kan andre samlingsarealer reduseres	Avviker fra normal utvandring fra stadionen og kan derfor skape forvirring
En oppnår en mindre forstyrrelse av selve "eventen" (konserten etc.)	Kan være vanskelig å sette igang evakuering hvis "eventen" fortsetter og det ikke er noen åpenbare tegn på fare for publikum



### **4.3.6 Eksterne faktorer**

Hastigheten til en evakuering kan bli påvirket av flere faktorer utenfor byggverket det evakueres fra. Goldblatt beskriver blant annet et fenomen kalt “shadow evacuation” (skyggeevakuering) [45]. Skyggeevakuering innebærer at personer som befinner seg i byggverk liggende i nærheten av byggverket det faktisk har oppstått en fare, også evakuerer. Dette gjør de av frykt for sin egen sikkerhet. Denne ekstra folkemengden kan i noen tilfeller gjøre det vanskeligere for de mest risikoutsatte personene å komme seg vekk fra faresonen.

Parkeringsplasser og plassering av disse er også noe som må vurderes. Personer ønsker å bevege seg i retning av der de har parkert kjøretøyet sitt. Er alle parkeringsplassene på én side av bygningen, vil det kunne føre til økt innendørs personstrøm mot denne siden av arenaen. Dette vil gi en ubalansert tømning av arenaen, og økt forflytningstid. [23].

Utforming av områdene på utsiden av arenaen bør også tilrettelegges for rømning. Dette betyr at det ikke må forekomme fysiske hindringer på utsiden av arenaen som kan svekke rømningsforholdene. Personell bør også sørge for at personer ikke stopper opp med en gang de har kommet ut fra arenaen. Stopper personer rett utenfor utgangsdørene vil de hindre personer som fortsatt er inne på arenaen fra å kunne komme ut.



# Kapittel 5

## Simuleringsprogrammer

For å bestemme nødvendig rømningstid, må en beregne selve forflytningstiden. Denne kan finnes ved å utføre håndberegninger, men dette er ganske tidkrevende. Andre alternativer er å bruke regneark- eller databaserte rømningsmodeller. Disse rømningsmodellene er basert på de grunnleggende formlene for forflytning.

Ved å bruke avanserte datamodeller kan en i tillegg få en visualisering av selve rømningsprosessen. I bygninger med utfordrende geometri og mange brukere er det en fordel å benytte seg av slike programmer. De ulike modellene benytter som oftest 2D-tegninger av bygningene og dimensjonerende persontall som inndata. Modellene er ofte komplekse og de er gjerne basert på en studie av personers oppførsel i faktiske rømningssituasjoner. I dette kapitlet vil to slike simuleringsprogrammer bli omtalt.

Tabell 5.1: Simuleringsprogrammer for forflytning ved rømning

Program	Utvikler	Versjon	Kommentar
Simulex	P. Thompson ved Integrated Environmental Systems, United Kingdom	2009.1.0.6	Lisensbelagt, €800 per år
Pathfinder	Thunderhead Engineering	2012	Lisensbelagt, \$1500 per år <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Kan også få kjøpt en permanent lisens til \$5000.

### 5.1 Simulex

Simulex er et simuleringsprogram som kan vise en evakueringsprosess grafisk. Personer vil forflytte seg til forhåndsdefinerte utganger med individuelle ganghastigheter. Hastigheten er avhengig av personenes karakteristikk og avstand til andre

personer i nærheten. Programmet bruker en strømningshastighet på 1.1-1.4 personer per meter utgangsbredde per sekund [12].

Programmet bruker plantegninger i DXF-format. Disse kan lages i et standard CAD-program, men må renses for all informasjon som ikke er relatert til selve bygningen. Tegningen skal kun inneholde vegger og fysiske objekter som ikke er bevegelige.

Utganger (Exits) og dennes bredde defineres der det er ønskelig. Personer velger automatisk nærmeste utgang, men det er mulig å spesifisere at en person skal bruke en annen utgang enn denne. Det anbefales å plassere utgangene et stykke på utsiden av bygningen for å kunne simulere forflytning gjennom den siste døren [12].

Simulering av rømning fra en fleretasje-bygning kan gjøres ved å koble sammen flere plantegninger ved hjelp av trapper (Stairs). Trappens lengde og bredde må defineres. Trappens faktiske lengde, langs helningen, skal benyttes. Alle trapper, selv spiraltrapper, blir behandlet som rette trapper i simuleringen.

Koblinger (Links) gjør det mulig å koble en trapp til to forskjellige plan. En kobling plasseres i bunnen av trappen og en plasseres i toppen av trappen. Disse koblingene må videre ha en korresponderende kobling på de to planene som skal trappen skal binde sammen. Koblingenes bredde kan også defineres. Det er viktig at det er en minste avstand på 0.5 m foran og bak hver kobling [12]. Dette skal sørge for fri bevegelse rundt selve koblingen og at det ikke oppstår problemer under overførsel av en person mellom to koblinger.

Simulex bruker et mesh bestående av ruter på  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$  for å lage et avstandskart. De ulike rutenes numeriske verdi tilsvarer avstanden fra denne ruten til en utgang. Ved hjelp av avstandskartet kan Simulex finne nærmeste utgang for personer i bygget. Spesifiseres andre utganger må det lages flere avstandskart.

Personer kan legges til en etter en, eller som en gruppe. Det er mulig å spesifisere personenes fysiske og psykologiske egenskaper. De fysiske egenskapene påvirker personenes størrelse og fordeling samt maksimal hastighet. De psykologiske egenskapene er valg av avstandskart (utgang) og responstid. Dette vil bli nærmere behandlet under respektive avsnitt.

Når alle personene i bygget er definert, kan simuleringen begynne. Tiden det tar å kjøre en simulering av sterkt avhengig av antall personer i simuleringen og PCen som skal utføre simuleringen. Simulex simulerer bevegelser hvert 0.1 s. Ved endt simulering lages det en utdatafil der blant annet total evakueringstid framkommer.

I følge hjemmesiden til Simulex bygger modellen på ekte menneskelig oppførsel. Den

Tabell 5.2: Ulike kroppstyper i Simulex, gjengitt fra [12]

Kroppstype	Rb (m)	Rt (m)	Rs (m)
Median	0.25	0.15	0.10
Voksen mann	0.27	0.16	0.10
Voksen kvinne	0.24	0.14	0.09
Barn	0.21	0.12	0.07
Eldre	0.25	0.15	0.09
NFPA - 1 m/s	0.25	0.15	0.10
SFPE - 1.4 m/s	0.25	0.15	0.10
SFV - 1.2 m/s	0.25	0.15	0.10
SFV - 1.2 m/s (+jakke)	0.25	0.235	0.10

er basert på data som er samlet inn fra videoanalyser av personer som beveger seg i folkemengder. Det er hentet inn data fra forskning fra hele verden. [46].

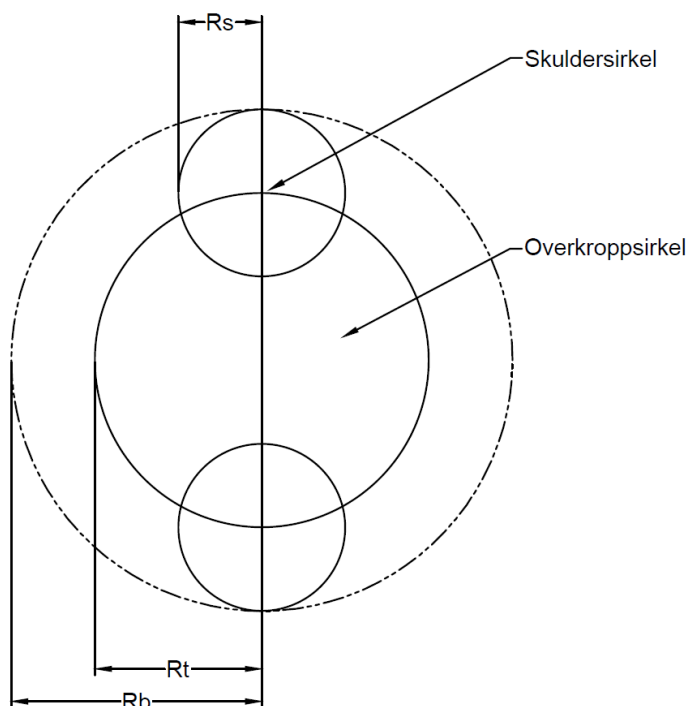
### 5.1.1 Prinsipper og antagelser

Følgende grunnleggende prinsipper og antagelser er gjort i Simulex [12];

- Hver enkelt person blir gitt en normal, uhindret ganghastighet
- Ganghastighet blir redusert når personer kommer nærmere hverandre
- Personer beveger seg til en utgang ved å bevege seg en retning som danner rette vinkler til meshet som er dannet i det valgte avstandskartet
- Forbipassering, kroppslig rotering, sideveisbevegelse og små bevegelser bakover er inkludert

### 5.1.2 Kroppslige dimensjoner

I Simulex vises personer kun ovenfra og matematisk er disse representert som tre sirkler, se Figur 5.1. Selve overkroppen har en radius  $Rt$  og skuldrene har radius  $Rs$ .  $Rb$  representerer hvor mye skuldrene er forflyttet ut fra selve kroppen. Det finnes flere ulike kroppsfasonger i Simulex og disse er vist i Tabell 5.2.



Figur 5.1: Figur som viser den matematiske representasjonen av en kropp i Simulex

Når en legger til en gruppe med personer i Simulex er det mulig å velge brukertype (Occupant Type). Brukertypen vil bestemme fordeling av personers kroppsfasong i gruppen. Denne fordelingen følger prosentfordelingen gitt i Tabell 5.3.

### 5.1.3 Personers ganghastighet

Simulex velger tilfeldig personers uhindrede ganghastighet i intervallet 0.8 - 1.7 m/s. En persons virkelige ganghastighet er avhengig av avstanden til personer framfor seg, og denne hastigheten bestemmes i henhold til Figur 8 i brukerhåndboka til Simulex [12]. Basert på figuren har Kuligowski og Peacock laget et matematisk uttrykk for sammenhengen mellom ganghastighet og avstand mellom personer. Sammenhengen er gitt ved [47];

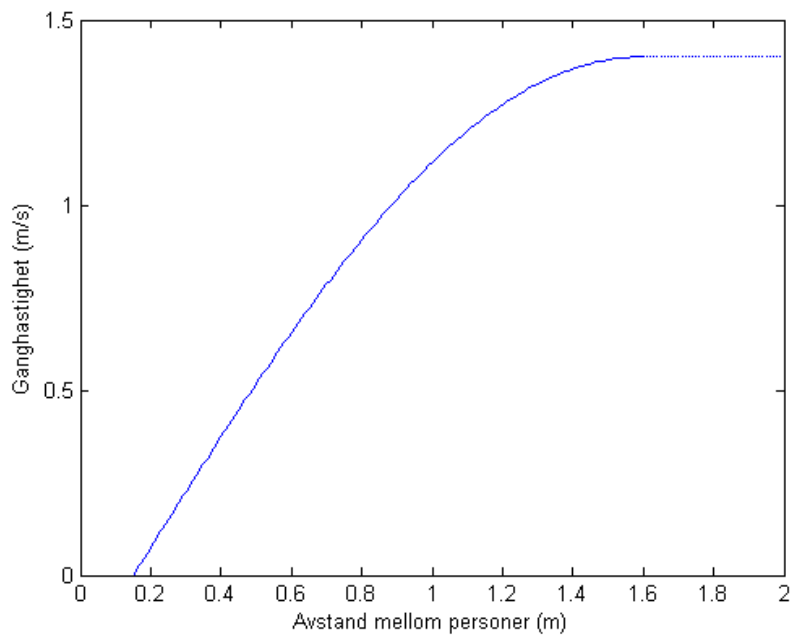
$$v = \begin{cases} V_u \times \sin(90 \times \frac{d-b}{t_d-b}) & \text{når } b \leq d \leq t_d \\ V_u & \text{når } d > t_d \end{cases}$$

der  $v$  er ganghastighet (m/s),  $V_u$  er normal uhindret ganghastighet (m/s),  $d$  er avstand mellom personer (m),  $t_d$  er grenseavstand (m) og  $b$  er overkroppens radius,  $R_t$ , (m).  $V_u$  er her satt til 1.4 m/s og  $t_d$  er satt til 1.6 m [47]. For en person med gjennomsnittlig kroppsfasong,  $R_t = 0.15$  m, fåes sammenhengen i Figur 5.2.

Tabell 5.3: Fordeling av kroppsfasonger for ulike brukertyper, gjengitt fra [12]

Brukertype	% Gjennomsnittlig	% Mann	% Kvinner	% Barn
Kontorarbeidere	30	40	30	0
Pendlere	30	30	30	10
Shoppere	30	20	30	20
Skolebarn	10	10	10	70
Eldre	50	20	30	0
Kun menn <sup>a</sup>	0	100	0	0
Kun kvinner	0	0	100	0
Kun barn	0	0	0	100

<sup>a</sup>Merknad: I brukerhåndboka er det skrevet at brukergruppen “Kun menn” består av 100 % gjennomsnittlige. Jeg antar at dette er feil og har derfor satt denne til å være 100 % menn.



Figur 5.2: Sammenheng mellom ganghastighet og avstand mellom personer i Simulex

I trapper der personer forflytter seg nedover, reduseres ganghastigheten til  $0.5 \times$  horisontal hastighet. Der personer går oppover trapper er hastigheten  $0.35 \times$  horisontal hastighet. [12].

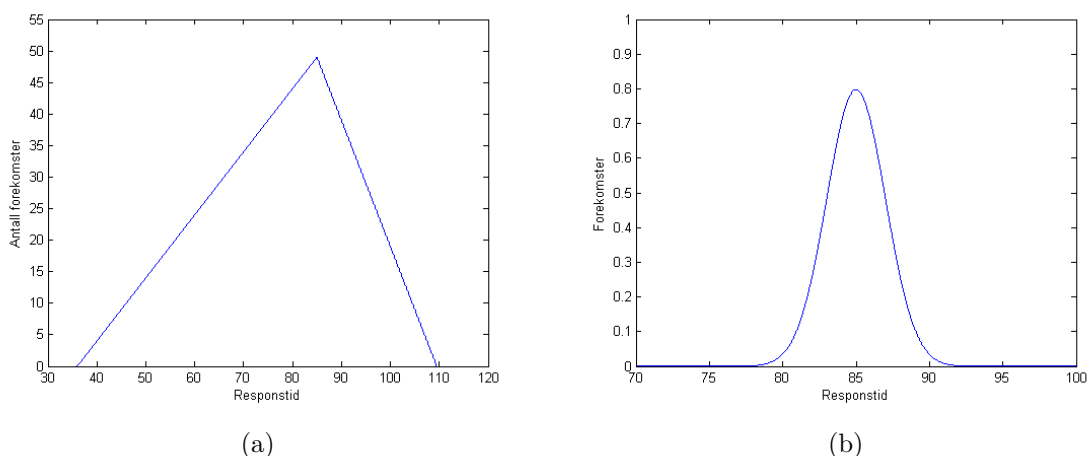
### 5.1.4 Personers psykologiske egenskaper

En psykologisk egenskap som må defineres er responstiden. Responstiden defineres med en middelværdi og en varians i tillegg til type sannsynlighetsfordeling. De ulike sannsynlighetsfordelingene er; vilkårlig fordeling, triangulærfordeling og normalfordeling.

Ved bruk av vilkårlig fordeling velges en responstid innenfor intervallet:

$$\text{Middelværdi} \pm \text{variens} \quad (5.1)$$

En triangulærfordeling tar utgangspunkt i en minimumsverdi (a), en maksimumsverdi (b) og den verdien som forekommer oftest i det aktuelle datasettet (c). Figur 6.2a illustrerer dette for et tilfelle der a, b og c er henholdsvis 36, 85 og 109.5 s.



Figur 5.3: Figuren viser et eksempel på henholdsvis (a) Triangulærfordeling og (b) normalfordeling

Normalfordelingen passer godt der de fleste responstidene ligger i området rundt middelværdien,  $\mu$ . En normalfordeling uttrykkes ved hjelp av middelværdien og dens varians,  $\sigma^2$ . Figur 5.3b viser en normalfordelingskurve med en  $\mu$  på 85 s og en  $\sigma^2$  på 0.5.



### 5.1.5 Kjente begrensninger

- Smale åpninger ( $\leq 0.55$  m) gjør at avstandskartet finner en vei igjennom, men personer kan bli hindret i å komme seg igjennom [12]
- Personer kan sette seg fast i koblinger [47]

## 5.2 Pathfinder

Pathfinder er en agent-basert evakueringssimulator, som kan vise rømningsprosessen i 2D og 3D. Simuleringsprogrammet benytter to ulike metoder for å beskrive personers bevegelser; “SFPE-modus” og “steering modus”.

SFPE-modus implementerer rømningskonseptene beskrevet i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Dette er en strømningsmodell, der ganghastigheter er bestemt av persontettheten innenfor et rom. Strømningshastigheten ut av dører er kontrollert av døras bredde. I SFPE-modus kan personer overlape hverandre når de beveger seg og ved kødannelser.

“Steering” modus er basert på en idè om invers styrings-oppførsel. “Steering” gjør det mulig å ha en mer kompleks oppførsel, som følge av bevegelsesalgoritmer. Dette gjør det mulig å eliminere beregning av persontetthet og køer ved dører.

I Pathfinder brukes det en geometrisk 3D-modell, hvor det defineres et triangelformet navigasjonsmesh (navigation mesh) i 2D. Dette meshet representerer området hvor personer kan bevege seg. Vegger og andre ugjennomtrengelige områder blir representert som hulrom i meshet. Navigasjonsmeshet kan tegnes manuelt eller genereres automatisk ved hjelp av en importert geometri (FDS-filer, DXF-format samt DWG filer). Den automatiske mesh-generatoren behandler et område hvor det er fri høyde på mindre enn 1.8 m som en hindring [4].

Dører (doors) gjør det mulig å forflytte seg mellom to rom. En dør som ikke kobler sammen to rom og er plassert langs byggets utside kalles en utgangsdør (exit door). En person som vil gå igjennom en dør i SFPE-modus blir plassert i en kø og denne køen blir fjernet ved strømningshastigheten gitt av SFPE. I “steering” modus blir personene fjernet med en gang de går igjennom døren.

Navigasjonsmeshet kan bli kategorisert som en av fire terrengetyper; åpent rom, dører, trapper og utganger. Disse terrengetypene påvirker personenes oppførsel i det aktuelle området. Åpne rom (rom og ramper) påvirker ikke personenes oppførsel.

Trapper gjør det mulig å koble sammen flere etasjer. Personers ganghastighet i trapper blir redusert i forhold til vanlig ganghastighet, på bakgrunn av trappens helning. Når en trapp blir definert dannes det i tillegg to dører og disse fungerer helt likt som vanlige dører.

Personer er modellert som stående sylindre i navigasjonsmeshet og det er mulig å legge til disse én og én, eller som en gruppe. Hver enkelt person blir gitt et eget sett med unike parametre (maksimum hastighet, valg av utgang etc.).

Når all geometri og personer er definert, kan en justere parametre som påvirker simuleringen. Følgende parametre kan spesifiseres [48];

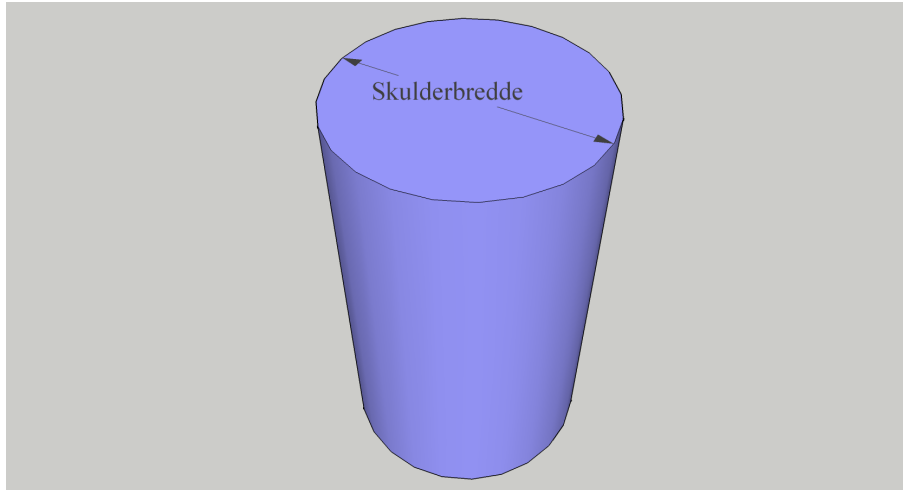
- Termineringstidspunkt - simuleringen vil automatisk stoppe når denne tiden er nådd.
- Størrelsen på  $\Delta t$  - styrer lengden på tidsstegene i simuleringen. En økning av  $\Delta t$  vil gi en raskere simulering.
- Frekvens for registrering av ulike utdata - bestemmer hvor ofte utdata skal registreres.
- “Max Agent Radius Trim Error” - påvirker agents presisjon til å navigere i trange rom når personene har ulike størrelser. Større verdi gjør det vanskeligere å komme igjennom trange områder.
- “Constrain Edge Length” - påvirker algoritmen som generer det triangelformete navigasjonsmeshet. Pathfinder bruker i utgangspunktet færrest og størst mulig triangler.

I tillegg kan parametre for de ulike modus justeres. Disse blir behandlet under respektive avsnitt.

Ved endt simulering er det mulig å se en 3D-visualisering av rømningsprosessen. Utdatafilen inkluderer også en oversikt over antall personer i respektive rom, som funksjon av tid, samt strømningshastigheter ut av dører.

### 5.2.1 Person-profil

Person-profilen (profile) gjør det mulig å definere ulike personers egenskaper. Personer kan bli gitt en prioritering, der høyere verdi gir en høyere prioritering. Denne



Figur 5.4: Figur som viser sylindringen som representerer en person i Pathfinder

funksjonen gjør at personer med lavere prioritet vil flytte seg for de med høyere prioritet. Det er også mulig å definere personers maksimale hastighet og skulderbredde. Skulderbredden tilsvarer diameteren på sylindringen som skal representere en person, se Figur 5.4.

Andre parametre som kan spesifiseres i person-profilen er [48];

- Høyde (Height) - høyden av sylindringen.
- Reduksjonsfaktor (Reduction Factor) - en parameter som påvirker “steering” modus og som spesifiserer hvor godt en person kan presse seg forbi andre i trange korridorer (0-1). Denne faktoren multipliseres direkte med skulderbredden.
- Komfortavstand (Comfort Distance) - spesifiserer avstanden en person ønsker å ha til andre i nærheten.
- Vedvarende tid (Persist Time) - spesifiserer hvor lenge personen med høy prioritet klarer å beholde denne i en kø.
- Responstid ved kollisjon (Collision Response Time) - denne faktoren kontrollerer når personer begynner å bremse for å unngå en kollisjon med andre. (I “steering modus”.)
- Saktefaktor (Slow Factor) - spesifiserer den delen av en persons hastighet, som regnes for å være treg. En treg person vil vurderer å bevege seg bakover for å gi avstand til andre, mens en rask person vil ha en mer fokusert bevegelse.

Disse parametrene kan bli satt til en konstant verdi, en vilkårlig fordeling mellom to verdier, en normalfordeling eller en log-normalfordeling.

Hver enkelt person blir tildelt en unik id (seed). Denne id'en blir linket til personprofilen slik at personen får faste parametre. Dette forholder seg slik helt til fordelingen blir forandret eller en persons id blir endret manuelt.

Når en legger til en gruppe med personer i Pathfinder er det mulig å velge fordeling av personer i henhold til profiltyper. En kan f. eks. spesifisere at gruppen skal bestå av 50 % kvinner (<30 år) og 50 % menn (30-50 år). Disse profiltypene må derimot defineres manuelt.

“Default”-verdiene i personprofilen er konstante, og er som følger [49];

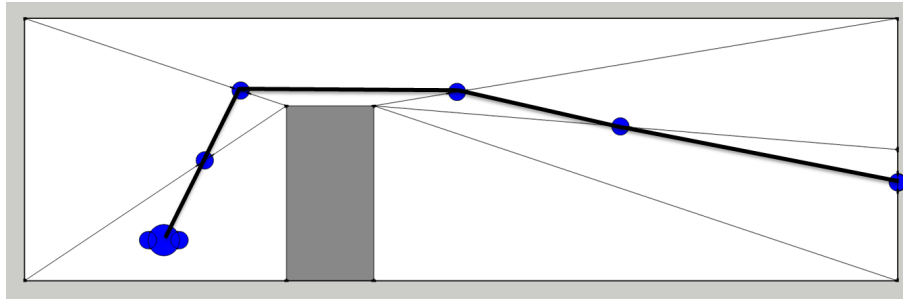
Tabell 5.4: “Default”-parametre i personprofilen til Pathfinder

Parameter	Verdi
Hastighet	1.19 m/s
Skulderbredde	45.58 cm
Høyde	1.8288 m
Reduksjonsfaktor	0.7
Komfortavstand	0.3048 m
Vedvarende tid	1.0 s
Responstid ved kollisjon	1.5 s
Saktefaktor	0.1

## 5.2.2 Personers oppførsel

I Pathfinder er det mulig å velge hvordan personer skal oppføre seg. For hver slik oppførsel ligger det en implisitt handling om at personen til slutt skal komme seg til en utgang. Denne implisitte handlingen vil alltid skje til slutt. “Default” - funksjonen er “Goto Any Exit” og denne funksjonen gjør at personene velger den utgangen som har den raskeste ruten.

Det er mulig å spesifisere en oppførsel der personen blir stående en viss tid før den påbegynner rømning. En kan også spesifisere en gitt utgangsdør, et punkt som skal passeres og et rom hvor personene skal vente.



Figur 5.5: En persons planlagte rømningsrute og waypoints i Pathfinder, gjengitt fra [4]

### 5.2.3 Generering av rømningsrute

Det første Pathfinder gjør i simuleringen, er å generere personers rømningsrute til utgangsdør. Dette gjøres ved hjelp av en A\*-algoritme<sup>1</sup> og det triangelformete navigasjonsmeshet. Resultatet blir en rekke punkter langs kanten på trianglene i navigasjonsmeshet. Disse punktene vil danne en hakkete rute til personenes mål.

Pathfinder benytter seg av en variant av “string pulling”-teknikken for å jevne ut rømningsruten. Denne metoden vil flytte punktene mot målet, slik at ruten kun endrer retning ved hjørnet på eventuelle hindringer. Personen vil i tillegg ha en minste avstand til hindringen på størrelse med personens radius. De resulterende punktene kalles “waypoints”. Pathfinder vil så fjerne waypoints som ligger på linjen mellom to andre waypoints. En illustrasjon av dette kan sees i Figur 5.5.

Når en person beveger seg langs en rømningsrute, blir følgende framgangsmåte utført [4];

1. To waypoints blir definert: (1) det waypoint som initielt er lengst unna, som en person kan se og nå uten å komme i kontakt med hindringer. (2) det neste waypoint, sett fra (1), som en person kan se og nå uten å komme i kontakt med hindringer.
2. En person prøver å oppdatere sitt waypoint fra (1) til (2). Dette kan gjøres hvis personen kan bevege seg i en rett linje fra (1) til (2) uten å treffe på hindringer og komme innefor en viss avstand fra (2). For SFPE-modus er denne nær null, siden det ikke er noen begrensninger for at personer kan overlape hverandre. For “steering” modus er denne 1 m.

<sup>1</sup>En gjennomgang av A\*-algoritmen har blitt gjort av Hart, Nilsson og Raphael [50]

3. Personen kontrollerer om den må finne en ny rute. En person må legge om ruten hvis de ikke kan se en rett strekning til neste waypoint, eller hvis de må bevege seg mer enn 1 m bort fra deres originale rute.
4. En “seek”-kurve blir laget for å definere ønsket bevegelse. I SFPE-modus er denne kurven en rett linje fra aktuell posisjon til neste waypoint. I “steering” modus er dette en andregrads B-kurve. B-kurven dannes på bakgrunn av aktuell posisjon, waypoint (1) og et kontrollpunkt projisert bakover langs retningen fra (1) til (2).
5. En person forsøker å bevege seg langs tangenten til aktuell “seek”-kurve. Denne bevegelsen er sterkt påvirket av type modus.

Noen rom kan ha flere dører som gir omtrent like lengder på rømningsrutene. Hadde rømningsruten kun blitt valgt på bakgrunn av lengden til utgangsdør ville dette ha gitt en unaturlig persontrafikk. Et slikt tilfelle ville ført til en stor pågang i en av dørene, mens de andre hadde blitt nærmest ubrukt. Pathfinder tillater derfor personene å beregne rute basert på et estimert tidsforbruk ved hver dør. Personene er bare klar over køene og forholdene i det rommet de faktisk befinner seg i, de husker ikke hva som var i forrige rom. For å forhindre at personer går tilbake til forrige rom er det laget en algoritme for å vurdere valg av neste dør. [4].

#### 5.2.4 SFPE-modus

SFPE-modus bruker en strømningsbasert rømningsmodell basert på en modellerings-teknikk presentert i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [51] og *SFPE Engineering Guide: Human Behavior in Fire* [52].

I SFPE-modus består et bygg av tre komponenter; dører, rom og trapper. I håndboka er korridorer også en romkomponent, men i Pathfinder behandles dette som en romkomponent. Et rom kan ses på som et åpent område hvor personer kan forflytte seg. Trapper sees på som et rom, der trappens helning påvirker personenes forflytningshastighet. Dørene begrenser strømningshastigheten mellom ulike rom og rom/trapp. Som utgangspunkt kan personer overlape hverandre i SFPE-modus [4].

I SFPE-modus kan en aktivere grunnleggende kollisjoner, som gir et mer realistisk visuelt utseende. Dette vil ikke påvirke selve evakueringstiden i noe særlig grad. En maksimal persontetthet (Max Room Density) på mer enn 3.6-3.8 pers/m<sup>2</sup> vil føre til

ekstremt lange rømningstider, mens en verdi på under 2.8 pers/m<sup>2</sup> vil gi unaturlig raske rømningstider [4].

Dørens grenselag (Door Boundary Layer) er med på å bestemme dørens effektive bredde. Som “default” er denne satt til 15 cm. Dette stemmer godt overens med hva som anbefales av både SFPE Handbook og av Hagen [53, 35]. Dørens strømningshastighet (Door Flow Rate) er maksimal personstrøm per meter dørbredde. “Default”-verdien er satt til 1.32 personer per meter dørbredde per sekund [48]. Minimum og maksimum tetthet (Min Density og Max Density) bestemmer nedre og øvre grense for persontetthet, ved beregning av strømningshastighet gjennom dører. Det anbefales en nedre grense på 1.9 pers/m<sup>2</sup> og en øvre grense på 3.5 pers/m<sup>2</sup> [4]. Personers ganghastighet er avhengig av det aktuelle rommets persontetthet. Der persontettheten er mindre enn 0.55 pers/m<sup>2</sup> er hastigheten gitt ved [4];

$$v(D) = v_{max} \tag{5.2}$$

For persontetthet over 0.55 pers/m<sup>2</sup> er hastigheten gitt ved [4];

$$v(D) = v_{max} \times \frac{k - 0.266 \times k \times D}{1.19} \tag{5.3}$$

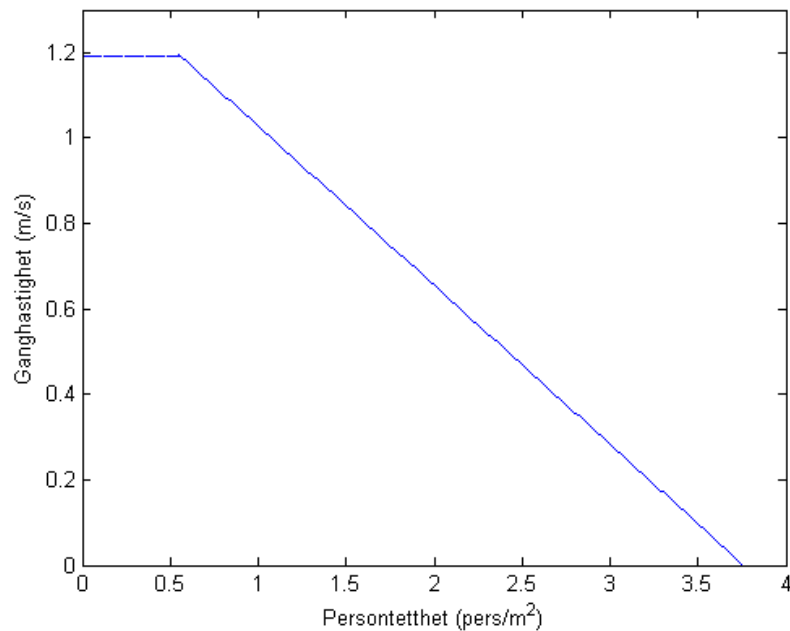
$v_{max}$  er i begge tilfellene satt til 1.19 m/s og  $k$  er satt til 1.40 m/s. Figur 5.6 viser et plott av disse funksjonene.

I trapper senkes ganghastigheten ved at verdien til  $k$ , i uttrykket ovenfor, forandres på bakgrunn av trappens helning.

### 5.2.5 “Steering” modus

Steering-systemet forflytter personer slik at de oppfyller sitt forflytningsmål og slik at de kan reagere på et endret miljø. I Pathfinder brukes invers steering. Denne prosessen innebærer en evaluering av en persons ulike forflytningsmuligheter og de “kostnader” i form av en ulempe disse mulighetene innebærer. Den forflytningen som koster minst vil bli utført.

Det finnes fire ulike steering oppførsler; søk (seek), separer (separate), unngå vegger (avoid walls) og unngå personer (avoid occupants). Disse oppførslene tilsvarer en kostnad mellom 0 og 1 for hver forflytningsretning. Netto kostnad for en retning tilsvarer en vektet sum av disse verdiene. Uttrykk for de ulike kostnadene er gitt



Figur 5.6: Sammenheng mellom ganghastighet og persontetthet i Pathfinder

i *Technical Reference - Pathfinder 2012* [4]. Etter at forflytningsretning er valgt, beregnes personenes hastighet og akkselerasjon.

Personer kan ha to ulike tilstander som påvirker deres oppførsel; søkende (seeking) og tomgangsstilling (idling). “Seeking” vil si at personene forsøker å følge en rute til en destinasjon. “Idling” betyr at personen venter i en spesifisert tid. Disse tilstandene har en direkte innvirkning på hvilke steering oppførsler som skal kombineres i beregning av kostnad. Tilstandene avgjør også antall forflytningsretninger som skal vurderes. Ved idling vurderes 8 retninger, mens ved seeking vurderes det færre og færre avhengig av hastigheten.

Personer med avvikende prioritet vil påvirke oppførselen til andre. Personer som har oppdaget en med høyere prioritet vil bytte fra en “seek”-oppførsel til en “separate”-oppførsel slik at den med høy prioritet kan prøve å passere.

I “steering” modus er kollisjonshåndtering (Collision Handling) på forhånd aktivert for reaktiv steering. Treghet (Inertia) gjør at personer ønsker å oppnå maksimal hastighet før de stopper. Oppdateringsinterval (Steering Update Interval) spesifiserer hvor ofte steering’en skal oppdateres. Et høyere tall gir kortere simuleringstid, men personer vil gjøre dårligere valg underveis.



### **5.2.6 Kjente begrensninger**

- Pathfinder kan ikke integrere resultater fra en brannmodell [48]
- Det er ikke støtte for kompleks oppførsel fra personene (f. eks. familie gruppering) [48]
- Dynamisk geometri er kun støttet til en viss grad (f.eks. heis, men ikke rulletrapp, tog etc.) [48]



# Kapittel 6

## Kvalitativ analyse

Dette kapitlet tar for seg den kvalitative delen av analysen. Analyseobjektet i denne rapporten har vært Arena Larvik, en idrettsarena i Larvik. Arena Larvik er allerede ferdigstilt og ble åpnet høsten 2009. Arenaens størrelse gjør den allikevel til et godt egnet analyseobjekt. Arenaens adresse er Hoffs gate 6, 3262 Larvik.

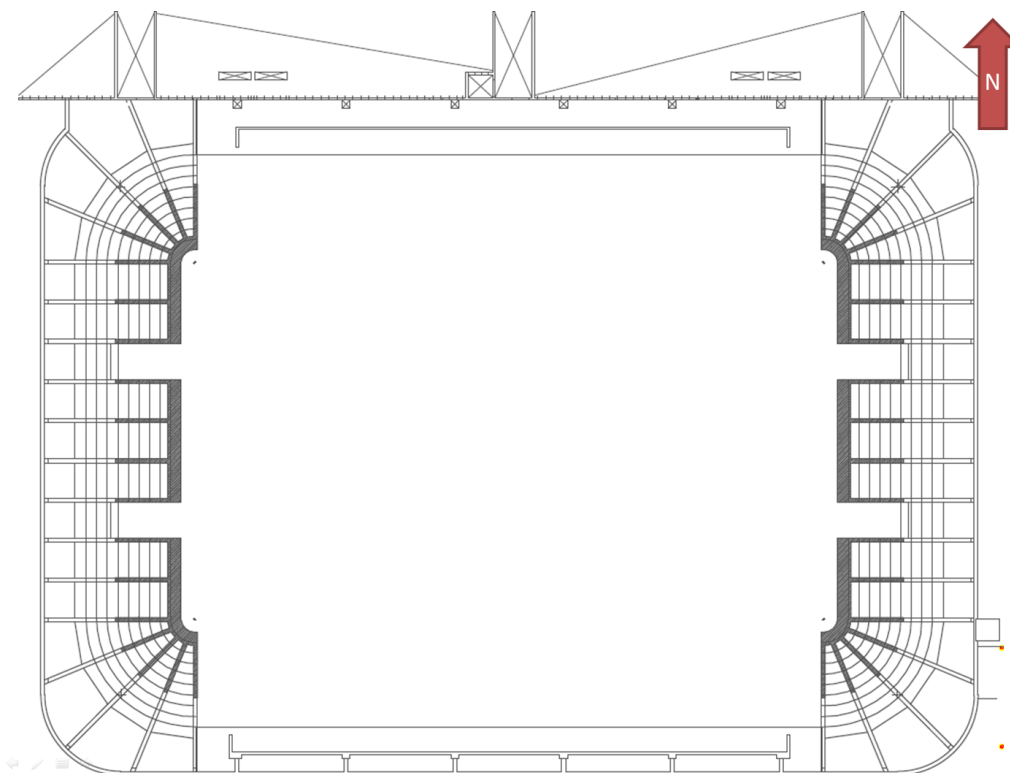
Analysen er forsøkt utført i samsvar med NS 3901:2012 så godt det har latt seg gjøre [31]. Forenklinger har blitt gjort der det var nødvendig. Målet med den kvalitative analysen var å avdekke scenarioer med behov for videre kvantifisering.

### 6.1 Beskrivelse av analyseobjektet

Arena Larvik eies av Vestfold fylkeskommune. Arenaen driftes og disponeres i skoletiden av Thor Heyerdahl videregående skole. På kveldstid blir den benyttet som treningslokale, i tillegg til at den er hjemmebanen til Larviks håndballag. Arenaen kan også bli brukt til konsert- og messeformål.

For sportsarrangementer har arenaen en oppgitt publikumskapasitet på totalt 4000 personer, hvorav 3000 er sitteplasser og 1000 er ståplasser. Tribunene på langsiden (teleskoptribuner) kan kjøres tilbake for å gi en større spilleflate. På denne måten kan det foregå to håndballkamper samtidig, med 900 sitteplasser til hver kamp. Publikumskapasiteten ved andre typer arrangement vil avhenge av gulvflatens inndeling samt bruken av teleskoptribuner, plassbygde tribuner og ståplasser. Det er opplyst om en kapasitet på opptil 5000 personer ved konsert-arrangementer på arenaens hjemmesider. [54].

Vestfold Fylkeskommune har bidratt med tegning av arenaen i .dwg-format som



Figur 6.1: Tegningsgrunnlag fra Vestfold Fylkeskommune

grunnlag for analysen, se Figur 6.1. Bredden på noen av rømningsveiene har vært kjent, mens bredden på trappeløp og plassering av utgangsdører har vært ukjent.

Avhengig av type bruk vil arenaen bli besøkt av mange ulike typer personer. Under et sportsarrangement vil spilleflaten bli brukt av et fåtalls veltrente idrettsutøvere. Publikum vil bestå av personer i alle aldersgrupper og kroppsfasonger. Noen vil være kjent med rømningsforholdene, andre ikke. Ved en konsert vil spilleflaten bestå av en scene i tillegg til et betydelig antall personer. Disse kan være fordelt utover i ulike soner og i varierende persontetthet. Store deler av tribunen vil også være fylt med publikummere. Ved messelignende arrangementer vil det trolig ikke være et stort antall personer på tribunen, men spilleflaten kan være delt opp av ulike stands og reoler. Utforming av disse kan påvirke rømningsforholdene.

I Kapittel 3 kom det fram at et multifunksjonsanlegg tilhørte risikoklasse 5. Det kom også fram at bygg med et dimensjonerende persontall på mer enn 3000 personer tilhørte brannklasse 4. Med bakgrunn i disse klassene fulgte også en del krav angående rømningsforholdene. En oppsummering av analysebyggverkets egenskaper er gitt i Tabell 6.1.

Arenaen består av to hovednivåer; ett nivå ved spilleflaten (Nivå 1) og ett nivå i bakkant av tribunens overkant (Nivå 2). Nivå 2 kan blant annet brukes til ståplasser

Tabell 6.1: Egenskaper ved analysebyggverket

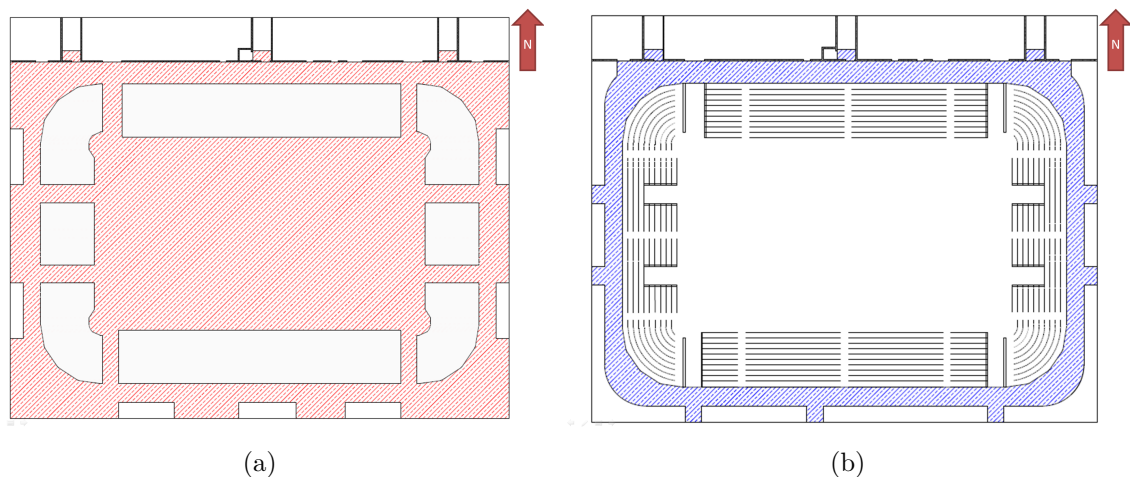
Egenskaper ved analysebyggverket		Henvisning/Kommentar
Virksomhet	Idrettshall	VTEK 10, § 11-2 Tabell 1
Risikoklasse	5	VTEK 10, § 11-2 Tabell 1
Brannklasse	4	SINTEF Byggforsk
Krav til ledesystem	Ja	TEK 10, § 11-12 (3)
Krav til fri bredde i rømningsvei	1.2 m	VTEK 10, § 11-11 (3)
Maksimal lengde på fluktvei	30 m	VTEK 10, § 11-13 Tabell 1
Særskilt brannobjekt	Ja	BEL, SINTEF Byggforsk
Dimensjonerende personbelastning	4000/5000	Arena Larvik [54]
<b>Tekniske installasjoner</b>		
Sprinkler	Ja	Delsprinkling av rømningssoner/forflytningsareal nivå 1
Brannalarmanlegg	Kategori 2	VTEK 10, § 11-12 Tabell 3
Krav til talevarslingsanlegg	Ja	VTEK 10, § 11-12 (2) a.
Krav til ledesystem	Ja	VTEK 10, § 11-12 (3)
Røykventilasjon		Bør avdekkes av en CFD-analyse

under en håndballkamp. Det er mulig å forflytte seg også i bakkant av tribunen på nivå 1. Dette området kan nåes via “tuneller” gjennom tribunene eller via trapper fra nivå 2. Totalt 8 tuneller leder fra spilleflaten til rømningsarealet på baksiden av tribunene; henholdsvis to tuneller på hver av de fire sidene. Arealet som er tilgjengelig til forflytning på nivå 1 og 2 er vist i Figur 6.2b. I underkant av tribunene i øst og vest kan det tilrettelegges for enkelt kiosksalg og garderober for oppbevaring av ytterklær. Det forutsettes da at disse områdene delsprinkles. I nordenden av arenaen finnes det garderober der spillere kan skifte og dusje. Det forutsettes at disse områdene er egne brannceller.

Høydeforskjellen mellom nivå 1 og nivå 2 er på 4.0 m. I TEK 10, §12-16 (1) d., settes det krav til repos der høydeforskjellen er på mer enn 3.3 m [7]. Dette er tatt hensyn til ved å bruke et mellomnivå (nivå 1.5). I den nordlige delen av bygget finnes det tre nødutganger fra dette mellomnivået. Resten av nødutgangene befinner seg på nivå 1. Fri takhøyde er satt til 7 m ihht. krav fra Norges Håndballforbund for arenaer ferdigstilt før 01.08.2014 [55].

I denne analysen er menneskeliv den verdien som skal sikres. Det skal sørges for at alle personene i analyseobjektet kan rømme bygget på en sikker måte. I rømningsveiene skal det ikke være brennbart materiale.

I denne rapporten er det antatt at analyseobjektet ligger i god avstand fra nær-



Figur 6.2: Figuren viser det tilgjengelige forflytningsarealet på nivå 1 og 2. På nivå 1 er dette skravert med rødt (a) og på nivå 2 er dette skravert med blått (b).

meste nabobyggverk. Det er også antatt at områdene rundt kan håndtere den store personmengden som skal rømme fra arenaen. Utforming av arealene rundt arenaen blir i denne rapporten behandlet i liten grad, men den har stor betydning for suksessgraden av selve rømningsprosessen. Uteområdet må også kunne håndtere personmengden på en trygg måte. Arenaen kan altså ikke være omringet av tungt trafikkerte bilveier.

I følge Statens Bygningstekniske Etat skal brannvesenets innsatstid settes til 15 min i bystrøk [10]. Innsatstiden er da tiden fra innsatsstyrken blir alarmert til denne er i arbeid på skadested. Da avstanden fra Arena Larvik til Larvik brannvesen er kort, ca. 1.3 km<sup>1</sup>, forutsettes det at innsatstiden for dette analyseobjektet er <10 min.

Personell ved arenaen må til enhver tid sørge for at rømningsveier holdes frie for brennbart materiale og fysiske hindringer.

## 6.2 Valg av analysemetode og analyseteknikk

En grovanalyse blir benyttet for å avdekke om det er behov for å utføre kvantifisering av nødvendig rømningstid. Om dette er tilfelle, skal nødvendig rømningstid bestemmes på bakgrunn av blant annet rømningssimuleringer i Pathfinder og Simu-lex.

<sup>1</sup>Målt av forfatteren i Google Maps

Tabell 6.2: Rømningstider fra noen spanske fotballstadioner [13]

Stadion	Tilskuerkapasitet	Rømningstid <sup>a</sup> (min)
El Campo Nou, Barcelona	98 000	15
La Romareda, Saragoza	34 000	10
El Jose Zorilla, Valladolid	33 000	4
Santiago Bernabeu, Madrid	80 000	15 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Disse tidene er mest sannsynlig forflytningstiden og inkluderer ikke deteksjonstid og reaksjonstid

<sup>b</sup>Ved evakueringen i 2004 tok det 8 min å evakuere 70 000 fra samme stadion

### 6.3 Fastsetting av beslutningskriterier

Det forutsettes at det utføres en CFD-analyse for å avdekke tid til kritiske forhold oppstår, altså tilgjengelig rømningstid. Dette er ikke en del av denne rapporten. Nødvendig rømningstid kan derfor ikke vurderes opp i mot tilgjengelig rømningstid.

For å kunne fastsette beslutningskriterier, er det derfor behov for å sammenligne Arena Larviks nødvendige rømningstid med oppnådd rømningstid fra andre kjente arenaer. Krav fra utenlandske institusjoner kan også legges til grunn.

I 2004 ble Santiago Bernabeu i Madrid evakuert på grunn av en bombetrussel. I løpet av 8 min ble mer enn 70 000 personer evakuert, uten at ulykker oppstod. Polit og sikkerhetspersonell ved stadionen hadde da forberedt evakueringen i ca. 30 min. Forberedelsene bestod av å flytte hindringer i rømningsveiene og omdirigering av biltrafikken rundt stadionen. Rømningen ble satt i gang over høyttaleranlegget, og kampen ble stoppet. De 315 overvåkningskameraene ble brukt aktivt for å dirigere personer og kontrollere personstrømmene. [13].

Det har blitt utført rømningsøvelser ved flere spanske stadioner. Rømningstiden ved noen av disse er gitt i Tabell 6.2. Tabellen viser en generelt kortere rømningstid for synkende tilskuerkapasitet.

For engelske idrettsarenaer er det, som tidligere nevnt, et krav om avsluttet rømning innen 8 min fra brannstart [2].

Basert på den innhentede informasjonen bør nødvendig rømningstid for Arena Larvik være på <8 min. Det kan diskuteres om den burde være enda lavere enn dette, men 8 min ses her på som en absolutt øvre grense.

## 6.4 Fareidentifikasjon

Noen aktuelle farekilder og trusler ved analyseobjektet er listet opp i Tabell 6.3. Listen er generert til dels på bakgrunn av Tabell 3.2 i boken *Risikoanalyse - teori og metoder* [56]. Dette er bare et utvalg av farer, ikke en fullstendig liste.

Tabell 6.3: Aktuelle farekilder ved analyseobjektet

<b>Farekilder/trusler</b>
Eksplosiver
Brennbare stoffer/materialer
Kortslutning
Elektrisk overbelastning
Flammer
Røyk
Lynnedslag
Manglende sikkerhetsutstyr
Feil bruk av maskiner
Blokkering av utganger
Mangelfullt vedlikehold
Mangelfull kompetanse
Brannstifting
Terrorhandling

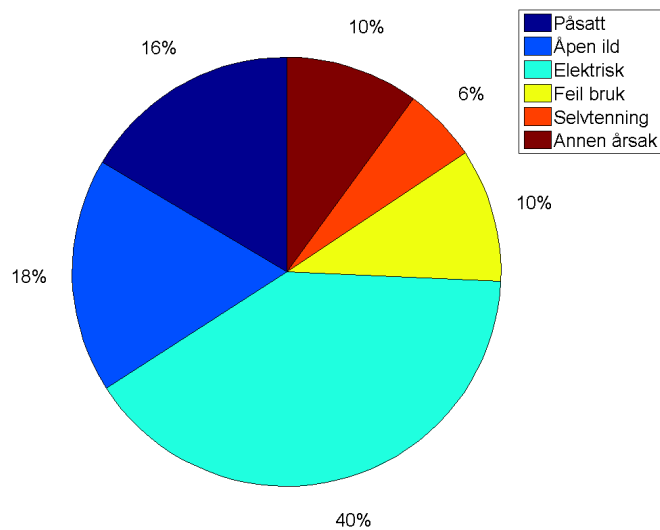
Det antas at røyk i de fleste tilfellene vil være den største faren med tanke på rømningsforholdene på nivå 2. Avhengig av hvor en brann oppstår, vil den kunne blokkere noen utgangsdører. Blokkering av utgangsdører kan også forekomme om personellet har mangelfull kunnskap om viktigheten av at rømningsveier holdes frie for hindringer.

De ulike bruksområdene vil gi forskjellige brannutviklinger avhengig av hvor de brennbare stoffene befinner seg. Ved messe vil det f. eks. forekomme mye mer brennbart materiale på spilleflaten sammenlignet med en håndballkamp. Reolutformingen vil også kunne påvirke rømningsmønsteret ved en messe.

## 6.5 Analyse av årsaker og sannsynlighet

I Tabell 1.1 ble flere store katastrofer, der mange personer omkom, listet opp. Brann var sjelden den initierende årsaken til disse katastrofene. Mange av katastrofene oppstod under vanlig inntreden/utvandring.





Figur 6.3: Årsaker til brann i næringsbygg, laget på bakgrunn av tall fra DSB [5]

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) fører statistikk over brannårsaker i Norge. Denne er dog lite detaljert angående branner i multifunksjonsanlegg. DSBs statistikk baserer seg på innrapporteringer fra brannvesenet etter utrykninger der det har vært flamme eller glødebrann. Statistikken dekker altså ikke alle branner. [5].

For næringsbranner finnes det statistikk vedrørende brannårsaker. I 2011 ble det registrert 1055 branner ved næringsbygg i Norge. Ved 742 av disse ble brannårsak ikke rapportert inn. Det er med andre ord stor usikkerhet knyttet til hva som faktisk var årsaken til over 70 % av brannene. I tillegg var årsaken til 64 av de innrapporterte brannene “ukjent”. Hvis disse brannene sees bort fra, får en årsaksfordelingen som er gitt i Figur 6.3. [5].

Av årsaksfordelingen kan en se at størsteparten av branner i næringsbygg oppstår i det elektriske, gitt de forutnevnte antakelsene. Nest største brannårsak er åpen ild og deretter følger påsatt.

Når arenaen skal benyttes til konserter, kan det trekkes linjer mot brannårsaker i f. eks. nattklubber. Den mest hyppige årsaken til branner i nattklubber i USA på 2000-tallet var brannstifting/påsetting [57]. Deretter fulgte elektrisk, matlaging og røyking.

Det er som sagt store usikkerhetsmomenter ved tallene ovenfor. Hvis det forutsettes at de ikke rapporterte og “ukjente” årsakene fordeles på samme måte som de rap-

porterte, er det mulig å si noe om sannsynligheten. Det er da mest sannsynlig at en brann oppstår i det elektriske anlegget (40%). Videre er det sannsynlig at en brann blir satt i gang på grunn av åpen ild (18%). Påsatte branner frekventerer nesten like ofte som brannårsak (16%). Hvis “ukjent” brannårsak inkluderes som en egen kategori i årsaksfordelingen får en et annet bilde. Dette er vist i Vedlegg C.

## 6.6 Brannscenarioer

Ved identifisering av relevante brannscenarioer skal minst følgende betraktninger inngå [31];

*“- lokalisering av brann. Branner som kan blokkere rømningsveien med størst kapasitet skal vurderes...”*

Der analysen skal verifisere at byggt teknisk forskrift er oppfylt, skal uansett følgende fire brannscenarioer vurderes [31];

1. Et alvorlig brannscenario med rask utvikling og høy branneffekt som representerer det verste troverdige brannscenarioet i byggverket.
2. Brann som oppstår i et rom som normalt er uten personer, og som kan true et større antall personer i andre deler av byggverket.
3. Brann som utvikler seg langsomt, og som ikke vil utløse et automatisk slokkeanlegg.
4. Representative brannscenarioer for det aktuelle byggverket som skal analyseres for å avdekke robustheten i den branntekniske utformingen.

Brannscenario 1 er veldig aktuelt for en messeutforming da det sannsynligvis vil være en god del brennbart materiale på spilleflaten. Det antas da at denne brannen initieres på midten av spilleflaten slik at alle rømningsveiene er tilgjengelige. Samtidig vil personer da rømme vekk fra dette området. For konsertutforming vil dette scenarioet også være sannsynlig, men da vil brannen trolig initieres i tilknytning til scenen. Personer vil ved dette tilfellet også kunne benytte alle rømningsveiene. For en håndballkamp vil det være lite sannsynlig at en slik brann oppstår på selve spilleflaten.

Brannscenario 2 tilsvarer at det oppstår en brann i garderobeområdene i nordenden av arenaen. Da garderobene er utformet som egne brannceller, vil rømning fra arenaen kunne foregå ved bruk av alle de tilgjengelige rømningsveiene.

Brannscenario 3 er aktuelt for byggverk beregnet for overnatting, eller der personer ikke kan bringe seg selv i sikkerhet. Det forutsettes her at arenaen ikke skal benyttes for overnattingsformål, samt at personer som ikke kan bringe seg selv i sikkerhet aldri befinner seg alene i bygget. Dette scenarioet er derfor ikke aktuelt.

Ved å se på effekten av å blokkere rømningsveien med størst kapasitet kan den branntekniske utformingen vurderes. Dette vil isåfall tilsvare brannscenario 4. Blokkering av en slik rømningsvei kan f. eks. oppstå på grunn av mangelfull kompetanse hos personell i forhold til å holde utganger frie for hindringer. Det kan også tenkes at det oppstår en brann i en søppelbøtte eller lignende.

Med utgangspunkt i dette må det utføres rømningsanalyser der rømning fra hele arenaen blir vurdert for følgende forhold;

- Rømning fra arenaen der alle rømningsveier er tilgjengelige, for de tre ulike bruksområdene
- Rømning fra arenaen der rømningsveien med størst kapasitet er blokkert, for de tre ulike bruksområdene

De tre ulike bruksområdene er da håndballkamp, konsert og messe. Sensitivitetsanalyser må utføres der dette ses på som nødvendig.



# Kapittel 7

## Kvantitativ analyse

Dette kapittelet tar for seg den kvantitative delen av analysen. På bakgrunn av den kvalitative analysen, Kapittel 6, har det blitt laget ulike analysemodeller for bruk i Pathfinder og Simulex. Målet med den kvantitative analysen var å benytte simuleringsprogrammer for å estimere forflytningstiden fra arenaen. På bakgrunn av simuleringene skulle bredder på trappeløp, døråpninger, gangpassasjer og tunneller fastsettes. Dette ble gjort på bakgrunn av en iterasjonsprosess.

En iterasjonsprosess innebar først å velge en noe tilfeldig trappeløpsbredde, samt dørbredder og plassering. Deretter ble det utført en simulering. Basert på denne simuleringens resultater og forflytningsmønster ble nye bredder og plassering valgt. En ny simulering ble gjennomført, vurdert og endringer ble gjort. Denne prosessen ble så gjentatt til det ble observert små forandringer i resultatene fra simulering til simulering. Hensikten med denne prosessen var å finne optimale løsninger med tanke på dørplassering, dørbredde og trappeløpsbredde. I tillegg ga denne prosessen vurderingsgrunnlag for valg av ulike løsninger. Denne prosessen ble utført for de tre bruksområdene; håndballkamp, konsert og messe.

Resultatet av iterasjonsprosessen ga grunnlag for forflytningstiden der alle rømningsveiene var tilgjengelige. I tillegg ble et brannscenario der en av utgangene var blokkert simulert. Grunnet forfatterens begrensede tilgang til Simulex, ble dette scenarioet kun vurdert ved bruk av Pathfinder.

## 7.1 Fastsetting av deteksjonstid og reaksjonstid

### 7.1.1 Deteksjonstid

Deteksjonstiden kan bestemmes på bakgrunn av Tabell 4.1. To inputparametre må her bestemmes; brannveksttiden,  $t_g$ , og takhøyden. Brannveksttiden defineres på bakgrunn av arenaens spesifikke brannbelastning. Ved multifunksjonsanlegg er det anbefalt å bruke en spesifikk brannbelastning på  $200 \text{ MJ/m}^2$ . Dette gir en  $t_g$  på 225 s. Fri takhøyde er satt til 7 m for spilleflaten. Ved å benytte en konservativ takhøyde på 9 m får en da en deteksjonstid på 2.0 min ved bruk av røykdetektor. Denne deteksjonstiden er mest aktuell for konsert- og messeutforming.

Ved en håndballkamp kan det være mer aktuelt å se på deteksjonstiden i gardero-bene. Det er her lite sannsynlig at en brann ville oppstått på selve spilleflaten. Med en antatt takhøyde på 3 m i garderobene og med samme brannenergi, gir dette en deteksjonstid på 1 min.

### 7.1.2 Reaksjonstid

Reaksjonstiden er sterkt knyttet til informasjon om hva som har inntruffet og hva som forventes av de som befinner seg i bygningen [2]. Bayer og Rejnö viste derimot at bruk av talemelding i en kinosal ga en lengre reaksjonstid [39]. I deres forsøk var reaksjonstiden ved bruk av talemelding på 35-40 s, mens den var under  $30 \text{ s}^1$  for bruk av andre alarmtyper. Selv om reaksjonstiden var kortere uten bruk av talemelding, var personene mindre sikre på hva de skulle foreta seg når de først hadde reagert.

Franzich oppnådde en gjennomsnittlig reaksjonstid på ca. 30 s for varehusdelen på IKEA-varehus. Der personer befant seg i kasseområdet ble gjennomsnittlig reaksjonstid opp imot 83 s registrert. Ved disse varehusene ble det benyttet informativ talevarsling. Tabell 4.2 opplyser om reaksjonstider for varehus ved bruk av flere ulike alarmtyper. Den raskeste reaksjonstiden fåes ved bruk av informativ varsling og er på 1 min.

VTEK 10 stiller krav til bruk av talevarslingsanlegg ved denne typen byggverk (VTEK 10, § 11-12 (2) a.). Det er derfor forutsatt at dette blir benyttet. Basert på de undersøkelsene som er beskrevet i denne rapporten og aktuelt alarmanlegg, er det grunnlag for å sette reaksjonstiden i denne arenaen til 1 min.

---

<sup>1</sup>Ved 90 % av tilfellene

## 7.2 Generelt om modellen i Pathfinder

Den tildelte plantegningen ble rensert for unødvendige detaljer og teleskoptribune- ne på langsiden ble tegnet inn ved hjelp av AutoCAD. Dybden på stolradene på langsiden ble satt til den samme som for kortsiden (790 mm). Tegningene ble så lagret i DXF-format for bruk i Pathfinder. De ulike arealene ble videre definert i Pathfinder ved hjelp av “Extract Floor”-funksjonen.

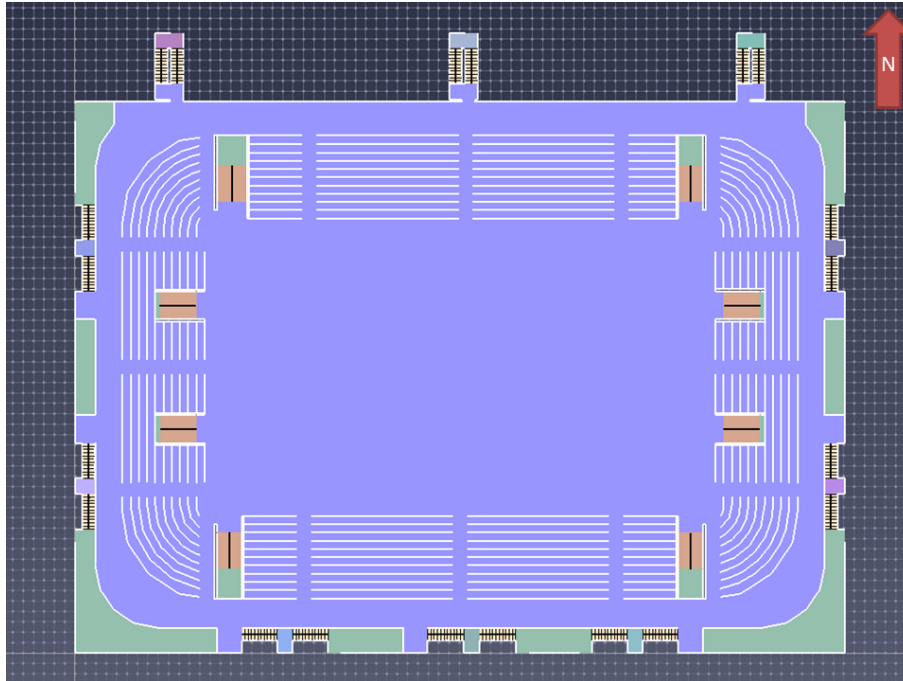
Arenaen ble modellert ved å bruke tre plan. Plan 1 bestod av rømningsarealet på baksiden av tribunene i nivå 1. Plan 2 bestod av reposene i nivå 1.5. Plan 3 bestod av spilleflaten på nivå 1, tribuneområdet og det tilgjengelige forflytningsarealet i nivå 2. Denne løsningen ble valgt for å kunne simulere forflytning av personer gjennom tunellene. De tre planene ble så knyttet sammen ved bruk av trapper og ramper.

I tunellene som ledet fra spilleflaten og ut til forflytningsarealet på baksiden av tribunen, ble det benyttet ramper. Personer i Pathfinder forflytter seg med samme hastighet på ramper som på en horisontal flate, men i modellene ble forflytnings- strekningen noe lenger. Den økte lengden har bakgrunn i at rampen knytter sammen to plan med en vertikal, innbyrdes avstand på 4 m. Denne økte lengden (1.8 m) ble videre neglisjert. Rampenes bredde er gitt i Tabell 7.1 og plassering er vist i Figur 7.1.

Tabell 7.1: Rampenes plassering og bredde

Rampe ID	Plassering	Bredde (cm)
Rampe 1	Nord	290
Rampe 2	Nord	237
Rampe 3	Øst	267
Rampe 4	Øst	267
Rampe 5	Sør	237
Rampe 6	Sør	237
Rampe 7	Vest	267
Rampe 8	Vest	267

Tribuneområdet har i virkeligheten en helning, men i denne modellen ble denne modellert som en horisontal flate. For å forhindre forflytning mellom seteradene ble det tegnet inn tynne vegger. Disse veggene ledet så personene ut til gangpassasjen hvor de videre kunne forflytte seg ned til spilleflaten eller opp til nivå 2.



Figur 7.1: Figuren viser modellen som ble brukt i Pathfinder samt plassering av ramper og trapper

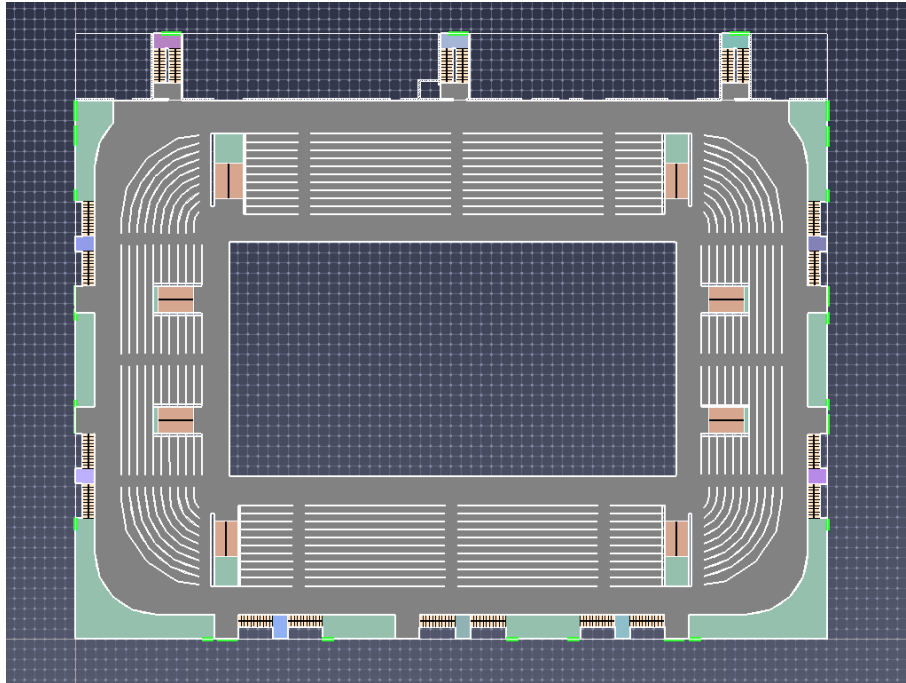
## 7.3 Fullsatt håndballkamp i Pathfinder

### 7.3.1 Beskrivelse av modellen

Størrelsen på spilleflaten, inkludert sikkerhetssoner, ble satt til den anbefalte verdien  $44\text{ m} \times 23\text{ m}$  [55]. Denne størrelsen er anbefalt for arenaer ferdigstilt før 01.08.2014. Under en håndballkamp er det satt opp reklameskilter og andre hindringer mellom selve spilleflaten og tribuneområdet. I denne analysen er det derfor antatt at publikums forflytningsareal er mellom det avsatte arealet på  $44\text{ m} \times 23\text{ m}$  og tribunen.

Personer ble plassert ved hjelp av “Add rectangular group of people”-funksjonen. Det ble brukt “default”-personprofil og tilfeldig plassering innenfor det gitte området. Der det oppstod tomrom på tribunen, eller på ståplassene, ble det lagt til enkeltpersoner. Dette ble gjort for å få en mest mulig jevn fordeling av personer. Fordeling av personer på tribunen er gitt i Tabell 7.2. Det var totalt 3827 personer på arenaen ved simulering av fullsatt håndballkamp.





Figur 7.2: Figuren viser modellen som ble brukt som utgangspunkt for iterasjonsprosessen i Pathfinder

Tabell 7.2: Fordeling av personer ved simulering av håndballkamp

Tribune ID	Antall personer
Tribune Nord	884
Tribune Øst	1026
Tribune Sør	888
Tribune Vest	1029

De første simuleringene ble gjort med trappeløpsbredder på 120 cm og ved bruk av 13 dører à 200 cm og 13 dører à 120 cm. Dette gir en samlet dørbredde på 36.83 m. Dørbreddene er valgt på bakgrunn av tilgjengelige åpninger en kan få på tradisjonelle ståldører hos Daloc [58]. I løpet av iterasjonsprosessen ble antallet dører redusert til 8 dører à 170 cm og 10 dører à 120 cm. Dette gir en samlet dørbredde på 25.60 m. Modellen som ble benyttet som utgangspunkt for iterasjonsprosessen er vist i Figur 7.2. Utgangsdører er illustrert ved korte, lysegrønne streker i figuren. Gangpassasjer og trappeløpsbredder var i utgangspunktet på 120 cm.

I simuleringene ble begge modus benyttet (steering og SFPE-modus). “Basic collisions” i SFPE-modus ble i tillegg aktivert for å kunne evaluere effekten av denne i forhold til vanlig SFPE-modus. Ved bruk av SFPE-modus ble følgende “default”-

verdier brukt; “Max Room Density” på 1.88 pers/m<sup>2</sup>, “Door Boundary Layer” på 15 cm og “Use Max Flow”. Det ble gjort en sensitivitetsanalyse for å kunne vurdere disse parametrene effekt.

### 7.3.2 Resultater

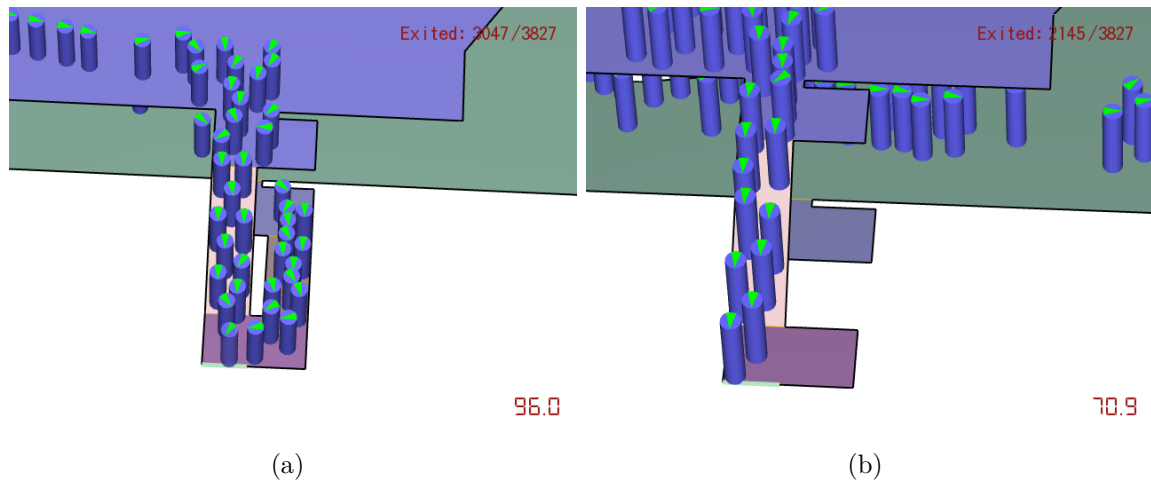
Total forflytningstid for fullsatt håndballkamp er gitt i Tabell 7.3. En detaljert beskrivelse av hva som er simulert er gitt i Vedlegg B.

Tabell 7.3: Resultater fra simulering av fullsatt håndballkamp i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.1.

SimID	Modus	Tid <sup>a</sup> (s)
120-newdoor	steering	149.5
130-newdoor	steering	143.7
140-newdoor	steering	141.1
140-newdoor02-wider-stairs	steering	144.0
140-newdoor02-wider-stairs02	steering	142.3
140-newdoor02-fewer-exits	steering	143.4
140-newdoor02-very-few-exits	steering	140.9
140-newdoor03-1.2m-door-all-stairs	steering	148.5
140-newdoor03-1.7m-wide-doors	steering	149.3
140-newdoor03-1.7m-wide-doors-long-repos	steering	145.7
140-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	steering	142.4
140-newdoor04-1.7m-wide-doors-moved	steering	146.8
130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	steering	145.3
130-newdoor	SFPE	150.8
130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	SFPE	169.8
130-newdoor	SFPE - BC	187.5
130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	SFPE - BC	195.8
140-newdoor04-1.7m-wide-doors-moved	SFPE - BC	214.8
140-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	SFPE - BC	201.8

<sup>a</sup>Tid til siste person forlater bygget

De nordlige trappeløpene med utgangsdører på nivå 1.5 var i utgangspunktet tiltenkt som rømningsvei for personer fra nivå 2. I løpet av simuleringene viste det seg derimot at noen personer ønsket å rømme opp trappen fra nivå 1 og videre ut fra nivå 1.5. I simuleringene der det ble benyttet en dørbredde på 120 cm gjorde dette at personer fra nivå 2 til dels måtte vike for personer fra nivå 1. Dette medførte en lengre rømningstid for personene fra nivå 2. Det at personer fra nivå 1 ville benytte

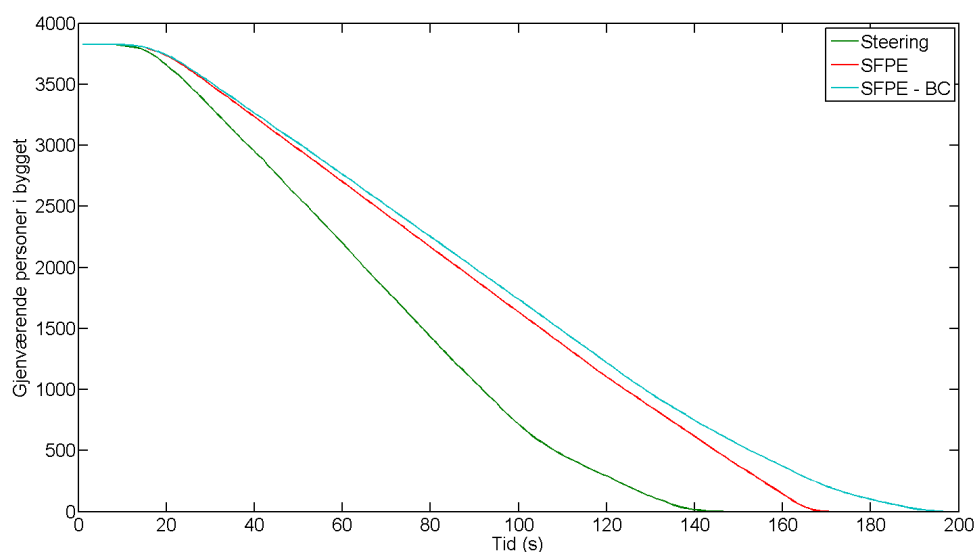


Figur 7.3: Figuren viser et situasjonsbilde (a) før endringen og (b) etter endringen utgangene på nivå 1.5 gjorde at det til tider oppstod korte køer i tilknytning til trappeløpene på nivå 1. Disse kødannelsene påvirket videre rømningsforholdene for personer som ville benytte utgangene i øst og vest på nivå 1.

Årsaken til at personer på nivå 1 ønsket å rømme oppover ble derfor undersøkt. Trappereposene på nivå 1.5 var kun 1.5 m lange. Det ble derfor vurdert om dette kunne ha noe å si. Ved å øke lengden på disse til ca. 6.5 m ønsket ikke personer lenger å rømme oppover. Forflytningstiden for hele arenaen ble også kortere (145.7 s vs. 149.3 s). Den økte lengden på trappereposet gjorde at lengden på rømningsveien for personer fra nivå 1 ble ca. 2.0 m lenger ved rømning oppover. Årsaken til at personer ikke valgte å rømme opp trappene kan derfor være begrunnet med valg av korteste rømningsvei.

For å utbedre modellen og samtidig få riktig lengde på rømningsveien for personer fra nivå 2 ble trappene fra nivå 1 til nivå 1.5 i nordenden av arenaen fjernet. På denne måten kunne personer fra nivå 2 fortsatt komme seg ned til nivå 1.5, og dermed utgangsdørene her. I tillegg gjorde dette at personer på nivå 1 benyttet utgangene i øst og vest på nivå 1, da de ikke hadde muligheten til å forflytte seg opp trappene. Figur 7.3 viser en situasjon før og etter denne endringen ble gjort. Dette tiltaket ga en enda kortere forflytningstid enn ved simulering med lange reposer (142.4 s vs. 145.7 s).

En sammenligning av gjenværende personer i bygget, per tidsenhet, for de ulike modus er gitt i Figur 7.4 (gjelder SimID: 130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs). Av figuren kan en se at “steering” modus gir en raskere personstrøm ut av bygget, enn ved bruk av de to andre modusene.



Figur 7.4: Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid, for ulike modus, ved simulering av SimID: 130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs

### 7.3.3 Sensitivitetsanalyse av SFPE-modus

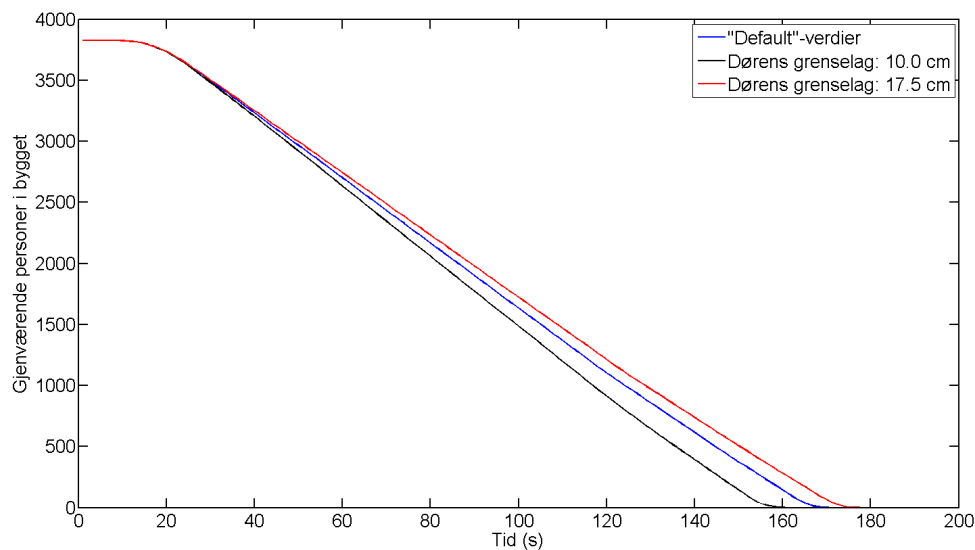
Det ble utført en sensitivitetsanalyse for å vurdere de tre parametrene: maksimal persontetthet, dørens grenselag og maksimal personstrøm. Dette ble gjort ved å benytte SimID: 130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs og ved å variere én og én av de ulike parametrene i SFPE-modus. Parametrenes innvirkning på total forflytningstid ble vurdert. Ved vurdering av maksimal personstrøm må en velge “kalkulær fra tetthet” (Calculate from Density) og spesifisere minimum og maksimum tetthet. Disse er som “default” satt til henholdsvis  $1.9 \text{ pers/m}^2$  og  $3.0 \text{ pers/m}^2$ . Resultater fra sensitivitetsanalysen er gitt i Tabell 7.4. Til sammenligning var total forflytningstid på 169.8s ved bruk av “default”-verdier.

Tabell 7.4: Resultater fra sensitivitetsanalyse av parametre i SFPE-modus

Parameter	Verdi	Tid
Maksimal persontetthet	2.8 pers/m <sup>2</sup>	170.6
Maksimal persontetthet	4.0 pers/m <sup>2</sup>	170.1
Dørens grenselag	10 cm	159.6
Dørens grenselag	17.5 cm	176.1
Kalkulør fra tetthet <sup>a</sup>	1.9 - 3.0	169.3
Kalkulør fra tetthet <sup>a</sup>	1.9 - 3.7	170.2
Kalkulør fra tetthet <sup>a</sup>	1.9 - 1.9	170.2

<sup>a</sup>Første verdi er nedre grense, mens andre verdi er øvre grense

Figur 7.5 viser gjenværende personer i bygget, per tidsenhet, for sensitivitetsanalysen. Ved plottingen viste det seg at parametrene “maksimal persontetthet” og “kalkulør fra tetthet” hadde liten innvirkning på gjenværende personer i bygget, sammenlignet med bruk av “default”-verdiene. I figuren er derfor bare “default”-grafene og de to simuleringene med endret grenselag på dørene inkludert.



Figur 7.5: Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid for sensitivitetsanalyse av SimID: 130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs

## 7.4 Fullsatt konsert i Pathfinder

### 7.4.1 Beskrivelse av modellen

Ved simulering av en fullsatt konsert ble tribunen på den ene langsiden fjernet og det ble satt inn en scene på  $20\text{ m} \times 13\text{ m}$ . Det ble vurdert to tilfeller; ett tilfelle der det var sitteplasser på spilleflaten, og ett tilfelle der det var ståplasser. Personene ble plassert ut på samme måte som ved fullsatt håndballkamp. Det ble iderimot ikke plassert personer på tribunesvingene i nord og på nivå 2 i overkant av tribunen. Disse arealene kunne allikevel bli benyttet som forflytningsareal under simuleringene.

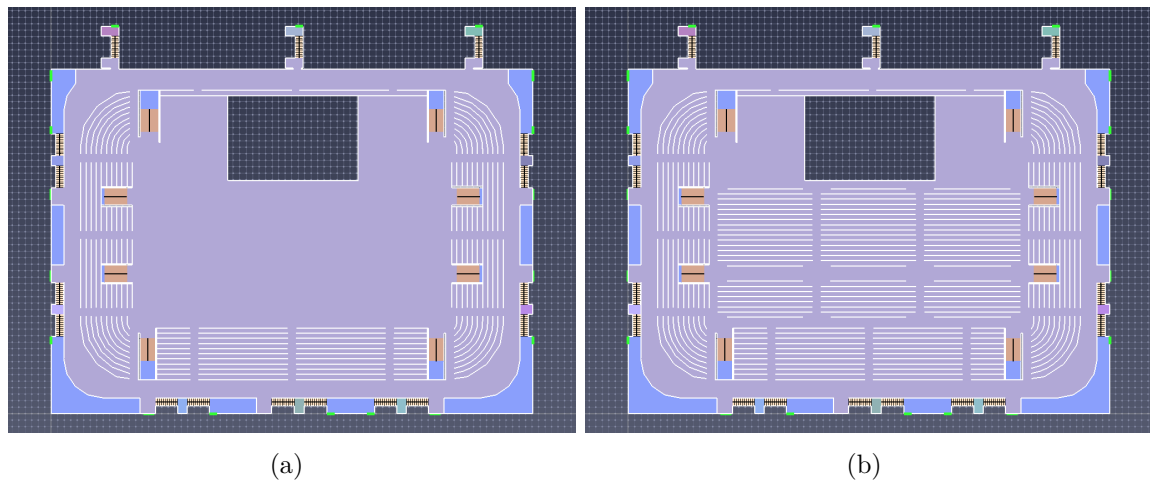
Fordeling av personer for tilfellet med ståplasser på spilleflaten er gitt i Tabell 7.5. Det var totalt 4239 personer på arenaen ved simulering av dette tilfellet. For tilfellet med sitteplasser ble det brukt to ulike personfordelinger. Det ble gjort analyser av økt bredde i gangpassasjene, som førte til en redusering av antall tilgjengelige sitteplasser. Fordeling av personer ved bruk av sitteplasser på spilleflaten er gitt i Tabell 7.6. Det var totalt 3481 og 3423 personer på arenaen ved disse simuleringene. Basert på resultatene fra fullsatt håndballkamp ble det valgt å benytte en 130 cm gangpassasje på tribunen.

Tabell 7.5: Fordeling av personer ved simulering av fullsatt konsert og ved bruk av ståplasser

Tribune ID	Antall personer
Spilleflaten	2600
Tribune Øst	515
Tribune Sør	610
Tribune Vest	514

Tabell 7.6: Fordeling av personer ved simulering av fullsatt konsert og ved bruk av sitteplasser

Tribune ID	Gangpassasje 120 cm	Gangpassasje 180 cm
Spilleflaten	1842	1784
Tribune Øst	515	515
Tribune Sør	610	515
Tribune Vest	514	515



Figur 7.6: Figuren viser de to modellene som ble brukt til simulering av fullsatt konsert i Pathfinder. (a) Ståplasser på spilleflaten og (b) sitteplasser på spilleflaten

Utgangsdørene bestod av 8 dører à 170 cm og 10 dører à 120 cm. De to modellene i dette scenarioet er vist i Figur 7.6. For tilfellet med stående publikum ble det først gjort simuleringer uten sperrevegger på spilleflaten. I tillegg ble det utført simuleringer hvor det var tegnet inn sperrevegger mellom områdene med ulik personfordeling. På denne måten kunne sperreveggenes effekt på forflytningstiden vurderes. I tilfellet med sitteplasser ble forreste og bakerste stolrad avkortet for å oppnå en jevnere personstrøm rundt hjørnene.

## 7.4.2 Resultater

Total forflytningstid for fullsatt konsert ved bruk av ståplasser på spilleflaten er gitt i Tabell 7.7. Simuleringer med stående personer på spilleflaten har ordet “standing” i SimID’en. Det viste seg at personene fordelte seg ganske jevnt utover de ulike utgangene uten bruk av sperrevegger (SimID: 130-newdoor07-standing-v0). Det ble utført noen simuleringer der sperrevegger ble benyttet for å lede personer mot spesifikke utgangsdører (SimID: 130-newdoor07-standing-v1, 2, 3). Bruk av sperrevegger medførte lengre forflytningstider enn ved å ikke bruke sperrevegger.

Tabell 7.7: Resultater fra simulering av fullsatt konsert med ståplasser på spilleflaten i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.2.

SimID	Personer	Modus	Tid (s)
130-newdoor07-standing-v0	4239	steering	144.0
130-newdoor07-standing-v1	4239	steering	152.8
130-newdoor07-standing-v2	4239	steering	175.8
130-newdoor07-standing-v3	4239	steering	172.8
130-newdoor07-standing-v0	4239	SFPE	188.3
130-newdoor07-standing-v0	4239	SFPE - BC	210.9

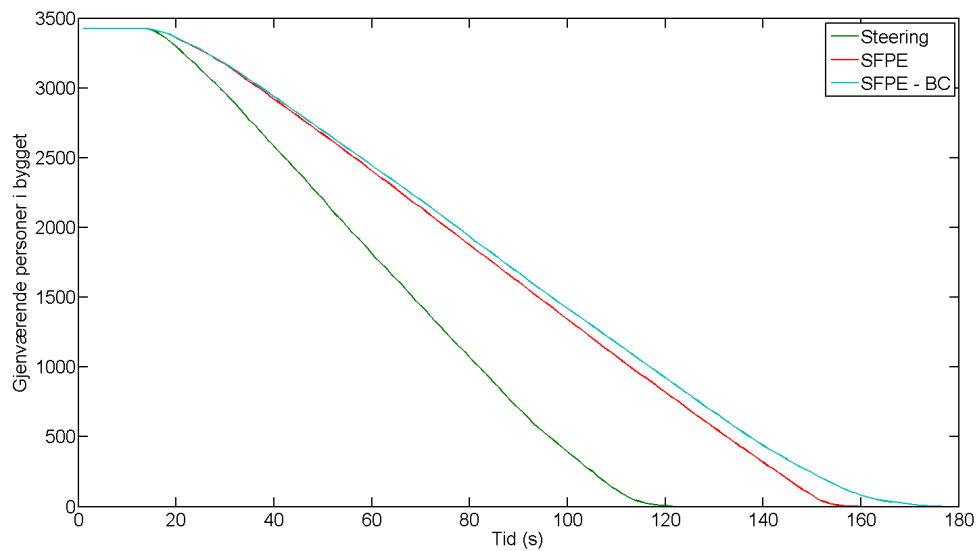
Total forflytningstid for fullsatt konsert ved bruk av sitteplasser på spilleflaten er gitt i Tabell 7.8.

Tabell 7.8: Resultater fra simulering av fullsatt konsert med kun sitteplasser i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.2.

SimID	Personer	Modus	Tid (s)
130-newdoor05-isles-and-corners-uniform	3481	steering	136.8
130-newdoor06-more-doors	3481	steering	144.0
130-newdoor06-more-doors-x2	3481	steering	145.3
130-newdoor-1800	3481	steering	141.3
130-newdoor-1800-4columns	3423	steering	137.3
130-newdoor-1800gangpassasje	3423	steering	126.5
130-newdoor-1800gangpassasje-v2	3423	steering	123.0
130-newdoor-1800gangpassasje-v3	3423	steering	120.8
130-newdoor-1800-4columns	3423	SFPE	167.0
130-newdoor-1800gangpassasje-v3	3423	SFPE	159.0
130-newdoor-1800gangpassasje-v3	3423	SFPE - BC	172.5

En sammenligning av gjenværende personer i bygget, per tidsenhet, for ulike modus er gitt i Figur 7.7. Denne sammenligningen gjelder for simulering av forflytningstid for SimID: 130-newdoor-1800gangpassasje-v3, der det er sitteplasser på spilleflaten. “Steering” gir en raskere personstrøm ut av bygget, sammenlignet med de to andre modusene.



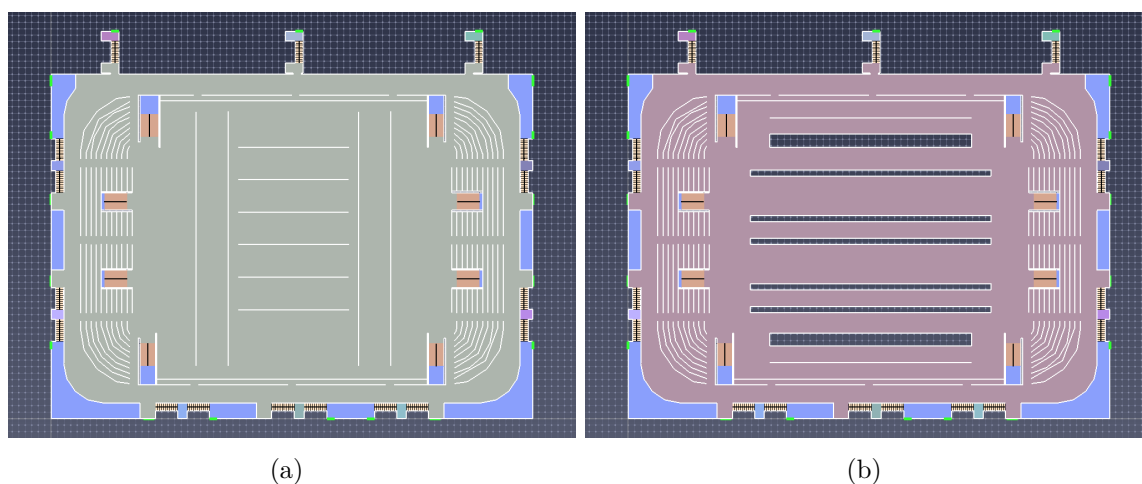


Figur 7.7: Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid, for ulike modus, ved simulering av SimID: 130-newdoor-1800gangpassasje-v3

## 7.5 Messe i Pathfinder

### 7.5.1 Beskrivelse av modellen

Ved simulering av messescenariot ble begge teleskoptribunene fjernet. Det ble tegnet inn tynne vegger på spilleflaten for å modellere ulike reolutforminger. To ulike reolutforminger er vist i Figur 7.8. Det ble gjort én simulering med 1000 personer, resten ble gjort med 1500 personer. Alle personene ble plassert tilfeldig utover spilleflaten.



Figur 7.8: Figuren viser to ulike reolutforminger for et messescenario, henholdsvis (a) messe-v1 og (b) messe-v4

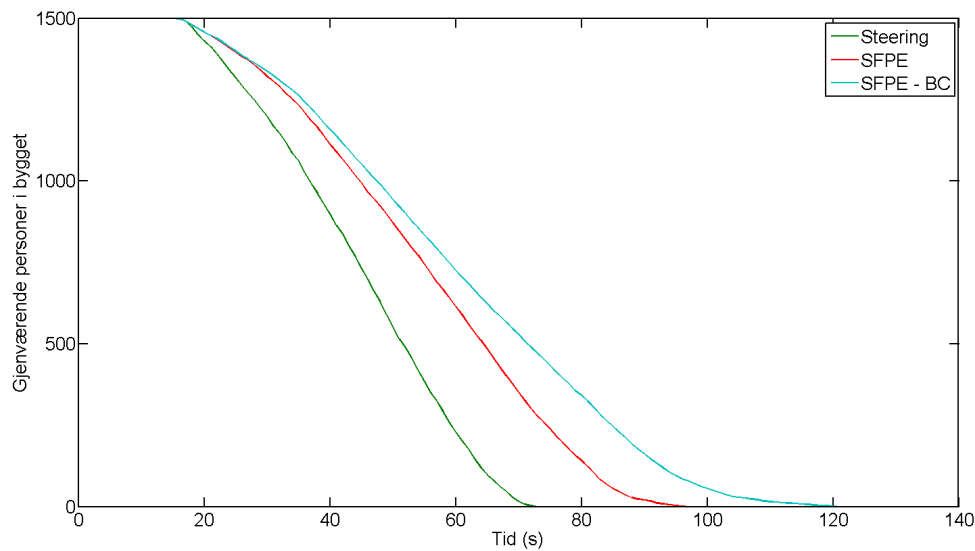
## 7.5.2 Resultater

Total forflytningstid for messescenarioer simulert i Pathfinder er gitt i Tabell 7.9. Tabellen viser store forskjeller i forflytningstid avhengig av reolenes utforming på spilleflaten. Samme persontall ble benyttet i messe-v2 og messe-v3, men reolutformingen ga nesten dobbelt så lang forflytningstid for SimID: messe-v3.

Tabell 7.9: Resultater fra simulering av messescenarioer i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.3.

SimID	Personer	Modus	Tid (s)
messe-v1	1000	steering	108.3
messe-v2	1500	steering	143.3
messe-v3	1500	steering	82.3
messe-v4	1500	steering	72.0
messe-v3	1500	SFPE	92.3
messe-v4	1500	SFPE	96.0
messe-v3	1500	SFPE - BC	129.0
messe-v4	1500	SFPE - BC	119.8

En sammenligning av gjenværende personer i bygget, per tidsenhet, for de ulike modus er gitt i Figur 7.9. Denne sammenligningen gjelder for simulering av forflytningstid for SimID: messe-v4. Dette scenarioet får også raskest personstrøm ut av bygget ved bruk av “steering”.



Figur 7.9: Figuren viser gjenværende personer i bygget over tid, for ulike modus, ved simulering av SimID: messe-v4

## 7.6 Blokkering av rømningsvei

Det ble utført simuleringer for brannscenarioet der rømningsveien med størst kapasitet skulle være blokkert. Dette ble utført for alle bruksområdene. Simuleringene ble kun utført ved bruk av “steering” modus. Tabell 7.10 viser de ulike SimID’ene som ble simulert for arenaens ulike bruksområder.

Tabell 7.10: Simuleringsmodeller som ble benyttet for brannscenario der en av rømningsveiene var blokkert

Bruksområde	SimID
Håndballkamp	130-newdoor04-1.7m-wide-doors-no-upstairs
Konsert (stående)	130-newdoor07-standing-v0
Konsert (sittende)	130-newdoor-1800gangpassasje-v3
Messe	messe-v4

Den bredeste tunellen i arenaen ble vurdert som den rømningsveien med størst kapasitet. For å simulere blokkering av denne rømningsveien ble derfor tunellen og tiltenkt utgangsdør ved bruk av denne fjernet. Dette gjelder altså den vestlige tunnelen på nordsiden av arenaen, samt den nordligste døren, 200 cm bred, på vestsiden av arenaen.

### 7.6.1 Resultater

Total forflytningstid for brannscenario der rømningsveien med størst kapasitet var blokkert er gitt i Tabell 7.11. Resultater for brannscenario uten blokkert rømningsvei er også inkludert i tabellen.

Tabell 7.11: Resultater fra simulering av blokkert utgang, og ikke blokkert utgang, i Pathfinder. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.4.

Bruksområde	Blokkert utgang	Ikke blokkert
Håndballkamp	150.2	145.3
Konsert (stående)	151.3	144.0
Konsert (sittende)	128.0	120.8
Messe	75.6	72.0

Blokkering av rømningsveien med størst kapasitet medfører lengre forflytningstider. Prosentvis øker den mest for konsert, med sitteplasser på spilleflaten. Økningen er da på 6.0%. Den øker minst for håndballkamp, da øker den 3.4%.

## 7.7 Generelt om modellen i Simulex

DXF-filene som ble benyttet i Pathfinder måtte bearbeides ytterligere for å kunne brukes i Simulex. Døråpninger måtte f. eks. representeres med et hull i veggene med riktig bredde. Det samme gjaldt topp og bunn i trappeløpene.

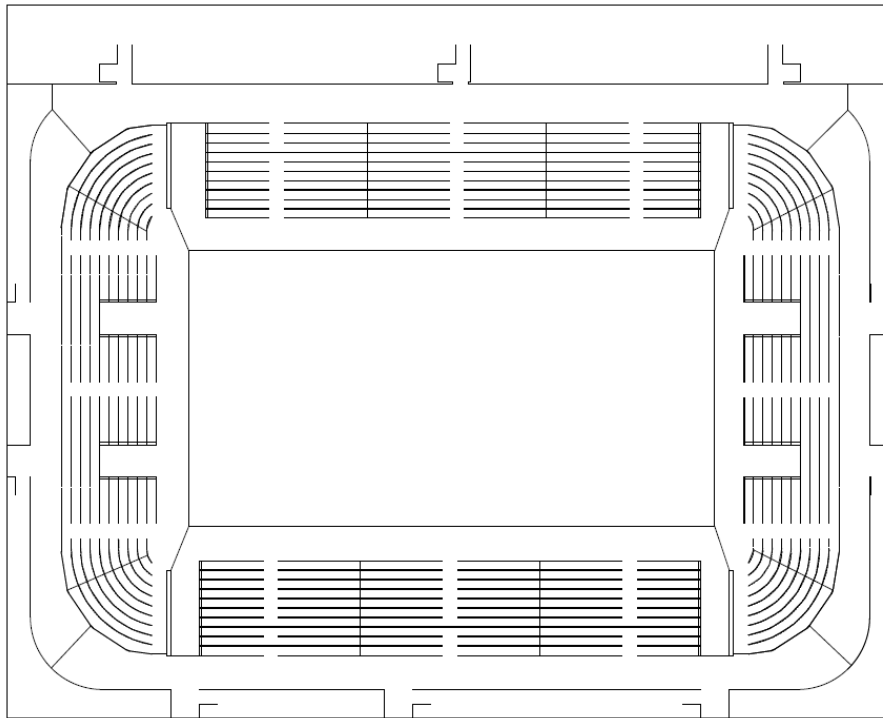
Arenaen ble modellert ved å bruke tre plan. Plan 0 bestod av rømningsarealet på baksiden av tribunene i nivå 1. Plan 1 bestod av reposene i nivå 1.5, mens plan 2 bestod av spilleflaten på nivå 1, tribuneområdet og det tilgjengelige forflytningsarealet i nivå 2. På grunn av tidkrevende arbeid med å definere trappeløp og linker ble trapper fra nivå 2 til nivå 1 modellert som én trapp, istedet for to. I Pathfinder var lengden på disse trappene ca.  $2 \times 4$  m. Trappene mellom nivå 2 og nivå 1 i Simulex ble derfor definert til å være 8 m lange. Linkene i Simulex måtte plasseres et lite stykke utenfor selve åpningen, så dette vil veie opp for reposene på 1.5 m i Pathfinder.

Det fantes ikke noen rampe-funksjon i Simulex, disse måtte derfor modelleres som trapper. Det ble valgt å benytte en trappelengde på 1.0 m der det i Pathfinder var benyttet ramper. Bredden på de ulike trappeløpene ble satt til samme verdi som i Pathfinder. Totalt ble det definert 18 trappeløp, 18 utgangsdører og 36 linker. I resultatfilene er det i tillegg en ekstra utgang (Exit 20). denne ble kun benyttet til innledene prøving og feiling i programmet og deltok ikke i de faktiske simuleringene.

Persontypen “kontorarbeidere” ble benyttet i Simulex. Disse hadde en vilkårlig responstid med en median på 1.0 s og en varians på  $\pm 0.5$  s.

Det viste seg at simuleringene i Simulex var en god del mer tidkrevende enn de utført i Pathfinder. Personer hadde i tillegg en lei tendens til å kile seg fast. Dette førte til at noen personer ikke kom seg ut av bygningen. For å løse dette ble det forsøkt å tegne inn bredere vegger på tribunene. Denne løsningen ga allikevel ingen garanti for at personer ikke kilte seg fast. Arenaen ble også delt opp i mindre deler, hvor hver del ble simulert hver for seg. Fra og med test12.astaende ble det østlige trappeløpet på nordsiden av arenaen forandret noe i forhold til modellen i Pathfinder. Trappen som ledet fra nivå 2 til nivå 1.5 ble da flyttet fra høyre til venstre side av sjakten.

Personene i Simulex velger alltid korteste vei ut av bygget. Dette førte til større kødannelser ved noen av utgangene. For å optimalisere personstrømmene ut av bygget ble det derfor benyttet en kombinasjon av flere ulike “distance maps” og integrede sperrevegger. Figur 7.10 viser en DXF-fil som ble benyttet som underlag i Simulex.



Figur 7.10: Figuren viser et av DXF-underlagene som ble benyttet i Simulex

## 7.8 Fullsatt håndballkamp i Simulex

### 7.8.1 Beskrivelse av modellen

I dette scenarioet ble forflytningstid fra tribune nord og øst simulert. Størrelsen på det tilgjengelige forflytningsarealet var det samme som i simuleringene i Pathfinder. Personer ble plassert ved hjelp av “Group People” og ved å supplere med “Single Person”. Alle simuleringene med Simulex ble gjort med trappeløpsbredder på 120 cm og 13 utgangsåpninger à 200 cm samt 8 utgangsåpninger à 120 cm. Alle “Exit” i modellen ble derimot satt til å være 200 cm. Ved en utgang på 120 cm må personene først komme seg igjennom åpningen i veggen på 120 cm før de kan nå en “Exit”. Dette ble derfor sett på som en gyldig forenkling. Bredden på gangpassasjene ble satt til 130 cm

De to tribunene (nord og øst) ble delt i to; der nedre del av tribunene ble henvist “rampene” og øvre del (samt stående personer) ble henvist til trapper i overkant av tribunene. Denne delingen ble gjort ved å tegne inn sperrelinjer mellom to rader på tribunen. Plassering av denne sperrelinjen ble gjort utifra en iterasjonsprosess, der det ble forsøkt å oppnå tilnærmet lik forflytningstid for øvre og nedre del.

Det ble forsøkt å oppnå omtrent samme personfordeling som i Pathfinder. I og med at sperrelinjene ble flyttet mellom simuleringene varierte persontallet mellom simuleringene. Det totale persontallet ble allikevel holdt konstant.

## 7.8.2 Resultater

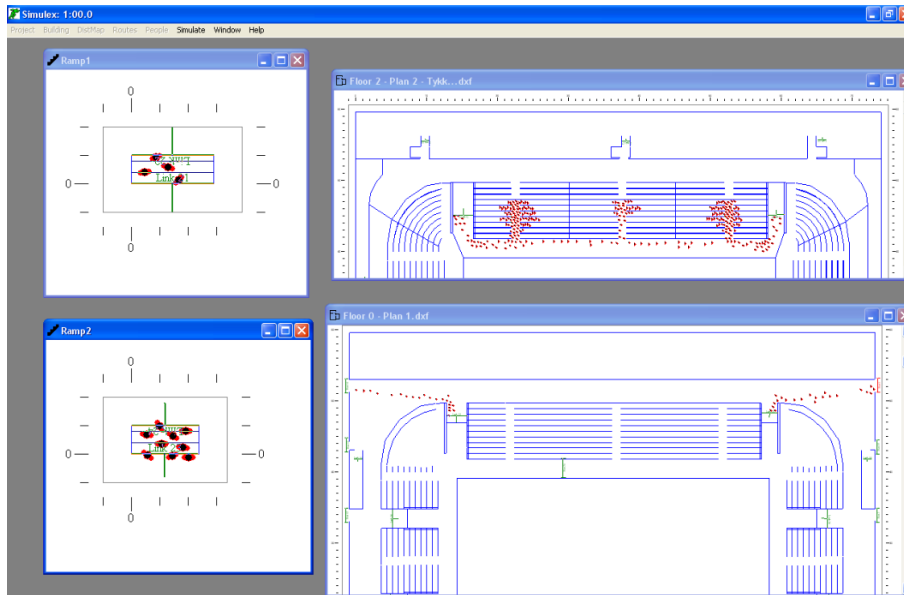
Forflytningstid fra de ulike tribunedelene er gitt i Tabell 7.12. SimID-endelse på a tilsvarer nedre del av nord-tribunen, mens b henviser til nedre del av øst-tribunen. Forlengelsen -staende henviser til øvre del av disse tribunenene.

Tabell 7.12: Resultater fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.5.

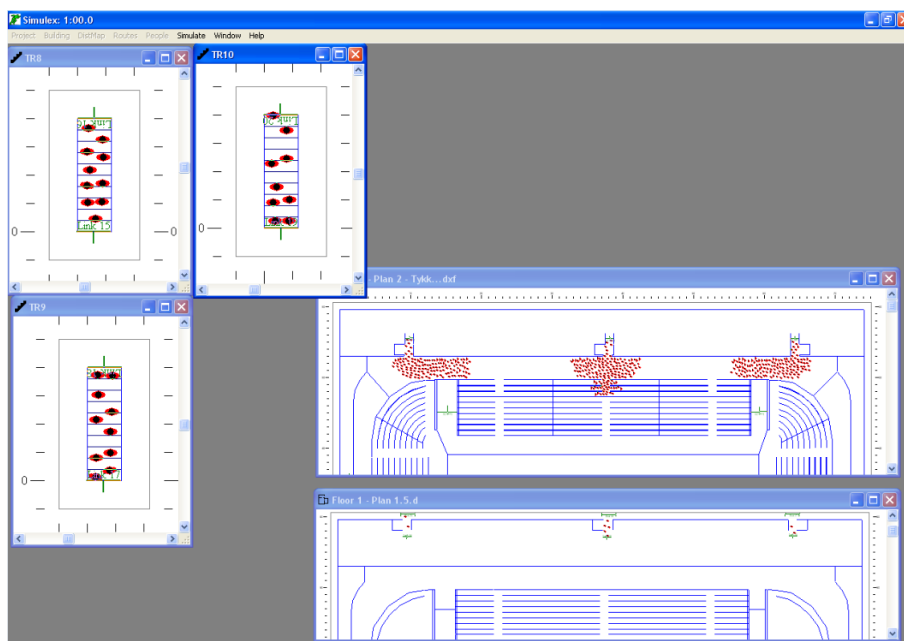
SimID	Personer	Tid (s)
test10.a	600	275.6
test10.a2	600	277.5
test10.b	488	153.3
test11.astaende	538	206.9
test12.astaende	607	192.3
test12.bstaende	269	157.4
test12.a	535	246.0
test13.a	413	200.0
test13.astaende	743	227.6
test13.bstaende	307	183.1
test14.astaende	659	207.2
test14.bstaende	353	195.0

Den beste oppnådde kombinasjonen var ved bruk av test10.b, test13.a, test14.astaende og test14.bstaende. Denne kombinasjonen tilsvarte et persontall på 1913. Det er antatt at den andre halvdelene har samme rømningstid. Den største rømningstiden av den nevnte kombinasjonen er på 207.2 s. Ved bruk av Simulex får en da en total forflytningstid for rømning av 3826 personer på 207.2 s.

Figur 7.11 og 7.12 viser skjermdump fra simulering av tribune nord, mens Figur 7.13 og 7.14 viser skjermdump fra simulering av tribune øst. Av Figur 7.11 kan en se at sperrelinjene i overkant av tribunenene ikke er på samme sted. Dette vil ikke ha noe å si; det er sperrelinjene i Figur 7.12 og Figur 7.14 som må samsvare.

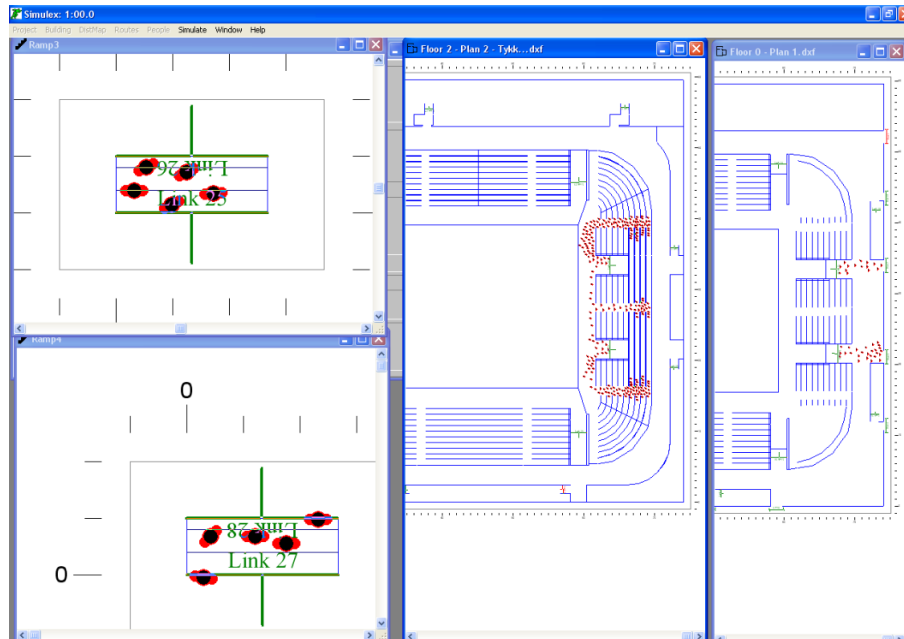


Figur 7.11: Figuren viser skjermdump av nedre del, tribune nord, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer gjennom tunellene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter fra tribuner til utgangsdører.

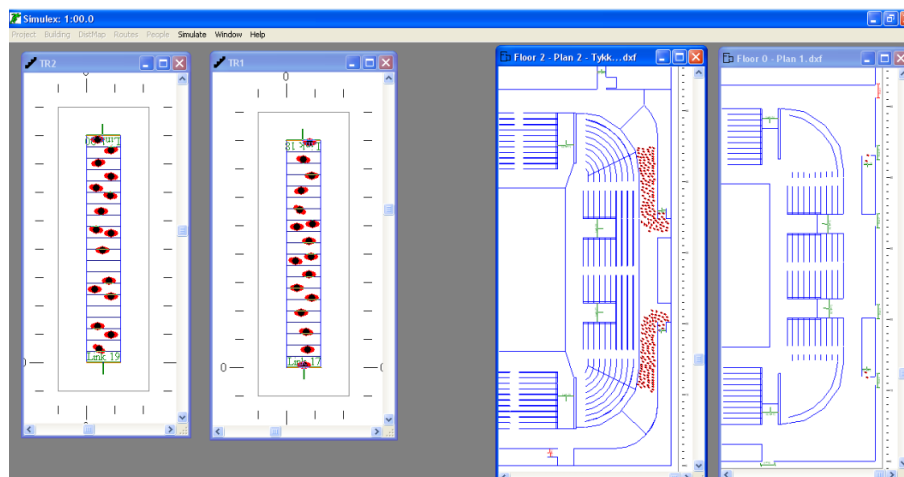


Figur 7.12: Figuren viser skjermdump av øvre del, tribune nord, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer i de tre trappeløpene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter seg fra tribuner til utgangsdører.





Figur 7.13: Figuren viser skjermdump av nedre del, tribune nord, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer gjennom tunnelene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter seg fra tribuner til utgangsdører.



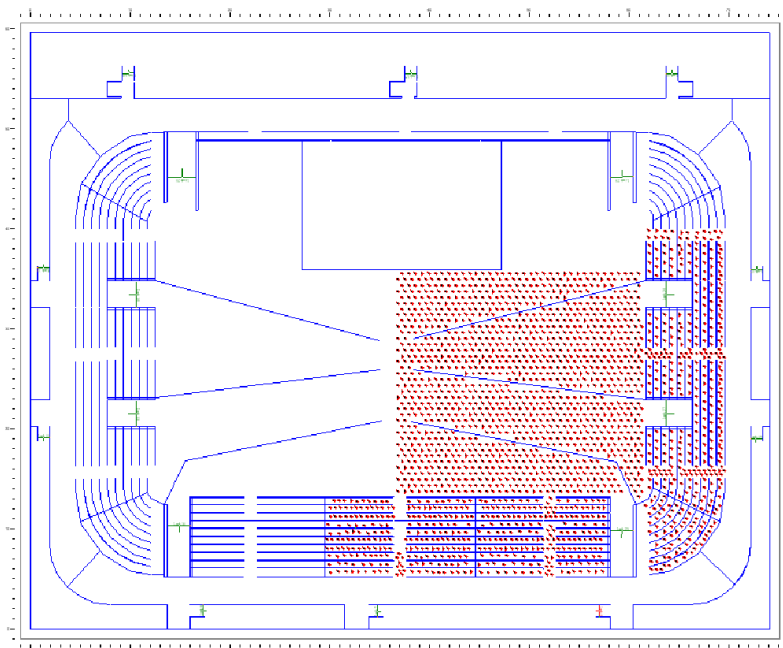
Figur 7.14: Figuren viser skjermdump av øvre del, tribune øst, fra simulering av fullsatt håndballkamp i Simulex. Venstre del av figuren viser personstrømmer i trappeløpene, mens høyre del viser hvordan personer forflytter seg fra overkant av tribunen til utgangsdører.

## 7.9 Simulering av fullsatt konsert i Simulex

### 7.9.1 Beskrivelse av modellen

I dette scenarioet ble forflytningstid fra halve arenaen simulert. Både stående og sittende personer på spilleflaten ble vurdert. Personer ble plassert i henhold til Figur 7.15. Det er valgt å ta med personer til venstre for gangpassasjen i den midtre delen av tribune sør. Dette ble gjort for å oppnå en mer realistisk personstrøm i gangpassasjen. En kan også legge merke til at noen personer befant seg i gangpassasjene allerede ved simuleringens start. Ved plassering av personer viste det seg vanskelig å få plassert alle personene på de respektive stolradene. For å oppnå et høyt nok antall personer i simuleringene ble derfor noen plassert i gangpassasjene.

Plassering av sperrelinjer på spilleflaten ble gjort på bakgrunn av skjønn. Det ble forsøkt å lede personer til respektive utganger slik at arenaen ville bli tømt på en optimal måte. Det kan diskuteres om sperrelinjene er en god måte å oppnå dette på, men dette er et valg som er gjort i denne rapporten. I løpet av den første simuleringen viste det seg at noen personer ville bruke utganger ved den vestlige delen av arenaen. For å forhindre dette ble det laget distance-maps hvor disse utgangene ble erklært ugyldige.



Figur 7.15: Figuren viser modellen som ble benyttet ved simulering av en fullsatt konsert i Simulex (stående personer på spilleflaten)

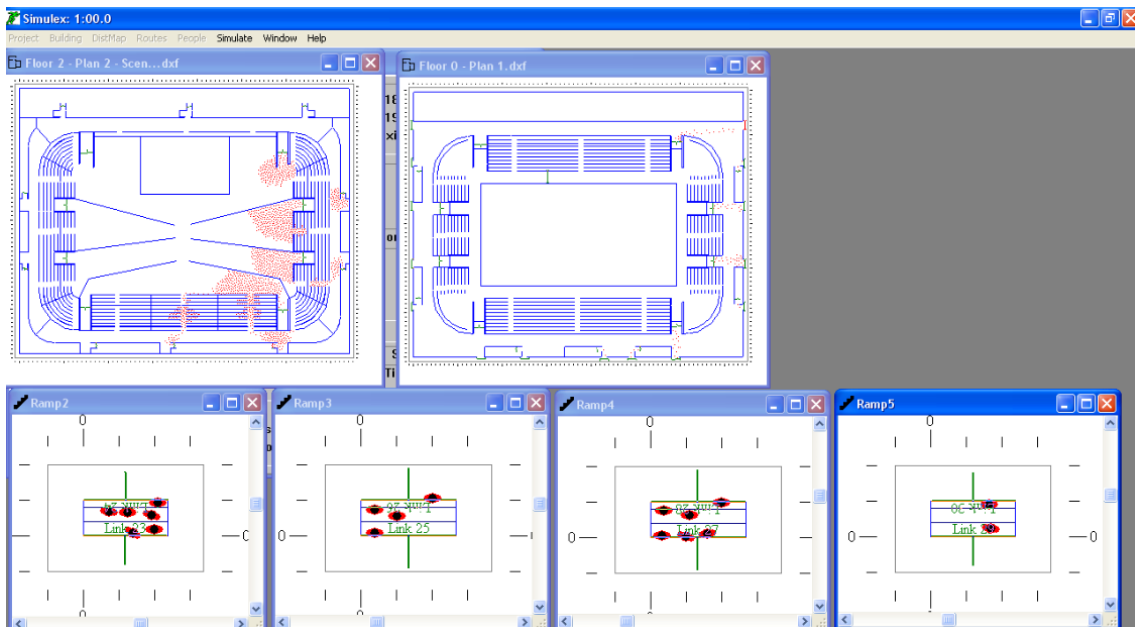
## 7.9.2 Resultater

Forflytningstid fra arenaen er gitt i Tabell 7.13. Figur 7.16 og 7.17 viser skjermdump fra simulering av fullsatt konsert. Figur 7.18 viser fastlåste personer i SimID test38.sittende.

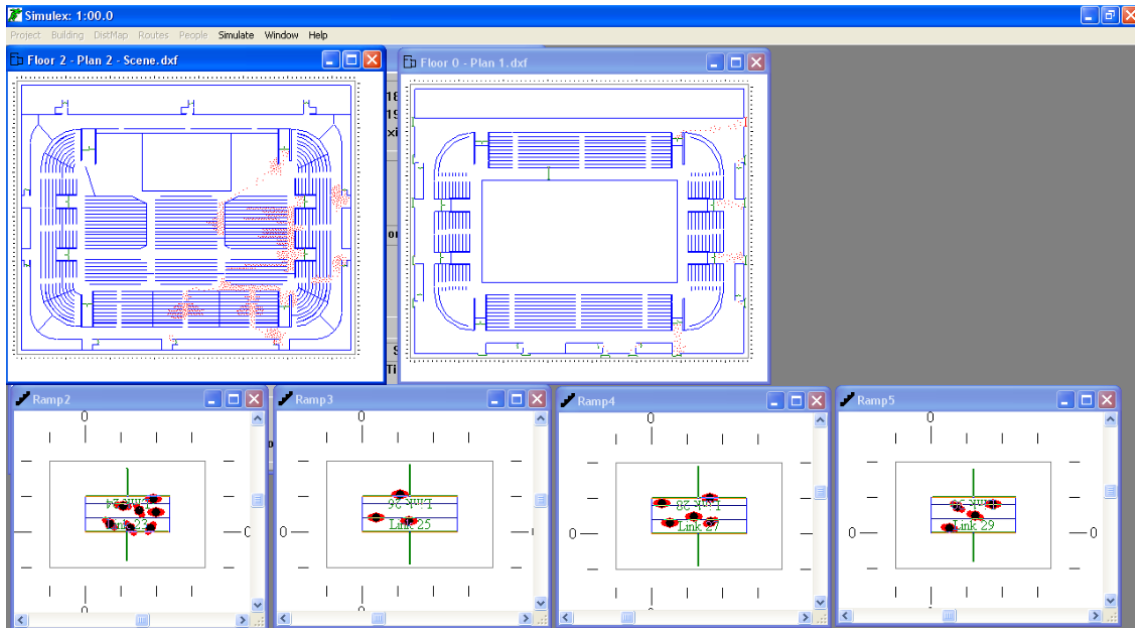
Tabell 7.13: Resultater fra simulering av fullsatt konsert i Simulex. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.6.

SimID	Personer	Tid (s)
test35.staende	2129	244.9
test36.sittende	1728	330.1
test37.sittende	1728	205.0 <sup>a</sup>
test38.sittende	1717	195.0 <sup>a</sup>

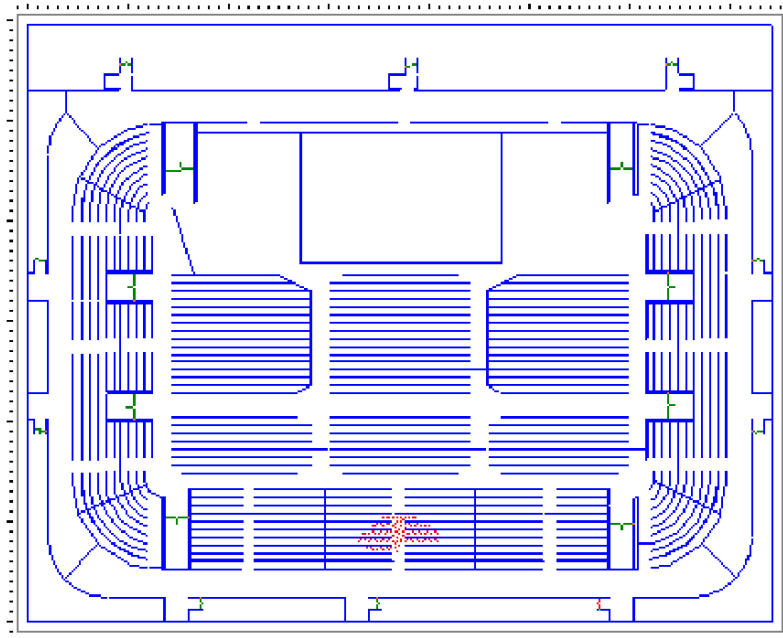
<sup>a</sup>Personer låste seg fast, etter denne tiden var det ingen flere personer som forlot bygget



Figur 7.16: Figuren viser skjermdump fra simulering av fullsatt konsert i Simulex, med ståplasser på spilleflaten. Øvre del av figuren viser kødannelser ved tunnelene, mens nedre del viser personstrømmer i tunnelene.



Figur 7.17: Figuren viser skjermdump fra simulering av fullsatt konsert i Simulex, med sitteplasser på spilleflaten. Øvre del av figuren viser kødannelser ved tunellene, mens nedre del viser personstrømmer i tunnelene.



Figur 7.18: Figuren viser skjermdump fra simulering av SimID test38.sittende der personer låste seg fast. Denne skjermdumpen ble gjort etter 4.0 min av simuleringen. De fastlåste personene forholdt seg på samme måte til simuleringen ble avbrutt etter nesten 47 min.

## 7.10 Simulering av messe i Simulex

### 7.10.1 Beskrivelse av modellen

To av reolutforingene, messe-v1 og messe-v4, fra Pathfinder ble simulert i Simulex. Personmengden var på ca. 1500 personer i alle simuleringene. En av simuleringene (SimID test23.messev2) ble gjort ved bruk av persontypen “shoppers”.

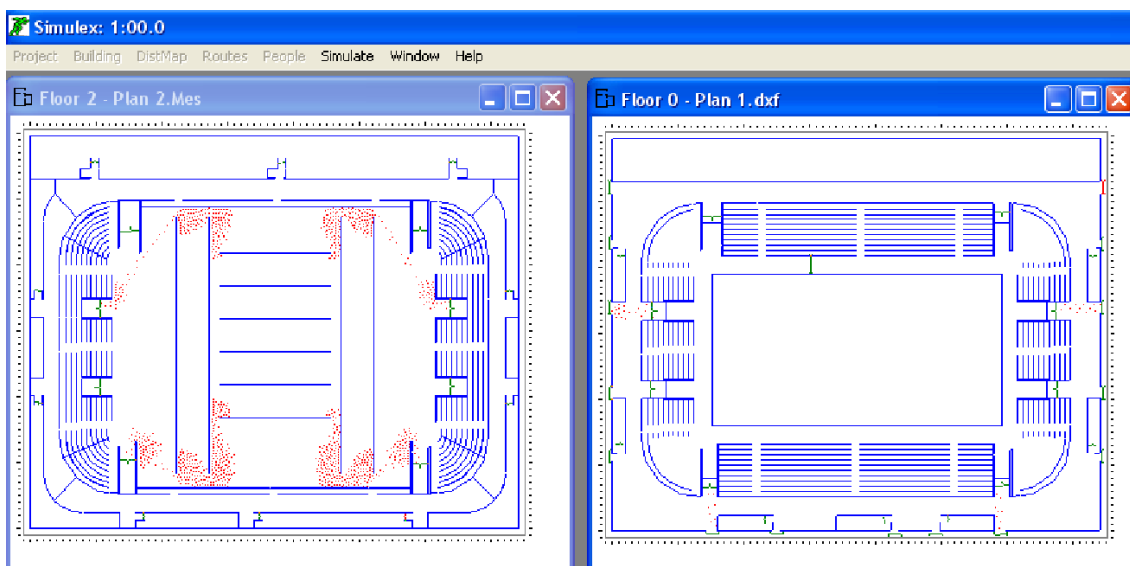
### 7.10.2 Resultater

Total forflytningstid for messescenarier i Simulex er gitt i Tabell 7.14. Figur 7.19 og 7.20 viser skjermdump fra simulering av messe i Simulex.

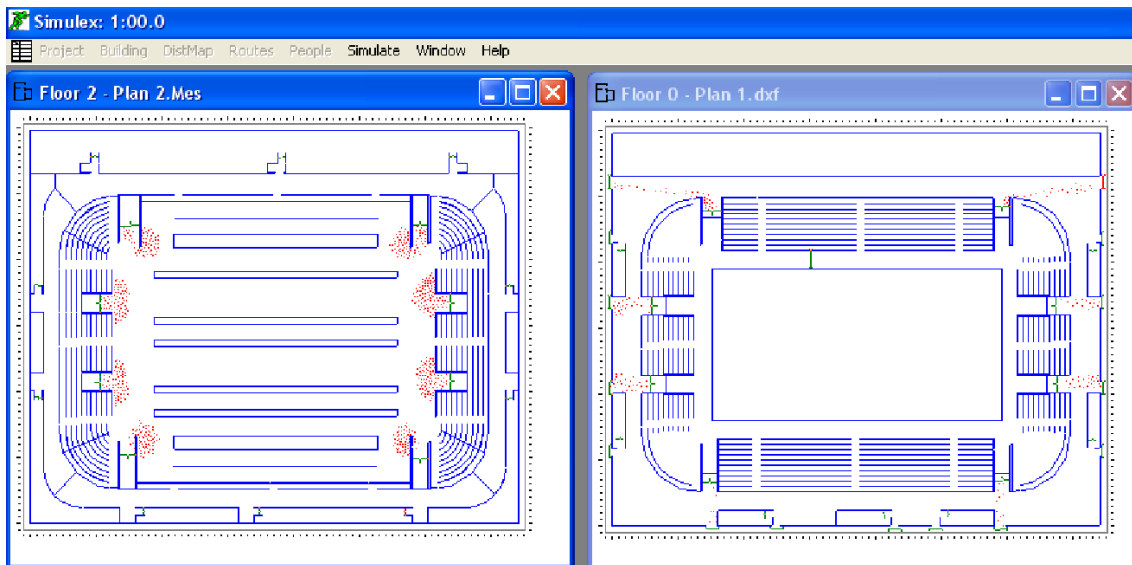
Tabell 7.14: Resultater fra simulering av messe i Simulex. Detaljert beskrivelse av simuleringene finnes i Vedlegg B, Figur B.7.

SimID	Personer	Tid (s)
test20.messe	1497	298.1
test21.messev2	1500	180.1
test22.messev2	1500	175.4
test23.messev2	1500	170.9 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Persontype “shoppers”



Figur 7.19: Figuren viser skjermdump fra simulering av messe i Simulex, SimID: test20.messe. En kan se at den dårlige reolutforingen skaper store kødannelser der det er smalt.



Figur 7.20: Figuren viser skjermdump fra simulering av messe i Simulex, SimID: test23.messev2. Kødannelser oppstår her først ved tunnelene.

## 7.11 Tilnærming til Simulex ved å bruke Pathfinder

Det ble utført noen simuleringer i Pathfinder der det ble forsøkt å benytte en etterligning av persontypen kontorarbeidere. Dette ble gjort ved å lage tre personprofiler (Median, Mann og Dame) der det ble brukt en skulderbredde tilsvarende  $2 \times R_b$  i Simulex. Simuleringene ble utført ved å bruke messeutforming med SimID: messe-v4. Det ble plassert ut 1500 personer med en fordeling på 30 % median, 40 % menn og 30 % damer. Dette tilsvarer fordelingen til kontorarbeidere i Simulex. Ganghastigheten til personene ble så satt til 1.4 m/s, som tilsvarer  $V_u$  i Simulex. Resultater fra simuleringene er gitt i Tabell 7.15.

Tabell 7.15: Resultater ved bruk av persontype kontorarbeidere på messeutforming i Pathfinder

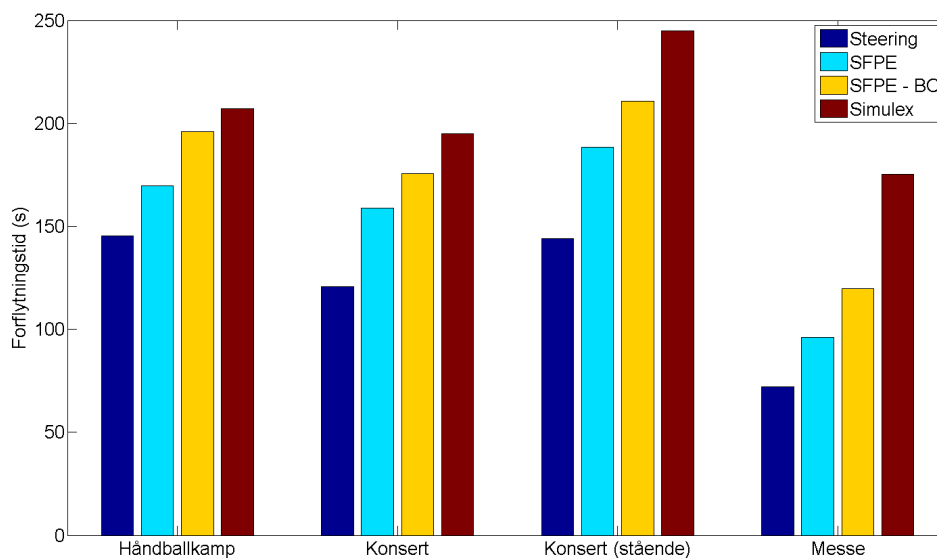
SimID	Personer	Modus	Kontorarbeidere <sup>a</sup>	“Default”
messe-v4	1500	steering	73.2	72.0
messe-v4	1500	SFPE	91.6	96.0
messe-v4	1500	SFPE - BC	117.1	119.8

<sup>a</sup>Med ganghastighet 1.4 m/s

Av tabellen kan en se at persontypen kontorarbeidere gir andre forflytningstider enn ved simulering med “default” personer. Endret persontype førte til lengre forflytningstid ved “steering”, mens det ga kortere forflytningstid ved bruk av begge SFPE-modusene.

## 7.12 Sammenligning av simulert forflytningstid

Figur 7.21 viser et sammendrag av simulert forflytningstid for de ulike simuleringsverktøyene. For håndballkampscenarioet er SimID: 130-newdoor-04-1.7m-wide-doors-no-upstairs sammenlignet med den beste oppnådde kombinasjonen fra Simulex. Ved konsertscenarioet ble SimID: 130-newdoor-1800gangpassasje-v3 sammenlignet med test38.sittende fra Simulex (sittende personer på spilleflaten). For stående personer på sitteflaten ble SimID: 130-newdoor07-standing-v0 sammenlignet med test35.staende fra Simulex. For messescenarioet ble SimId: messe-v4 (den gode utformingen) sammenlignet med test22.messev2, med “default”-persontype fra Simulex. De nevnte modellene tilsvarer de beste utformingene fra iterasjonsprosessen.



Figur 7.21: Figuren viser forflytningstid for ulike simuleringsprogram/modus

En kan se at Simulex gir en lengre forflytningstid for alle de fire scenarioene. Ved håndballkampscenarioet er forflytningstiden ved bruk av Simulex ca. 143 % av tiden i Pathfinder<sup>2</sup>. For messescenarioet er den hele 244 % av tiden i Pathfinder<sup>2</sup>, altså

<sup>2</sup>Ved bruk av “steering” modus

mer enn dobbelt så lang. Pathfinder med SFPE-modus og aktivering av “Basic Collisions” gir generelt lengre forflytningstider enn SFPE-modus, som igjen gir lengre forflytningstider enn “steering”.

Ved bruk av “steering” er håndballkamp det scenarioet der forflytningstiden er den lengste, med 145.3 s. Ved bruk av alle de andre modusene er konsert, med stående personer på spilleflaten, det scenarioet med lengst forflytningstid. Simulex gir da en forflytningstid på hele 244.9 s, eller ca. 4 min og 5 s. Det er verdt å merke seg at det høyeste persontallet i simuleringene også er ved konsertscenarioet med stående personer på spilleflaten.

Det benyttede persontallet i Pathfinder er det samme innenfor hver av scenarioene. Ved bruk av Simulex er dette tallet forsøkt å holdes i nærheten av de i Pathfinder. Tabell 7.16 viser en oversikt over benyttet persontall i simuleringene. Ved bruk av Simulex ble kun halve arenaen simulert for scenarioene håndballkamp og konsert (sittende og stående). For håndballkamp og konsert (sittende og stående) er derfor benyttet persontall tilnærmet halvparten av hva de er i Pathfinder. For messe er persontallene identiske.

Tabell 7.16: Benyttet persontall i simuleringene

Scenario	Pathfinder	Simulex
Håndballkamp	3827	1913
Konsert (sittende)	3423	1717
Konsert (stående)	4239	2129
Messe	1500	1500

### 7.13 Estimering av nødvendig rømningstid

Den mest konservative deteksjonstiden var på 2 min. Reaksjonstiden ble satt til å være 1 min. Ved bruk av Pathfinder (“steering”) ga håndballkamp og konsert (stående) så og si helt like forflytningstider. Disse var på henholdsvis 145 s og 144 s. Konsert (stående) ga den lengste forflytningstiden ved bruk av Simulex. Estimert forflytningstid var da på 245 s.

Ved bruk av Pathfinder fås dermed en nødvendig rømningstid på 325 s, eller 5 min og 25 s. Simulex gir en nødvendig rømningstid på 425 s, eller 7 min og 5 s.



# Kapittel 8

## Diskusjon

Der store mengder mennesker samler seg, har det vist seg at katastrofale ulykker kan oppstå uten noe tilsynelatende forvarsel. Ulykker har oppstått på vei inn til arrangementet, under selve arrangementet og på vei ut ved arrangementets slutt. Fruin mener årsaken til disse ulykkene i stor grad skyldes mangelfull kommunikasjon [23]. Zhang m. fl. mener panikk er den utløsende årsaken [22].

Basert på et byggverks plassering i risikoklasse og brannklasse medfølger det en rekke krav med hensyn til byggets rømningsveier. Disse kravene, samt hvordan mange av de kan tilfredsstilles, behandles i Kapittel 3.1 og vil ikke bli videre diskutert her.

### 8.1 RSET/ASET

Den mest omtalte metoden for å dokumentere sikker rømning er RSET/ASET-metoden. Metoden beskrives på litt ulike måter, men konseptet går ut på å sørge for at nødvendig rømningstid er kortere enn tilgjengelig rømningstid. En sikkerhetsmargin skal inkluderes for å dekke usikkerheten i beregningen av de to. Selv om metoden er godt etablert som verifiseringsmetode, møter den også motstand. Babrauskas m. fl. mener sikkerhetsmarginen bør maksimeres, istedenfor bare å dekke usikkerheten ved beregning av tilgjengelig og nødvendig rømningstid [30].

Ved utregning av tilgjengelig rømningstid, oppstår det en del usikkerhet. Skal rømning foregå helt uten tilstedeværelse av farlige gasser? Hvilke siktforhold skal det være? Litteraturen opererer i tillegg med ulike tålegrenser, som igjen vanskeliggjør prosessen med å bestemme tilgjengelig rømningstid. Fastsetting av personers tålegrenser er også etisk vanskelig å gjennomføre. Personer måtte isåfall utsettes for en

potensielt farlig situasjon.

Ved bruk av RSET/ASET-metoden medfører valg av sikkerhetsmargin et ganske stort problem. Litteraturen sier generelt at den skal bestemmes på bakgrunn av usikkerheten i beregning av tilgjengelig og nødvendig rømningstid. I tillegg skal sikkerhetsmarginen fastsettes før en beregning av tilgjengelig og nødvendig rømningstid. Sikkerhetsmarginen må fastsettes ved en skjønnsmessig vurdering, basert på erfaring. Denne metoden kan føre til flere ulike resultater, avhengig av hvem som utfører prosjekteringen.

En måte å fastsette sikkerhetsmarginen er å sette den lik effekten av et røykventilasjons- eller sprinkleranlegg. Ved å gjøre dette, kan en enkelt forklare hvorfor sikkerhetsmarginen må være det den er. Ved å sette sikkerhetsmarginen lik f. eks. 50 % av nødvendig rømningstid, vil en ha vanskeligheter med å kunne begrunne valget.

## 8.2 Nødvendig rømningstid

Nødvendig rømningstid har i denne rapporten blitt inndelt i tre ulike hoveddeler; deteksjon, reaksjon og forflytning. Litteraturstudiet har vist at det er mange faktorer som har innvirkning på én eller flere av disse delene.

### 8.2.1 Deteksjonstid

Deteksjonstiden er sterkt avhengig av en branns utvikling og avstanden fra denne til en detektor. Den vil derfor være forskjellig, avhengig av brannens type og lokasjon. Ventilasjonsanlegget kan i tillegg bidra til usikkerhet ved bestemmelse av deteksjonstiden. En CFD-analyse kunne bidratt til å bestemme tid til detektorene vil løse ut, men det er ikke gjort her.

Noen alarmanlegg er utformet slik at en brann kan verifiseres av en person, før en eventuell alarm lyder. Dette kan forhindre eventuelle falske alarmer, men bør sette strengere krav til sikkerhetsmarginen. Det er ønskelig at personer blir varslet så fort som mulig. Jo raskere personer blir varslet om en brann, destod mer tid har de på å komme seg ut av bygningen.

## 8.2.2 Reaksjonstid

Denne rapportens analyseobjekt har som tidligere nevnt flere ulike bruksområder. En messe har klare likhetstegn med et varehus, mens håndballkamp og konsert kan minne mer om en kinosal med et veldig engasjert publikum. Bryter det ut en alarm i løpet av en håndballkamp eller under en konsert, er det viktig at arrangementet stoppes. Ved bruk av talevarsling, kan en så informere publikum om hva de skal foreta seg. Selv om talevarsling vil informere om hva som skal gjøres, er det allikevel nødvendig at personell på stedet bidrar til at publikum begynner å forflytte seg mot utgangene.

Litteratursøket viste at lederroller i en sosial gruppe også kunne ha innvirkningstid på reaksjonstiden. Dette gjelder spesielt ved konserter, hvor publikum vil forvente at en beskjed om eventuell utrømning skal komme fra scenen [37].

## 8.2.3 Forflytningstid

Ved beregning av forflytningstid er ganghastigheten den faktoren som bestemmer hvor fort folk kommer seg fra A til B. Ganghastigheten kan variere i stor grad fra person til person, men den er sterkt avhengig av persontettheten. En lav persontetthet gjør at personer kan bevege seg uhindret, mens høy persontetthet gjør at folk kan bli stående helt stille. Andre faktorer som kan redusere ganghastigheten er; trapper, personers fysiske form, funksjonshemninger og utforming av rømningsveier.

Utforming av selve rømningsveiene bør vurderes spesielt. En bør blant annet sørge for at det ikke forekommer løse gjenstander i rømningsveiene som kan hindre personer i rømningsprosessen. Køer oppstår gjerne ved innsnevring i rømningsveien. Ved innsnevring kan det også oppstå flere ulike oppførsler og kø-fenomener. Noen av disse kan medføre en sterkt redusert personstrøm gjennom innsnevringene. Forflytningstid vil bli videre behandlet ved diskusjon av rømningsmodelleringene.

## 8.3 Simuleringsprogrammer

### 8.3.1 Generering av modeller

Bruk av DXF-filer i Pathfinder viste seg å være noe enklere enn i Simulex. Ved bruk av Pathfinder kan en enkelt deaktivere de "layers" i AutoCAD en ikke vil ha

med i modellen. Simulex vil på den annen side importere alle “layers” som finnes i DXF-filen. Dette førte til en god del merarbeid for å tilpasse DXF-filene til de ulike programmene.

Begge simuleringsprogrammene hadde svakheter med å importere sirkel-formede linjer, noe som skapte problemer i tribunesvingene. I Pathfinder kunne dette løses ved å tegne inn korte, rette, streker inne i selve programmet (“Thin walls”). I Simulex måtte samme metode benyttes, men da i AutoCAD. Simulex har ingen muligheter til å forandre på modellen i selve simuleringsprogrammet. Det er bare trappeløp, “exits” og “links” som kan endres.

En annen fordel med Pathfinder er måten modellen kan vises på. I Pathfinder kan en se modellen i et 3D-perspektiv der det er mulighet for å rotere modellen i alle retninger. Simulex har kun en 2D-basert visning der en må se alle plantegninger og trappeløp hver for seg. En må altså vite hvor de ulike trappeløpene er koblet sammen med plantegningene for å danne seg et bilde av rømningsprosessen.

I Simulex er det kun én mulighet for å koble sammen to ulike plan og det er ved bruk av trappeløp. For vanlige byggverk, der det ikke er heis, vil dette være tilstrekkelig. For analyseobjektet i denne rapporten var det derimot en fordel å kunne benytte ramper for å koble sammen planene. Ved bruk av ramper kunne en oppnå samme ganghastighet som på en horisontal flate. En ulempe ved å bruke disse rampene var at en oppnådde en lengre forflytningsdistanse enn det ville vært i virkeligheten. Selv om det i Simulex måtte brukes trappeløp i stedet for ramper kunne disse defineres til å være 1 m lange. I Simulex er det nemlig ikke noe krav om at trappeløpene fra nivå 1 til nivå 2 må dekke samme vertikale avstand.

Plasseringen av trappeløp i Simulex viste seg å være en del mer tidkrevende enn i Pathfinder. Først måtte trappens lengde og bredde spesifiseres. Deretter måtte to “links” spesifiseres for både bunnen og toppen av trappen. Ved mange trappeløp blir det fort vanskelig å holde oversikten over alle de ulike “links”. I Pathfinder behøvde bare trappens bredde bestemmes før en enkelt kunne klikke der trappen skulle begynne og der den skulle slutte. Ved å benytte DXF-filer der trappeløpenes start og endepunkter var spesifisert på forhånd, viste dette seg å være en ganske enkel prosess.

Plassering av personer fungerer omtrent likeverdig i de to programmene. Det var mulig å plassere personer gruppevis, men det var nødvendig å etterfylle med personer enkeltvis der det oppstod store mellomrom. I Simulex kunne en gruppe personer bli plassert i et polygonformet område, mens det kun var mulig å bruke firkanter i

Pathfinder.

### **8.3.2 Simuleringene**

Tiden det tok å gjennomføre simuleringene viste seg å variere stort mellom de to simuleringsprogrammene. Simuleringene i Simulex ble utført på en langt kraftigere maskin enn de i Pathfinder, likevel tok de betydeligere lengre tid. Dette gjorde at simuleringene i Simulex måtte bli delt opp i mindre deler og bli kjørt hver for seg. Det hadde vært en stor fordel om hele arenaen kunne bli kjørt i én simulering, slik det ble gjort i Pathfinder. På denne måten kunne en unngått mye prøving og feiling med å dele opp arenaen i likeverdige deler.

Et ofte oppdukkende problem i Simulex var at personer hadde en tendens til å låse seg fast. Dette skjedde ofte i tilknytning til gangpassasjene ned fra tribuneområdene. Fastlåsing medførte noen ganger at en god del personer aldri forlot arenaen. Andre ganger førte et par fastlåste personer til en redusert personstrøm, da tilgjengelig forflytningsareal i gangpassasjen ble redusert. Slike fastlåsing kunne godt oppstå et stykke ut i selve simuleringen. Etter råd fra veileder ble det forsøkt å tegne inn doble streker med ca. 30 mm avstand for å unngå problemet med fastlåsing. Dette forhindret likevel ikke alle fastlåsingene. Løsningene på fastlåsingproblemet bestod derfor av å enten;

1. Avbryte simuleringen umiddelbart, forsøke å lokalisere personene som forårsaket fastlåsing, flytte disse og deretter kjøre en ny simulering.
2. Avbryte simuleringen etter at alle, untatt de fastlåste personene, hadde forlatt bygget. Forflytningstiden ble så satt til tiden da siste person forlot bygget.

I de fleste simuleringene holdt det å utføre punkt 1 én gang. Der punkt 1 ikke løste problemet første gang, ble punkt 2 benyttet. Problemet med fastlåsing oppstod ikke i Pathfinder.

I Pathfinder var det tydelig at personer fordelte seg jevnt utover de forskjellige utgangene. Dette gjorde de helt av seg selv, uten at spesifikke utganger måtte spesifiseres. Denne tendensen var klart størst ved bruk av “steering”. I Simulex valgte personene konsekvent den den nærmeste utgangen, de tok altså ikke hensyn til kødannelse. For å oppnå en jevnere fordeling over utgangene ble det brukt en kombinasjon av “distance maps” og sperrevegger. Bruken av sperrevegger og avstandskart

skaper et usikkerhetsmoment med hensyn til de oppnådde forflytningstidene. Disse ble skjønnsmessig definert, og om nødvendig justert, slik at arenaen ble tømt på en mest mulig effektiv måte.

Selv om Pathfinder generelt ga en jevn fordeling av personer på de forskjellige utgangene, viste det seg imidlertid ved simulering av håndballkampen at det var noen svakheter ved programmet. Dette gjaldt tilfellet som er illustrert i Figur 7.3, se ellers beskrivelse i tilknytning til denne.

Ganghastighetene som blir benyttet i de to programmene korresponderer ganske godt med verdiene som ble funnet i litteratursøket. For uhindret forflytning tilsa litteraturen en ganghastighet på ca. 1.25 m/s. Pathfinder benytter en “default”-hastighet på 1.19 m/s, mens Simulex benytter en maksimalhastighet på 1.4 m/s. Begge programmene tar også hensyn til at ganghastigheten reduseres ved økt persontetthet.

### 8.3.3 Simuleringsresultater

Det må påpekes at det ikke har blitt utført noen rømningsøvelse som simuleringsresultatene kan sammenlignes med i denne rapporten. En slik øvelse kunne bidratt til å styrke eller svekke validiteten til simuleringsresultatene i denne rapporten. Noen vurderinger av resultatene kan likevel gjøres.

Sensitivitetsanalysen av SFPE-modus viste at parameteren “dørens grenselag” er den mest utslagsgivende med hensyn til forflytningstiden. Det er derfor spesielt viktig at denne parameteren defineres riktig. Som “default” er denne satt til 15 cm, noe litteraturen også anbefaler. Resultater som oppnåes ved bruk av denne kan derfor sies å være troverdige.

Iterasjonsprosessen som ble brukt i denne rapporten hadde som mål å gi kortere forflytningstid. Den oppnådde forflytningstiden kan så brukes som grunnlag for å velge optimale arenautforminger. En god utforming vil gi en kortere forflytningstid, og derfor en sikrere arena. Simulering av blokkert rømningsvei i Pathfinder ga relativt liten økning i forflytningstid (3.4-6.0%). Dette tyder på at arenaen har en god fordeling av rømningsveiene.

Simulex gir jevnt over lengre forflytningstider enn Pathfinder. Pathfinder med SFPE-modus og BC aktivert gir lengre forflytningstider enn SFPE-modus, som igjen gir lengre forflytningstider enn “steering”. En vinkling å se dette på er da å si at Simulex gir mer konservative resultater enn Pathfinder. Noe som kan være litt urovekkende,

er at Pathfinder (“steering”) gir en forflytningstid for messe på 41 % av hva Simulex gir. Det finnes her ikke noe grunnlag for å si hva som er mest riktig, men en eventuell rømningsøvelse kunne bidratt til å gjøre det.

I følge brukerhåndboken skulle aktivering av grunnleggende kollisjoner, ved bruk av SFPE-modus, ikke påvirke evakueringstiden i noe særlig grad. Resultatene fra denne analysen har derimot vist at aktivering av grunnleggende kollisjoner vil påvirke evakueringstiden. For simuleringsmodellene som er vist i Figur 7.21 gir grunnleggende kollisjoner mellom 10 % og 25 % lengre forflytningstid enn vanlig SFPE-modus. En stor svakhet ved å bruke SFPE-modus uten grunnleggende kollisjoner er det visuelle utseendet av rømningssituasjonen. Aktivering av kollisjoner gir et mye mer realistisk utseende når rømningen skal vises visuelt.

Arenautformingen som la grunnlaget for estimering av nødvendig rømningstid hadde en samlet dørbredde på 25.6 m. For konsertscenarioet, med stående personer på spilleflaten, medfører dette en åpning på ca. 0.6 cm per person. Dette er noe under anbefalingen fra VTEK 10 på minimum 1.0 cm fri bredde per person. Begge simuleringsverktøyene viste derimot at rømningsforholdene fortsatt var gode ved å bare bruke 0.6 cm per person. En god utforming av rømningsveiene gir altså mulighet til å avvike noe fra anbefalingene i VTEK 10.

## 8.4 Tanker om simuleringene

Simuleringsprogrammer er et veldig godt hjelpemiddel for å illustrere en rømningssituasjon visuelt. Simuleringsprogrammene åpner for å velge ganghastigheter og persontyper/fasonger. Da det er mye kødannelser ved simuleringene i denne rapporten, blir programmenes evne til å løse dette avgjørende for simulert forflytningstid. Dette gjelder spesielt hvordan programmene bestemmer personstrømmer gjennom innsnevring.

Et generelt problem ved bruk av simuleringsprogrammer er deres manglende evne til å inkludere en del forhold som ble presentert i litteraturen. Dette gjelder blant annet; en sosial gruppes vilje til å holde sammen, personer med behov for assistanse og effekten av et aktivt styrende personell. Et annet viktig poeng er at personer ikke oppfører seg som roboter. Noen ganger vil man gjøre beslutninger som ikke nødvendigvis bidrar til en effektiv rømning.

De to simuleringsprogrammene som blir brukt i denne rapporten har ikke mulighet

for å avdekke forhold der det kan være fare for oppstå katastrofale ulykker (som ihjeltramping). Programmene kan derimot benyttes for å estimere hvor lenge personer eventuelt må stå stille før de kan fortsette å forflytte seg. Det er en fordel om personer ikke står for lenge stille, og da spesielt hvis det skulle oppstå en farlig situasjon i nærheten. Personer som står lenge stille kan etterhvert bli utålmodige. En mengde med utålmodige personer er ikke å foretrekke. For å unngå en slik situasjon er det viktig at personell aktivt kommuniserer med folkemengden, spesielt de som er lengst fra utgangsdørene.

Noe som kan være lett å overse når en skal estimere nødvendig rømningstid fra en bygning er forholdene på utsiden av byggverket. Viktigheten av dette er spesielt stor for bygninger med et høyt persontall. Når personer først har kommet seg ut av bygget må de ledes vekk fra utgangene slik at andre personer kan komme seg ut. Biltrafikk i umiddelbar nærhet kan være et problem, da dette kan være en mulig fare for personsikkerheten. Det må også sørges for at brannmannskapet har en slik tilgang til bygget at de kan få utført jobben sin.



# Kapittel 9

## Konklusjon og anbefalinger

### 9.1 Konklusjon

Rømning blir i dag sikret ved å bruke en RSET/ASET-analyse der det sørges for at nødvendig rømningstid er mindre enn tilgjengelig rømningstid. Usikkerheten i beregning av disse skal dekkes av en sikkerhetsmargin. TEK 10 setter krav til utforming av rømningsveiene. Der rømningsforholdene er komplekse og/eller persontallet er høyt, kan forflytningstiden estimeres ved bruk av simuleringsverktøy.

Det er en god del faktorer som ikke kan tas hensyn til ved bruk av simuleringsverktøy. Disse inkluderer blant annet en families ønske om å holde sammen ved en eventuell utrømning og hvorvidt personer har behov for assistanse eller ikke. Simuleringsverktøy er allikevel en ypperlig måte å sammenligne ulike arenautforminger. Simuleringene kan brukes til å avdekke problemer med rømningsveiene i tillegg til å danne beslutningsgrunnlag for om én løsning er bedre enn en annen.

Et usikkerhetsmoment ved bruk av simuleringsverktøy er at to verktøy sjelden vil gi samme svar. Pathfinder og Simulex har gitt store forskjeller i estimering av forflytningstid for analyseobjektet i denne rapporten. Pathfinder ga en nødvendig rømningstid på 325 s, mens Simulex ga en nødvendig rømningstid på 425 s. Begge simuleringsverktøyene ga imidlertid en rømningstid som var kortere enn kravet som ble satt til 8 min.

De gitte rømningstidene ble oppnådd ved å fordele utgangsdørene jevnt rundt hele bygget. En samlet dørbredde på 25.6 m ble fordelt på 8 dører à 170 cm og 10 dører à 120 cm. Ved å fordele utgangsdørene godt oppnås rømningsforhold som er lite sensitive med hensyn til blokkering. Andre forhold ved den fysiske utformingen av

arenaen bør velges i samsvar med modellene som er nevnt i Kapittel 7.12.

Plassering av stoler og reoler ved konsertarrangement og messer må vurderes spesielt, og ses i sammenheng med ønsket persontall. En uheldig plassering kan gi unødvendig lange forflytningstider. Utforming av områdene på utsiden av arenaen bør også inngå i en vurdering av rømningsforholdene. Eventuelle hindringer utenfor arenaen kan medføre en redusert personstrøm inne på selve arenaen. Personell må sørge for at personer som har kommet seg ut ikke blir stående ved utgangsdørene, men at de ledes videre vekk fra arenaen.

Der det forekommer byggverk i nærheten av et analyseobjekt som også har et høyt persontall bør skyggeevakueringer tas hensyn til. I slike tilfeller spiller personell også en viktig rolle. Personell må da sørge for at rømningsforholdene fra bygget det faktisk har oppstått en fare i kan opprettholdes.

## 9.2 Anbefalinger

- Legges det vekt på brukervennlighet, simuleringshastighet og programmets mulighet for å gi gode visuelle rømnings-simuleringer anbefales det å bruke Pathfinder.
- Utgangsdører og rømningsveier bør plasseres jevnt rundt hele bygningen. På denne måten vil blokkering av en rømningsvei ikke føre til store endringer i forflytningstid.
- Utforming av områder på utsiden av et multifunksjonsanlegg bør være en del av brannprosjekteringen.
- Personell bør være klar over deres påvirkningsevne under rømning og hva denne kan brukes til. Det anbefales derfor at personell får opplæring og trening i hvordan de skal bidra i en rømnings-situasjon.

## 9.3 Forslag til videre arbeid

På bakgrunn av hva som har kommet fram i denne rapporten ville det vært ønskelig å utføre en fullstendig rømningsøvelse av det aktuelle analyseobjektet. En slik øvelse kunne bidratt til å vurdere de to simulering-programmenes validitet. Hadde

en rømningsøvelse vist seg å være nært knyttet til resultater fra Simulex, ville det kunne bli stilt store spørsmålstegn ved bruken av Pathfinder.



# Referanser

- [1] Direktoratet for byggkvalitet. Veiledning om tekniske krav til byggverk, 2011.
- [2] SINTEF Byggforsk. Nødvendig rømningstid ved brann, 2006.
- [3] SINTEF Byggforsk. Rømning fra bygninger ved brann, 2007.
- [4] Thunderhead Engineering. Technical Reference - Pathfinder 2012. 2012.
- [5] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB). Antall næringsbranner, etter kommune, år og brannårsak. [Oppdatert 20.07.2012, sitert 29.05.2013]. Tilgjengelig fra [http://stat.dsb.no/Database/DSB/1\\_Brann/4\\_Arsaker/2\\_Fom2009/2\\_Fom2009.asp](http://stat.dsb.no/Database/DSB/1_Brann/4_Arsaker/2_Fom2009/2_Fom2009.asp).
- [6] J.F. Dickie. Major crowd catastrophes. *Safety Science*, 18(4):309 – 320, 1995.
- [7] Direktoratet for byggkvalitet. Forskrift om tekniske krav til byggverk, 2010.
- [8] Standard Norge. Risikoanalyse av brann i byggverk, 1998.
- [9] Bodil Aamnes Mostue and Jan P. Stensaas. Effekt av boligsprinkler i omsorgsboliger, 2002.
- [10] Statens Bygningstekniske Etat. Røykventilasjon - Temaveiledning, 2000.
- [11] Kristin Hoskin. Fire Protection and Evacuation Procedures of Stadia Venues in New Zealand. Master's thesis, University of Canterbury, New Zealand, 2004.
- [12] Integrated Environmental Solutions Limited (IES). Simulex User Guide <Virtual Environment> 6.0. 2009.
- [13] U.S. Department of Homeland Security/FEMA. Mass evacuations: Planning for Sports Venues. [Oppdatert 2005, sitert 01.06.2013]. Tilgjengelig fra <https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CCoQFjAA&url=https%3A%2F%2Fwww.hsd1>.

org%2F%3Fview%26did%3D30616&ei=jc-pUd-MJITMswa25YD4AQ&usg=AFQjCNGlYtf00Qf8ZoIkd1HQkHC3u\_maKQ&sig2=pKQNje0q8XybqlVWYu0\_-g.

- [14] Telenor Arena. Om Telenor Arena. [Oppdatert 2013, sitert 05.02.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.telenorarena.no/index.php?l1=78&pageID=37>.
- [15] Oslo2022. Mulighetsstudie arenaer - OL i Norge 2022. 2013.
- [16] The New York Times World. Melee in Overcrowded Guatemala Stadium Kills 84 Soccer Fans. [Oppdatert 18.10.1996, sitert 08.05.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.nytimes.com/1996/10/18/world/melee-in-overcrowded-guatemala-stadium-kills-84-soccer-fans.html>.
- [17] CNN.com. Tearful victory - Twelve dead in stampede as S. Africa tops Zimbabwe. [Oppdatert 09.07.2000, sitert 08.05.2013]. Tilgjengelig fra [http://sportsillustrated.cnn.com/soccer/world/news/2000/07/09/zimbabwe\\_safrica\\_ap/](http://sportsillustrated.cnn.com/soccer/world/news/2000/07/09/zimbabwe_safrica_ap/).
- [18] CNN.com/World. Forty-three die in soccer stampede. [Oppdatert 11.04.2001, sitert 08.05.2013]. Tilgjengelig fra <http://archives.cnn.com/2001/WORLD/africa/04/11/safrica.stampede.04/>.
- [19] CNN.com/World. Ghana mourns soccer crush victims. [Oppdatert 10.05.2001, sitert 08.05.2013]. Tilgjengelig fra <http://archives.cnn.com/2001/WORLD/africa/05/10/stadium.stampede.03/>.
- [20] Mohammed Fadel Fahmy and Ben Wedeman (CNN.com). Egyptian health ministry: 74 dead, hundreds injured in soccer riots. [Oppdatert 01.02.2012, sitert 08.05.2013]. Tilgjengelig fra <http://edition.cnn.com/2012/02/01/world/africa/egypt-soccer-deaths>.
- [21] National Fire Protection Association (NFPA). Public assembly and nightclub fires - The 10 deadliest nightclub fires in world history. [Oppdatert 02.2013, sitert 09.05.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.nfpa.org/itemDetail.asp?categoryID=851&itemID=21090#outside>.
- [22] Qingsong Zhang, Mao Liu, Caihong Wu, and Guomin Zhao. A stranded-crowd model (SCM) for performance-based design of stadium egress. *Building and Environment*, 42(7):2630–2636, 2007.
- [23] John J. Fruin. The causes and prevention of crowd disasters. 2002.

- [24] SINTEF Byggforsk. Oversikt over krav og løsninger ved brannteknisk prosjektering av bygninger, 2007.
- [25] Standard Norge. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann, 2009.
- [26] Standard Norge. Visuelle ledesystemer for rømning i byggverk. Del 1: Planlegging og utforming, 2009.
- [27] SINTEF Byggforsk. Ledesystem for rømning, 2003.
- [28] SINTEF Byggforsk. Tilgjengelig rømningstid ved brann, 2006.
- [29] CFPA Europe. European Guideline - Fire safety engineering concerning evacuation from buildings, 2009.
- [30] Vytenis Babrauskas, Joseph M. Fleming, and B. Don Russell. RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment. *Fire and Materials*, 2010.
- [31] Standard Norge. Krav til risikovurdering av brann i byggverk, 2012.
- [32] Anders Arnhus. Stipendiat - NTNU. Personlig kommunikasjon (e-post), 2013.
- [33] Justis og beredskapsdepartementet. Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver, 2009.
- [34] SINTEF Byggforsk. Dokumentasjon av brannsikkerhet i bruksfasen, 2002.
- [35] Bjarne Christian Hagen. *Brannteknisk rømningsanalyse*. Tapir Akademisk Forlag, 2008.
- [36] Nikolay Tolstoy (red.). Utrymningsdimensionering, 2006.
- [37] Håkan Frantzich. Tid för utrymning vid brann, 2001.
- [38] Direktorat for samfunnssikkerhet og beredskap. Veiledning til forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn, 2012.
- [39] Klas Bayer and Tobias Rejnö. Utrymningslarm - Optimering genom fullskaleförsök, 1999.
- [40] Guylène Proulx. Evacuation Time. In *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, chapter 12, pages 3/355–3/372. NFPA, SFPE, 2008.

- [41] Jake Pauls. Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Safety Journal*, 12(3):213 – 236, 1987.
- [42] K.E. Boyce, T.J. Shields, and G.W.H. Silcock. Toward the characterization of building occupancies for fire safety engineering: Capabilities of disabled people moving horizontally and on an incline. *Fire Technology*, 35(1):51–67, 1999.
- [43] Janne G. Sørensen and Anne Dederichs. *Evacuation characteristics of blind and visually impaired people*. 2012.
- [44] Xiaoshan Pana, Charles S. Han, Ken Dauber, and Kincho H. Law. A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *AI & SOCIETY*, 22(2):113–132, 2007.
- [45] Reuben Goldblatt. *Evacuation Planning: A Key Part of Emergency Planning*. 2004.
- [46] Integrated Environmental Solutions (IES). Simulex - Technical Details. [Oppdatert 2013, sitert 03.04.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.iesve.com/software/ve-pro/analysis-tools/egress/simulex>.
- [47] Erica D. Kuligowski and Richard D. Peacock. A review of building evacuation models. Technical Report Technical Note 1471, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2005.
- [48] Thunderhead Engineering. *User Manual - Pathfinder 2012*. 2012.
- [49] Pathfinder 2012 x64, 2013.
- [50] P.E. Hart, N.J. Nilsson, and B. Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 4(2):100–107, 1968.
- [51] H. E. Nelson and F.W Mowrer. Emergency Movement. In *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, pages 3/367–3/380. NFPA, SFPE, 2002.
- [52] Society of Fire Protection Engineering. *Engineering Guide - Human Behavior in Fire*. SFPE, 2003.
- [53] Steven M. V. Gwynne and Eric R. Rosenbaum. Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. In *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, chapter 13, pages 3/373–3/396. NFPA, SFPE, 2008.



- [54] Arena Larvik. Arena-spesifikasjoner. [Oppdatert 2012, sitert 12.02.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.arena-larvik.no/index.php/leie/arena-spesifikasjoner>.
- [55] Norges Håndballforbund. Eliteseriereglementet Sesongen 2012/2013, 2012.
- [56] Marvin Rausand and Ingrid Bouwer Utne. *Risikoanalyse - teori og metoder*. tapir akademisk forlag, 2009.
- [57] U.S. Fire Administration/National Fire Data Center. Nightclub Fires in 2000. *Topical Fire Research Series*, 3(7), 2004.
- [58] Daloc. S60 Branndør/tradisjonell ståldør. [Oppdatert 2013, sitert 22.04.2013]. Tilgjengelig fra <http://www.dorkatalogen.daloc.no/staldorer/S60/>.



**Vedlegg A**

**Oppgavetekst**

## **MASTEROPPGAVE**

(TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2013

for

**Andreas Lein Ungersness**

### **Brannprosjektering av innendørs multifunksjonsanlegg – Nødvendig rømningstid**

#### **BAKGRUNN**

Innendørs idrettsanlegg blir ikke lenger bare benyttet til idrettsarrangementer. De skal gjerne brukes som konsertarena og messeanlegg i tillegg. Høyere krav til bruksfleksibilitet medfører at anleggene vil ha forskjellig utforming og persontall, sammenlignet med et vanlig idrettsarrangement.

For å tilfredsstille forskriftenes krav til rask og sikker rømning kan en RSET/ASET-analyse utføres. Ved å bruke passende simuleringsverktøy kan forflytningstiden estimeres for et anleggs ulike bruksområder.

#### **OPPGAVE**

##### **Beskrivelse av oppgaven**

Oppgaven tar for seg nødvendig rømningstid ved innendørs multifunksjonsanlegg. Faktorer som kan påvirke nødvendig rømningstid blir behandlet og utforming av rømningsveiene i et analyseobjekt blir vurdert ved hjelp av to ulike simuleringsverktøy.

##### **Målsetting og hensikt**

Målet med oppgaven er å utrede hvordan rømning kan sikres, samt avdekke usikkerhet knyttet til rømningssimuleringer, fra store innendørs multifunksjonsanlegg.

##### **Deloppgaver og forskningsspørsmål**

- Hvilke krav stilles til innendørs multifunksjonsanlegg i TEK 10?
- Hva påvirker den nødvendige rømningstiden fra innendørs multifunksjonsanlegg?
- Hvordan kan rømning fra multifunksjonsanlegg simuleres?
- Kan oppførsel implementeres i simuleringsverktøy?

## GENERELT

Oppgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendigheten i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- hovedteksten
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel for internasjonal publisering. Besvarelsen inneholder da de samme punktene som beskrevet over, men der hovedteksten omfatter en vitenskapelig artikkel og en prosessrapport.

Instituttets råd og retningslinjer for rapportskriving ved prosjektarbeid og masteroppgave befinner seg på <http://www.ntnu.no/bat/studier/oppgaver>.

### Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

**(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.** Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

**Helse, miljø og sikkerhet (HMS):**

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befarings, feltkurs eller ekskursionsjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>. Alle studenter som skal gjennomføre laboratoriearbeid i forbindelse med prosjekt- og masteroppgave skal gjennomføre et web-basert TRAINOR HMS-kurs. Påmelding på kurset skjer til [sonja.hammer@ntnu.no](mailto:sonja.hammer@ntnu.no)

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

**Oppstart og innleveringsfrist:**

Oppstart og innleveringsfrist er i henhold til informasjon i DAIM.

**Faglærer ved instituttet:** Harald Landrø

**Veileder(eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner:** Lars Erik Sorthe

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato:

Underskrift  
Faglærer



## Vedlegg B

# Detaljert beskrivelse av simuleringene

Dette vedlegget inneholder detaljerte beskrivelser av de ulike simuleringene i Simulex og Pathfinder. Der det er skrevet samme utforming, referes det til simulering med samme SimID utført tidligere.

Simld	Antall på hvert tribuneområde				Totalt	Modus	Tid	Kommentarer
	Nord	Øst	Sør	Vest				
120-newdoor	884	1026	888	1029	3827	steering	149.5	Gangpassasje på 120 cm
130-newdoor	884	1026	888	1029	3827	steering	143.7	Gangpassasje på 130 cm
140-newdoor	884	1026	888	1029	3827	steering	141.1	Gangpassasje på 140 cm
140-newdoor02-wider-stairs	884	1026	888	1029	3827	steering	144.0	Trappbredde på 130 cm på sørsiden av arenaen
140-newdoor02-wider-stairs02	884	1026	888	1029	3827	steering	142.3	Bredde på 130cm i alle trappene
140-newdoor02-fewer-exits	884	1026	888	1029	3827	steering	143.4	Fjernet tilleggsutgangene på 120 cm ved rampene
140-newdoor02-very-few-exits	884	1026	888	1029	3827	steering	140.9	Fjernet ekstraintgangene på 200 cm i NØ og NV
140-newdoor03-1.2m-door-all-stairs	884	1026	888	1029	3827	steering	148.5	Redusert utgangsdører fra trapper i nord til 120 cm
140-newdoor03-1.7m-wide-doors	884	1026	888	1029	3827	steering	149.3	Redusert alle utgangsdører på 200 cm til 170 cm
140-newdoor03-1.7m-wide-doors-long-repos	884	1026	888	1029	3827	steering	145.7	Forlengt trapperrepos i nord til 6.5 m.
140-newdoor-04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	884	1026	888	1029	3827	steering	142.4	Fjernet trapp fra nivå 1 til nivå 1.5 for å bedre personstrømmen. Personer som ville opp hindret personer ovenfra i å bruke utgangsdøren, samt at det var god plass nede. Repos forkortet til opprinnelig lengde på 1.5 m.
140-newdoor04-1.7m-wide-doors-moved	884	1026	888	1029	3827	steering	146.8	Flyttet utgangsdører til mindre hensiktsmesselig lokasjon
130-newdoor-04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	884	1026	888	1029	3827	steering	145.3	Som 140-newdoor-04-1.7m-wide-doors-no-upstairs, men med gangpassasje på 130 cm
130-newdoor	884	1026	888	1029	3827	SFPE	150.8	Som ved 130-newdoor, men ved bruk av SFPE mode
130-newdoor-04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	884	1026	888	1029	3827	SFPE	169.8	Som ved 130-newdoor04,,, men ved bruk av SFPE mode
130-newdoor	884	1026	888	1029	3827	SFPE-BC	187.5	Tar betydelig lengre tid når BC er aktivert
140-newdoor04-1.7m-wide-doors-moved	884	1026	888	1029	3827	SFPE-BC	195.8	SFPE med "Basic Collisions"
140-newdoor-04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	884	1026	888	1029	3827	SFPE-BC	201.8	

Figur B.1: Fullsatt håndballkamp i Patchfinder



SimID	Antall på hvert tribuneområde			Totalt	Modus	Tid	Kommentarer
	Spilleflaten	Øst	Sør				
130-newdoor07-standing-v0	2600	515	610	514	steering	144.0	Uniform personfordeling i midten foran, ellers tilfeldig fordeling (på spilleflaten)
130-newdoor07-standing-v1	2600	515	610	514	steering	152.8	Uniform personfordeling i midten foran, ellers tilfeldig fordeling (på spilleflaten). Tegnet inn sperrevegger mellom de ulike fordelingene
130-newdoor07-standing-v2	2600	515	610	514	steering	175.8	Ledet de sittende oppover til rømnig, mens de stående skulle rømme på rampene. Tegnet inn sperrevegger for å lede lede personer i spesifikke retninger.
130-newdoor07-standing-v3	2600	515	610	514	steering	172.8	Brukte "Waypoints" for å lede personer til spesifikke utganger. Noen valgte å gå en omvei til waypointsene og hindret dermed personer gående i motsatt retning.
130-newdoor05-isles-and-corners-uniform	1842	515	610	514	steering	136.8	Personer plassert kun på selve stolradene, ved bruk av uniform personfordeling
130-newdoor06-more-doors	1842	515	610	514	steering	144.0	Satt inn en ekstra utgangsdør på 120 cm ved rampe på østsida og vestsida av arenaen
130-newdoor06-more-doors-x2	1842	515	610	514	steering	145.3	Satt inn enda en utgangsdør på 120 cm på østsida og vestsida av arenaen
130-newdoor-1800	1842	515	610	514	steering	141.3	Økt avstand mellom sitteplasser og tribunen til 180 cm, utgangsdører er tilbake til vanlig (8 x 170 cm + 10 x 120 cm). Uniform personfordeling
130-newdoor-1800-4columns	1784	515	610	514	steering	137.3	Forsøkt med 4 seksjoner i bredden på spilleflaten, gir også et mindre persontall på spilleflaten
130-newdoor-1800gangpassasje	1784	515	610	514	steering	126.5	Kun 3 seksjoner i bredden, men økt avstanden mellom alle seksjonene til 180 cm
130-newdoor-1800gangpassasje-v2	1784	515	610	514	steering	123.0	Redusert lengden på radene fremst ved scenen for å øke tilgjengelig forflytningsbredde rundt hjørnene på scenen
130-newdoor-1800gangpassasje-v3	1784	515	610	514	steering	120.8	Små lengdejusteringer på stolradene i forhold til ...v2
130-newdoor07-standing-v0	2600	515	610	514	SFPE	188.3	Samme utforming, bare SFPE
130-newdoor-1800-4columns	1784	515	610	514	SFPE	167.0	Samme utforming, bare SFPE
130-newdoor-1800gangpassasje-v3	1784	515	610	514	SFPE	159.0	Samme utforming, bare SFPE
130-newdoor07-standing-v0	2600	515	610	514	SFPE-BC	210.9	Samme utforming, bare SFPE og "Basic Collisions"
130-newdoor-1800gangpassasje-v3	1784	515	610	514	SFPE-BC	175.5	Samme utforming, bare SFPE og "Basic Collisions"

Figur B.2: Fullsatt konsert i Pathfinder

<b>SimID</b>	<b>Antall personer</b>	<b>Modus</b>	<b>Tid</b>	<b>Kommentarer</b>
messe-v1	1000	steering	108.3	Ganske dårlig utforming med hensyn til reolbruk på spilleflaten
messe-v2	1500	steering	143.3	Samme som messe-v1, endret persontallet til 1500
messe-v3	1500	steering	82.3	Forsøkt med en bedre reolløsning der reolene leder personer naturlig mot rampene og dermed utgangsdørene
messe-v4	1500	steering	72.0	Laget større avstand mellom reolene midt på spilleflaten, samt lagt til korte reoler i nord og sør av arenaen
messe-v3	1500	SFPE	92.3	Samme utforming, bare SFPE
messe-v4	1500	SFPE	96.0	Samme utforming, bare SFPE
messe-v3	1500	SFPE - BC	129.0	Samme utforming, bare SFPE med ``Basic Collisions``
messe-v4	1500	SFPE - BC	119.8	Samme utforming, bare SFPE med ``Basic Collisions``

Figur B.3: Messe i Pathfinder

<i>SimID</i>	<i>Totalt</i>	<i>Modus</i>	<i>Tid</i>	<i>Kommentarer</i>
130-newdoor-04-1.7m-wide-doors-no-upstairs	3827	steering	150.2	Fjernet én tunell og utgangsdør (Blokkering)
130-newdoor07-standing-v0	4239	steering	151.3	Fjernet én tunell og utgangsdør (Blokkering)
130-newdoor-1800gangpassasje-v3	3423	steering	128.0	Fjernet én tunell og utgangsdør (Blokkering)
messe-v4	1500	steering	75.6	Fjernet én tunell og utgangsdør (Blokkering)

Figur B.4: Blokkering av rømmingsvei i Pathfinder

<i>SimID</i>	<i>Antall på hvert tribuneområde</i>				<i>Modus</i>	<i>Tid</i>	<i>Kommentarer</i>
	Nord nedre	Nord øvre	Øst nedre	Øste øvre			
test10.a	600				Simulex	275.6	Nedre del av tribune nord
test10.a2	600				Simulex	277.5	Tegnet inn sperrelinjer for å lede personer ut til yttersving. Forsøk på å utnytte hele bredden av rampene.
test10.b			488		Simulex	153.3	Nedre del av tribune øst; alle sitteplassene. Brukte "distance maps" for å lede personer til de østlige rampene
test11.aستاende		538			Simulex	206.9	Øvre del av tribune nord. Tegnet inn sperrelinjer i overkant av tribunen, samt i sving, slik at personer rømmer ned trappene til nivå 1.5
test12.aستاende		607			Simulex	192.3	Flyttet sperrelinje en rad ned slik at øvre rad må rømme via trappeløpet. Trapp i NØ-hjørne ble flyttet fra høyre til venstre side av sjakten
test12.bستاende				269	Simulex	157.4	Øvre del av tribune øst. Kun ståplassene
test12.a	535				Simulex	246.0	Nedre del av tribune nord. Alle sitteplassene untatt øverste rad (tilhører nå øvre del)
test13.a	413				Simulex	200.0	Nedre del av tribune nord. De tre øverste radene tilhører nå øvre del av tribunen
test13.aستاende		743			Simulex	227.6	Øvre del av tribune nord. Ståplasser + 3 øverste rader med sitteplasser
test13.bستاende				307	Simulex	183.1	Øvre del tribune øst. Sperrelinjer i svingene er flyttet noe slik at flere personer tilhører tribune øst
test14.aستاende		659			Simulex	207.2	Øvre del tribune nord. Sperrelinjer i sving på samme sted som for test13.bستاende
test14.bستاende				353	Simulex	195.0	Samme utforming som test13.bستاende, men med mer personer

Figur B.5: Fullsatt håndballkamp i Simulex

SimID	Antall på hvert tribuneområde		Modus	Tid	Kommentarer
	Spilleflaten	Totalt			
Test35.staende	1300	2129	Simulex	244.9	Stående personer på spilleflaten. Ble brukt sperrelinjer og ``distance maps`` for å lede personer til respektive utganger
Test36.sittende	850	1728	Simulex	330.1	Sittende personer på spilleflaten. Ble benyttet sperrelinjer for å lede personer til respektive utganger. Veldig mange benyttet den sydlige rampen i øst
test37.sittende	850	1728	Simulex	205.0	Sperrelinjer ble flyttet/endret noe i forhold til test36.sittende, samt at det ble benyttet ``distance maps`` for å lede personer mot utgangene i nord. Noen personer låste seg
Test38.sittende	850	1717	Simulex	195.0	Sperrelinjer ble flyttet/endret noe iforhold til test37.sittende, det samme gjelder ``distance maps``. Noen personer låste seg

Figur B.6: Fullsatt konsert i Simulex

<i>SimID</i>	<i>Antall personer</i>	<i>Modus</i>	<i>Tid</i>	<i>Kommentarer</i>
test20.messe	1497	Simulex	298.1	Brukte den dårligste utformingen fra Pathfinder (tilsvarer messe-v2)
test21.messev2	1500	Simulex	180.1	Samme utforming som messe-v4 i Pathfinder
test22.messev2	1500	Simulex	175.4	Samme utforming som test21.messev2, men benyttet "distance maps" for å lede personer mot de nordlige rampene
test23.messev2	1500	Simulex	170.9	Samme utforming som test22.messev2, men benyttet persontypen "shoppers" og noe modifiserte "distance maps"

Figur B.7: Messe i Simulex

<i>SimID</i>	<i>Antall personer</i>	<i>Modus</i>	<i>Tid</i>	<i>Kommentarer</i>
messe-v4	1500	steering	73.2	Forsøkt å definere kontormedarbeidere, samt v = 1.4 m/s
messe-v4	1500	SFPE	91.6	Forsøkt å definere kontormedarbeidere, samt v = 1.4 m/s
messe-v4	1500	SFPE - BC	111.7	Forsøkt å definere kontormedarbeidere, samt v = 1.4 m/s

Figur B.8: "Kontorarbeidere" i Pathfinder

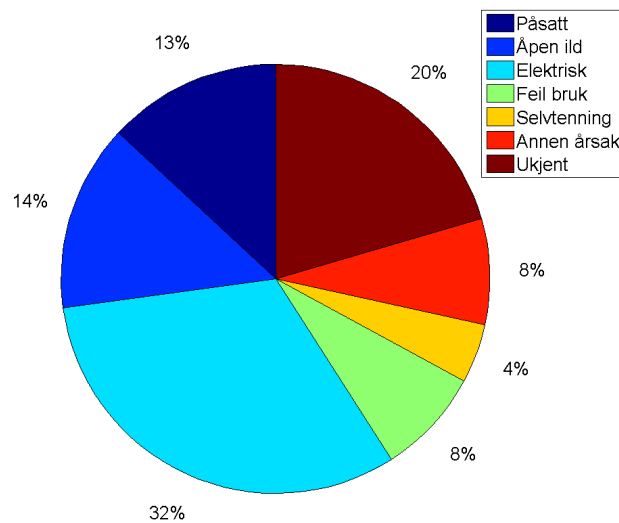




## Vedlegg C

# Alternativ fordeling av brannårsaker

Dette vedlegget viser en alternativ årsaksfordeling der “ukjent” årsak er inkludert som en egen kategori, se Figur C.1.



Figur C.1: Årsaker til brann i næringsbygg der “ukjent” årsak er inkludert som en egen kategori