



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Risikostyring

Vårsemesteret, 2014

Åpen

Forfatter:

Siri Herlin Walaker

.....
(signatur forfatter)

Fagansvarlig:

Roger Flage

Veiledere:

Bjarne Christian Hagen (Høgskolen Stord/Haugesund)

Roger Flage (Universitetet i Stavanger)

Tittel på masteroppgaven:

Usikkerhet knyttet til predikering av nødvendig rømningstid ved brann

Engelsk tittel:

Uncertainty associated with the prediction of required safe egress time in case of fire

Studiepoeng: 30

Emneord:

Usikkerhetsanalyse

Modellusikkerhet

Funksjonsbaserte analyser

Nødvendig rømningstid

Evakueringsmodellering

Menneskelige faktorer

Sidetall: 53

+ vedlegg: 12

Stavanger, 16 juni 2014

”They are all guessing; if they knew for certain,
they would not be dealing with risk” (John Adams)

Forord

Denne masteroppgaven avslutter det to-årige studieløpet ved Universitetet i Stavanger (UiS) under vårsemesteret 2014. Masteroppgaven er utført ved Institutt for industriell økonomi, risikostyring og planlegging. Arbeidet med oppgaven utgjør 30 studiepoeng

Ved valg av masteroppgave hadde jeg et ønske om å skrive om et tema innenfor fagområdet brann sikkerhet, og jeg lengtet tilbake til fagmiljøet på Høgskolen Stord/Haugesund. Interessen for brannteknisk modellering og et ønske om å lære mer om evakuering av mennesker ved brann resulterte i oppgaven: «*Usikkerhet knyttet til predikering av nødvendig rømningstid ved brann*».

Med det ønsker jeg å takke samtlige på Høgskolen Stord/Haugesund for muligheten til en hyggelig gjensitt, praktisk hjelp i forbindelse med oppgaveskrivingen og for lån av kontor. En oppmerksomhet rettes til alle som spesielt har bidratt i arbeidet med denne masteroppgaven.

- Takk til ekstern veileder, Bjarne Christian Hagen ved Høgskolen Stord/Haugesund som har bidratt bl.a. til det brannfaglige i oppgaven, gitt mange gode innspill og veiledet godt.
- Roger Flage ved Universitetet i Stavanger, som har anbefalt metode og gitt ulike innspill til hvordan en ny metode kan anvendes i en brannteknisk usikkerhetsanalyse.
- Birgitte Storstein for et godt samarbeid og mye god diskusjon. Takk for glede, motivasjon og oppmuntring som du har gitt meg i løpet av semesteret.
- David R. U. Johansen ved Høgskolen Stord/Haugesund som har bidratt med sin kunnskap når det gjelder modellering, for korrekturlesning og for god støtte.
- Barbro Storm i Sweco Norge AS for å ha tatt seg tid til å besvare flere spørsmål om evakueringsmodellering.

Haugesund, juni 2014

Siri Herlin Walaker

Sammendrag

Evakueringsmodellering brukes ofte som et hjelpemiddel i funksjonsbaserte analyser for å predikere evakueringstid, dvs. hvor lang tid det tar for alle personene å evakuere en bygning. Modellene reflekterer variasjoner i evakueringstid. Denne oppgaven vil ta for seg modellusikkerhet knyttet til prediksjon av evakueringstid ved hjelp av evakueringsmodellering. Modellusikkerhet er usikkerhet om verdien til modellfeilen, og er en kombinasjon av tre komponenter: parameterusikkerhet, strukturell modellusikkerhet og kompletthetsusikkerhet.

En sensitivitetsanalyse er utført for modellparameterne. Evakueringstiden var mest sensitiv ovenfor variasjoner i personantallet og strømningsraten. Evakueringstiden var ikke sensitiv for variasjoner i reaksjonstiden og forflytningshastigheten, men det eksisterer likevel epistemisk usikkerhet ved tallfesting av disse fordi analytikerens bakgrunnskunnskap kan være svak, spesielt med tanke på menneskelige handlingsmønstre. Kilder til usikkerhet kan også komme fra modellens struktur. Derfor bør analytikere kjenne godt til modellens oppbygning, og de begrensninger som kan føre til modellfeil.

Metoden som anvendes i usikkerhetsanalysen er en ny måte å behandle modellusikkerhet på i sammenheng med brannteknisk modellering. Metoden ble spesifikt brukt for å vurdere en delmodell for forflytningshastigheten i evakueringsmodellen STEPS, hvor antakelsene og prinsippene som modellen bygger på betraktes. Disse antakelsene blir behandlet som potensielle bidragsyttere til modellusikkerhet, og ved hjelp av antakelsene kunne de faktorene som evakueringstiden påvirkes av bli vurdert med hensyn på usikkerhet.

Usikkerhetsanalysen viste at metoden egner seg godt til å analysere usikkerhet i matematiske modeller hvor et fenomen eller system bygger på et sett av antakelser som en følge av modellens egenskaper. Den studerte delmodellen ble vurdert å være en akseptabel modell for å uttrykke forflytningshastighet som en normalfordelt størrelse i evakueringsmodellering.

Fordelen med metoden var at den ga klare indikasjoner på hvor hvilke antakelser som var mest usikre, og at den strukturelle modellusikkerheten kunne knyttes mot antakelsenes usikkerhet- og sensitivitetsgrad. Ved å utføre analysen kan analytikeren også vise hvor velfundamentert bakgrunnskunnskapen er som ligger til grunn for vurderingen, og dermed øke troverdigheten til prediksjonene.

Videre ble det konkludert med at for antakelser fra (del)modeller som gir små usikkerhetsbidrag slik analysen av delmodellen gjorde var det lite meningsfylt med en detaljert analyse. Fra et helhetlig perspektiv ble den valgte metoden derfor vurdert å være for ressurskrevende å anvende for den studerte delmodellen. For modeller med små usikkerhetsbidrag kan usikkerheten derfor enten gjøres kjent eller vurderes ved hjelp av en kvalitativ analyse. Det gis derfor forslag til hvordan modellusikkerhet kan håndteres med tanke på brukervennligheten i sammenheng med evakueringsmodellering.

I sum viser rapporten viktigheten av å bruke usikkerhetsanalyse ved brannteknisk modellering. Antakelsene i delmodellen som ble undersøkt hadde ikke stor nok sensitivitet og usikkerhet for å bruke en så omfattende metode for håndtering av usikkerhet. Det påpekes derfor at når større deler av evakueringsmodellen skal vurderes med hensyn på usikkerhet vil rammeverket presentert i denne rapporten i mye større grad vise hvorvidt det er usikkerhet i prediksjonene av nødvendig rømningstid.

Innholdsfortegnelse

1	INNLEDNING.....	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Formål og problemstilling.....	2
1.3	Avgrensninger	2
1.4	Forkortelser.....	3
1.5	Strukturen i rapporten.....	3
2	TEORI.....	4
2.1	Risiko.....	4
2.1.1	Sannsynlighet	5
2.1.2	Risikoanalyse.....	6
2.2	Usikkerhet.....	7
2.2.1	Modellering i risikoanalyser.....	7
2.2.2	Modellfeil og modellusikkerhet.....	8
2.2.3	Usikkerhet i evakueringsmodellering.....	9
2.3	Rømningsteori	11
2.3.1	Deteksjonstid	13
2.3.2	Evakueringstid.....	13
2.4	Menneskelig atferd	17
2.4.1	Problemløsning.....	17
2.4.2	Kritiske faktorer som påvirker handlingsmønstre	19
2.5	STEPS.....	22
2.5.1	Agentbasert tilnærming	22
2.5.2	Geometri	23
2.5.3	Den grunnleggende mekanisme.....	24
3	METODE OG CASEBESKRIVELSE.....	26
3.1	Case	26
3.2	Definering og benevning av uttrykk og størrelser.....	26
3.3	Beskrivelse av referanseoppsett	27
3.4	Metode for sensitivitetsanalyse	29
3.5	Metode for håndtering av modellusikkerhet	30
4	USIKKERHETSANALYSE	31
4.1	Utførelse av analysen	32
4.1.1	Kvalitativ vurdering av antakelser.....	32
4.1.2	Parameterusikkerhet	35
4.1.3	Subjektive sannsynligheter	36
4.1.4	Aksept av delmodell.....	37
4.2	Resultater fra simuleringene	38

4.2.1	Simulering av referanseoppsettet.....	38
4.2.2	Sensitivitetsanalyse.....	38
5	DISKUSJON.....	40
5.1	Bidragstere til modellusikkerhet i STEPS.....	40
5.1.1	Parameterusikkerhet.....	40
5.1.2	Strukturell modellusikkerhet.....	41
5.1.3	Komplekthetsusikkerhet.....	42
5.2	Analytikerens bakgrunnskunnskap.....	43
5.3	Metode for å håndtere usikkerhet.....	43
5.3.1	Metoden i sammenheng med evakueringsmodellering.....	44
6	FORSLAG TIL HÅNTERING AV MODELLUSIKKERHET	45
Del 1.	Identifisering av modell og viktige størrelser.....	45
Del 2.	Usikkerhetsanalyse.....	46
Del 3.	Aksept av modell.....	47
7	KONKLUSJON.....	48
8	VIDERE ARBEID.....	49
I.	REFERANSELISTE.....	50
II.	APPENDIKS.....	54
A.	Kategoriklassifiseringer for usikkerhet og sensitivitet.....	54
B.	Data.....	55
B.1	Reaksjonstid.....	55
B.2	Forflytningshastighet.....	58
C.	Detaljer rundt casen.....	60
D.	Resultater fra simulering.....	61
E.	Utrekning av strukturell modellfeil.....	65

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I økende grad har evakueringsmodellering blitt en del av funksjonsbaserte analyser hvor hensikten er å kunne vurdere nivået av personsikkerhet i bygninger (Kuligowski, Peacock & Hoskins, 2010), og sikkerhetsdesignere- og ingeniører, forskere og andre fagpersoner bruker derfor evakueringsmodellering verden over. I sammenheng med brannsikkerhet er formålet å predikere hvor lang tid det tar å evakuere en bygning, og det finnes et stort antall modeller i dag, blant annet ALLSAFE, Pathfinder, PedGO, Simulex, STEPS, buildingEXODUS, og EGRESS EESCAPE (Kuligowski et al., 2010).

Disse modellene anvendes dermed som et verktøy for å simulere bevegelse av personer og det dannes et visuelt inntrykk av hvordan evakuering kan foregå i bygget. Simulering av evakuering i bygg er ifølge Pelechano og Malkawi (2008) en effektiv måte å teste sikkerheten før konstruksjon, og benyttes blant annet for å vise at funksjonskrav om brannsikkerhet gitt av myndigheten tilfredsstilles. I Norge må funksjonskravet i § 11-11 (2) i teknisk forskrift være tilfredsstillt, for å vise at bygget er tilrettelagt for sikker rømning:

«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»

For å tilfredsstille dette kravet må både den *nødvendige*- og *tilgjengelige* rømningstiden predikeres, og det er i sammenheng med den *nødvendige* rømningstiden at evakueringsmodellering ofte anvendes. Med *nødvendige* rømningstiden menes den totale tiden det kreves for personer å rømme et byggverk fra brannen blir detektert (DiBK, 2010), og kan deles opp i deteksjonstid samt menneskenes reaksjon- og forflytningstid (NBI, 2006).

Bakgrunnen for denne oppgaven er å se hvordan usikkerhet behandles når en skal predikere *nødvendige* rømningstid, da den *nødvendige* rømningstiden blir påvirket av en rekke faktorer fra både brannen, bygget og mennesket (Kobes, Helsloot, Vries & Post, 2010) hvor fokuset vil være på evakueringstiden.

Det er hovedsakelig to årsaker til at oppgavens problemstilling er aktuell. For det første blir evakueringsmodellering sett på som et nyttig verktøy under predikering av *nødvendig* rømningstid og for å gi et visuelt bilde om hvordan menneskene vil forflytte seg i bygget. På en annen side mener flere forskere og andre fagpersoner at det fortsatt mangler både kunnskap og data om ulike menneskelige handlingsmønstre ved en brann, og at mangelen bidrar til usikkerhet i analysene (Kuligowski, 2009; Kobes et al., 2010; Proulx, 2002; Purser & Bensilum, 2001; ISO, 1999; Magnussen, Frantzich & Harada, 1996).

Den andre årsaken til at problemstillingen er aktuell er at innen risikofeltet er konseptet om modellusikkerhet svært sentralt, men likevel finnes det ingen fast praksis om hvordan modellusikkerhet skal håndteres i analyser (Bjerga, Aven & Zio, 2014), herunder brann-tekniske analyser. I denne rapporten vurderes modellusikkerhet i forhold til evakueringsmodellering og hvordan en usikkerhetsbeskrivelse kan inkluderes og forstås med hensyn på modellusikkerhet.

1.2 Formål og problemstilling

I denne oppgaven ønskes det å belyse hvilke utfordringer en står ovenfor når en skal predikere nødvendig rømningstid. Problemstillingene i oppgaven er som følgende:

- Identifisere bidragsyttere til usikkerhet knyttet til predikering av nødvendig rømningstid
- Teste ny metode og komme med forslag til hvordan usikkerhet kan behandles bedre i sammenheng med predikasjon av nødvendig rømningstid
- Demonstrere hvilken effekt antakelser har på nødvendig rømningstid

1.3 Avgrensninger

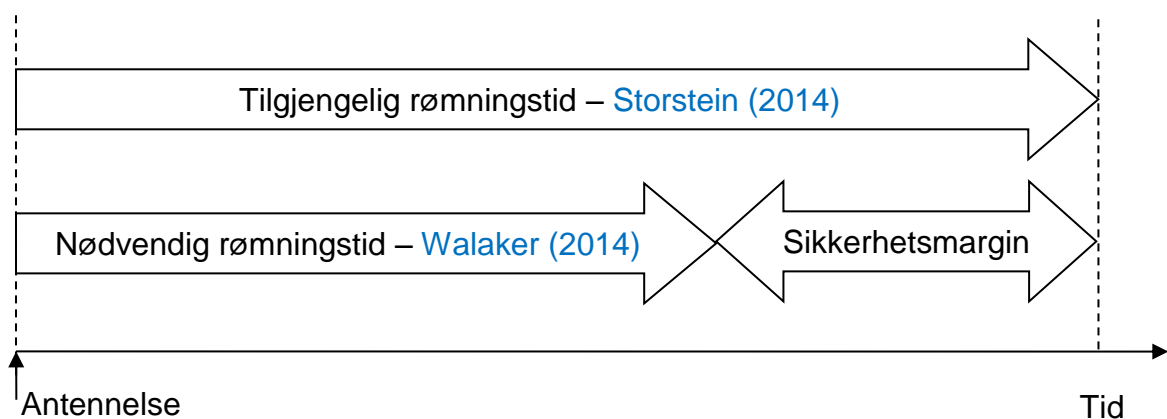
Det ble gjort følgende avgrensninger i denne oppgaven:

- Den nødvendige rømningstiden består av deteksjon- og evakueringstid, hvor det er evakueringstiden som blir sett på
- For å identifisere usikkerhetsbidrag i evakueringsmodellering brukes evakueringsmodellen STEPS
- I usikkerhetsanalysen ble kun forflytningshastighet (en delmodell i STEPS) vurdert i forhold til utprøving av ny metode
- Det vil kun vurderes et hendelsesforløp i analysen: deteksjonssystemet fungerer gitt at en brann oppstår

Tilleggsopplysning:

Det er benyttet en casetilnærming for å predikere nødvendig rømningstid.

I Storstein (2014) er samme case brukt for å predikere tilgjengelig rømningstid, slik at rapportene kan sees i sammenheng. Figur 1 viser forholdet mellom tilgjengelig- og nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin. Rapporten kan derfor sees i sammenhengen mellom Storstein (2014).



Figur 1: Sammenheng mellom Storstein (2014) og Walaker (2014)

1.4 Forkortelser

Forkortelser	Beskrivelse
ABA	Automatisk brannalarmanlegg
DiBK	Direktoratet for byggekvalitet
DSB	Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap
NBI	Norsk byggeteknisk institutt
NFPA	National Fire Protection
NS	Standard Norge
Ptil	Petroleumstilsynet
SFPE	Society of Fire Protection Engineering
SNL	Store norske leksikon
ISO	International Organization for Standardization
TEK	Teknisk forskrift
VTEK	Veiledningen til teknisk forskrift

1.5 Strukturen i rapporten

Strukturen i rapporten på et overordnet nivå presenteres under.

Kapittel og innhold:

2. Relevant teori for oppgaven
3. Beskrivelse av metode, case og scenarier som benyttes i usikkerhets- og sensitivitetsanalysen
4. Usikkerhetsanalysen presenteres sammen med resultater fra sensitivitetsanalysen
5. Resultatene fra kapittel 4 diskuteres sammen med teorisøket fra kapittel 2
6. Forslag til håndtering av usikkerhet i sammenheng med evakueringsmodellering.
7. Konklusjon
8. Noen forslag til videre arbeid basert på funnene i rapporten

2 Teori

I dette kapitlet vil relevant teori for oppgaven bli presentert. Kapittel 2.1 tar for seg risiko, hvor risikobegrepet er definert og en innføring i ulike typer usikkerhet er gitt. I 2.2 presenteres teori rundt usikkerhet i sammenheng med modellering. I kapittel 2.3 presenteres rømningsteori hvor begrepet nødvendig rømningstid blant annet vil bli forklart nærmere. I kapittel 2.4 blir teori om menneskelig atferd presentert. Det vil bli gitt en innføring i hvordan programmet STEPS brukes i sammenheng med evakueringsmodellering, og hvilke prinsipper modellen bygger på i kapittel 2.5.

2.1 Risiko

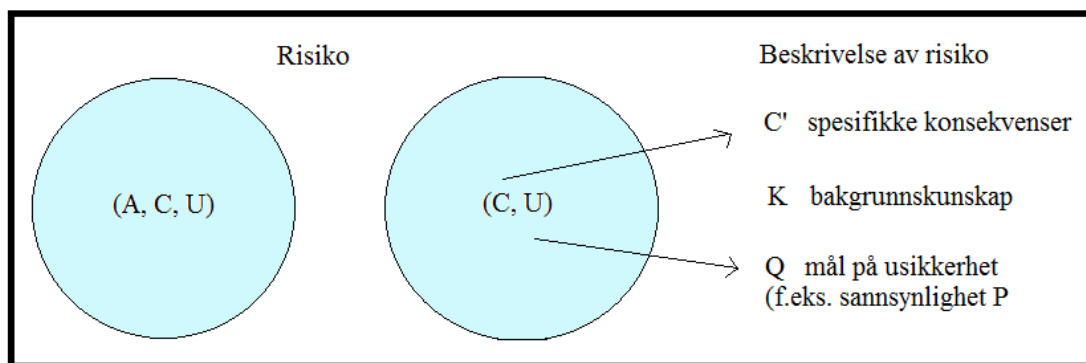
Dette kapitlet vil først innledes med å definere konseptet risiko, for og deretter presentere ulike fortolkninger av sannsynlighet og til slutt risikoanalysen som verktøy.

Risiko er forbundet med en rekke situasjoner og aktiviteter, og mennesket står ovenfor risiko både som en privatperson, i arbeidslivet og i samfunnet (Aven, 2010). Ifølge Ptil (2014) kan ingen aktiviteter skje uten risiko, og Aven (2010) melder et behov for å forstå, beskrive, analysere, styre og kommunisere risiko.

Ifølge Aven (2010) kan konseptet risiko bli definert som en todimensjonal kombinasjon av:

1. hendelser (A) og konsekvenser av hendelsene (C), og
2. den tilhørende usikkerheten (U) om hvilke hendelser som vil inntreffe og hva konsekvensene vil bli.

En misoppfatning med risiko er at konseptet kun relateres til negative konsekvenser (Aven, 2010). Ut ifra definisjonen kan en se at konsekvensene av hendelsene ikke defineres som negative, dvs. at utfallet eller konsekvensen av en hendelse kan også være ønsket eller positiv. Denne definisjonen kalles ofte (A, C, U) perspektivet på risiko, se figur 2, og gir en bred tilnærming til risiko som kan bli tilpasset i flere sammenhenger.



Figur 2: Hvordan beskrivelsen av risiko er avledet fra konseptet risiko (Aven, Baraldi, Flage & Zio, 2014)

Figur 2 viser boblene (A, C, U) og (C,U) som begge er definisjoner på konseptet risiko. Teksten til høyre viser hvordan det er mulig å beskrive risiko.

I figur 2 illustreres (C , Q , K), som en beskrivelse av risiko, hvor C er observerbare størrelser som karakteriserer konsekvensene C (f.eks. skadekostnad). Q er et mål på usikkerhet om C og K representerer den kunnskapen som C og Q er basert på (Aven, 2012). Sannsynlighet er det vanligste verktøyet å bruke for å beskrive usikkerhet og vil bli skrevet om i 2.1.1, det kan brukes sannsynlighetsintervaller og kvalitative metoder for Q (Aven, 2012).

2.1.1 Sannsynlighet

Det brukes ofte sannsynligheter for å uttrykke usikkerhet i risikoanalyser (Aven, 2012). Siden det eksisterer flere sannsynlighetsfortolkninger vil det bli gitt en kort innføring om ulike fortolkninger i dette kapitlet.

Frekvensbasert sannsynlighet

Aven & Reniers (2012, s. 226) definerer frekvensbasert sannsynlighet som:

«andelen av antall ganger hendelsen A forekommer hvis situasjonene kan betraktes å være repetert (hypotetisk) et uendelig antall ganger»

I tilfeller hvor utfallet er symmetrisk balansert (kaste terning, mynt/krone o.l.) er det meningsfylt at sannsynligheten blir fortolket som en frekvensbasert sannsynlighet (Aven & Reniers, 2012). Frekvensbasert sannsynlighet blir betraktet som en objektiv sannsynlighet (Aven & Reniers, 2012). Med objektiv menes en sann sannsynlighet som ikke er avhengig av bakgrunnskunnskap eller en vurdering eller mening fra en person.

Subjektive sannsynlighet

Sannsynligheter som er påvirket av intuisjon, personlig tro og andre indirekte informasjonskilder kalles gjerne subjektive sannsynligheter (Walpole et al., 2012). Subjektive sannsynligheter uttrykker usikkerhet eller «grad av tro», og er betinget av all den relevante informasjonen (bakgrunnskunnskap) som er kjent på et gitt tidspunktet (Notarianni, 2002).

En måte å tolke en subjektiv sannsynlighet er å knytte det til en usikkerhet standard, vanligvis en urne. F.eks. dersom analytikeren tildeler en sannsynlighet på 0,1 for en gitt hendelse betyr det at analytikeren har den samme usikkerheten, eller grad av tro, for denne hendelsen skal skje som å trekke en bestemt kule ut av en urne inneholder 10 kuler (Aven & Reniers, 2012).

Upresise sannsynlighetsintervall

Sannsynlighetsintervallet brukes for å representere usikkerhet om en hendelse (A), og kan gis på følgende måte: $[P_a, P_b]$ hvor P_a er den nedre sannsynligheten for en bestemt hendelse (A) og P_b er den øvre sannsynligheten (Aven, 2013).

For å illustrere hvordan sannsynlighetene kan tolkes: en person tildeler sannsynlighetsintervallet for en hendelse (A) å være: $[0,1, 0,3]$. Dette innebærer at personen har en «grad av tro» som er større enn å plukke tilfeldig en bestemt kule ut i fra en urne med 10 kuler, og ikke mindre enn en «urne sjanse» på 0,3 (Aven, 2013) for at hendelsen (A) forekommer.

2.1.2 Risikoanalyse

Risikoanalyser handler om å utvikle en forståelse av risikoen (ISO, 2009), hvor hovedformålet ved gjennomføringen av analysen er å støtte en beslutningstakingsprosess (Nilsen & Aven, 2003). Gjennom en risikoanalyse kan både sikre og usikre størrelser bli tatt hensyn til slik at det er mulig å beregne i hvilken grad fremtidige hendelser eller scenarioer kan forventes (Nilsen & Aven 2003). Dermed vil risikoanalysen gi en basis for å sammenligne ulike valg (f.eks. handlinger) under usikkerhet hvor formålet er å beskrive usikkerhet om verden. Ifølge Frantzych (1998) kan risikoanalyser bli delt inn i tre nivåer, avhengig av hvor detaljert analysen skal være og de tilgjengelige ressurser:

- Kvalitative (ikke-tallfestet) metoder: typisk HAZOP analyser og «hva hvis»-sjekklister
- Semi-kvantitative metoder: Helt eller delvis basert på kvalitative vurderinger. Typisk indeksmetoder, punktskjema eller nummeringsgradering
- Kvantitative (tallfestet) metoder: den mest omfattende analysemetoden hvor enten en deterministisk eller probabilitisk metode brukes

En risikoanalyse inneholder ofte en usikkerhetsanalyse og en sensitivitetsanalyse. En usikkerhetsanalyse utføres for å identifisere og analysere risiko (ISO, 2009), og referer til å beskrive usikkerheter (Aven, 2010). Det finnes flere typer metoder som kan brukes i usikkerhetsanalyser, blant annet kvantitative og kvalitative (Bjerga et al., 2014).

En sensitivitetsanalyse blir ofte forbundet med usikkerhetsanalysen, men er ikke det samme (Aven, 2010). I en sensitivitetsanalyse blir det vist hvor sensitiv resultatet (risikoindeksen) er i forhold til endringer i antakelser og inngangsparametere. Ved å utføre en sensitivitetsanalyse kan det dermed avdekkes hvilke inngangsparametere eller antakelser som vil gi de største risikoendringene. Sensitivitetsanalysen forteller derfor ikke hvilken verdi som skal brukes, men innflytelsen på resultatet (f.eks. evakueringstid) ved å endre på de ulike inngangsparametere.

2.2 Usikkerhet

Siden usikkerhet er et viktig begrep innen branntekniske analyser og risiko er det viktig med en god forståelse av begrepet. Ifølge Notarianni (2002) er usikkerhet et bredt og generelt begrepet som kan deles inn i flere undergrupper. I dette kapitlet defineres derfor ulike typer av usikkerhet i forbindelse med modellering og risikoanalyser.

Generelt kan usikkerhet i risikoanalyser deles inn i to hovedkategorier: *aleatorisk* og *epistemisk* usikkerhet (Paté-Cornell, 1996). Ordet aleatorisk kommer opprinnelig fra det latinske *alea* og betyr rulling av terninger, mens ordet epistemisk stammer fra det greske ordet *episteme* og betyr kunnskap (Der Kiureghian & Ditlevsen, 2009). Aleatorisk usikkerhet er også kalt tilfeldig eller stokastisk usikkerhet, og ifølge Paté-Cornell (1996) representerer aleatorisk usikkerhet variasjoner i utvalg. Aleatorisk usikkerhet kan f.eks. være:

- Variasjoner i temperaturavlesninger nøyaktig samme tid og sted gjennom flere år
- Variasjoner av forekomster av orkaner på et geografisk sted gjennom flere år

Aleatorisk usikkerhet kommer derfor enten fra kjente eller observerbare populasjoner. Denne usikkerheten kan ikke bli redusert, og blir derfor ofte kalt *ikke-reduserbar usikkerhet* (Bjerga et al., 2014). Det er f.eks. ikke mulig å gjøre noe med de variasjoner som kan observeres fra temperaturavlesninger. Epistemisk usikkerhet kommer enten fra manglete kunnskap eller data (Der Kiureghian & Ditlevsen, 2009), og kan reduseres dersom den manglende kunnskapen kan tilegnes (Bjerga et al., 2014).

I denne oppgaven fokuseres det på modellusikkerhet, som er en underkategori av epistemisk usikkerhet. I kapittel 2.2.2 vil denne usikkerhetstypen bli presentert. Kapittel 2.2.3 vil omhandle usikkerhet i evakueringsmodellering basert på det forestående.

2.2.1 Modellering i risikoanalyser

Teorien i kapittel 2.2.1 og 2.2.2 er basert på Aven & Zio (2013) og Aven (2010).

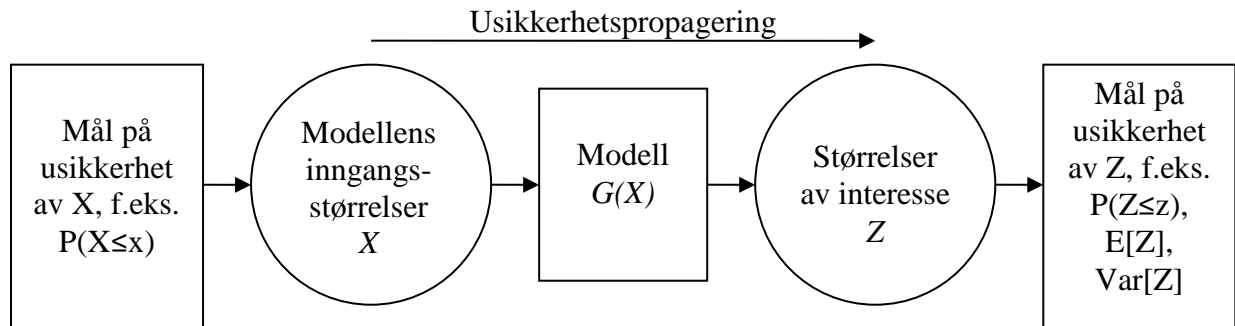
Modeller brukes ofte for å gi innsikt i et fenomen og for å kvantifisere usikkerheter i en risikoanalyse. En modell er dermed en representasjon av verden, og kan betegnes $G(X)$. Hensikten med modellen er å beskrive verden tilfredsstillende nøyaktig, men modellen bør også forenkle kompliserte forhold.

F.eks. kan evakueringsmodeller være delt opp i rutenett og gridceller (se 2.5.2) som de modellerte menneskene kan bevege seg i. En modell $G(X)$ avhenger av inngangsstørrelser X , se figur 3. Dermed er modellens *utgangsverdier* avhengig av både inngangstørrelsene X og modellen G . Z er størrelser av interesse som kan realiseres i fremtiden, og en modell $G(X)$ kan utvikles for å kunne gi en prediksjon på Z .

Verdien Z kan være svært ulike mengder av interesse, og er den *sanne* fremtidige verdien. Dvs. Z er ikke det samme som modellens utgangsverdi. Z kan være et systems nedetid, temperaturen på et geografisk sted eller nødvendig og tilgjengelig rømningstid ved brann.

I figur 3 kan et mål på usikkerhet f.eks. være sannsynligheten for at et systemes nedetid er mindre eller lik en akseptgrense x . Inngangsstørrelser legges så inn i modellen for å predikere

systemets nedetid. Modellen vil gi prediksjoner på en sann fremtidig nedetid for systemet: Z , og målene på usikkerhet av Z kan presenteres som en forventningsverdi.



Figur 3: Grunnleggende egenskaper av usikkerhetsanalyser, Aven (2010)

Siden modellen $G(X)$ kun er en representasjon av virkeligheten vil usikkerhetsbeskrivelsen av X propageres gjennom modellen for å gi en usikkerhetsbeskrivelse av størrelsen av interesse.

2.2.2 Modellfeil og modellusikkerhet

Avviket mellom prediksjonen som modellen $G(X)$ er og den sanne fremtidige verdien Z kan kalles modellfeil og betegnes $\Delta_G(X)$, definert som:

$$\Delta_G(X) = G(X) - Z \quad (1)$$

Ligning (1) viser hvordan modellfeilen $\Delta_G(X)$ kan bli utregnet. Denne feilen eller avviket kommer av at modellen kun er en forenkling av virkeligheten. Usikkerhet om denne verdien kalles modellusikkerhet. Modellfeil og modellusikkerhet er dermed ikke det samme. Modellusikkerhet er usikkerhet om verdien til modellfeilen, og er en kombinasjon av tre komponenter: parameterusikkerhet, strukturell modellusikkerhet og kompletthetsusikkerhet. Disse tre komponentene uttrykker alle epistemisk usikkerhet (Drouin et al., 2009), og vil forklares nærmere under.

Parameterusikkerhet

Parameterusikkerhet er definert i Bjerga et al. (2014, s. 48) som:

«Usikkerheten assosiert med den sanne verdien av inngangstørrelsen X »

Parameterusikkerhet er epistemisk usikkerhet (manglende kunnskap) om de sanne verdiene til parameterne X . Ved gjennomføring av en rømningsanalyse (for å predikere nødvendig rømningstid ved brann) kan det f.eks. være usikkerhet knyttet til menneskenes evne til å oppfatte signaler og bevege seg.

Strukturell modellusikkerhet

Strukturell modellusikkerhet er definert på følgende måte (Bjerga et al., 2014, s. 48):

«Den betingede usikkerhet assosiert med modell feilen $\Delta_G(X)$, gitt den sanne verdien X_{True} (dvs. $\Delta_G(X_{True})$)»

Strukturell modellusikkerhet er epistemisk usikkerhet om modellfeilen når usikkerhet knyttet til parameterne kan ignoreres. Dvs. at dersom verdiene av X er kjente eller observerbare kan usikkerheten kun knyttes til modellens struktur. Kilder til strukturell usikkerhet kan f.eks. komme av manglende kunnskap f.eks. i form av dårlig forståelse av fenomenet som studeres, eller en total ignorering av andre fenomen.

Komplettthetsusikkerhet

Komplettthetsusikkerhet assosieres med den graden modellen henvender seg til det fenomenet som studeres og er en spesiell underkategori av modellusikkerhet (Parray, 1996). Ifølge Drouin et al. (2009) er denne type usikkerhet relatert til de bidragsyterne til usikkerhet som *ikke* er inkludert i risikoanalysen, og kan være både kjente eller ukjente. Dermed er bidragsyterne til komplettthetsusikkerhet:

- Kjente men ekskludert i analysen, *eller*
- Ukjente og dermed ikke inkludert i analysen

En kjent bidragsyter til komplettthetsusikkerhet kan f.eks. være ulike feilmodi, dvs. mekanismer som kan føre til feil (Drouin et al., 2009), eller en antakelse som ansees å gi svært lite bidrag til risikoen. Drouin et al., (2009) skriver at mangel på komplettthet er ikke i seg selv en usikkerhet, men en anerkjennelse av de begrensningene som ligger i modellens omfang. Ifølge Drouin et al., (2009) kan ikke denne usikkerheten kvantifiseres. Komplettthetsusikkerhet kan dermed tolkes som en type usikkerhet som kan være vanskelig å identifisere og redusere siden de ukjente usikkerhetene ikke er synlige for den som analyserer. Komplettthet usikkerhet er også kalt usikkerhet om fullstendigheten.

2.2.3 Usikkerhet i evakueringsmodellering

Ved bruk av evakueringsmodellering er Z -verdiene (se figur 2) ofte knyttet til forhold som kan si noe om konsekvenser. Derfor kalles slike analyser ofte for konsekvensanalyser. Det kan være nyttig å dele konsekvenser inn i to nivåer: fysiske fenomener og tap (Flage & Aven, 2009). Fysiske fenomener kan f.eks. være spredning av gass, brann og eksplosjon eller metrologiske fenomener som vind, orkan og tyfon. Med tap menes f.eks. personskader, dødsfall eller materielle tap i form av verdier.

Z -verdiene er relatert til personsikkerhet i evakueringsmodellering. For å vise at et bygg er tilrettelagt for sikker rømning predikeres nødvendig og tilgjengelig rømningstid for å tilfredsstille funksjonskravet i § 11-11 (2) i TEK (se også innledning i kapittel 1). For teori rundt nødvendig og tilgjengelig rømningstid vises det til kapittel 2.3.

Oftest er konsekvensene vanskelige å predikere, og derfor er avanserte modeller utviklet slik at komplekse fenomener bedre kan forstås, men ifølge Notarianni (2002) blir ofte modellusikkerhet i modellering ignorert eller ikke tatt hensyn til.

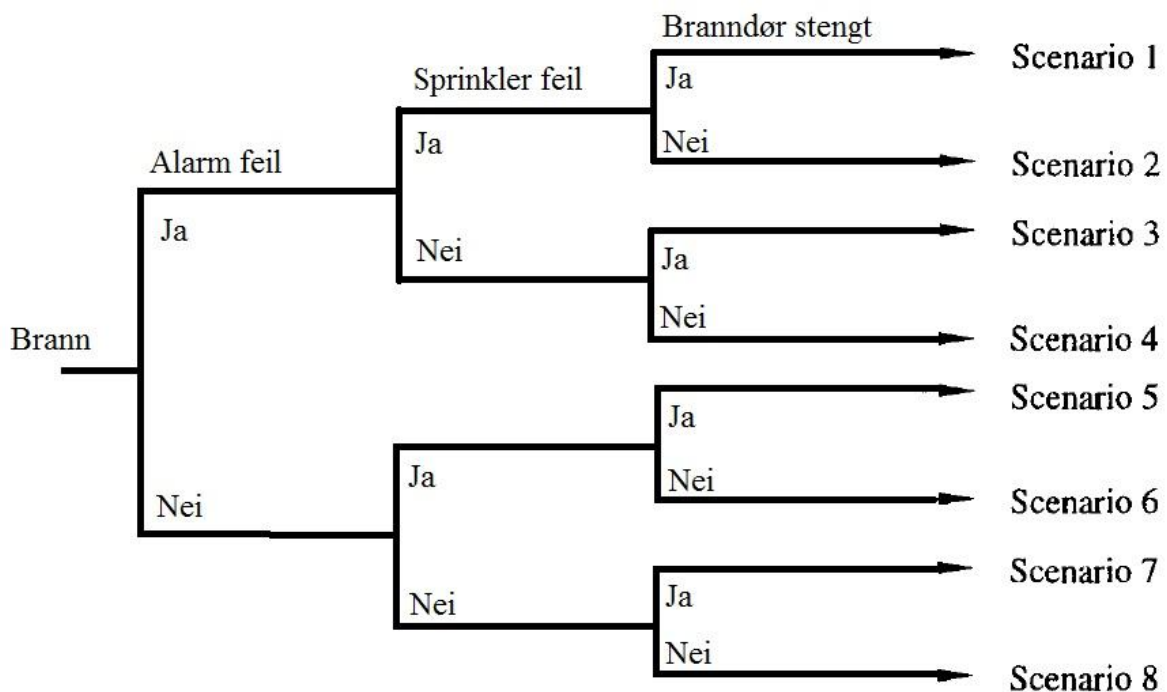
Nedenfor vises et eksempel på hvordan hendelsesforløpet i en brann og konsekvensene kan illustreres som et utgangspunkt for å håndtere usikkerhet.

Hendelsestre

Ifølge NS 3901 (Standard Norge, 2012) kan et hendelsestre illustrere mulige brannforløp i en rømningsanalyse. De alternative hendelsesforløpene som kan forekomme etter en brann er oppstått blir da visualisert i treet.

Hendelsesforløpet vil i stor grad påvirkes av ytelsen av ulike sikkerhetsfunksjoner (deteksjonsanlegg, sprinkleranlegg, automatisk stenging av branndører osv.), og derfor skal analysen omfatte hendeskjeder der sikkerhetsfunksjonene virker som forutsatt og hvor de svikter.

På denne måten vil usikkerheten i rundt flere forhold kunne identifiseres i analysen og bidra til et bredere risikobilde. Et eksempel på et hendelsestre som beskriver ulike scenarier er vist i figur 4.



Figur 4: Hendelsestre som beskriver 8 ulike hendelsesforløp, hentet fra Magnussen et al. (1996)

Hendelsestreet illustrerer at mulige stier fra brannen starter kan finnes ved å svare ja/nei på om ulike sikkerhetsfunksjoner fungerer eller ikke. F.eks. scenario 3 vil representere følgende hendelsesforløp: en brann starter hvor alarmanlegget svikter, men sprinkleranlegget utløses og branndøren blir blokkert.

Ifølge NS 3901 (Standard Norge, 2012) skal hendelsesforløpene beskrives såpass detaljert at sannsynligheter kan bli tildelt hvert scenario.

Ifølge Magnussen et al. (1996) vil valget av metode avhenge av flere faktorer, blant annet om det anvendes en datamodell eller et analytisk uttrykk. Det kan også vurderes opp mot hendelsestreet, dvs. om hele treet skal betraktes eller kun et brannforløp.

2.3 Rømningsteori

Det finnes flere begreper innen rømningsteorien som vil bli forklart og definert i dette kapitlet. Aller først vil kapitlet starte med å introdusere begrepene tilgjengelig- og nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin som er sentrale begreper innenfor rømningsteorien.

I VTEK § 11-11 (2) (2011) defineres tilgjengelig rømningstid som:

«tiden fra en brann oppstår til forholdene blir kritiske»

og nødvendig rømningstid som:

«tiden det tar å rømme et byggverk»

Det ligger i definisjonene at den nødvendige rømningstiden må være mindre enn den tilgjengelige for at sikker rømming kan skje. Dermed kalles differansen mellom tidene ofte for sikkerhetsnivået eller sikkerhetsmarginen. Ifølge Hagen (2008) kan sikkerhets(margin)-faktoren finnes ved å bruke ligning (2):

$$\text{Sikkerhetsfaktor} = \frac{\text{Tilgjengelig rømningstid}}{\text{Nødvendig rømningstid}} \cdot 100 \quad (2)$$

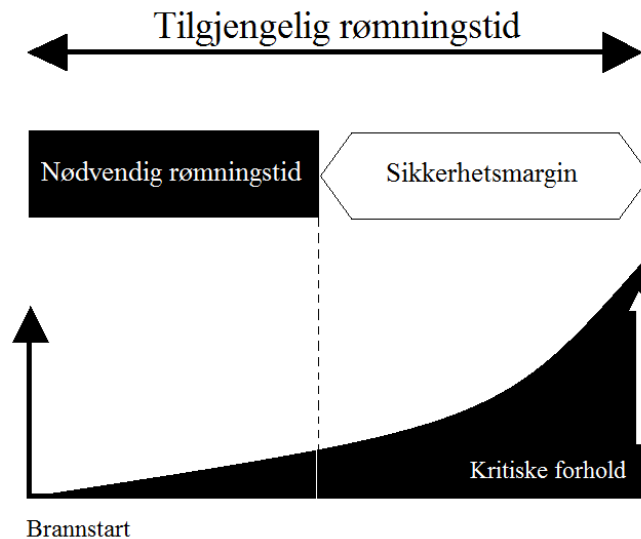
Det kan skilles mellom eksplisitte og implisitte sikkerhetsfaktorer (Notarianni, 2002). En eksplisitt sikkerhetsfaktor er en multiplikator og brukes som kriterium for å vurdere om designet/løsningen skal aksepteres. Sikkerhetsfaktoren i ligning (2) er et eksempel på en eksplisitt sikkerhetsfaktor. En implisitt sikkerhetsfaktor kan skyldes at en komponent eller en størrelse blir valgt fordi den vil bidra til ekstra sikkerhetsmargin, eller at det gjøres konservative antakelser.

Det finnes ingen innarbeidet størrelse for sikkerhetsfaktoren mellom tilgjengelig- og nødvendig rømningstid i lover, forskrifter o.l. pr. i dag (Hagen, 2008), men Bukowski (2003) gir som en generell anbefaling at sikkerhetsmarginfaktoren bør være minst 2, slik at ukjente variasjoner blir tatt hensyn til i en gitt populasjon.

Ifølge Hall & Watts (2002) er det tvetydighet knyttet til å håndtere usikkerhet i brannteknisk analyser blant annet fordi sikkerhetsfaktorer brukes til å bortforklare usikkerhet, og ifølge Notarianni (2002) er fastsettelse av slike sikkerhetsfaktorer like mye en funksjon av hvor mye troverdighet som gis den prediktive metoden som for interessentenes risikotoleranse. Sikkerhetsfaktorer skal derfor brukes til å reflektere troverdighet i prediksjonen og interessentenes risikotoleranse. Dersom det er gitt lite troverdighet til predikeringen betraktes sikkerhetsfaktoren mer som en usikkerhetsfaktor (Notarianni, 2002).

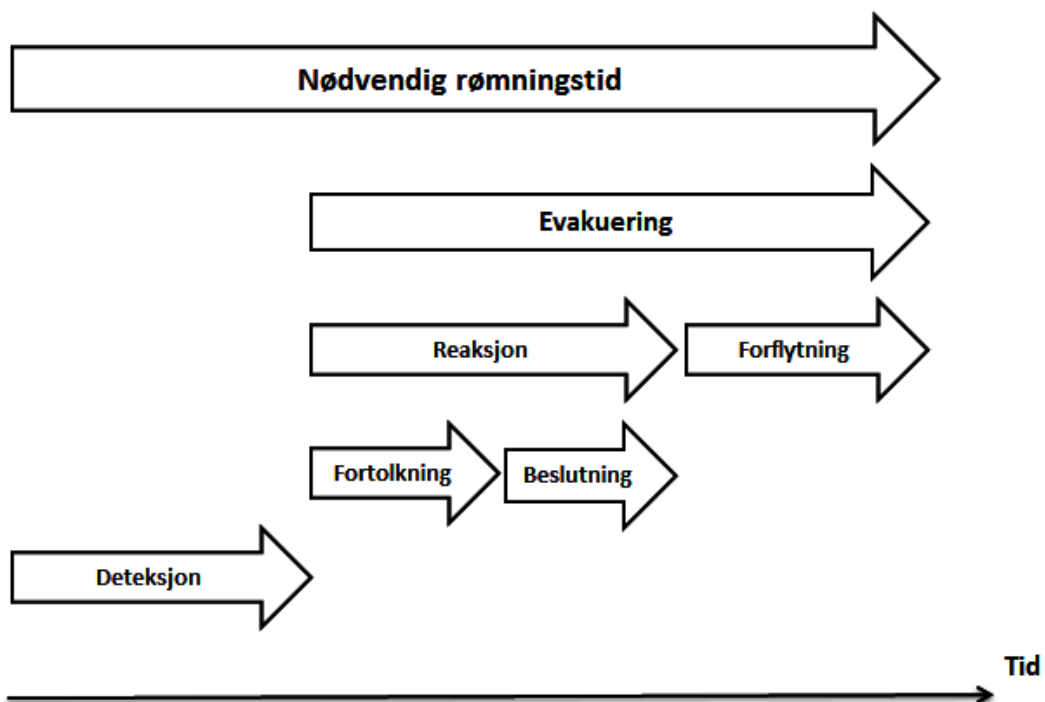
Figur 5 illustrerer både den tilgjengelige og nødvendige rømningstid med hensyn på brannstart og kritiske forhold for mennesker. Dersom brannen får lov å vokse etter brannstart, vil det etter en tid oppstå kritiske forhold for mennesker. Ifølge Deibjerg, Husted, Bygbjerg & Westermann (2003) er det kritisk for mennesker i et rom når f.eks. temperaturen i røykfri sone er ved 60-80 °C, varmestrålingen er over 2,5 kW/m² eller oksygennivået er under 15 %. Ved

evakuering i bygg er det viktig at personene klarer å rømme bygget før disse kritiske forholdene oppstår. Den tilgjengelige rømningstiden kan bli predikert ved hjelp av data-modeller (Hagen, 2008), hvor en ved hjelp av simulering kan finne ut når kritiske forhold vil oppstå (f.eks. tidspunktet strålingen fra brannen når et ugunstig nivå for mennesket).



Figur 5: Den tilgjengelige rømningstiden inneholder elementene: nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin (DSB, 2010)

Figur 6 illustrerer hvordan nødvendig rømningstid kan fremstilles.



Figur 6: Nødvendig rømningstid (NBI, 2006)

Den nødvendige rømningstiden kan igjen deles inn i flere underkategorier i form av tidselementer slik figur 6 illustrerer. Figuren viser at den nødvendige rømningstiden inneholder flere elementer, bl.a. deteksjon-, fortolkning-, beslutnings- og forflytningstid. Da

denne rapporten omhandler den nødvendige rømningstiden ved brann, vil elementene vist i figur 6 bli nærmere forklart. De neste underkapitlene vil ta for seg både deteksjonstiden og evakueringstiden som vist i figur 6. Evakueringstiden inneholder de elementene reaksjon- og forflytningstid. Reaksjonstiden kan igjen deles opp i fortolkning- og beslutningstid.

2.3.1 Deteksjonstid

Deteksjonstiden kan ifølge (2006, s.1) defineres som:

«tiden fra en brann starter til den oppdages, sanses eller detekteres» (...)

Deteksjonstiden deles i tre:

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

Ifølge NBI (2006) kan det ikke gis noen generell anbefaling av deteksjonstiden, med ved å analysere ulike hendelsesforløp kan den predikeres. Denne tiden kan variere fra sekunder til minutter. For å bestemme en deteksjonstid vurderes følgende: brannalarmen i bygningen, type alarm, hvilke deler av bygget som dekkes av alarmen osv. Ofte kan deteksjonstiden bli lang. Dette kan skyldes at brannalarmen ikke fungerer optimalt eller er koblet ut av ulike årsaker (vedlikehold, ombygging etc.).

2.3.2 Evakueringstid

Evakueringstiden innebærer den tid som det tar for mennesket å reagere og forflytte seg, og tidene vil bli forklart nærmere under. Teorien i disse delkapitellene er hentet fra Fahy (2003) og NBI (2006).

Reaksjonstid

NBI (2006, s.1) definerer reaksjonstiden som:

«tiden fra brannen er sanset og til rømningsforflytning faktisk starter» (...)

Denne fasen deles ytterligere opp i fortolknings- og beslutningstid:

- fortolkningstid: tid som går med til å erkjenne at det har oppstått en brann i bygningen og gjøre seg en oppfatning om hva det vil være lurt å gjøre*
- beslutningstid: tid etter fortolkning som går med til å forberede forflytning og velge rømningsvei*

Reaksjonstiden inneholder den tiden som går med til beslutning og fortolkning, se figur 6 og definisjonen over. Ofte kan begrepet «*delay time*» dukke opp når en leser engelsk litteratur. Dette begrepet dekker både fortolkning- og beslutningstiden som illustrert i figur 6, også kalt reaksjonstid. Ifølge Fahy (2003) er det ingen generelt akseptert teknikk tilgjengelig for å fastslå en reaksjonstid, og det finnes ingen database over verdier som aksepterte i dag på reaksjonstid. Derfor brukes gjerne ekspertvurderinger i dagens analyser for å tallfeste reaksjonstiden.

Ifølge Proulx (2002) er kunnskapen om reaksjoner i brann ganske utilstrekkelig. I tidligere utgaver av SFPE håndboka har det vært foreslått å doble forflytningstiden for å ta hensyn til

reaksjonstiden. Mange analytikere mener denne tilnærmingen blir for krevende, og foretrekker å legge til 15- 30 s som en gjetning på reaksjonstid. Ifølge Hall & Watts (2002) blir ofte en antakelse gjort om at reaksjonstiden er like lang som forflytningstiden. Slike antakelser blir ofte behandlet som konservative i rømningsanalyser, selv om en fullt oppegående person like gjerne kan bruke lengre tid på å samle sammen eiendeler, redde et kjæledyr osv.

Purser (2010) beskriver sekvenser av hendelser fra en ekte brann i klesbutikk som ble filmet. Sekvensene viser at mennesker ikke alltid starter evakuering etter reaksjon. Filmen viste at selv om flammene var over en meter og ble forsøkt slokket uten hell, fortsatte kundene å shoppe, stå i kø i kassen og passere brannen uforstyrret. Først etter 4 min og tykk røyk i butikken startet menneskene å evakuere etter å ha vært nølende til å forlate butikken. Slike handlingsmønstre blir ofte observert i branner. Mennesker viser ofte en tendens til å fortsette eller starte nye handlinger fremfor å evakuere (Bryan, 2002). De forstår som regel alvoret først når brannen er blitt ganske omfattende (Purser & Bensilum, 2001).

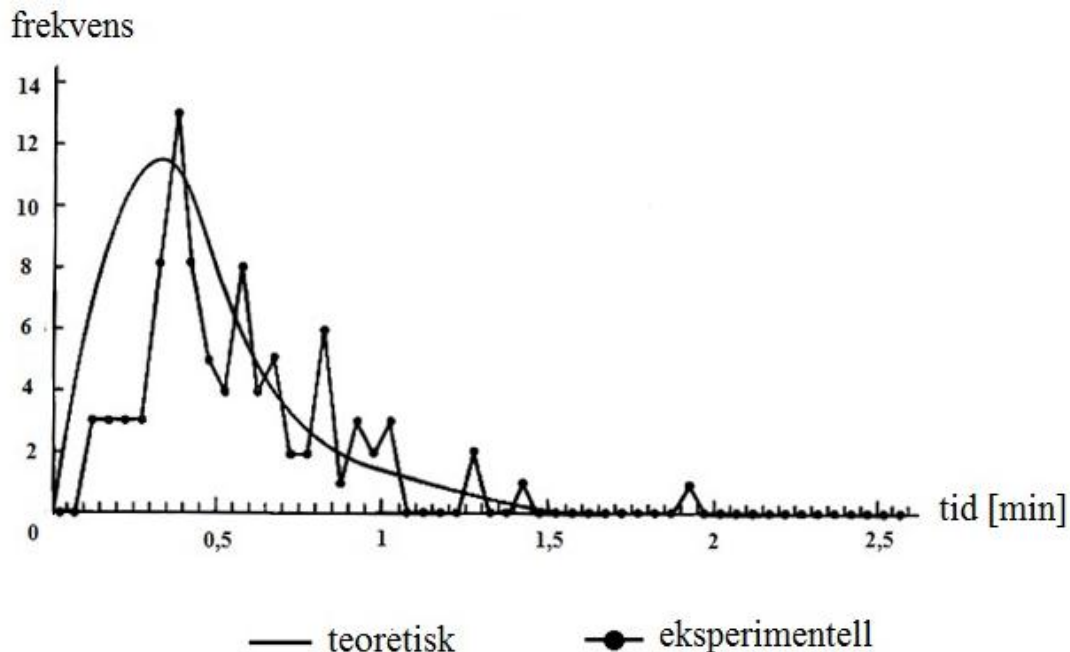
NBI (2006, s.4) gir veiledende forslag til reaksjonstid ut fra hvilken type virksomhet som skal prosjekteres. Forslagene til NBI (2006) er gjengitt nedenfor i tabell 1:

Tabell 1: Veiledende forslag til reaksjonstid, hentet fra NBI (2006).

Virksomhet	Personer ser brannen	Reaksjonstid [s]
Offentlig miljø		
-skole		
-kontor	Ja	60
-varehus		
-butikk		
Varehus, alarmklokke	Nei	210
Varehus, informativ talevarsling	Nei	60
Sykehus		
-bemannet		
-enkelt akustisk signal (Pleieavdeling og god oversikt)	Nei	120
Sykehus		
-bemannet		
-enkelt akustisk signal og talevarsling (Pleieavdeling og god oversikt)	Nei	60
Nattklubb - personale		
-avhengig av alarmtype og organisering	Nei	60-90
Nattklubb – gjester		
-avhengig av alarmtype og organisering	Nei	180-480

I appendiks B.1 er det også gjengitt data over reaksjonstider fra blant annet Fahy (2003), hvor det er blitt samlet data over reaksjonstider fra flere brannøvelser. Spørreskjemaer og videoanalyser er hovedkildene til de dataene som er tilgjengelige i dag. Spørreskjemaene gir ofte mye god informasjon fra ekte branner, men det er utfordrende å estimere nøyaktige tidslinjer over når personene oppdaget brannen og startet forflytning. I tillegg til at observasjonene blir svært subjektive. Videoanalyser derimot har den fordel at det kan gis mer nøyaktig informasjon om tidslinjer, persontetthet, forflytningshastigheter m.m.

Figur 7 illustrerer eksperimentelle reaksjonstider fra evakuering av et kjøpesenter. Grafen som består av punkter viser den eksperimentelle fordelingen, som sammenlignes med en teoretisk lognormal kurve (Purser & Bensilum, 2001).



Figur 7: En typisk fordeling for hvordan reaksjonstiden ser ut (Fahy, 2003)

De fleste reaksjonstidene er ganske korte (15-35 s) i Figur 7, men grafen har en lang hale mot høyre som indikerer personer som bruker lang tid eller som aldri klarer å forlate bygget. I følge Magnussen et al. (1996) og Frantzich (1998) kan reaksjonstiden uttrykkes som en log-normal fordelt størrelse.

Forflytningstid

Ifølge NBI (2006, s.2) defineres forflytningstiden som:

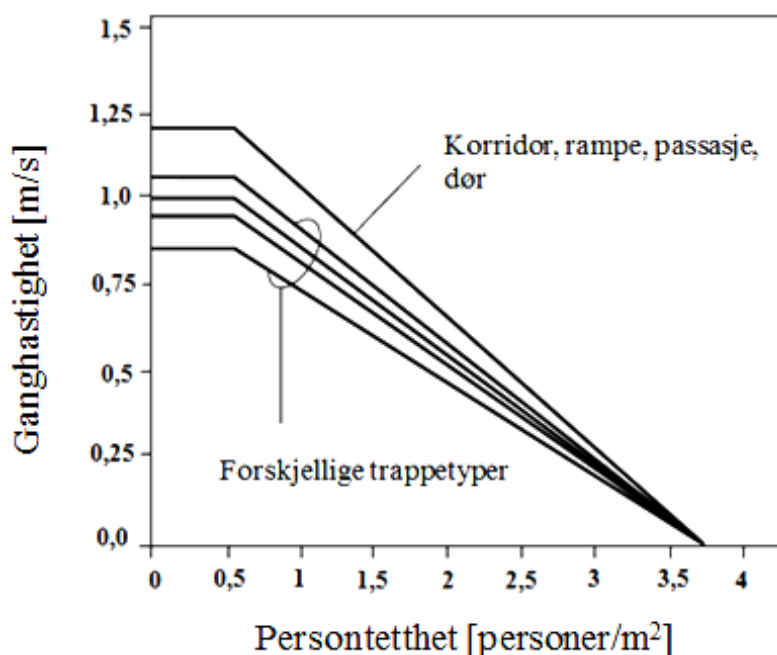
«tiden det tar for personer å forflytte seg til forutsatt sikkert sted»

Forflytningshastigheten til personer som rømmer avhengig av både persontetthet og utformingen av rømningsveien (Hagen, 2008). Ulike studier har vist at forflytningshastighet kan betraktes normalfordelt, hvor de fleste vil rømme i en gjennomsnittshastighet, mens noen vil ha en raskere, eller senere forflytningshastighet (Chandra & Bharti, 2013). Tidligere forskning har og vist at forflytningshastigheten av en gruppe/populasjon er en funksjon av populasjonens tetthet, se figur 8.

Følgende observasjoner er funnet (Nelson & Mowrer, 2002):

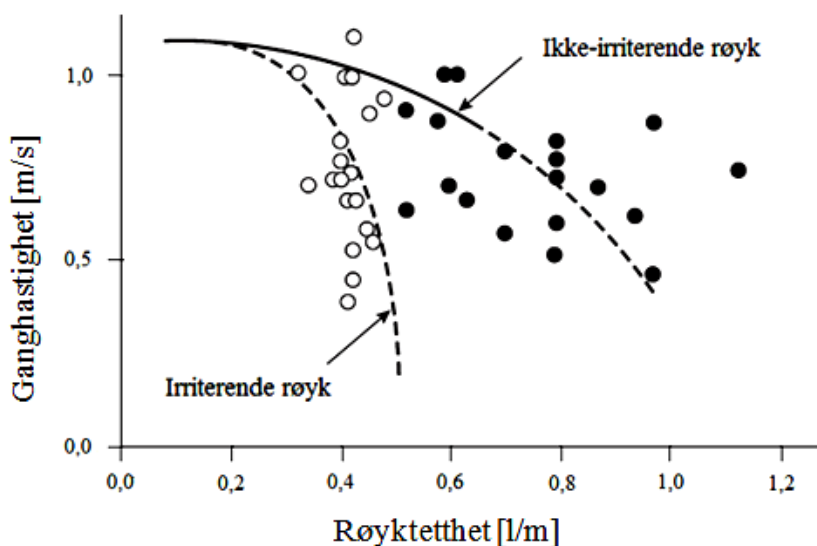
- Når persontettheten er mindre enn $0,54 \text{ personer/m}^2$ vil personer kunne gå i maksimal forflytningshastighet og de som rømmer vil da kunne gå i sitt eget tempo
- Dersom persontettheten av en gruppe/populasjon overstiger $3,9 \text{ personer/m}^2$ vil ingen forflytning skje før nok personer har forflyttet seg vekk fra det overfylte området for å redusere tettheten

- Mellom 0,54 til 3,8 personer/m² kan forholdet mellom forflytningshastighet og persontetthet bli betraktet som lineært, se figur 8.



Figur 8: Forflytningshastighet vs. persontetthet, basert på Nelson & Mowrer (2002)

Siden tidlig 1900-tallet er det gjort en rekke studier på forflytningshastighet, og i appendiks B.2 er en del av de funnene som er blitt gjort presentert i tabeller. I de fleste studiene av forflytningshastigheter er eksperimentene og observasjonene gjort i røykfrie omgivelser (Nelson & Mowrer, 2002). Figur 9 viser resultater fra tidligere forskning gjort av T. Jin. Figuren illustrerer at irriterende røyk vil redusere forflytningshastigheten betydelig i forhold til ikke-irriterende røyk (Nelson & Mowrer, 2002).



Figur 9: Forflytningshastighet vs. røyktetthet (Nelson & Mowrer, 2002)

For nærmere beskrivelser av observasjoner rundt figuren 9 henvises det til tabell 16 i appendiks B.2.

2.4 Menneskelig atferd

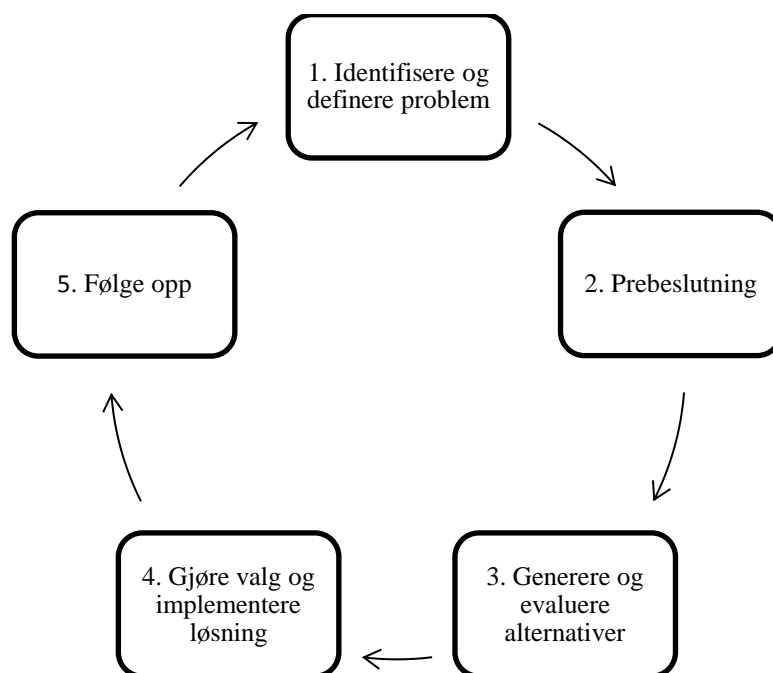
Menneskelig atferd er et sentralt emne i rømningsteorien og en viktig faktor under tidlig fase av brann når det gjelder overlevelse, og vil innvirke på hvor lang den nødvendige rømningstiden blir (Kobes et al., 2010). I følge Kuligowski (2009) er kunnskap om menneskelig atferd ved brann viktig for å kunne forstå hvordan mennesker opptrer under rømning i en brannsituasjon. Menneskelig atferd i brann kan variere fra å være totalt overraskende, og på en annen side være som forventet (Notarianni, 2002). I kapittel 2.4.1 og 2.4.2 vil teori om menneskelige problemløsningsprosesser og handlingsmønstre bli presentert.

2.4.1 Problemløsning

Når brukere av et bygg møter en situasjon hvor det har oppstått en brann vil de vurdere alvorlighetsgraden av brannen. Brukerne vil vurdere om de skal rømme, eller om andre aktiviteter skal iverksettes (Hagen, 2008), f.eks. slukke brannen eller redde andre ut.

Rasjonell problemløsningsprosess

I Helstrup og Kaufmann (2000) forklares en typisk rasjonell problemløsningsprosess, se figur 10.



Figur 10: En rasjonell og analytisk problemløsningsprosess (Helstrup og Kaufmann, 2002)

Å tenke rasjonelt er det samme som å tenke fornuftig og hensiktsmessig (Holmen, 2013). Dersom problemet skal løses rasjonelt og analytisk må først problemet *identifiseres* og *defineres*, som fase 1 viser. Dvs. å definere målet for problemløsningen: hva må oppnås for å kunne løse problemet?

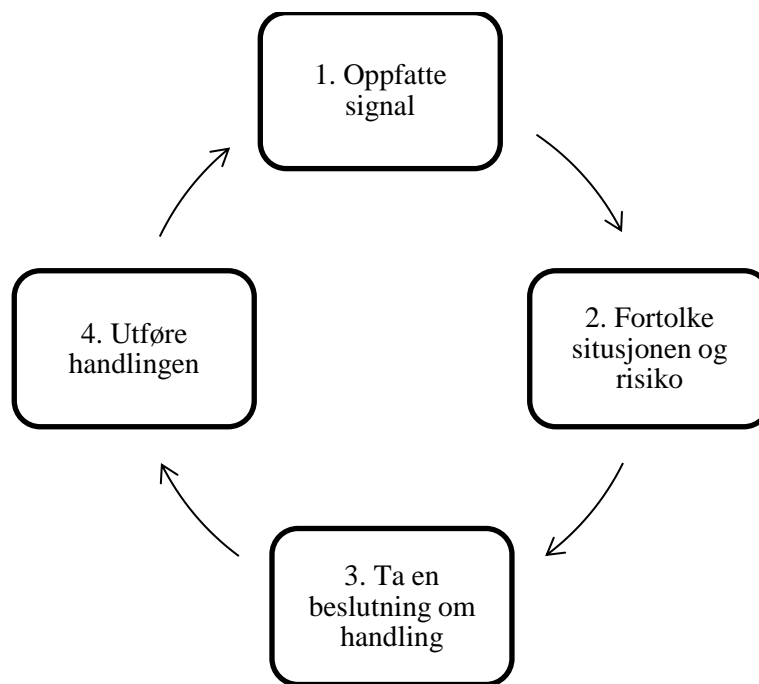
Etter at målet er definert må en bevege seg til fase 2 og bestemme seg for hvordan problemet skal bli løst, en såkalt *prebeslutning*. Etter prebeslutningen må alternativene *genereres* og *evalueres*. Ved generering utvikles gjerne flere løsningsforslag og når en har tilfredsstillende

antall forslag må en veie en rekke forhold mot hverandre, altså evaluere. I fase 4 gjøres det endelige valget av løsningsalternativer, og det må velges konkrete metoder for å gjennomføre forandringen. Det siste steget er å *følge opp*. Dvs. at ofte løsningene vise seg å være dårlige nok i form av negative konsekvenser, og en kan da vurdere om det er en annen løsning som kan oppfylle målene på en bedre måte.

Problemløsningsprosess i en brannsituasjon

Problemløsningsprosessen som ble introdusert i figur 10 er gitt at problemet blir løst på en rasjonell måte og kan tilpasses problemløsning for mer spesifikke problemer eller situasjoner. Figur 11 viser problemløsningsprosessen i brannsituasjon, og denne modellen vil bli forklart mer inngående med utgangspunkt i Kuligowski (2009) og Hagen (2008).

I fase 1 kan menneskene oppfatte brannalarm eller motta fysiske eller sosiale signaler fra miljøet rundt dem. Fysiske signaler oppdages via lyd, lys eller lukt fra flammer, røyk eller varme. Sosiale signaler kan være at en legger merke til inaktivitet hos andre og blir oppmerksom på situasjonen gjennom andre.



Figur 11: Menneskets problemløsningsprosess ved brann (Kuligowski, 2009)

Ifølge Hagen (2008) er mennesker ofte gode til å detektere branner, men det er flere forhold som kan bidra til at personer har mindre evne til å oppdage brannen. Dette kan skyldes bl.a. at de sover, er påvirket av medisiner eller rusmidler eller at det er en funksjonshemming som svekker evnen til å detektere brannen. Andre faktorer som kan svekke mulighetene for å oppdage en brann er evnen til å se, høre, lukte og føle. F.eks. svært mye støy fra en maskin.

Når signalene er mottatt, må de tolkes. I fase 2 vil personene fortolke informasjonen som ble gitt gjennom signalene i fase 1. Noen ganger kan de første signalene være vanskelige å fortolke. I fase 2 vil personene også vurdere hvilken risiko de kan bli eksponert for. Ifølge Hagen (2008) blir en også påvirket av andre personers handlingsmønstre. Dette er fordi en

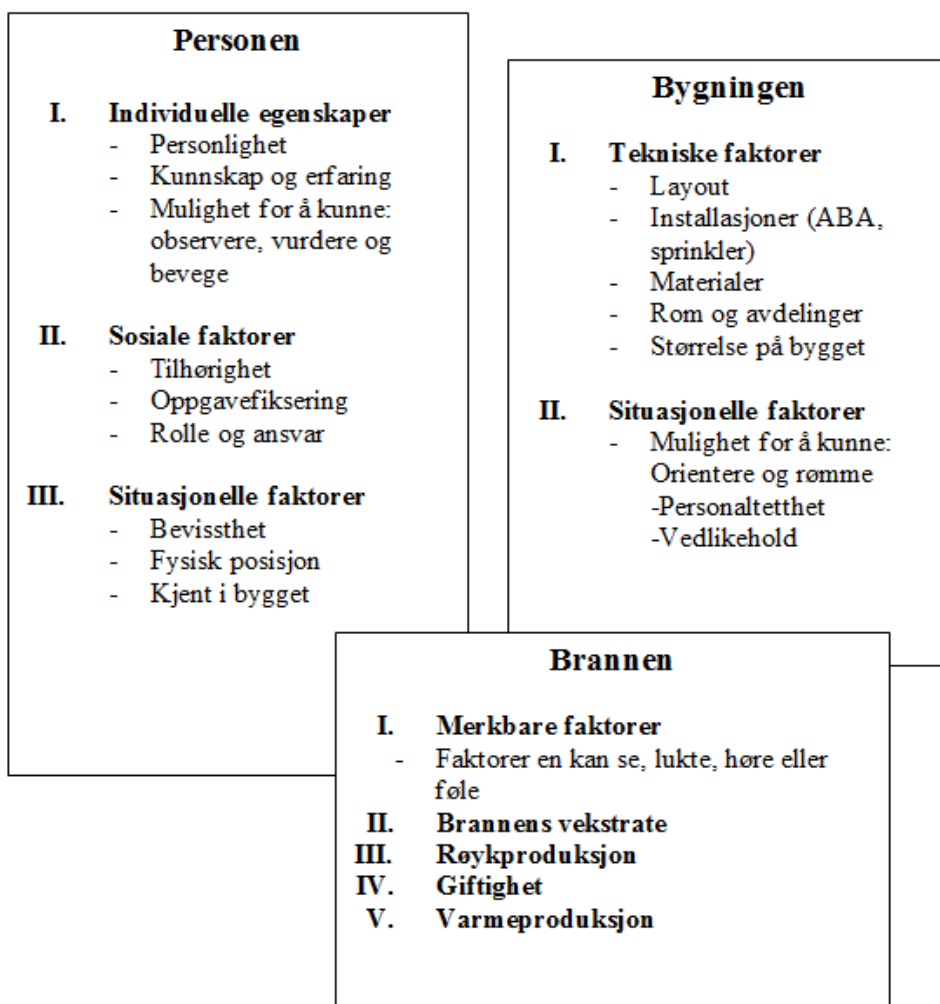
person i en sosial setting som regel ikke ønsker å skille seg ut. Derfor kan personer, selv om de har både mottatt og forstått at situasjonen er farlig, ikke oppføre seg i henhold til signalene.

I neste fase tar personene en beslutning om hvilken handling de skal utføre basert på deres fortolkning av situasjonen og oppfattelse av risikoen. Handlingen kan være å vente på flere signaler, rømme bygget, hjelpe andre ut eller bekjempe brannen. Ifølge Kobes et. al (2010) er valget om denne løsningen avhengig av flere faktorer som forklares nærmere i kapittel 2.4.2.

Deretter, i fase 4, vil personene kanskje utføre denne handlingen, eller de vil revurdere situasjonen, dvs. at de går tilbake i fase 1, 2 eller 3. Dette kan skyldes at personen mottar ny informasjon om hendelsen.

2.4.2 Kritiske faktorer som påvirker handlingsmønstre

Kapittel 2.4.2 er hovedsakelig basert på Kobes et. al (2010) og Hagen (2008). Generelt kan en si at det er tre faktorer som påvirker evakuering: mennesket, brannen og bygget, se figur 12.



Figur 12: Faktorer som påvirker evakueringen (Kobes et al., 2010)

Brannen vil utgjøre den «farlige» faktoren og kritiske underfaktorer er brannens vekstrate, giftstoffer samt røyk- og varmeproduksjon. De menneskelige faktorene kan igjen deles opp i individuelle, sosiale og situasjonelle faktorer, mens bygget kan deles opp i tekniske og

situasjonelle, se figur 12. På grunn av oppgavens omfang vil det kun bli gått nærmere inn på de menneskelige faktorene.

De menneskelige faktorene vil påvirke beslutningsprosessen og evakueringstiden i en brannsituasjon sammen med faktorer knyttet til brannen og bygget. Som det illustreres i figur 12 er det tre overordnede faktorer som påvirker mennesket i en brannsituasjon: Individuelle, sosiale og situasjonelle, og vil presenteres under.

Individuelle faktorer

Personligheten kan deles opp i tre trekk. Det første trekket er om personene er *ledere* eller *etterfølgere*. Dvs. personer som er etterfølgere vil ofte ikke handle selv om de har oppfattet faresignalet før andre gjør det. De vil vente på at andre handler, og det er verdt å merke seg at de fleste vil følge etter andre i en brannsituasjon.

Det andre trekket er *stresstoleranse*. Noen personer vil ha et høyere stressnivå enn andre fordi deres mulighet for å bearbeide informasjon er overskredet eller de kjenner ikke igjen situasjonen. For mye psykisk stress kan påvirke, men selv om stressnivået kan øke, betyr ikke dette at personen har panikk. Det finnes definisjoner på både stress og panikk og begge begrepene kan brukes i dagligtalen. Ifølge Malt (2009a, 13. februar) er stress et begrep som:

(...) omfatter en psykisk eller fysiologisk tilstand som er kjennetegnet ved – eller ytre hendelser eller situasjoner som fører til – en subjektiv opplevelse av å være under press i en slik grad at det oppleves som ubehagelig, belastende eller plagsomt anmassende

Ifølge Malt (2009b, 13 februar) kan panikk defineres som:

«Sterk, ukontrollert redsel forbundet med tap av dømmekraft og derfor formålsløs aktivitet»

I en panikktilstand vil menneskene mangle evne til å ta vare på seg selv og på andre. Panikk er derfor en urasjonell og ulogisk atferd hvor personen mister kontroll, mens stress er en tilstand hvor en kan føle press og ubehag, men likevel ha kontroll. Ifølge Hagen (2008) brukes begrepet panikk ofte i media for å beskrive menneskers handlemåte i brann og andre ulykker, selv om panikkhandlinger faktisk forekommer sjeldent i branner.

Den siste personlighetsfaktoren baserer seg på sosial kognitiv læringsteori, og det er at troen på egen mestringsevne påvirker våre handlinger (Kobes et. al, 2010). Kunnskap om kognitiv psykologi er nødvendig dersom analytikerene skal tilegne seg kunnskap om hvordan mennesker oppfatter, tenker, sanser osv. i en brann.

Kunnskap og erfaring vil også innvirke på atferden, om hvordan personer vil handle og påta seg roller og ansvar. Personer som er trent på å håndtere slike situasjoner (typisk brannmenn) vil lettere kjenne igjen en brannsituasjon og beslutte seg for handlinger (Hagen, 2008).

Evnen til å vurdere og for å tolke faresignalene vil være en bidragsyter til hvordan individet vil handle. Da beslutningstakingsprosessen avhenger av signalene personene oppfatter så er deres fortolkning av signalene en svært viktig prosess. Opplevelsen av faren vil bestemme hvordan personen reagerer: personer som opplever brannen som svært farlig vil sannsynligvis starte rømningen raskt. Det kan påpekes her at antakelser som mennesker gjør om hvor hurtig

brannen vil spre seg og hvor kraftig røykproduksjon er, ofte er feil (Purser & Bensilum, 2001).

Personenes bevegelsesevne har også innflytelse på rømningen. I appendiks B.2 er det presentert flere tabeller over tidligere studier hvor forflytningshastigheter er målt blant annet med hensyn på persontetthet, funksjonshemming og bevegelse i røyk. Ifølge Oomes (sitert i Kobes et.al, s.7 2010) kan det skilles mellom fire ulike grader av mobilitet: *høy, midlertidig redusert, permanent redusert* og *avhengig bevegelsesevne*. Ofte antas det i rømningsanalyser at alle 100 % av populasjonen er mobil (har uavhengig bevegelsesevne), men at dette ikke alltid er tilfelle (Notarianni, 2002).

Høy mobilitet tilsvarer mennesker som ikke har noen form for redusert eller avhengig forflytningsevne, mens midlertidig redusert mobilitet er typisk en person som bruker krykker. Ifølge Pelechano og Malkawi (2008) er tretthet et viktig element i høye bygg, og fra ekte branner har det blitt rapportert svært sakte forflytningshastighet i trapper. Denne trettheten refereres til som permanent redusert mobilitet. Eldre mennesker, funksjonshemmede eller mennesker i dårlig form er en gruppe mennesker som typisk vil ha permanent redusert mobilitet i evakuering i høyhus. Denne gruppen kan ha behov for å hvile under evakuering i trapperom, som kan føre til opphopning. Noen funksjonshemmede kan også være helt avhengig av assistanse for å evakuere, og denne graden kalles avhengig bevegelsesevne.

Sosiale faktorer

Med sosiale faktorer menes samhandlingene mellom menneskene, dvs. hvordan personene påtar seg roller og oppgaver. I offentlige bygg og på kontorer er vanligvis personene eller personalet trent i å rømme, og vil gjerne starte evakueringen raskt. Likevel er det ikke slik at personer som er trent i et bygg vil handle like raskt dersom de må evakuere i et annet bygg. Grunnen til dette er at de trenes til å påta seg en rolle i det spesifikke bygget, mens rollen endres i andre bygg. Personene vil på en måte holde seg til den rollefordelingen som er passende for det bygget de er i. Denne atferden kan hemme personens oppfattelse av situasjonen og øke reaksjonstiden. Ofte vil personene gjøre seg ferdig med en påbegynt aktivitet (f.eks. fyller opp posene med alle handlevarene eller kle på seg) selv om de oppfatter et signal. (Kobes et al., 2010; Purser, 2009).

En annen sosial faktor er at i en nødsituasjon er personene mer tilbøyelige for å samarbeide (Purser & Bensilum, 2001). Personer som har et ansvar for andre vil derfor gjerne ha fokus på evakueringen av de personene de føler et ansvar for. F.eks. personer med ansvar for pasienter på sykehus, en butikkselger for sine kunder eller foreldre med barn (Kobes et al., 2010).

Situasjonelle faktorer

De viktigste situasjonelle faktorene er personens tilstand og fysiske posisjon, samt hvor godt personen kjenner byggets utforming (Kobes et al., 2010). Ifølge NBI (2006) vil de fleste rømme ut den veien de kom inn. Personens tilstand vil ha innvirkning på muligheten til å oppdage brannen.

Ifølge Kobes et.al. (2010) er dagens kunnskap om hvilken innflytelse menneskets fysiske posisjon har i en brann begrenset. Hvor godt en person kjenner bygget har innflytelse på valg av rømningsvei, som nevnt før velges vanligvis den mest familiære ruten, og det er som oftest hovedutgangen.

2.5 STEPS

I dette kapitlet introduseres generelle prinsipper i STEPS. Teorien i dette kapitlet er hovedsakelig basert på Mott MacDonald Limited (2013) og Watersen & Pellissier (2010).

STEPS er et datasimuleringsverktøy til anvendelse for simulering av personer både under normale forhold og ved evakuering. Opprinnelig ble programmet designet for modellering av personstrømmer i transporteringssystemer, men anvendes i dag innen en rekke fagdisipliner.

2.5.1 Agentbasert tilnærming

For å predikere bevegelse av personer i STEPS brukes en agentbasert tilnærming av virtuelle mennesker gjennom et tredimensjonalt (3D) rom. De virtuelle menneskene omtales ofte som agenter, også i denne rapporten. Den agentbaserte tilnærmingen blir forklart videre med utgangspunkt i Tufte, Lyngstad og Birkelund (2010), Watersen & Pellissier (2010) og Mott Macdonald Limited (u.å.).

Agentbasert tilnærming betyr at de grunnleggende elementene i modellen er agenter og representerer individer, grupper av individer, sosiale grupper etc. En rekke egenskaper og kjennetegn på agentene kan bli inkludert i modellene, og to forhold ved agentene er sentrale:

1. agentenes egenskaper, og
2. agentenes handlingsregler

For det første må agentenes egenskaper spesifiseres. I STEPS er eksempler på dette kjønn, høyde og gruppetilhørighet (f.eks. familie). Modellene kan ved å bruke familieegenskap på en gruppe agenter belyse et samhandlingsmønster mellom agentene: denne gruppen vil vente til gruppen er samlet før de rømmer bygningen sammen.

For det andre spesifiseres agentenes handlingsregler. Regler kan eksempelvis være ganghastighet eller forflytningshastighet, reaksjonstid, og tålmodighetsgrad.

Forflytningshastighet

I STEPS kan agentene bli tildelt ulike forflytningshastigheter. Tildeling av forflytningshastighet kan gjøres på flere måter. Enten kan det fastsettes en fordeling over maksimale forflytningshastigheter. Med maksimal hastighet menes hastigheten agentene går i når de kan bevege seg fritt (ikke hindret av andre). Alternativt kan en bruke STEPS sin innebygde ligning for forflytningshastighet V (Mott Macdonald Limited, u.å.) som tar hensyn til blant annet skråninger, tilstedeværelse av røyk, persontetthet m.m. Agentene kan også tildeles en standardverdi (f.eks. 1,2 m/s) som en maksimal forflytningshastighet for alle agentene.

Reaksjonstid

Reaksjonstiden kan uttrykkes via en sannsynlighetsfordeling eller gjennom en singel verdi som tallfestes av analytikeren.

Tålmodighetsfaktor

Tålmodighetsfaktoren er et tall mellom 0 og 1 og spesifiserer agentens tålmodighet. Dersom en agent har tålmodighetsfaktor over 0,5 ansees agenten som utålmodig, og under 0,5

tålmodig. En utålmodig agent som står i kø vil raskere se seg om etter en annen utgang, mens en tålmodig agent aksepterer å stå lenger i kø.

2.5.2 Geometri

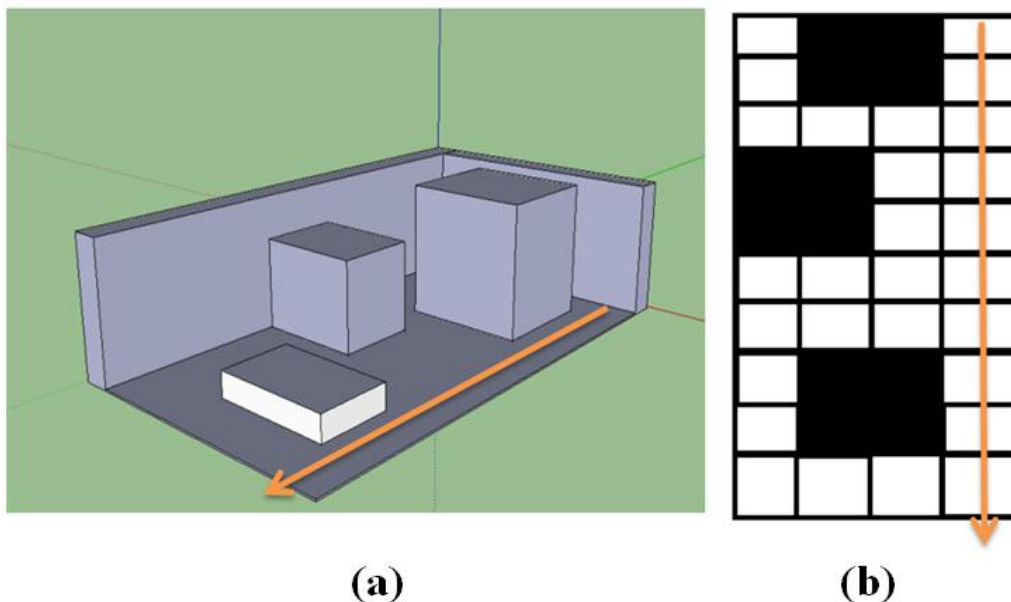
Teorien i 2.5.2 er hentet fra Mott Macdonald Limited (2013), Mott MacDonald Limited (u.å.) og Pelechano & Malkawi (2008). Som tidligere nevnt brukes en 3D geometri i STEPS. Området/bygget kan hovedsakelig deles inn i to grunneheter: overflater/plan og stier/baner.

Plan eller overflater, er der hvor folk beveger seg, slik som på gulv og i trapper. Overflatene kan ha skråning eller være helt flate. En overflate kan f.eks. representere hele flaten av en bygning eller etasje. I tillegg kan det plasseres ut obstruksjoner/blokkeringer som representerer områder hvor ingen personer er tillatt å bevege seg på. Blokkeringer kan være både lukkede rom, vegger eller andre blokkeringer som representerer f.eks. møblement, søyler eller andre faste objekter.

Flere plan kan bli sammenføyd enten ved å bruke flere plan eller stier. Stiene er geometriske enheter som tillater kun enveis strøm i en enkel fil. En utgang brukes som en forbindelse mellom plan og stier. I utgangen kan strømningsraten bli definert som en funksjon av bredde og kapasitet. Kapasiteten kan fastsettes etter verdier funnet i en standard eller verdien kan bli spesifisert av den som utfører simuleringen.

Rutenett og gridceller

Agentbasert tilnærming som anvendes i STEPS bygger på prinsippene fra «*cellular automata*», hvor modellene deler inn rommet i kartesiske rutenett, se figur 13.



Figur 13: Figuren til venstre (a) viser et rom i 3D rom med blokkeringer. Figuren til høyre (b) viser 3D rommet sett ovenfra med gridceller

Figur 13 (b) viser hvordan rommet i figur 13 (a) er delt opp i kartesiske rutenett. En hvit celle, se figur 13 (b), fungerer som en algoritme for fri bevegelse i rommet og i tillegg løser sammenstøtsproblemer mellom agentene (se 2.5.3). Blokkeringene er markert svarte, mens celler som agentene kan oppta er markert hvite. Den oransje pilen viser en rømningsvei agentene kan gå uten å støte på blokkeringer. Standardstørrelsen på gridcellene er store nok til

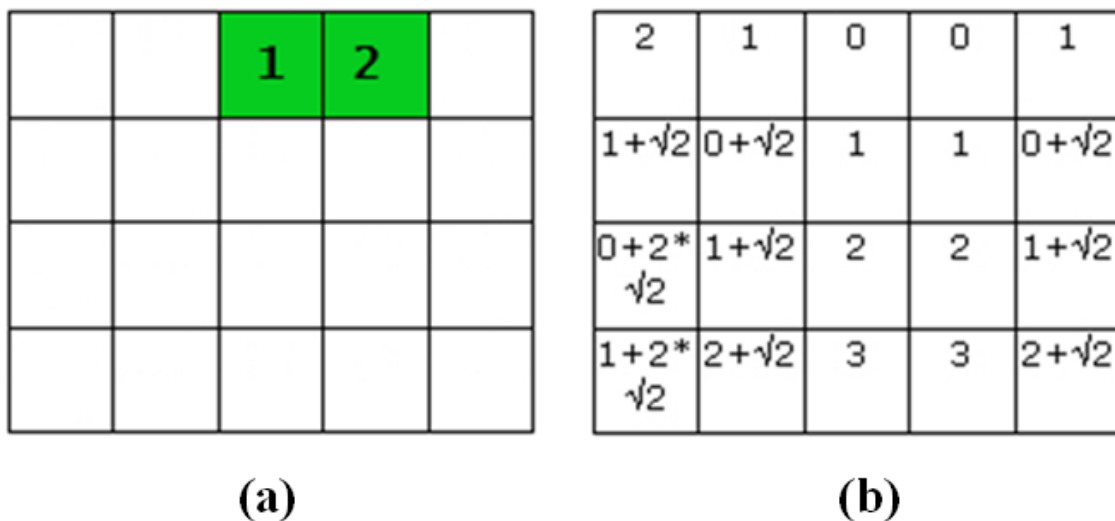
en agent, men de kan endres. Agentene kan ikke oppta mer enn en (hvit) celle, og vil bevege seg mot neste celle. Gridstørrelsen er viktig fordi den bestemmer den maksimale person-tettheten per kvadratmeter, og den kan påvirke strømningsraten.

Dersom den foretrukne cellen er opptatt velges en annen. Dersom to agenter sikter til samme celle blir konflikten løst tilfeldig (Varas, 2007). Denne konflikten er den eneste sam-handlingen mellom agentene med mindre agentene er i familie.

Hvordan modellen bestemmer hvordan agenten oppfører seg kalles atferdskontroll. Atferds-kontrollen beveger agenten fra en celle til en annen basert på korteste vei mot utgangen og blir forklart nærmere i 2.5.3.

2.5.3 Den grunnleggende mekanisme

Den grunnleggende mekanismen eller idéen for agentenes bevegelse er et ønske om uhindret forflytningshastighet mot dørene og utgangsdørene ved å bruke kortest mulig tid og uten sammenstøt. Hvordan denne bevegelsesmekanismen fungerer i STEPS vil bli nærmere forklart. I hver gridcelle (for hver agent) blir en potensialverdi beregnet for hver utgang. Denne verdien representerer avstanden mellom cellene og utgangene. I et eksempel hentet fra STEPS 5.2 brukermanual er et område definert med lengde = 5 m, bredde= 4 m og grid størrelse =1 m², se figur 14.



Figur 14: Figuren til venstre (a) illustrerer et rutenett med to utgangsdører (1 og 2), mens figuren til høyre (b) illustrerer hvordan STEPS algoritmisk beregner potensialet (avstanden) fra gridcellene. Figurene er hentet fra Mott MacDonald Limited (u.å.)

Figur 14 illustrerer at utgangene er gitt potensialet 0 (agentene er ute). På bakgrunn av at gridstørrelsen er 1 meter blir potensialet både horisontalt og vertikalt 1 meter fra nabocellen. Dersom agenten beveger seg diagonalt mellom cellene blir avstanden $\sqrt{2}$ m. Potensial-verdien tar og hensyn til tilstedeværelsen av eksistensen av blokkeringer, dermed refererer det gjerne til en verdi og ikke en avstand.

For hvert tidssteg blir en potensialverdi beregnet for hver utgang basert på ankomsttid og en sluttverdi kan beregnes. Verdien er da en tilnærming på den tiden som kreves for agenten å gå

til utgangen og igjennom. Basert på sluttverdien beveger agentene seg til neste celle (som gir lavest verdi), og på den måten bruker agentene kortest vei, tid og de forhindrer sammenstøt.

Denne grunnleggende mekanismen gjør at agentene samhandler med hverandre på en slags måte om valg av ruter, og igjen betyr det at hver simulering vil bli forskjellig. Derfor simuleres gjerne scenarioene mange ganger for å bli mer sikker på resultatet. Ifølge Løvås (2005) bør det være tilstrekkelig med minst 30 simuleringer når standardavviket er ukjent.

Evakuering

Under evakuering er agentene instruert til å finne veien frem til nærmeste tilgjengelige utgang, se figur 15. Figur 15 illustrerer hvordan agentene vil bevege seg etter hvor utgangene er plassert. De røde pilene skal vise veien til utgangsdørene (rømningsvei). De blå og grønne strekene illustrerer henholdsvis vegger og dører.



Figur 15: Eksempelbilde fra STEPS som viser simulering i evakuering

Agentene har ingen global oversikt over bygningen og betrakter kun utganger på deres gjeldende plan. I denne rapporten brukes kun et plan. Agentene vil umiddelbart se etter den nærmeste utgangen fordi STEPS er bygget opp ut fra følgende antakelse: dersom en person evakuerer fra et bygg han/hun er godt kjent med, så kan han ha en god formening om korteste vei ut, men han eller hun kan ikke vite om mulige hendelser på denne veien som kan hindre evakueringen eller øke evakueringstiden.

Agentene beveger seg også i forhold til hvilke egenskaper og handlingsregler som ble forklart innledningsvis i 2.5.1. Egenskapene og handlingsreglene defineres i forkant av simuleringene.

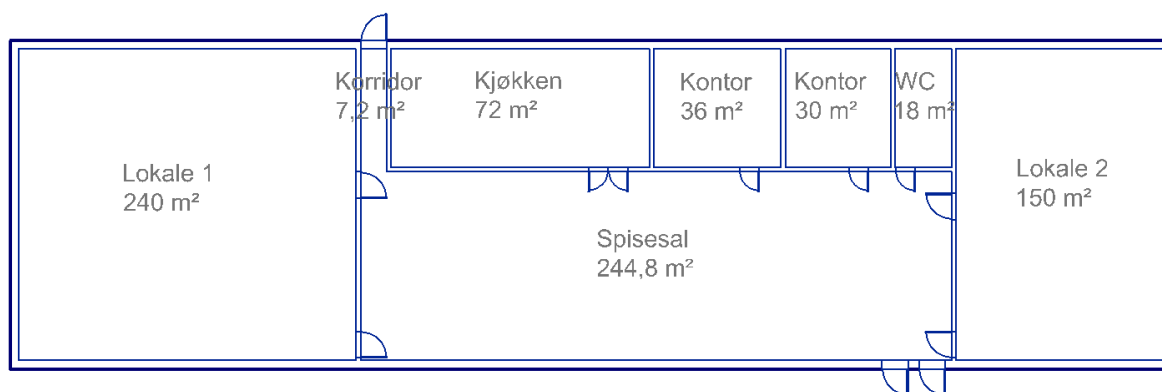
Evakueringsmodellen STEPS brukes for å predikere evakueringstiden i denne rapporten, og videre vil gis en presentasjon over metode, case og scenarioer.

3 Metode og casebeskrivelse

Det vil bli gjennomført en usikkerhet- og en sensitivitetsanalyse som kan legges til grunn for diskusjon av predikering av nødvendig rømningstid, og det brukes en case til dette formålet. I dette kapitlet vil metoden for å håndtere usikkerhet og sensitivitet presenteres. I kapittel 3.1 blir casen beskrevet og i kapittel 3.2 er formålet å gi leseren en oversikt over viktige begreper og størrelser før metoden i usikkerhet- og sensitivitetsanalysen presenteres. I 3.3 defineres et referanseoppsett. I kapittel 3.5 og 3.4 vil henholdsvis metodene brukt i usikkerhet- og sensitivitetsanalysen bli presentert.

3.1 Case

Det er benyttet en casetilnærming for å predikere nødvendig rømningstid og i Storstein (2014) er samme case brukt for å predikere tilgjengelig rømningstid, slik at rapportene kan sees i sammenheng. Bakgrunnen for valg av utforming er at den både egner seg godt til både STEPS og programvaren Argos brukt av Storstein (2014). I denne rapporten brukes casen for å illustrere både sensitiviteten til inngangsstørrelser samt i usikkerhetsanalysen.



Figur 16: Case

Casen er et typisk kurs- eller konferanselokale med en etasje, og to forsamlingslokaler på henholdsvis 240 og 150 m². Det er tilrettelagt for et kjøkken på 72 m², to kontorer på henholdsvis 36 og 30 m², et toalett på 18 m² og en større og åpen spisesal på ca. 245 m². For plantegning med mål, se appendiks C.

3.2 Definerings og benevning av uttrykk og størrelser

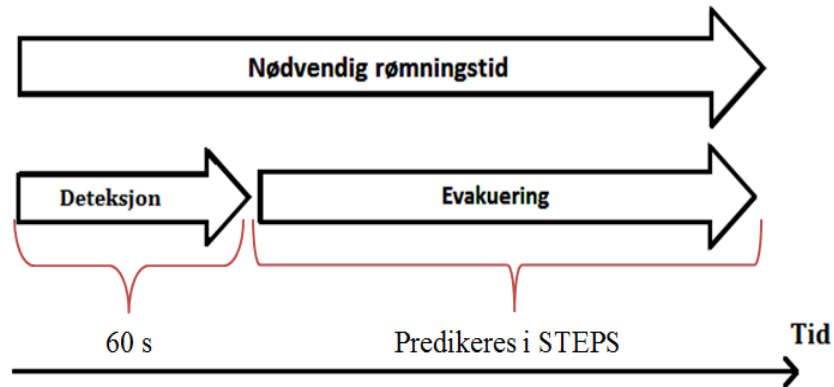
Hensikten med kapittel 3.2 er å forklare terminologi og gi en oversikt over relevante størrelser videre i rapporten. Figur 17 illustrerer at den nødvendige rømningstiden inneholder elementene evakuering- og deteksjonstid.

Avgrensninger er gjort slik at det kun er evakueringstiden som blir sett på i forhold til usikkerhet. Deteksjonstiden antas å være 60 s. Evakueringstiden predikeres i modellen STEPS som defineres $G(X)$ og evakueringstiden betegnes Z .

Modellen $G(X)$ predikerer da hvor lang tid det vil ta fra brannen er detektert til alle personene i bygget har evakuert. Modellen $G(X)$ består da av inngangsstørrelsene X som behandles som

ukjente. Det velges å betrakte parametere X som anses å ha potensiale til å kunne endre konklusjon (Notarianni, 2002).

Med å endre konklusjonen menes det f.eks. at evakueringstiden blir for lang i forhold til en ønsket sikkerhetsmargin. Alle andre parametere anses som antakelser (f.eks. agentenes bredde og høyde). Det vurderes at evakueringstiden ikke er spesielt sensitiv til disse antakelsene.



Figur 17: Illustrasjon av hvordan nødvendig rømningstid predikeres i analysen

3.3 Beskrivelse av referanseoppsett

Referanseoppsettet anvendes for å illustrere metodene for å håndtere usikkerhet og sensitivitet, se henholdsvis kapittel 3.5 og 3.4.

En oppsummering er gitt under av Z , G og X :

<i>Størrelser av interesse:</i>	
Evakueringstid	Z
<i>Modell for å predikere Z:</i>	
Modellen for å predikere evakueringstid som funksjon av inngangsparametere (X)	$G(X)$
<i>Inngangsstørrelser:</i>	
Parametere som håndteres som ukjente	X

Fem ulike inngangsparametere X ble vurdert å ha potensiale til å gi usikkerhetsbidrag, og dermed viktige for å predikere evakueringstid og blir behandlet som ukjente, se kapittel 3.2. Tabell 2 angir inngangsparametere i simuleringene, og tabell 3 viser referanseoppsettet med tilhørende referanseverdier.

De ukjente parametere blir videre forkortet i rapporten som vist i tabell 2, f.eks. «RE» vil referere til inngangsparameteren reaksjonstid.

Tabell 2: Inngangsparametere med forkortelser

Parametere	Forkortelse	X
Antall personer	(AP)	Antall personer i lokale 1 Antall personer i lokale 2
Reaksjonstid	(RE)	Lognormal fordeling
Forflytningshastighet	(GA)	Normalfordeling
Strømningsrate	(ST)	Rate
Grad av tålmodighet	(GT)	Rate

En forklaring til bakgrunnen for valgte inngangsparametere er gitt under tabell 3.

Tabell 3: Referanseverdier brukt i referanseoppsettet

Referanseoppsett med referanseverdier			
Hvor agentene er plassert og antall ¹	Lokale 1 (240 m ²)		240 personer
	Lokale 2 (150 m ²)		150 personer
	Spisesal (244,8 m ²)		0
	Totalt		390 personer
Reaksjonstid [s]	Lognormal(120,30) ²	Maks: 480	Min: 60
Forflytningshastighet [m/s]	Normal(1,25, 0,32) ³	Maks: 1,77	Min: 0,82
Grad av tålmodighet	0,5		
Strømningsrate	0,8 person/s		

¹Agentene ble tilfeldig plassert i lokale 1 og 2 fra begynnelsen av evakueringen.

² Reaksjonstiden uttrykkes som en lognormal størrelse med gjennomsnitt på 120 s og standardavvik på 30 s.

³ Forflytningshastigheten uttrykkes som en normalfordelt størrelse med gjennomsnitt på 1,25 m/s og standardavvik 0,32 m/s.

Antall personer: 240 personer i lokale 1 og 150 personer i lokale 2 gir en person-tetthet på 1 m² som er pre-akseptert i henhold til DiBK (2010). Ifølge NS 3901 (Standard Norge, 2012) er det usikkerhet knyttet til antall personer i bygget, lokasjon og bevegelsesevne.

Reaksjonstid: Det ble valgt en lognormal fordeling for reaksjonstiden i henhold til figur 7 da reaksjonstiden i teorien kan være uendelig lang. Ifølge Notarianni (2002) gir også sannsynlighetsfordelinger et rikere og mer informativt bilde på usikkerheten til motsetning av bruk av en singel verdi. Valget bygger derfor på en antakelse om at ingen mennesker vil reagere likt som samsvarer med observasjonene til Fahy (2003) og Purser & Bensilum (2001). De korteste og lengste fortolkning- og beslutnings-tidene agentene er tildelt er derfor henholdsvis 1 og 8 åtte min. I en lognormal fordeling må gjennomsnitt og standardavvik bestemmes.

NBI (2006) foreslår en reaksjonstid på 60 s for offentlige miljøer gitt at personene ser brannen (se også tabell 1). British Standards Institute, sitert i Proulx (2002, s. 885) foreslår (avhengig av type ABA) en reaksjonstid på mellom 2 og 6 min for bygg hvor personene er våkne, ukjente med bygget, alarmer og evakueringsprosedyren (se også tabell 9 i appendiks B.1). Fahy (2003) har også samlet data over reaksjonstider som viste store variasjoner når ulike bygg betraktes, se appendiks B.1, tabell 10. Det ble valgt en gjennomsnittlig reaksjonstid på 2 min og et standardavvik på 30 s ut ifra en ekspertvurdering av observasjonene som ble gjengitt ovenfor.

Forflytningshastighet: For forflytningshastighet ble det brukt en normalfordeling. Også her var årsaken til valget med fordeling en antakelse om at ingen mennesker vil evakuere likt (i den samme forflytningshastigheten). Fordelingen samsvarer med observasjonene til Proulx (2002).

Tålmodighetsgrad: Det ble vurdert at tålmodighetsgraden kanskje kunne innvirke en del på evakueringstiden. Alle agentene fikk som referanseverdi en tålmodighetsgrad på 0,5. Les 2.5.1 for mer om denne egenskapen.

Strømningsrate: Inngangsparameteren for strømningsrate ble valgt etter NBI (2006, s.6) figur 553. Når dørbredden er 1,2 m og personene antatt å være ukjente i bygget kan en strømningsrate på 0,8 personer/s avleses, som tilsier en personstrøm på 0,67 personer/ms.

3.4 Metode for sensitivitetsanalyse

Det vil også bli gjennomført en sensitivitetsanalyse som kan danne grunnlag for diskusjon om hvilken effekt endringer i inngangsparametere vil ha i forhold til evakueringstiden ved bruk av programmet STEPS. Referanseoppsettet i kapittel 3.3 er som nevnt benyttet til dette formålet. For hvert scenario ble kun parameterne endret enkeltvis, mens resten ble holdt konstante. Med konstante menes lik referanseverdiene, se tabell 3. Hver parameter ble enten økt eller redusert med en prosentvis faktor, se tabell 4. De prosentvise faktorene som ble brukt var: 5, 10, 15, 20 og - 5, 10, 15, 20.

Tabell 4: Sammenheng mellom scenario og inngangsparametere i sensitivitetsanalysen

Faktor [%]	AP	RE	GA	ST	GT
20	sc02AP	sc02RE	sc02GA	sc02ST	sc02GT
15	sc015AP	sc015RE	sc015GA	sc015ST	sc015GT
10	sc01AP	sc01RE	sc01GA	sc01ST	sc01GT
5	sc005AP	sc005RE	sc005GA	sc005ST	sc005GT
0	sc00	sc00	sc00	sc00	sc00
-5	sc-005AP	sc-005RE	sc-005GA	sc-005ST	sc-005GT
-10	sc-01AP	sc-01RE	sc-01GA	sc-01ST	sc-01GT
-15	sc-015AP	sc-015RE	sc-015GA	sc-015ST	sc-015GT
-20	sc-020AP	sc-020RE	sc-020GA	sc-020ST	sc-020GT

F.eks.: dersom en ønsket å vite innflytelsen av å øke antall personer i bygget med 10 % så ble kun personene i bygget økt med 10 % mens de andre parameterne ble holdt konstante (lik referanseverdi). Dette scenarioet forkortes «sc01AP», hvor «sc» er forkortelsen for scenario,

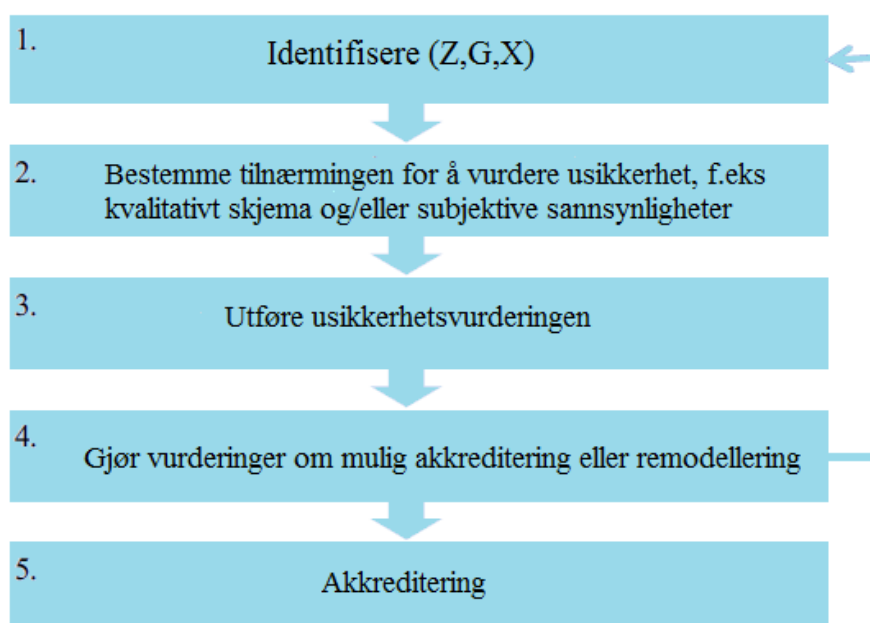
«01» for 10 % og «AP» for «antall personer». Tabell 5 er mest relevant for resultatene i appendiks D Det ble til sammen satt opp 41 ulike scenarier hvor alle scenarioene ble simulert 30 ganger på grunn av ukjent standardavvik (Løvås, 2005; Hall, 2002). Scenariene som er betegnet «sc00» er simuleringen av referanseverdiene i referanseoppsettet.

3.5 Metode for håndtering av modellusikkerhet

Den nødvendige rømmingstiden kan deles opp i flere tidssegmenter, og vil påvirkes av en rekke faktorer, se figur 11. Derfor ble det vurdert å være hensiktsmessig å bryte ned modellen STEPS i flere delmodeller. I denne rapporten har det blitt gjort en avgrensning slik at kun usikkerheten i delmodellen for forflytningshastigheten vurderes fordi denne hastigheten blir typisk uttrykt gjennom en sannsynlighetsmodell (se 2.3.2). Det vil utprøves en ny metode for å behandle usikkerhet i sammenheng med prediksjon av nødvendig rømmingstid.

Ifølge Bjerga et al. (2014) er de fleste kvantitative risikoanalyser basert på modeller som representerer systemer og andre fenomener. Når modeller anvendes vil de også bygge på et sett av antakelser om de representative systemene og fenomener. Disse antakelsene bør sees på som viktige bidragsyttere til modellusikkerhet som bør inkluderes i usikkerhetsanalysene. Metoden som brukes i denne rapporten for å behandle modellusikkerhet gjøres i samsvar med metoden som er anvendt i Bjerga et al. (2014), og trinnene illustreres i figur 18.

Steg 1. er å identifisere størrelsen av interesse Z, modellen G og parametere X, se figur 18. Steg 2. er å bestemme tilnærmingen for å vurdere usikkerheten og steg 3. gjennomføres usikkerhetsanalysen.



Figur 18: Steg i usikkerhetsanalysen og håndtering av modellusikkerhet (Bjerga et. al, 2014)

I forhold til steg 4. må resultatene fra steg 3. bli vurdert i forhold til modellens formål (Bjerga et al., 2014). Dersom modellen ikke blir funnet god nok i lys av modellens formål må den re-modelleres, om den vurderes å være akseptabel kan den akkrediteres slik det vises i steg 5.

4 Usikkerhetsanalyse

Rammeverket i figur 18 vil benyttes for håndtering av modellusikkerhet. En normalfordeling brukes til å representere variasjoner (aleatorisk usikkerhet) av ulike forflytningshastigheter til en gruppe mennesker dersom en hypotetisk uendelig stor populasjon betraktes. Tetthetsfunksjonen til en normalfordelt størrelse x gis i ligning (3):

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}, \quad -\infty < x < \infty \quad (3)$$

Hvor μ og σ er henholdsvis forventningsverdi og standardavvik.

Det vil også eksistere en *sann* fordeling $p_0(x)$. Den sanne fordelingen trenger nødvendigvis ikke være normalfordelt, men kan være tilnærmet lik. Den sanne fordelingen fortolkes som fordelingen av forflytningshastighet når en betrakter en uendelig stor populasjon, med et kjent gjennomsnitt μ_0 og standardavvik σ_0 . Normalfordelingen $p(x)$ er modellen av denne sanne fordelingen, med de ukjente modellparameterne μ og σ av de sanne parameterne μ_0 og σ_0 .

Modellen for evakueringstiden når kun forflytningshastigheten sees på betegnes $G(\mu, \sigma)$. Betydningen av $G(\mu, \sigma)$ er da at evakueringstiden predikeres med hensyn på delmodellen $p(x)$ med de ukjente modellparameterne μ og σ . Dermed er det kun delmodellen $p(x)$ sitt bidrag til usikkerhet i prediksjonen som betraktes. Størrelsen av interesse er evakueringstiden Z .

Steg 1. i figur 18 er å identifisere Z , G og X . Når kun delmodellen betraktes kan følgende bli oppsummeres:

<i>Størrelse av interesse:</i>	
Evakueringstid	Z
<i>Delmodell:</i>	
Delmodellen for å uttrykke forflytningshastighet	$p(x)$
<i>Modell for å predikere Z:</i>	
Modellen for evakuering når kun $p(x)$ betraktes	$G(\mu, \sigma)$
<i>Inngangsstørrelser:</i>	
Usikre parametere (som henholdsvis er populasjonens gjennomsnitt og standardavvik)	μ og σ
Alle andre parametere anses som konstante	

Avviket mellom prediksjonen av evakueringstiden fra modellen $G(\mu, \sigma)$ og den sanne fremtidige verdien Z kalles modellfeilen (se 2.2.2). Modellfeilen kan formuleres som: $\Delta_G(\mu, \sigma) = G(\mu, \sigma) - G_0 = G(\mu, \sigma) - Z$. Dersom verdiene av μ og σ er kjente kan modellusikkerheten om modellfeilen kun knyttes til modellens struktur. Modellfeilen kan da formuleres som: $\Delta_G(\mu_0, \sigma_0) = G(\mu_0, \sigma_0) - Z$.

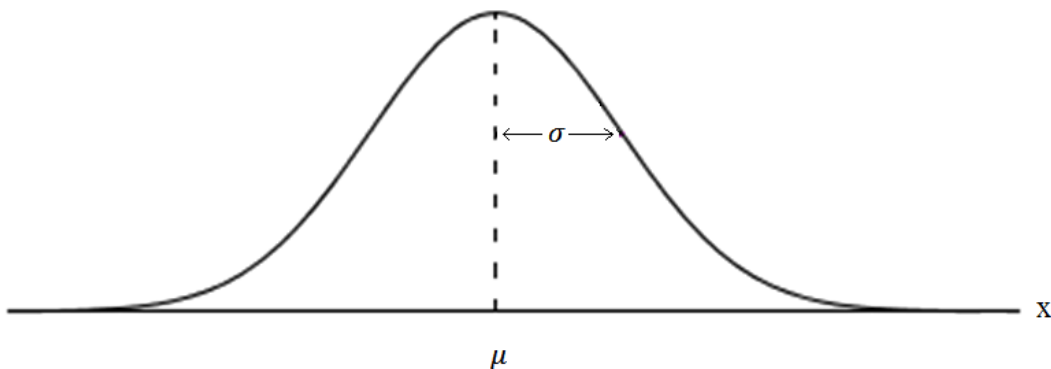
4.1 Utførelse av analysen

I forhold til steg 2. i figur 18 må det bestemmes metode. Det bli brukt en semi- kvantitativ metode for å reflektere usikkerheten.

Det brukes først en kvalitativ vurdering (skjema) for å gi score til antakelsene som gjøres i delmodellen $p(x)$, hvor både usikkerheten og sensitiviteten vurderes. En usikkerhetvurdering av modellparameterne vil også gjennomføres. Videre vil det brukes en kvantitativ analyse med subjektive sannsynligheter for den strukturelle modellusikkerheten. Usikkerhetsanalysen sees også i sammenheng med sensitivitetsanalysen i 4.2.2 for et sterkere beslutningsunderlag.

4.1.1 Kvalitativ vurdering av antakelser

Kurven i en normalfordeling med parametere μ og σ (som er henholdsvis gjennomsnittet og standardavviket) er vist i figur 19.



Figur 19: Kurve i en normalfordeling

Ifølge Walpole et al. (2012) har en normalfordeling følgende egenskaper:

1. Gjennomsnittet μ forekommer midt på den horisontale akse som det maksimale punktet av kurven, dvs. medianen er lik μ
2. Kurven er symmetrisk om μ
3. Kurven har infleksjonspunktet (vendepunktet) sitt ved $\mu \pm \sigma$. Dvs. kurven er konkav nedover hvor $\mu - \sigma < X < \mu + \sigma$, og motsatt konkav oppover
4. Kurven tilnærmer seg den horisontale akse asymptotisk uansett hvilken retning fra μ en beveger seg
5. Det totale område under kurven er 1

Antakelsene som er gjort ved bruk av $p(x)$ for ganghastighet er som følgende:

- a) Halvparten av en populasjon har en maksimal forflytningshastighet som er høyere enn μ , og halvparten lavere
- b) En like stor andel av populasjonen har en maksimal forflytningshastighet raskere enn f.eks. $\mu + \beta$ som $\mu - \beta$, hvor β er et positivt avvik [m/s] innenfor det observerte intervallet
- c) Den maksimale forflytningshastigheten en person får tildelt, vil være hastigheten til agentene ved fri bevegelse

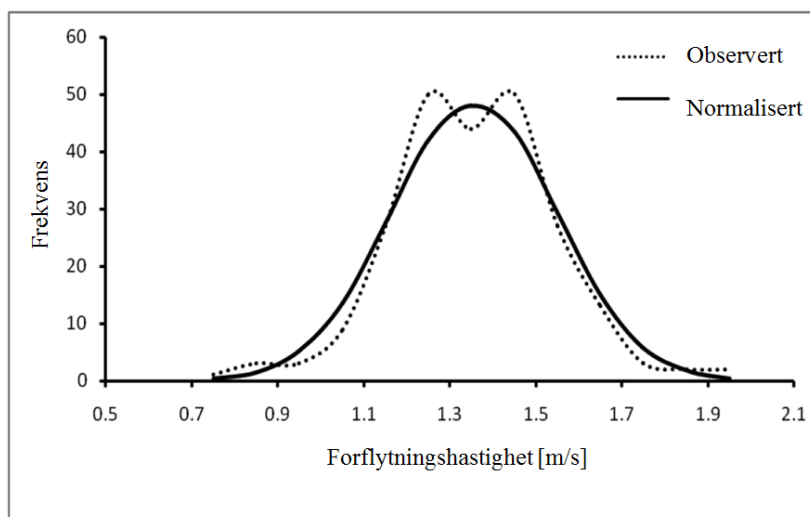
- d) Maksimal forflytningshastighet er alltid normalfordelt uavhengig av populasjonens sammensetning og bevegelsesevne

Modellen bygger dermed på fire antakelser (a)-(d), og det blir gitt en kvalitativ vurdering av disse antakelsene.

Antakelse (a):

Chandra & Bhati (2013) har studert forflytningshastigheten til fotgjengere på syv forskjellige steder, og det ble funnet at ved alle plassene fulgte forflytningshastigheten en tilnærmet normalfordeling, men med en «skjevhet». Skjevhet refererer til symmetrien rundt μ , og i skjeve fordelinger er ikke medianen lik μ (Hall, 2002), se også punkt 1 over.

Funnene i Chandra & Bhati (2013) viste at normalfordelingskurven enten hadde mer spredning på venstre eller høyre side av μ . Figur 20 viser den observerte kurven for et av stedene hvor studiene til Chandra & Bhati (2013) tok plass. Den observerte kurven viser ikke en symmetrisk normalfordeling, men at den kan normaliseres.



Figur 20: Forflytningshastigheter (Chandra & Bhati, 2013)

I virkeligheten kan det derfor ikke forventes at forflytningshastigheten er symmetrisk rundt μ . Når figur 20 betraktes kan forflytningshastigheten se ut til å kunne tilnærmes normalfordelingen.

Antakelsen om normalfordelt forflytningshastighet antas derfor å ha lav usikkerhetsgrad da empirien tilsier at den er normalfordelt (Chandra & Bharti, 2013; Frantzych, 1998; Løvås, 1994; Magnussen et al., 1996). Dersom antakelsen om normalfordeling sees i sammenheng med sensitivitetsanalysen for referanseoppsettet (se tabell 18), kan det vises at små endringer i inngangsparameteren for forflytningshastighet ga små endringer i evakueringstid. Dermed kan sensitiviteten betraktes som lav. Det må svært store endringer til for at antakelsen blir ugyldig og gir et resultat som medfører betydelig endring i risikoen.

Antakelse (b):

Denne antakelsen bygger på at kurven tilnærmer seg den horisontale akse asymptotisk uavhengig av hvilken retning fra μ som betraktes. Det er med andre ord like sannsynlig at personene går med en like høy (eller lav) maksimal forflytningshastighet i forhold til μ . Usikkerheten og vurderes å være lav på bakgrunn av empiri som for antakelse. Sensitiviteten vurderes å være lav. Det vurderes at det må svært store endringer til for at antakelsen blir ugyldig og gir et resultat som medfører betydelig endring i risikoen.

Antakelse (c):

Dersom den maksimale forflytningshastigheten vurderes å følge en normalfordeling er det ingen faktorer som kan påvirke den maksimale hastigheten til å bli høyere (enn den som er definert). Dvs. Dersom en agent får tildelt en maksimal forflytningshastighet på 1,8 m/s vil han eller hun ikke påvirkes av andre faktorer slik at han eller hun går raskere.

Fenomenet om hvordan mennesker opptrer i brann er heller ikke fullt ut forstått. Det eksisterer mye data på forflytningshastigheter, men ikke fra ekte branner. Dataene er basert på observasjoner enten fra brannøvelser eller normale situasjoner. Det vurderes likevel at menneskenes atferd ikke vil avvike betydelig i forhold til dataene funnet fra brannøvelser, bl.a. fordi forskning har vist at panikkhandlinger sjeldent forekommer i en situasjon med brann.

Antakelsen vurderes å ha en medium usikkerhetsgrad da dette er en forenkling av hvordan mennesker vil gå i virkeligheten. Mennesker har som regel en viss variasjon i forflytningshastigheten når de også beveger seg fritt, og det kan dermed tolkes at agentene har en noe mekanisk oppførsel. Sensitiviteten betraktes å være lav for denne antakelsen, pga. empiri vurderes at det må svært store endringer til for at antakelsen blir ugyldig og gi et resultat som medfører betydelig endring i risiko, dvs. en svært stor endring i evakueringstiden.

Antakelse d):

For å vise betydningen av denne antakelsen kan kontrollformen for normalitet tas utgangspunkt i. Ifølge Løvås (2005) er observasjonene (forflytningshastighetene) normalfordelt dersom 68 % av forflytningshastighetene ligger i intervallet $\mu \pm \sigma$ og 95 % i intervallet $\mu \pm 2\sigma$, og kalles en kontrollform for normalitet. F.eks.: dersom μ og σ henholdsvis settes lik 1,3 og 0,25, antas det at 68 % av alle menneskene går med forflytningshastighet i intervallet [1,05, 1,55], og 95 % har hastigheter i intervallet [0,8, 1,8]. Antakelsen gir at det er svært liten sannsynlighet (5 %) for at det kan observeres forflytningshastigheter under eller over henholdsvis 0,8 og 1,8 m/s.

Dersom forflytningshastigheten antas å være normalfordelt vil denne «kontrollformen» på normalitet også gjelde uavhengig av sammensetningen til populasjonen (kjønn, alder, mobilitetsgrad osv.). Det er kun μ og σ som kan varieres. Usikkerheten rundt denne antakelsen vurderes å være medium da antakelsen ekskluderer en vurdering av populasjonens sammensetning. Det er usikkerhet knyttet til om en normalfordeling ville passe for alle typer populasjoner, f.eks. på et sykehus hvor flere er assistanseavhengige og ikke har avhengig bevegelsesevne. Sensitiviteten til antakelse (d) vurderes å være medium. Det må store endringer til for at antakelsen blir ugyldig og gir et resultat som medfører betydelig endring i risikoen.

Klassifisere antakelsenes viktighetsgrad

I tabell 5 oppsummeres usikkerhet- og sensitivitetskategoriene for antakelsene.

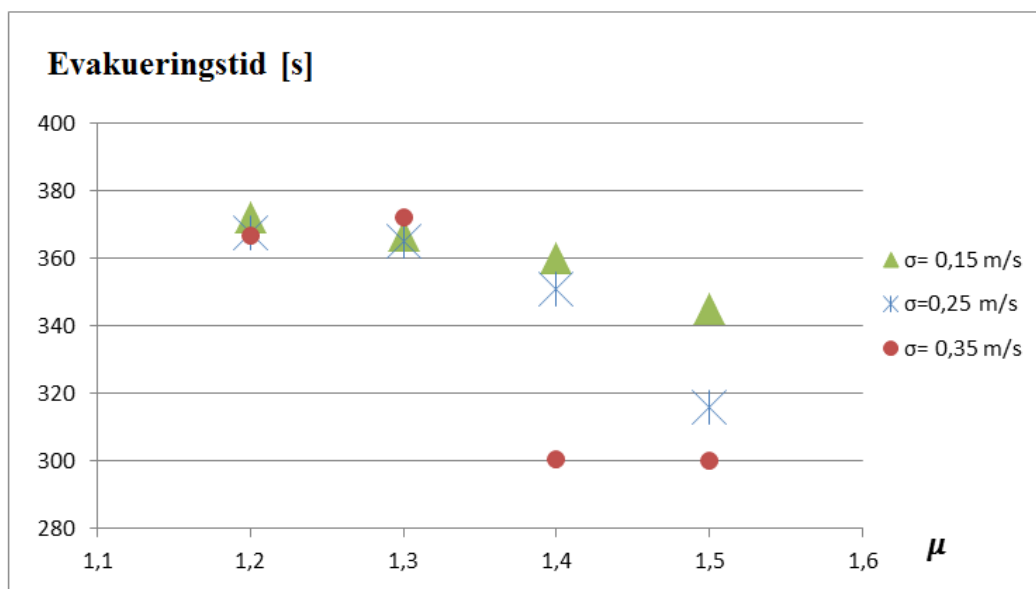
Tabell 5: Kategorisering av viktighet for antakelse(a)-(d)

Antakelse	Usikkerhet	Sensitivitet	Viktighet
(a)	lav	lav	lav
(b)	lav	lav	lav
(c)	medium	lav	medium-lav
(d)	medium	medium	medium

Det vurderes at antakelse (a) og (b) er akseptabel. Antakelse (c) vurderes å ha medium-lav viktighetsgrad som også aksepteres. Antakelse (d) er tildelt medium viktighetsgrad og blir videre analysert. En usikkerhetsvurdering av modellparameterne vil først gjennomføres for modellparameterne μ og σ , og etter det brukes en kvantitativ analyse med subjektive sannsynligheter for den strukturelle modellusikkerheten.

4.1.2 Parameterusikkerhet

For å vurdere usikkerhet om parameterne fastsettes et 0,90 troverdighetsintervall [1,20, 1,50] for μ og et 0,90 kredibilitetsintervall [0,15, 0,35] for σ . Betydningen av disse intervallene er at intervallene dekker de sanne verdiene for μ og σ med en subjektiv sannsynlighet på 0,90. Bakgrunnen for valg av disse størrelsene er en vurdering av μ og σ som tidligere er observert i ulike studier, se appendiks B.2. De valgte μ og σ i intervallene er for $\mu = 1,2, 1,3, 1,4$ og $1,5$ og for $\sigma = 0,15, 0,25, \text{ og } 0,35$. Det predikeres evakueringstider basert på de ulike μ og σ i delmodellen, se figur 21.



Figur 21: Predikert evakueringstid med hensyn på når μ og σ endres i delmodellen $p(x)$

Totalt ble det simulert 12 scenarier. F.eks. tre scenarier var simulert når $\mu = 1,20$, dvs. med $\sigma = 0,15, 0,25$ og $0,35$. Resultatene av simuleringene av de 12 scenarioene vises i figur 21. Hvert scenario simuleres 30 ganger. Tidene som er predikert er gjennomsnittsverdier av alle simuleringene fra hvert scenario.

Figur 21 viser at resultatene fra predikert evakueringstid varierer fra ca. 300 s ($\mu = 1,5$, $\sigma = 0,35$) til ca. 370 s ($\mu = 1,2$, $\sigma = 0,15$). Evakueringstiden er ikke spesielt sensitiv til endring av μ og σ . Punktene (μ og σ) i figur 21 viser en trend om at evakueringstidene blir kortere dersom en høyere μ velges. Det kan dermed forventes at evakueringstiden vil minke som en følge av at μ øker (uavhengig av σ) i casen.

I forhold til standardavvikene viser både $\sigma = 0,15$ og $0,25$ m/s en fallende trend (se også appendiks D). Når μ var 1,4 og 1,5 m/s ble resultatene mer sprikende når σ betraktes. Ved et større antall simuleringer vil trolig variasjonene reduseres.

Den strukturelle modellusikkerheten illustreres videre i analysen hvor scenarioet med $\mu=1,3$ og $\sigma=0,25$ betraktes. Verdiene $\mu=1,3$ og $\sigma=0,25$ ligger nærme de observerte forflytnings-hastigheter gitt i tabell 13 og 14 i appendiks B.2. Den predikerte evakueringstiden ved dette scenarioet var 365 s, som tilsvarer ca. 6 min.

4.1.3 Subjektive sannsynligheter

Neste steg i analysen vil være å tildele subjektive sannsynligheter for hvor stor den strukturelle modellfeilen er. For å finne modellfeilen må evakueringstiden være kjent. Et utfallsrom for den sanne evakueringstiden må derfor etableres; dvs. det lages et intervall for hva som henholdsvis vurderes å være den korteste og lengste sanne evakueringstiden.

Den sanne evakueringstiden kan ikke være null, men større enn null. Teoretisk kan evakueringstiden også være uendelig lang, fordi det ikke er noen tidsbegrensninger i elementene som evakueringstiden består av. Utfallsrommet for evakueringstiden skrives da: $(0, \infty)$, selv om en evakueringstid tilnærmet lik null og en uendelig lang vurderes å være svært usannsynlig.

Ved å bruke at $\mu_0=1,3$ og $\sigma_0=0,25$ er det betinget «perfekt» kunnskap om μ og σ . Den strukturelle modellfeilen for utgangsverdien for $\Delta_G(1,3, 0,25)$ vil da ligge i intervallet $(-\infty, 6]$. For utregning av den strukturelle modellfeilen henvises det til appendiks E.

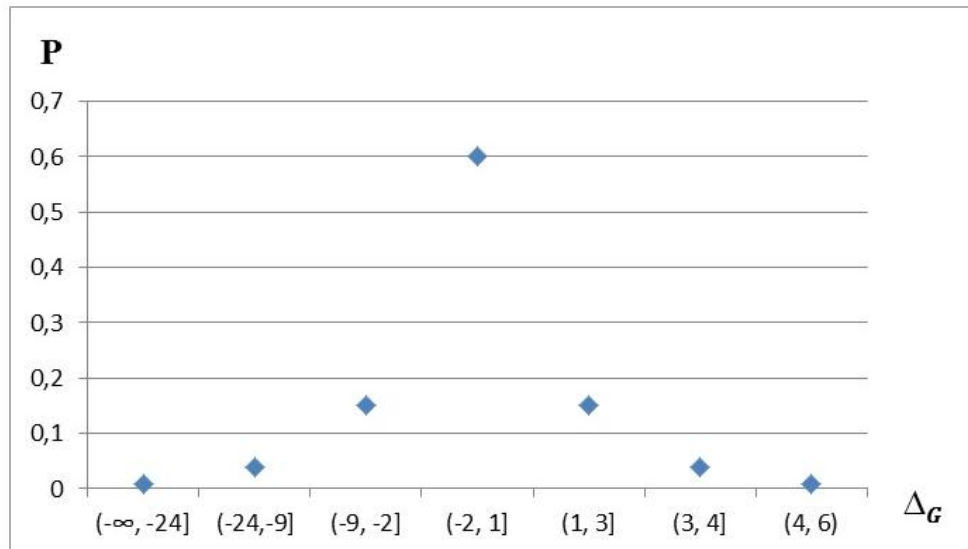
Utfallsrommet for den sanne evakueringstiden er delt opp i intervaller slik at en triangulær sannsynlighetsfordeling kan illustreres senere med hensyn på den strukturelle modellfeilen pga. antakelse (d). Det tildeles en subjektiv sannsynlighet for hvert intervall, se tabell 6.

Tabell 6: Sannsynlighet for strukturell modellfeil

Evakueringstid [min]	Strukturell modellfeil [min]	Sannsynlighet P
(30, ∞]	$(-\infty, -24]$	0,01
(15, 30]	$(-24, -9]$	0,04
(8, 15]	$(-9, -2]$	0,15
(5, 8]	$(-2, 1]$	0,6
(3, 5]	(1, 3]	0,15
(2, 3]	(3, 4]	0,04
(0, 2]	(4, 6)	0,01

Figur 22 illustrerer at det er tildelt en sannsynlighet på 0,6 for at den strukturelle modellfeilen er i området -2 til 1 minutt, dvs. at den sanne evakueringstiden ligger i intervallet (5, 8] min med subjektiv sannsynlighet på 0,6, se også tabell 6. En sannsynlighet (eller grad av tro) på

0,6 kan sammenlignes med sannsynligheten for å trekke en rød kule ut ifra en urne med 10 kuler hvor 6 er røde og 4 er blå.



Figur 22: Triangulær sannsynlighetsfordeling om modellfeilen Δ_G

Antakelse (d) vurderes å gi usikkerhetsbidrag og derfor er det sannsynlig at den sanne evakueringstiden vil avvike noe fra prediksjonen (6 min). Det vurderes at antakelsen (d) i delmodellen bidrar i en lav grad til modellusikkerhet, prediksjonen i $G(\mu, \sigma)$ vurderes derfor ikke å avvike mye fra den sanne evakueringstiden Z når kun modellfeilen betraktes.

Det ble også tildelt en sannsynlighet på 0,15 både for at den sanne evakueringstiden ligger i intervallet $(3, 5]$ og $(8, 15]$. Årsaken er hovedsakelig et resultat av at forflytningshastigheten antas å være normalfordelt uavhengig av populasjonens sammensetning og bevegelsesevne.

Halene i sannsynlighetsfordelingen er ganske spisse fordi sannsynligheten vurderes å være svært lav for at evakueringstiden skal bli lengre enn 15 og kortere enn 3 min pga. antakelse (d). Dette kan likevel skje dersom f.eks. dersom en svært stor andel av populasjonen har svært svekket bevegelsesevne.

4.1.4 Aksept av delmodell

Empirien tilsier at personers forflytningshastighet kan betraktes som en normalfordelt. Antakelsene som modellen bygger på fikk jevnt over lave viktighetsgrader og evakueringstiden var ikke spesielt sensitiv for endringer i modellparameterne.

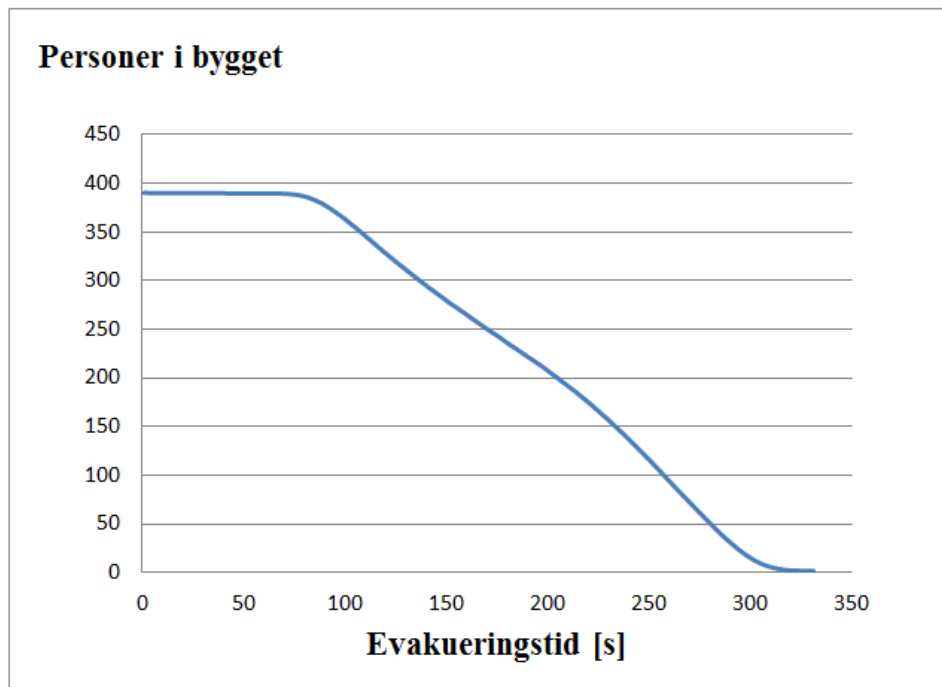
Det vurderes at antakelsene fra delmodellen $p(x)$ er små bidragsyttere til usikkerhet i evakueringsmodellen som kan aksepteres, og at modellen $p(x)$ kan brukes i henhold til modellens $G(V)$ formål: å predikere evakueringstid.

4.2 Resultater fra simuleringene

En sensitivitetsanalyse er utført for å danne grunnlag for diskusjon om hvilken effekt endringer i inngangsparametere vil ha i forhold til evakueringstiden ved bruk av programmet STEPS. Referanseoppsettet i kapittel 3.3 er som nevnt benyttet til dette formålet.

4.2.1 Simulering av referanseoppsettet

Referanseoppsettet med referanse verdier ble simulert med de inngangsstørrelser gitt i tabell 6. Figur 23 viser personer evakuert per tidssteg.



Figur 23: Figuren viser antall personer i bygget som funksjon av tid i sc00. Figuren viser at ved t=0 s var det 390 personer i bygget. Etter ca. et minutt begynner de første personene evakuert. Ved t=311 s (ca. 5 min) er alle personene evakuert (N=0)

Figur 23 viser at etter ca. 75 s har de første personene evakuert bygget. Årsaken til at det tar litt over minuttet før de første personene har evakuert skyldes blant annet at agentene er tildelt ulike reaksjonstider fra en lognormal fordeling, hvor de korteste reaksjonstidene er 1 minutt. Etter 75 s vil personene gradvis evakuere bygget og etter 311 s har alle personene evakuert.

Evakueringstidene hadde standardavvik på 7,5 s. Ved å legge på 60 s deteksjonstid gir det en nødvendig rømningstid på 377 s, dvs. i overkant av 6 min.

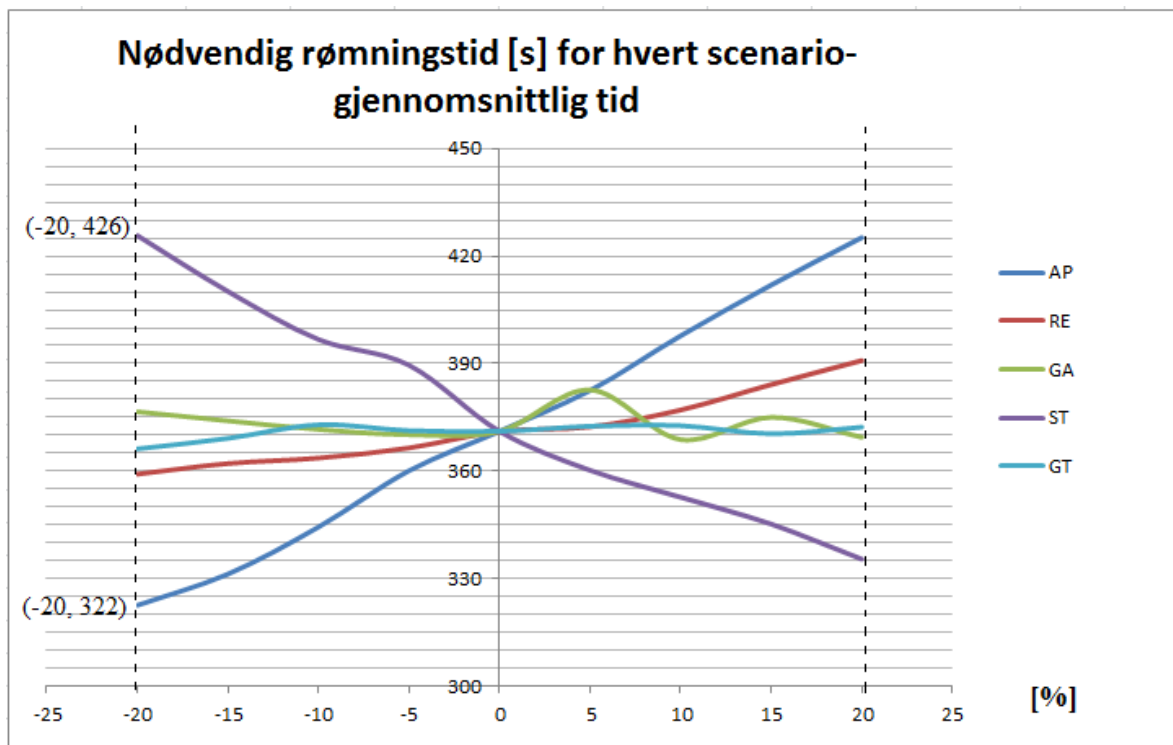
4.2.2 Sensitivitetsanalyse

Det ble endret på fem forskjellige inngangsparametere og disse parameterne ble enten økt eller minket med $\pm 20\%$ (se tabell 4). Til sammen ble dette 41 ulike scenarier. For nærmere beskrivelse av case og scenarier henvises det til kapittel 3.1 og 3.4.

Nødvendig rømningstid

I figur 24 er nødvendig rømningstid fra sensitivitetsanalysen presentert, dvs. at tidene som er presentert inkluderer både deteksjonstid og evakueringstid. De bratteste kurvene vil representere de mest følsomme evakueringstidene.

Den nødvendige rømningstiden er minst følsom ovenfor variasjoner i tålmodighetsgraden (GT) som viser en tilnærmet vannrett kurve (lys blå). Tiden viser ingen tydelig trend for ganghastighet (GA), men er heller ikke spesielt sensitiv ovenfor denne parameteren. Ved en økning over 5 % i (GA) vil først tiden bli lengre mens ved enda mer økning vil tiden bli noe kortere igjen.



Figur 24: Figuren viser nødvendig rømningstid som funksjon av endring i inngangsparameterne

Nødvendig rømningstid er mest følsom ovenfor variasjoner i personaltallet (AP) og strømningsraten (ST), som henholdsvis er illustrert som blå og lilla kurve. Den korteste predikasjonen var på 322 s da antall personer ble redusert med 20 %, og den lengste på 426 s da strømningsraten ble redusert med 20 %. Ved å øke personantallet 20 % over referanseverdien gir dette en nødvendig rømningstid på 425 s, og ved å øke strømningsraten 20 % blir nødvendig rømningstid ca. 325 s.

Den røde kurven illustrerer nødvendig rømningstid som en funksjon av reaksjonstiden (RE). Den nødvendige rømningstiden har en tilnærmet lineær vekst i forhold til en økning av reaksjonstiden. Ved å redusere referanseverdien til (RE) 20 % er nødvendig rømningstid ca. 360 s og ved å øke 20 % er tiden ca. 390. Nødvendig rømningstiden er heller ikke sensitiv i forhold til (RE). I appendiks D finnes figurer som baserer seg kun på de korteste og lengste nødvendige rømningstiden som ble predikert fra samtlige av scenarioer. Fremstillingene viser viktigheten av å kjøre flere simuleringer.

5 Diskusjon

5.1 Bidragsyttere til modellusikkerhet i STEPS

Modellusikkerhet inkluderer underkategoriene parameterusikkerhet, strukturell modellusikkerhet og kompletthetsusikkerhet som vil diskuteres videre da en av problemstillingene var å identifisere bidragsyttere til usikkerhet. Først diskuteres parameterusikkerhet, som er en underkategori av epistemisk usikkerhet.

5.1.1 Parameterusikkerhet

Personantall og strømningsrate

Den nødvendige rømningstiden var mest sensitiv i forhold til parameterne «antall personer» i bygget og «strømningsraten» i følge figur 24. Disse inngangsstørrelsene uttrykkes i STEPS gjennom en singel verdi. Strømningsraten uttrykker hvor mange personer som går gjennom døren per sekund, og er vanskelig å tallfeste fordi den kan variere etter omstendighetene. Ved simulering av evakuering vil både evakueringstiden og parameterne representere variasjoner, dvs. aleatorisk usikkerhet. Antall personer i bygget er en viktig parameter, og bestemmes gjerne ut ifra dimensjonerende personantall i DiBK (2010) i rømningsanalyser.

Det var derfor ønskelig å se hvilken effekt en økning eller reduisering av disse parameterne ville utgjøre for evakueringstiden pga. den usikkerheten de representerer. Strømningsraten må tallfestes i modellen og er betinget av analytikerens bakgrunnskunnskap. Flere studier viser observerte strømningsrater (bl.a. utført av Fruin, se Proulx (2002)), men det vil være usikkerhet om den sanne fremtidige verdien. Siden aleatorisk usikkerhet ikke kan reduseres er det heller ikke mulig å redusere denne usikkerheten. Et konsekvensreducerende tiltak er likevel å sørge for at personantallet ikke overdimensjoneres. Det argumenteres for at begge parameterne med fordel kan inkluderes i usikkerhetsanalyser pga. nødvendig rømningstid er sensitiv i forhold til disse variasjonene.

Reaksjonstid og forflytningshastighet

Ved simulering av evakuering vil også inngangsparameterne «reaksjonstid» og «ganghastighet» representere aleatorisk usikkerhet. Begge inngangsparameterne ble uttrykt ved hjelp av sannsynlighetsmodeller. Figur 24 viser at den nødvendige rømningstiden ikke var ikke spesielt sensitiv ved endring av disse parameterne, men selv om nødvendige rømningstid ikke var sensitiv i forhold til endringer av den bestemte reaksjonstiden og ganghastigheten betyr ikke det at disse inngangsparameterne ikke er usikre. Reaksjonstiden og ganghastigheten uttrykkes gjennom sannsynlighetsfordelinger som er bestemt ut ifra analytikerens bakgrunnskunnskap. Dersom bakgrunnskunnskapen til analytikeren er svak vil ikke fordelingen gi mye innsikt for å konkludere med om modellen kan aksepteres.

I utgangspunktet ville det vært logisk at en økning av gjennomsnittlig forflytningshastighet ville gi kortere nødvendig rømningstid (se figur 24), men nødvendig rømningstid er også en funksjon av persontettheten. Dersom personene er hindret i å gå sin egen frie hastighet vil de naturligvis måtte tilpasse seg og ikke lenger kunne gå like raskt.

Det ble vurdert i usikkerhetsanalysen at det var usikkerhet knyttet til om en normalfordeling ville passe for alle typer populasjoner, f.eks. for en populasjon hvor en andel har avhengig bevegelsesevne. Kanskje burde det tillegges en skjevhet og en traktering i normalfordelingen

for å uttrykke aleatorisk usikkerhet i simuleringmodellene tilknyttet populasjonens sammensetning i ulike tilfeller. Usikkerhetsanalysen i rapporten tok for seg forflytningshastigheten og viste at antakelsene som ble gjort ved å uttrykke forflytningshastighet som en normalfordelt størrelse ble vurdert å gi små usikkerhetsbidrag.

Usikkerhet om reaksjonstiden i simuleringene kommer fra epistemisk usikkerhet når denne tallfestes i modellen av analytikeren. Fra litteraturen er det funnet at reaksjonstiden kan variere fra å være noen få sekunder til over 20 minutter. Noen personer klarer heller aldri å forlate bygget. Det argumenteres for at reaksjonstiden krever detaljert analyse i en usikkerhetsanalyse pga. høy epistemisk usikkerhet om den fremtidige sanne reaksjonstiden i en brannsituasjon. Reaksjonstiden karakteriseres derfor som en viktig bidragsyter til modellusikkerhet selv om sensitivitetsanalysen viste at evakueringstiden ikke var følsom som en følge av små endringer i reaksjonstiden som var bestemt i referanseoppsettet.

Tålmodighetsgrad

Grad av tålmodighet ble også vurdert i forhold til sensitivitet. Evakueringstiden viste seg å være svært lite sensitiv til denne inngangsparameteren. I likhet med de andre inngangsparameterne vil denne variere med tid og omstendigheter. Ved simulering vil tålmodighetsgraden reflektere variasjon. Ved tallfesting må analytikeren bruke igjen bakgrunnskunnskap. Det vurderes og argumenteres at usikkerhet knyttet til denne faktoren vil være vanskelig å redusere. Tålmodighetsgrad er ikke en bidragsyter til usikkerhet i evakueringsmodellering men kan nevnes om det ansees svært hensiktsmessig i analyser.

5.1.2 Strukturell modellusikkerhet

Dersom parameterne er kjente eller observerbare kunne usikkerhet knyttet til parameterne neglisjeres og usikkerheten kun assosieres til modellen sin struktur. Et interessant spørsmål som kan stilles er hva som kan føre til strukturell modellusikkerhet i modellen STEPS. For å diskutere dette er det nødvendig å se på kapittel 2.5.3, hvor evakueringsprinsippene som STEPS bygger på er forklart. Kort oppsummert evakuerer agentene (de visuelle personene i modellen) byggverket ut ifra følgende prinsipper:

Agentene er ukjente i bygget: Agentene har ingen global oversikt over bygningen og betrakter kun utganger i det rommet de er.

Agentene går kun mot utgangene: Agentene vil med en gang de kan, se etter samt bevege seg mot nærmeste exit utgang.

Agentene vil bruke kortest mulig tid: Den grunnleggende idéen er at agentene ønsker å gå (i den grad det er mulig) mot nærmeste utgang i en uhindret forflytningshastighet ved å bruke korteste mulig tid og uten sammenstøt.

Cellular automata: Rommet er delt opp i kartesiske rutenett og en agent kan kun oppta en celle (1x1 m) per tiddsteg. Dersom to agenter sikter til samme celle blir konflikten løst tilfeldig.

Disse punktene kan være kilder til strukturell modellusikkerhet. Punktene representerer noe om strukturen til modellen, hvordan STEPS er bygget opp. Dersom disse punktene ikke stemmer overens med hvordan mennesker vil evakuere i virkeligheten vil det føre til et bidrag til modellfeilen (avviket mellom prediksjonen av STEPS og den sanne fremtidige verdien).

Modellen er ment for å gi en prediksjon på Z. Et spørsmål som kan stilles er på hvilket nivå det bør aksepteres at det eksisterer strukturell modellusikkerhet.

Det finnes flere eksempler på at mennesker ikke evakuerer på lik linje som agentene evakuerer i STEPS. I figur 12 ble det presentert flere faktorer om både personen, bygget og brannen som påvirker evakueringen, og viser at antakelsene i STEPS om menneskelige handlingsmønstre ikke alltid stemmer overens med virkeligheten. Personens kunnskap og erfaring er faktorer som påvirker hvordan personen vil handle og påta seg roller og ansvar. Dersom personen var trent på å håndtere en situasjon med brann ville han eller hun lettere kjenne igjen situasjon, og denne personen ville ofte forsøke å slukke brannen. Dersom slukking ikke lar seg gjøre vil han eller hun ofte varsle andre og deretter rømme. Noen vil også føle et ansvar for andre og hjelpe andre ut. Med andre ord, mennesker vil ikke alltid gå rett mot utgangene eller bruke kortest mulig tid i en evakueringsprosess.

Kilder til strukturell usikkerhet kommer fra epistemisk usikkerhet eller en ignorering av en rekke mulige menneskelige handlingsmønstre. Utfordringen er at menneskelige handlingsmønstre på en siden kan være forutsigbare, men på en annen side også være svært overraskende, og er derfor vanskelig å inkludere fullstendig i evakueringsmodeller. De nevnte prinsippene i modellen STEPS gir begrensinger i hvilke handlingsmønstre som kan tas høyde for. Hensikten med slik modellering er å beskrive evakueringsprosessen tilfredsstillende nøyaktig, men også å forenkle kompliserte forhold. Evakueringsmodellen STEPS har dermed sine begrensninger som bør bli gjort kjent av den som utfører analysen.

Det argumenteres for at det er viktig å diskutere strukturell modellusikkerhet i rømningsanalyser hvor evakueringsmodeller blir anvendt. Dersom dette usikkerhetsbidraget totalt ignoreres kan viktige aspekter rundt modell usikkerheten bidra til uventede overraskelser i fremtiden. På bakgrunn av at modellene må forenkle noen forhold bør et nivå av strukturell modellfeil kunne aksepteres ved evakueringsmodellering.

5.1.3 Kompletthetsusikkerhet

Menneskelige faktorer kan være bidragsyttere til kompletthetsusikkerhet i rømningsanalyser siden alle handlingsmønstre ikke er fullt ut forstått.

Ifølge Notarianni (2002) kan ikke menneskelige faktorer bli behandlet på lik linje som fysiske variabler som anvendes i evakueringsmodeller fordi menneskelige handlingsmønstre representerer «forsettlig usikkerhet». Dvs. usikkerhet om handlinger som gjøres med vilje. Dersom menneskene har få valg vil handlingene være mer forutsigbare, på en annen siden kan mange valg føre til uforutsigbarhet (Notarianni, 2002). Menneskelige faktorer kan derfor forstås å være vanskelige å inkludere fullstendig i analysene, og fører derfor gjerne til et bidrag til kompletthetsusikkerhet.

Kompletthetsusikkerhet assosieres med den graden modellen henvender seg til det fenomenet som studeres, og dermed bør analytikeren tenke etter hvorfor modellen kanskje *ikke* kan henvende seg til det studerte fenomenet. Mangel på fullstendighet er ikke i seg selv en usikkerhet, men en anerkjennelse av de begrensningene som ligger i modellens omfang.

5.2 Analytikerens bakgrunnskunnskap

Diskusjonen i 5.1.1-5.1.3 viser at det må utøves forsiktighet til å trekke for raske konklusjoner ut ifra en sensitivitetsanalyse og at analytikere bør kunne skille mellom aleatorisk og epistemisk usikkerhet.

Ved simulering behandles parameterne som å representere aleatorisk usikkerhet pga. modellene reflekterer variasjon (Bjerga et al., 2014). Evakueringsmodellene vil reflektere variasjoner i evakueringstid, mens det kan være epistemisk usikkerhet knyttet til tallfesting av inngangsparameterne.

Målene på usikkerhet om de fremtidige hendelsene og konsekvensene er betinget av analytikerens bakgrunnskunnskap (Aven, 2010). Analytikerens antakelser kan være bidragsyttere til usikkerhet i modelleringen fordi de er betinget av bakgrunnskunnskapen. Analytikerens bakgrunnskunnskap som ligger til grunn for tallfestingen av enkelte inngangsparametere kan være svak (Aven & Zio, 2013), og dermed føre til en prediksjon av evakueringstiden som avviker mye fra den sanne evakueringstiden. Det er argumentert for at det er epistemisk usikkerhet forbundet med menneskelig atferd i brann. Dersom kunnskapen på en annen side er velfundamentert vil troverdigheten til prediksjonene øke.

Det argumenteres derfor for at en bred usikkerhetsbeskrivelse blir gjennomført. På den måten styrkes troverdigheten til prediksjonen og til sikkerhetsmarginen. Sikkerhetsmarginen kan ikke ta høyde for alle overraskelser, noe risiko må aksepteres. Likevel bør ikke sikkerhetsmarginen brukes til å dekke over for usikkerheter uten at en usikkerhetsanalyse er gjennomført.

5.3 Metode for å håndtere usikkerhet

Analysen av delmodellen $p(x)$ ble gjennomført på et svært detaljert nivå. Dette ble hovedsakelig gjort for å illustrere metoden. Etter den kvalitative vurderingen av antakelsene kom det frem at antakelsene ble vurdert å ha enten middels eller lavere viktighetsgrad. Etter kvalitativ vurdering kunne det argumenteres for at antakelsene som ble undersøkt ikke hadde stor nok sensitivitet og usikkerhet for å videre analyseres med en omfattende metode for håndtering av usikkerhet. Derfor argumenteres for at det ikke var like nødvendig med videre analyse av modellusikkerheten om den strukturelle modellfeilen. Vurderingen av parameterusikkerheten viste også at evakueringstiden ikke var sensitiv i forhold til modellparameterne.

Metoden ga klare indikasjoner på hvilke antakelser i modellen som gir de største usikkerhetsbidragene. Metoden viste gjennom den kvalitative vurderingen at det må tas hensyn til usikkerhet knyttet til populasjonens sammensetning og spesielt menneskenes bevegelsesevne når delmodellen $p(x)$ brukes. I tillegg kunne den strukturelle modellusikkerheten knyttes mot antakelsenes usikkerhet- og sensitivitetsgrad og modellusikkerheten om modellfeilen kunne kvantifiseres. Anvendelse av subjektive sannsynligheter gir analytikeren et verktøy til å uttrykke hans eller hennes grad av tro om størrelsen til den strukturelle modellfeilen.

Utfordringen er at sannsynlighetsfordelingene kan være basert på en svak bakgrunnskunnskap, alternativt kan det utføres kvalitative vurderinger for størrelsen til den strukturelle modellfeilen, hvor målet er å analysere viktighetsgraden. (Aven, & Zio, 2013).

5.3.1 Metoden i sammenheng med evakueringsmodellering

Videre viste metoden en ny måte for analytikere å utføre en usikkerhetsvurdering i forbindelse med evakueringsmodellering. Ved hjelp av antakelsene kunne de faktorene som den nødvendige rømningstiden påvirkes av bli vurdert, se f.eks. figur 12. Bidragsyttere til usikkerhet i tidselementene kunne identifiseres og vurderes i usikkerhetsanalyser. I tillegg vurderes ikke bare evakueringen som en «mekanisk» prosess, men der menneskelig atferd kan trekkes inn og vurderes opp imot eksisterende kunnskap.

Det vurderes at det vil være svært ressurskrevende å anvende metoden for alle delmodeller som ansees å gi små usikkerhetsbidrag i evakueringsmodelleringen. Det var lite meningsfylt å analysere delmodellen på et såpass detaljert nivå som ble gjort, pga. antakelsenes tildeling av lavere viktighetsgrader samt en evakueringstid som ikke var spesielt sensitiv for endring i modellparameterne.

For mer praktisk anvendelse studerte metoden i rømningsanalyser er det laget et forslag til fremgangsmåte i kapittel 6.

6 Forslag til håndtering av modellusikkerhet

I dette kapittelet vil det bli presentert forslag til hvordan modellusikkerhet kan håndteres når nødvendig rømningstid skal predikeres ved hjelp av modellering. En mulig måte er å dele inn den nødvendige rømningstiden i tidselementene: deteksjon, fortolkning, beslutning og forflytning, se figur 25.

Nødvendig rømningstid			
Deteksjonstid	Evakueringstid		1
	Reaksjonstid		2
	Fortolkningstid	Beslutningstid	3
Forflytningstid			

Figur 25: Den nødvendige rømningstiden brutt ned i delementer

Forslaget til håndtering av usikkerhet bygger på funnene i denne rapporten.

Del 1. Identifisering av modell og viktige størrelser

Først må en modell G og eventuelle delmodeller som skal betraktes bli definert. Inngangsstørrelser X identifiseres og begrunnes. De parameterne og antakelsene som kan forårsake en vesentlig endring i resultatet inkluderes i analysen. Det kan være flere delmodeller som ønskes å studere, og derfor flere størrelser av interesse.

Et eksempel på et oppsett av Z , G og X er gitt i rammen under.

<i>Størrelser av interesse:</i>	
Nødvendig rømningstid	Z
- Evakueringstid	- T_E
- Deteksjonstid	- T_D
·	·
·	·
·	·
<i>Modellen G:</i>	
Modell for å predikere størrelser av interesse T_E :	
$G(X)$,	
hvor X er inngangsstørrelser i modellen G .	
<i>Velge ut eventuelle delmodeller i G:</i>	

Delmodeller i G(X):	1. p(x): Normal forflytningshastighet 2. p(y): Lognormal reaksjonstid 3. p(w): Lognormal deteksjonstid . . .
<i>Beskriv modellen, delmodell(er) og antakelser disse bygger på:</i>	
Delmodellen kan være på matematiske former om systemet eller prosessen.	
p(x)	a) antakelse 1 b) antakelse 2 c) . . .

Del 2. Usikkerhetsanalyse

For å identifisere delmodeller som krever enklere eller mer detaljert vurdering kan det være hensiktsmessig å utføre en sensitivitetsanalyse for parametere. Sensitivitetsanalysen kan ofte bidra til et sterkere beslutningsgrunnlag.

Først må det bestemmes tilnæringsmetode for vurdering av usikkerhet, f.eks. kvalitativ vurdering/skjema, subjektive sannsynligheter og upresise sannsynligheter. Det bestemmes metode ut ifra hvor viktige antakelsene vurderes å være i forhold til størrelsene av interesse og sensitivitetsanalysen dersom utført.

For delmodeller der antakelsene vurderes å gi store usikkerhetsbidrag (med parametere som eventuelt er funnet i sensitivitetsanalysen) kan det være informativt å kombinere både kvalitative og kvantitative tilnæringer for en mer detaljert analyse. Metodikken bestemmes etter hvilket detaljnivå som er ønsket og anses mest hensiktsmessig. Som et utgangspunkt anbefales uansett en enkel kvalitativ vurdering gjøres for alle antakelsene for de studerte delmodeller.

Tildele score til antakelsenes viktighetsgrad

Etter at antakelser er identifisert anbefales det at det tildeles viktighetsgrad basert på antakelsenes usikkerhet- og sensitivitetsgrad.

I tabell 7 vises det hvordan antakelser kan bli tildelt viktighetsgrad basert på usikkerhet og sensitivitet. Viktighetsgraden til p(x) i tabellen er kun for å vise et eksempel (og er de samme som resultatene i kapittel 4.1.1).

Antakelsene med lav viktighetsgrad kan betraktes som akseptable, mens antakelser med medium og høy viktighetsgrad må vurderes i forhold til om modellen kan aksepteres. Dersom modellen ikke kan aksepteres, må modellen re-modelleres i forhold til antakelsen som har høy viktighetsgrad.

Antakelser i modeller som vurderes å gi små usikkerhetsbidrag krever nødvendigvis ingen videre analyse, det vil være tilstrekkelig med en enkel vurdering.

Tabell 7: Eksempel på hvordan score kan tildeles antakelser i delmodeller

Antakelser i delmodell	Usikkerhet			Sensitivitet			Viktighetsgrad
	Lav	Medium	Høy	Lav	Medium	Høy	
p(x)							
a)	x			x			lav
b)	x			x			lav
c)		x		x			medium-lav
d)		x			x		medium
p(y)							
.							
.							
.							

Vurdering av parameterusikkerhet og strukturell modellusikkerhet for modeller der antakelsene gir medium og høye usikkerhetsbidrag

For de kritiske modellene (som bygger på antakelser med høyere viktighetsgrader) vil det være naturlig å analysere videre med hensyn på parameter- og strukturell modellusikkerhet. Her er det interessant om antakelsene i delmodellen kan føre til store modellfeil. For å vurdere parameter- og strukturell modellusikkerhet kan det benyttes f.eks. subjektive sannsynligheter slik det ble gjort i kapittel 4.1.2 eller det kan velges andre metoder ettersom hvilket detaljnivå som er ønsket eller anses mest hensiktsmessig

Vurdering av modellen dersom delmodeller brukes

Dersom kun delmodeller av en modell er vurdert frem til nå kan selve modellen tas i betraktning, dvs. identifisere usikkerhetsbidrag som kommer fra prinsippene i selve evakueringsmodellen. For å identifisere denne type usikkerhet må kunnskap tilegnes om de grunnleggende prinsippene i modellen. Det kan være utfordrende å finne alle prinsippene da dette krever detaljkunnskap, men en analytiker bør minimum kjenne til de grunnleggende prinsippene som ligger til grunn i modellen.

Usikkerhetsanalysen bør også inneholde en anerkjennelse av de begrensningene som ligger i modellens omfang, dvs. en kvalitativ vurdering om mulige forhold eller begrensninger i modellen. Denne erkjennelsen gir også en bredere forståelse for bruken av modellen (se 2.2.2 om kompletthetsusikkerhet).

Del 3. Aksept av modell

En antakelse med medium og høy viktighetsgrad må vurderes i forhold til om modellen kan aksepteres. Modellen kan da re-modelleres i forhold til denne viktige antakelsen, dvs. steg 1-4 i figur 18 gjentas slik at antakelsen kan få tildelt en lavere viktighetsgrad.

For modeller der antakelsene kun gir minimale usikkerhetsbidrag er modellen allerede akseptert. Modellen aksepteres dersom den anses å gi lav usikkerhet forhold til modellfeilen og modellens formål: å predikere en størrelse av interesse.

7 Konklusjon

Den nødvendige rømningstiden består av deteksjon- og evakueringstid. I sammenheng med brannsikkerhet brukes ofte evakueringsmodellering som et hjelpemiddel i funksjonsbaserte analyser for å predikere evakueringstiden, og i rapporten fokuseres det på usikkerhet som eksisterer når en skal predikere evakueringstid ved hjelp av evakueringsmodellering i STEPS.

En metode for håndtering av usikkerhet ble utprøvd i sammenheng med prediksjon av evakueringstid, og det ble utført en usikkerhetsanalyse for å illustrere metoden. Et nyttig grep ved vurdering av usikkerhet er å bryte ned evakueringsmodellen i flere delmodeller om det er gjennomførbart. En delmodell for forflytningshastighet ble studert i denne rapporten. En sensitivitetsanalyse for inngangsparametere ble også utført, hvor hensikten var å vurdere sensitiviteten til evakueringstiden ovenfor parameterne.

Sensitivitetsanalysen viste at evakueringstiden var mest sensitiv ovenfor variasjoner i personantallet og strømningsraten. Evakueringstiden var ikke spesielt sensitiv ovenfor variasjoner i reaksjonstiden, men det eksisterer høy epistemisk usikkerhet ved tallfesting av denne tiden. Modellene reflekterer variasjoner i evakueringstid, mens det kan være epistemisk usikkerhet knyttet til tallfesting av inngangsparametere. Analytikere må kunne skille mellom aleatorisk og epistemisk usikkerhet. Det er usikkerhet til analytikerens bakgrunnskunnskap som ligger til grunn for tallfestingen av inngangsparametere. Kilder til usikkerhet kan også komme fra modellens struktur. Derfor bør analytikere kjenne godt til modellens oppbygning, og de begrensninger som kan føre til modellfeil bør gjøres kjent.

Metoden som anvendes i usikkerhetsanalysen viser en ny måte å behandle modellusikkerhet på hvor antakelsene og prinsippene som delmodellen bygger på betraktes spesielt. Fordelen med metoden er at den gir klare indikasjoner på hvilke antakelser i modellen som gir de største usikkerhetsbidragene, hvordan den strukturelle modellusikkerheten kan knyttes mot antakelsenes usikkerhet- og sensitivitetsgrad og at modellusikkerheten om modellfeilen kan kvantifiseres. Det konkluderes med at metoden egner seg godt til å analysere usikkerhet i matematiske modeller hvor et fenomen eller systemet bygger på et sett av antakelser som en følge av modellens egenskaper.

Arbeidet med usikkerhetsanalysen for den valgte delmodellen og den anvendte tilnæringsmetodikken viser at en detaljert analyse blir for ressurskrevende ved analyser av delmodeller som ansees å gi små usikkerhetsbidrag. Antakelsene for modellen som ble analysert i denne rapporten fikk jevnt over tildelt lave og middels lave viktighetsgrader, og det vil derfor være lite meningsfylt å analysere delmodellen på et såpass detaljert nivå som ble gjort. Evakueringstiden var ikke sensitiv i forhold til inngangsparametere i delmodellen eller antakelsene delmodellen bygger på.

Rapporten viser i sum viktigheten av å bruke usikkerhetsanalyse ved brannteknisk evakueringsmodellering. Antakelsene i delmodellen som ble undersøkt hadde ikke stor nok sensitivitet og usikkerhet til å bruke en så omfattende metode for håndtering av usikkerhet. Det påpekes derfor at når større deler av evakueringsmodellen skal vurderes med hensyn på usikkerhet vil rammeverket presentert i denne rapporten i mye større grad vise hvorvidt det er usikkerhet i prediksjonene av nødvendig rømningstid. Ved å utføre en usikkerhetsanalyse kan analytikeren også vise styrken og fundamentet i bakgrunnskunnskapen som ligger til grunn for vurderingen, og dermed øke troverdigheten til prediksjonene.

8 Videre arbeid

I kapittel 6 ble det foreslått en fremgangsmåte å håndtere usikkerhet på i sammenheng med predikering av nødvendig rømningstid ved bruk av evakueringsmodellering. Denne fremgangsmåten er et resultat av funnene i rapporten og kan være en enkel tilnærming på usikkerhetshåndtering i branntekniske usikkerhetsanalyser.

Et forslag til videre arbeid ut er å utprøve fremgangsmåten og metoden i en fullstendig usikkerhetsanalyse i sammenheng med predikering av nødvendig rømningstid, og gi forslag til forbedringer eller endringer.

Om enkelte delmodeller kan kreve enklere eller mer avanserte tilnærminger for å analysere usikkerhet er også en problemstilling som kan være aktuell å se på videre.

Reaksjonstiden er ofte uttrykt gjennom en lognormal fordeling, og det kunne vært interessant å utprøve samme metoden for dette delementet av nødvendig rømningstid. Denne tiden påvirkes i høy grad av menneskelig atferd som sjeldent eller i liten grad vurderes i dagens usikkerhetsanalyser.

I. Referanseliste

- Aven, T. (2010). *Misconceptions of risk*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Aven, T. (2012) The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*, p. 33-44.
- Aven, T., & Reniers, G. (2012). How to define and interpret a probability in a risk and safety setting. *Safety Science*, p. 223-231.
- Aven, T. (2013, July 6). Probabilities and background knowledge is a tool to reflect uncertainties in relation to intentional acts. *Reliability Engineering and System Safety*, p. 229-234.
- Aven, T., Zio, E. (2013). Model Output Uncertainty in Risk Assessment. *International Journal of Performability Engineering* 9 (5), p. 475-486.
- Aven, T., Zio, E., Baraldi, P., Flage, R. (2014). *Uncertainty in Risk Assessment: The Representation and Treatment of Uncertainties by Probabilistic and Non-Probabilistic Methods*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Bjerga, T., Aven, T., Zio, E. (2014). An illustration of the use of an approach for treating model uncertainties in risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*,(125), p. 45-53.
- Brian, J.L. (2002). A Selected Historical Review of Human Behavior in Fire. *Fire Protection Engineering*, 16, p. 4-10.
- Bukowski, R.W. (2003). Fire Hazard Analysis, i *NFPA Fire Protection Handbook. 19th Edition* (eds Cote, A. E et al.). p. 3-105 to 3-114.
- Chandra, S., Bharti, A, K. (2013). Speed Distribution Curves for Pedestrians during Walking and Crossing. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, p. 660 – 667.
- Deibjerg, T., Husted, B.P., Bygbjerg, H., & Westerman, D. (2003). *Argos User`s Guide: A step by step guide to fire simulation* (revised 2005). Hvidovre: Danish Institute of Fire and Security Technology.
- Der Kiureghian, A., Ditlevsen, O. (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural Safety*, 31, p. 105–112.
- DiBK. (2010). *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. HO-2/2011. Hentet 12. februar 2014 fra <http://beta.dibk.no/no/BYGGEREGLER/Gjeldende-byggeregler/Veiledning-om-tekniske-krav-til-byggverk/>.
- Drouin, M., Parry, G., Lehner, J., Martinez-Guridi, G., LaChance, J., Wheeler, T. (2009). *Guidance on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision Making*. (NUREG-1855, Vol. 1) U.S. Nuclear Regulatory Commission.

DSB. (2012). *Veiledning til forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn*. Hentet 12 februar 2014 fra <http://oppslagsverket.dsb.no/content/brann-eksplosjonsvern/forskrifter/brannforebygging/veiledning-til-forskriften/3/3/>.

Fahy, R. F. (2003). Calculation Methods for Egress Prediction, i *NFPA Fire Protection Handbook. 19th Edition* (eds Cote, A. E et al). p. 4-33 to 4-55.

Flage, R., Aven, T (2009) Expressing and communicating uncertainty in relation to quantitative risk analysis. *Reliability & Risk Analysis: Theory & Application*, 2(2): s. 9-18. Special issue #2 on Summer Safety and Reliability Seminars (SSARS) 2008. http://www.gnedenko-forum.org/Journal/2009/022009/RATA_2_2009-01.pdf

Frantzych, H. (1998). Risk analysis and fire safety engineering. *Fire Safety Journal*, 31, p. 313-329.

Hagen, B.C. (2008). *Brannteknisk rømningsanalyse*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.

Hall, J. R. Jr. (2002) "Probability Concepts". i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3th Edition (eds Dinunno, P.J. et al). p. 192-202. Quincy Massachusetts.

Helstrup, T., Kaufmann, G. (2000). *Kognitiv psykologi*. Bergen: Fagbokforlaget.

International Organization for Standardization. (2009). *Risk management- Risk assessment techniques* (IEC/ISO 31010). Switzerland: the international Organization for Standardization (ISO).

International Organization for Standardization. (1999). *Fire safety engineering – Part 8: Life safety – Occupant behavior, location and condition* (OSI/TR 13387-8). Switzerland: the international Organization for Standardization (ISO).

Karlsson, B., Quintiere J.G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press LLC.

Kobes, M., Helsloot, I., de Vries, B., Post, Jos G. (2010) Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, 45(1), p. 1-11.

Kuligowski, E.D., Peacock, R.D., Hoskins, B.L. (2010). *A Review of Building Evacuation Models 2nd edition* (Technical Note 1680). NIST.

Kuligowski, E.D. (2009). *The Process of Human Behavior in Fires*. (Technical Note 1632). NIST.

Løvås, G. (1998). Models of way finding in emergency evacuations. Theory and methodology, *European Journal of Operational Research* 105, p. 371-389

Løvås, G. (2005). *Statistikk for høyskoler og universiteter*. Oslo: Universitetsforlaget.

Løvås, G (1994). Modeling and simulation of pedestrian traffic flow. *Transportation Research Part B: Methodological*, 28 (6), p. 429-443.

- Magnussen, S.E. Frantzich, H. Harada, K. (1996). *Uncertainty Analysis and Safety Verification*. Fire Safety Journal (27). p. 305-334.
- Malt, U.(2009a, 13. februar). *Stress*. I Store medisinske leksikon. Hentet 18. mars 2014 fra <http://sml.snl.no/stress>.
- Malt, U. (2009b, 13. februar). *Panikk*. I Store medisinske leksikon. Hentet 18. mars 2014 fra <http://sml.snl.no/panikk>.
- Mott Macdonald Limited. (2013). *STEPS- About STEPS*. Hentet 10 februar 2014 fra <http://www.steps.mottmac.com/aboutsteps2/>.
- Mott MacDonald Limited. (u.å.). *STEPS 5.2. On-Line User Manual: Simulation of Transient Evacuation And Pedestrian movements*.
- NBI. (2006). Byggforsk: *Nødvendig rømningstid ved brann*, Byggforskserien, Byggdetaljer 520.385, Sending 1- 2006. NBI = Norsk brannteknisk institutt.
- Nelson, H.E., Mowrer, F. W., (2002). Emergency movement, i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3th Edition (eds Dinunno, P.J. et al). p. 901-914. Quincy Massachusetts
- Nilsen, T., Aven, T. (2003). Models and model uncertainty in the context of risk analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, (79), p. 309-317.
- Notarinni, K. A. (2002). "Uncertainty". i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3th Edition (eds Dinunno, P.J. et al). p. 5.40-5.64. Quincy Massachusetts.
- Parry, G. W. (1996). The characterization of uncertainty in Probabilistic Risk Assessment of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety* 54, s. 119-126
- Paté-Cornell, M.E. (1996). Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment. *Reliability Engineering & System Safety* 54 (2-3), p. 95-111.
- Pelechano, N., Malkawi, A. (2008). Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in Construction* (17) p. 377–385.
- Proulx, G. (2002). «Movement of People: The Evacuation Timing», i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3th Edition (eds Dinunno, P.J. et al). 876-900. Quincy Massachusetts.
- Ptil. (2014). *Risiko og risikoforståelse*. Hentet 14 juni fra <http://www.ptil.no/risiko-og-risikoforstaelse/category823.html>
- Purser, D.A, Bensilum, M. (2001). Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations, *Safety Science* (38), p. 157-182.
- Rein, A., Torero, J.L., Jahn, W., Stern- Gottfried, J., Ryder, N.L., Denanghere, S., “. . .” Reszka, A. (2009). Round-robin study of a priori modelling predictions of the Dalmarnock Fire Test One . *Fire Safety Journal*, (44), p. 560-602.

Ronchi, E., Reneke, P. A., Peacock R. D., (2013). A Method for the Analysis of Behavioural Uncertainty in Evacuation Modelling. *Fire Technology*.

Standard Norge (2012). *Krav til risikovurdering av brann i byggverk* (NS 3901:2012).

Storstein, B. (2014). *Usikkerhet knyttet til predikasjon av brannforløp og tilgjengelig rømningstid* (Mastergradsoppgave, Universitetet i Stavanger).

Tufte, P.A., Lyngstad, T.H. & Birkelund, G.E. (2010). Agentbasert modellering : en del av samfunnsvitenskapenes verktøykasse. *Tidsskrift for samfunnsforskning*, 51 (3), s. 335-362.

Varas, A., Cornejo, M.D., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Munõz, V., Valdivia, J.A. (2007). Cellular automaton model for evacuation process with obstacles. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 382 (2), s. 631-642.

Waldau, N., Gattermann, P., Knoflacher, H., Schreckenberger, M. (2007). *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. Berlin: Springer.

Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., Ye, K. (2012). *Probability & Statistics for Engineers and Scientists*. Boston: Pearson Education Inc.

Waterson, Dr. N. P., Pellissier, E., (2010) *STEPS Software - Technical Summary*. Croyden UK: Mott MacDonald Limited.

Watts, J.M, Hall, J.R. (2002). Introduction to Fire Analysis, i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3th Edition (eds Dinunno, P.J. et al). p. 1299-1604. Quincy Massachusetts.

II. Appendiks

A. Kategoriklassifiseringer for usikkerhet og sensitivitet

Tabell 8 er basert på (Flage & Aven, 2009), hvor retningslinjer for kategoriklassifisering for usikkerhet og sensitivitet er presentert.

Tabell 8: Kvalitativ beskrivelse av kategorier for usikkerhet og sensitivitet

Aspekt	Kategori	Beskrivelse
Usikkerhet	Høy	En eller flere av forholdene er oppfylt: <ul style="list-style-type: none">- Antakelsene som er gjort bygger på store forenklinger- Data er ikke tilgjengelige, eller pålitelige- Det mangler enighet/konsensus blant eksperter- Fenomenet som betraktes er ikke godt nok forstått: modeller eksisterer ikke eller er kjent/trodd å gi dårlige prediksjoner
	Medium	Forhold mellom kategoriene høy og lav usikkerhet
	Lav	En eller flere av forholdene er oppfylt: <ul style="list-style-type: none">- Antakelsene som er gjort betraktes å være svært fornuftige- Svært mye data er tilgjengelig- Det er en bred enighet/samstemmighet blant eksperter- Fenomenet som betraktes er godt forstått: modellene som er brukt er kjent for å gi prediksjoner med nødvendig nøyaktighet.
Sensitivitet	Høy	Relativt små endringer i referanseoppsettets størrelser må til for å endre beslutning/konklusjon
	Medium	Relativt store endringer i referanseoppsettets størrelser må til for å endre beslutning/konklusjon
	Lav	Urealistiske store endringer i referanseoppsettets størrelser må til for å endre beslutning/konklusjon
Viktighet	Høy/ Medium/ Lav	Gjennomsnittet av kategoriene til usikkerhet og sensitivitet.

B. Data

B.1 Reaksjonstid

I dette kapittelet er det samlet data over reaksjonstider funnet i litteraturen.

British Standards Institute publiserte i 1997 et utkast over forslag til reaksjonstider etter type ABA (automatisk brannalarmsystem), (sitert i Proulx, s. 885, 2002) for ulike bygninger, og gjengis i tabell 9.

Tabell 9: Reaksjonstider foreslått av British Standards Institute.

Virksomhet	ABA 1 [min] ¹	ABA 2 [min] ²	ABA 3 [min] ³	Personkarakteristikk
Kontor, kommersielle og industrielle bygninger, skoler, høgskoler og universiteter	< 1	3	> 4	Personene er: -Våkne -Kjente med bygget, alarmen og evakueringsprosedyren
Butikker, museer, treningsentre o.l. og andre bygg hvor mennesker samles	< 2	3	>6	personene er: -Våkne -Ukjente med bygget, alarmen og evakueringsprosedyren
Studentboliger, middels høye og høye boligblokker	< 2	4	>5	Personer er: -Våkne eller sovende -Hovedsakelig kjent med bygget, alarmen og evakueringsprosedyren
Hoteller, pensjonat	< 2	4	>6	Personer kan være: -Sovende -Ukjente med bygget, alarmen og evakueringsprosedyren
Sykehus, eldrehjem og andre institusjoner	< 3	5	>8	Et stort antall personer kan være avhengige av assistanse ved evakuering

¹ABA 1: Direkte talevarsling fra et kontrollrom som er bemannet og har tilgang til intern TV, eller direkte talemeldinger sammen med godt trent og uniformert personell som kan bli sett og hørt av alle personene i området

²ABA 2:Talevarsling og/eller lyssignal med trent personell

³ABA 3: Brannalarmvarsling og personell uten trening.

Videre i Proulx (2002) gjengis det at for å ta hensyn til brannscenarioer, blir det anbefalt at tidene gitt i tabell 9 tilpasses i forhold til antatt brannvekst:

- a) For personer som oppholder seg i små rom hvor brannen starter eller område hvor en tydelig kan se røyk og flammer på avstand, så kan tiden gitt for ABA 1 brukes.
- b) For personer i store brannrom eller område hvor en tydelig kan se røyk og flammer på avstand, bruk tiden for ABA 2 om ikke ABA1 benyttes
- c) For personer utenfor brannrommet eller området, bruk tiden for ABA 3

I tabell 10 presenteres ulike observerte reaksjonstider.

Tabell 10: Reaksjonstider fra brannøvelser funnet i Fahy (2003).

Objekt	N	Min [s]	Maks [s]	Gjennomsnitt [s]	Faktorer
Høyt kontorbygg	107	60	~360	n/a ¹	Brann - ingen alarm - Intervjuer
Høyt kontorbygg	12	30	138	72	Uanmeldt brannøvelse -Videoanalyse
Middels høyt kontorbygg	92	0	>240	36	Uanmeldt brannøvelse -Varm dag
Middels høyt kontorbygg	161	0	<300	66	Uanmeldt brannøvelse -kald dag
Enetasjes varehus	122	4,2	102	30	Uanmeldt brannøvelse -Videoanalyse
Enetasjes varehus	71	1,8	60	24	Uanmeldt brannøvelse -Videoanalyse
Treetasjes varehus	122	3	96	36	Uanmeldt brannøvelse -Videoanalyse
Høy boligblokk	93	24	1116 (18,6 min)	318	Uanmeldt brannøvelse -Mye snø
Høy boligblokk	33	18	612	168	Uanmeldt brannøvelse
Høy boligblokk	27	60	>20	n/a ¹	Brann -Tidlig på morgen -mindre enn halvparten evakuerte

Objekt	N	Min [s]	Maks [s]	Gjennomsnitt [s]	Faktorer
Middels høy boligblokk	80	>18	>720	186	Uanmeldt brannøvelse -God alarm
Middels høy boligblokk	77	>18	>1140 (24 min)	582	Uanmeldt brannøvelse -Dårlig alarm
Treningsfasilitet	566	<12	>300	n/a ¹	Evakuering av sovende personer på treningssamling

¹ n/a: ikke rapportert

B.2 Forflytningshastighet

I dette kapittelet er det samlet data over forflytningshastigheten funnet i litteraturen.

Ifølge Waldau, Knoflacher, Gattermann og Schreckenber (s.15, 2007) er det funnet ulike gjennomsnittshastigheter for forflytningshastigheter i uhindrede omgivelser (free speed distributions), og et utdrag er gjengitt i tabell 11.

Tabell 11: Gjennomsnittshastighet vs. studier fra forskjellige verdensdeler (Waldau et al., s.15, 2007)

Studier	Gjennomsnittshastighet [m/s]
Europeiske studier	1,41
Amerikanske studier	1,35
Australske studier	1,44
Asiatiske studier	1,24

Videre i Waldau et al. (s.15, 2007) er det sitert en del forflytningshastigheter som er funnet i litteraturen. Et utdrag er vist i tabell 12. Disse verdiene gjelder også for uhindrede forflytningshastigheter.

Tabell 12: Gjennomsnittlige forflytningshastigheter og standardavvik hentet fra ulike verk sitert i Waldau et al. (s.15,2007)

Kilde	Gjennomsnittshastighet [m/s]	Standardavvik [m/s]	Land
Fruin	1,40	0,15	US
Hoel	1,50	0,20	US
Lam et. al	1,19	0,26	Hong Kong
O'Flaherty and Parkinson	1,32	1,0	Storbritannia
Older	1,30	0,30	Storbritannia
Sarkar & Janardhan	1,46	0,63	India
Tregaza	1,31	0,30	
Young	1,38	0,27	USA

I programvaren STEPS er kun en fordeling tilgjengelig som en forhåndsdefinert forflytningshastighet (Mott Macdonald Limited, u.å.), denne er en normalfordelt med verdier gitt i tabellen under.

Tabell 13: Forflytningshastighet sitert i Mott Macdonald Limited (u.å.)

Kilde	Fordeling [m/s]	Gjennomsnitt [m/s]	Standardavvik [m/s]	Rangering [m/s]
Fruin	Normal	1,35	0,255	0,65-2,05

I Løvås (1994, s.431) siteres forflytningshastigheter som er observert i korridorer uten hinder, og gjengis i tabell 14 under.

Tabell 14: Forflytningshastigheter i korridorer uten hinder, hentet fra Løvås (s. 431, 1994)

Kilde	Gjennomsnitt [m/s]	Standardavvik [m/s]
Fruin	1,35	0,255
Henderson	1,44	0,23
Hoel	1,46	0,20
Treganza	1,30	-
Older	1,31	0,30

I Proulx (2002, s.894,) blir det presentert en tabell over ulike forflytningshastigheter for horisontale flater, som viser både forflytningshastigheter for personer med forskjellig grad av funksjonshemming og uten, se tabell 15.

Tabell 15: Et utdrag av forflytningshastigheter på horisontal overflate, hentet fra Proulx (2002)

Gruppe	N	Gjennomsnitt [m/s]	Standardavvik [m/s]	Rangering [m/s]
Alle funksjonshemmede	107	1,0	0,42	0,1-1,77
Uten funksjonshemming	6	1,25	0,32	0,82-1,77
Rullestol	12	0,69	0,35	0,13-1,35
Assistert rullestol	16	1,30	0,34	0,84-1,98
Oppegående som ble assistert	18	0,78	0,34	0,21-1,40

Tabell 16 viser observerte data over forflytningshastighet i røyk. studert av T. Jin og Jensen (siteret i Proulx, s. 896, 2002).

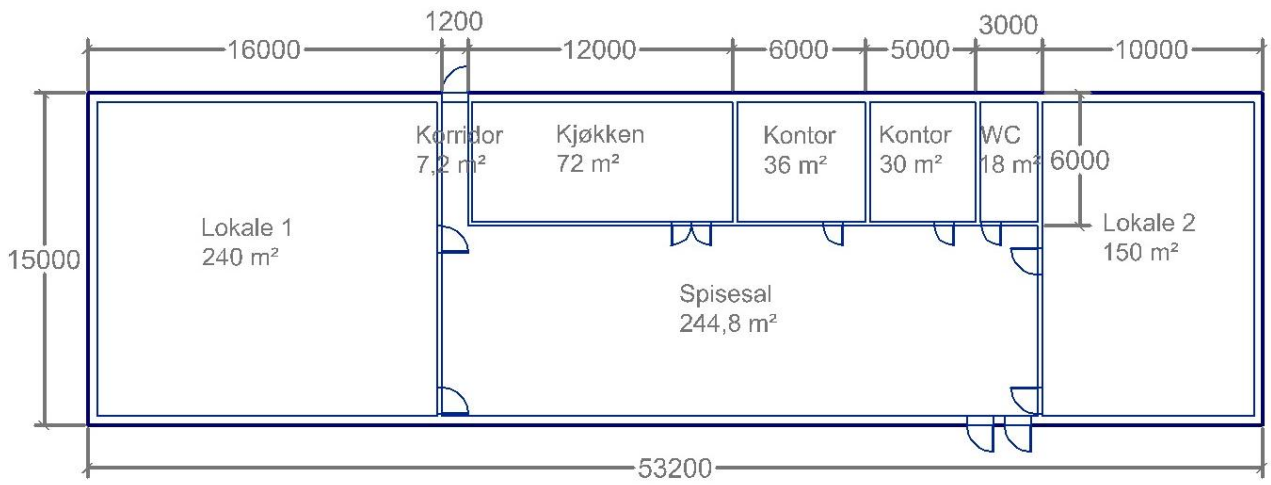
Tabell 16: Hvordan røyktetthet påvirker forflytningshastighet, hentet fra Proulx (2002)

Kilde	Type røyk	Røyktetthet [l/m]	Observasjon
T. Jin	Irriterende	0,5	Forflytningshastighet over 1 m/s ved introduksjon av røyk. Deretter stopper personer opp pga. svie i øyne. Saktere forflytningshastighet etter dette.
	Ikke-irriterende	0,5-1,0	Forflytningshastighet over 1 m/s ved introduksjon av røyk (røyktetthet = 0,5 l/m). Forflytningshastigheten ble redusert til 0,5 m/s da røyktetthet økte til 1,0 l/m.
Jensen	Ikke-irriterende	1,09-1,58	0,2 til 0,4 m/s ¹

¹ Anslås å være den ultimate forflytningshastigheten i tykk røyk ifølge Proulx (2002).

C. Detaljer rundt casen

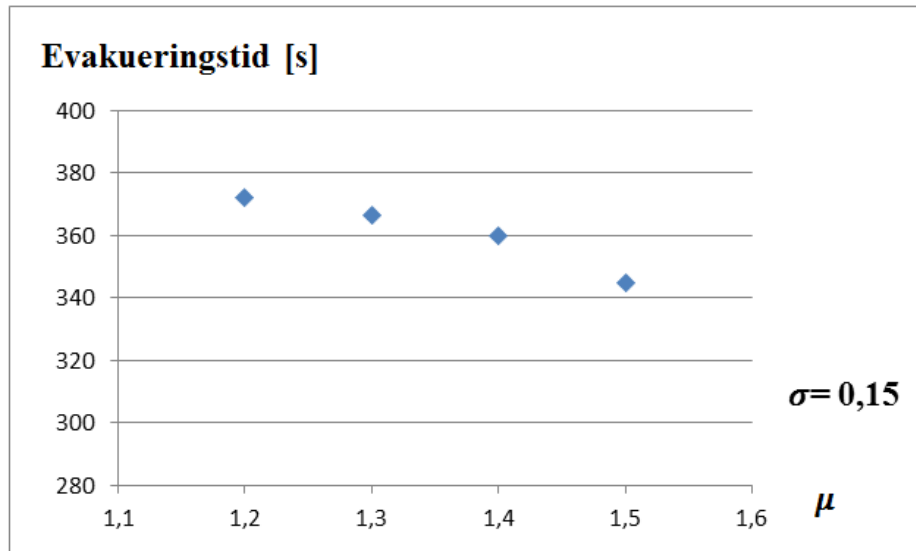
I figur 26 vises casen med lengde og breddemål.



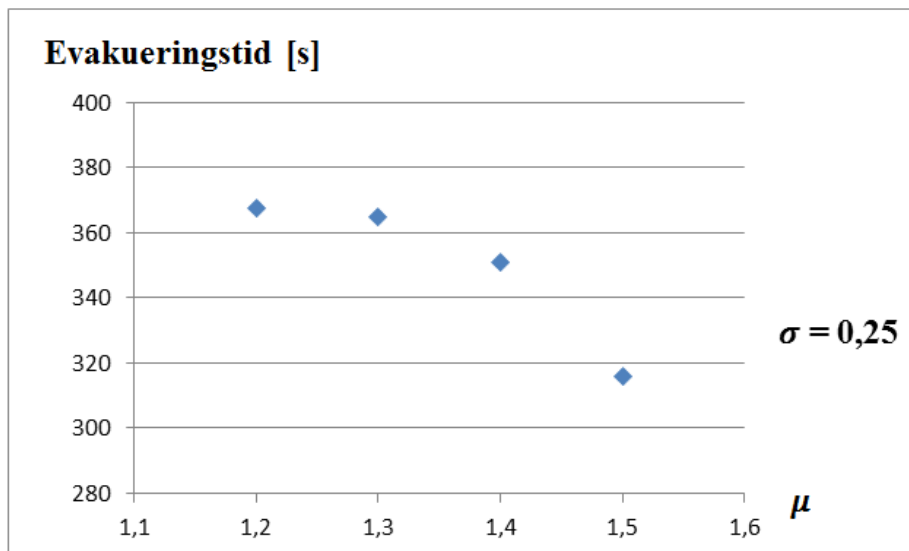
Figur 26: Case med mål (mm)

D. Resultater fra simulering

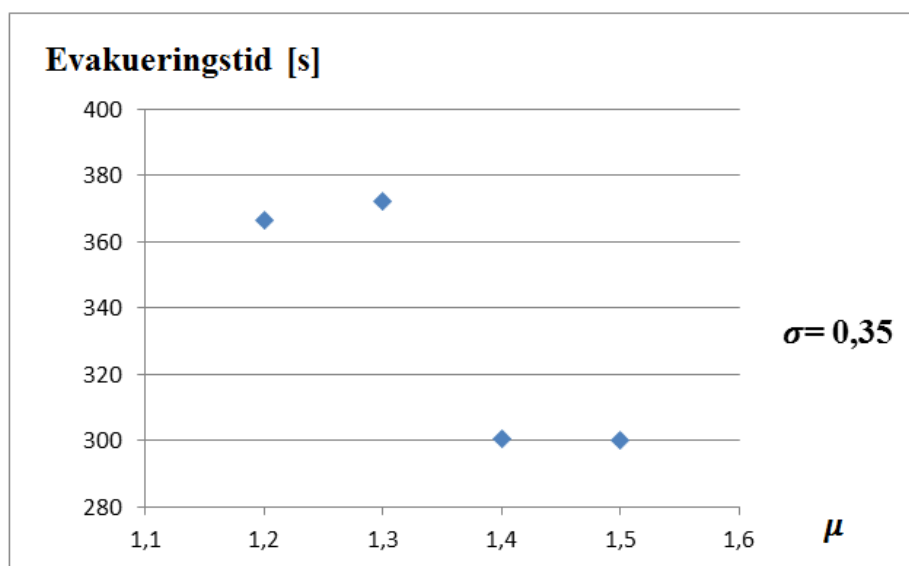
I dette kapittelet presenteres flere resultater fra usikkerhet- og sensitivitetsanalysen.



Figur 27: Evakueringstid VS gjennomsnittlig forflytningshastighet når standardavviket er 0,15 m/s



Figur 28: Evakueringstid VS. gjennomsnittlig forflytningshastighet når standardavviket er 0,25 m/s



Figur 29: Evakueringstid VS. gjennomsnittlig forflytningshastighet når standardavviket er 0,35 m/s

Verdiene presentert i tabell 17 og 18 er standardavviket for evakueringstidene, mens tabell 19 og 20 er presentert som evakueringstid.

Tabell 17: Standardavvik [s] fra alle simuleringene i sensitivitetsanalysen

	AP	RE	GA	ST	GT
Sc-02	17,7	8,0	7,5	8,3	6,6
Sc-015	12,	6,1	6,5	8,3	7,0
Sc-01	9,5	7,5	7,5	8,4	9,1
Sc-005	11,2	6,0	7,0	8,8	8,5
Sc00	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Sc005	6,2	8,0	7,4	7,0	9,3
Sc01	7,9	10,6	9,1	8,4	7,7
Sc015	6,5	17,2	8,3	14,7	5,8
Sc02	7,2	22,3	9,2	13,4	8,0

Tabell 18: Gjennomsnittlig evakueringstid [s] fra alle simuleringene i sensitivitetsanalysen.

	AP	RE	GA	ST	GT
Sc-02	262,5	299,1	316,5	365,8	306,2
Sc-015	271,2	302,1	314,0	314,0	309,1
Sc-01	284,3	303,6	311,6	336,7	312,9
Sc-005	300,0	306,4	310,1	310,1	311,3
Sc00	311,1	311,1	311,1	311,1	311,1
Sc005	322,5	312,3	310	322,6	312,5
Sc01	337,7	317,0	308,8	292,7	312,6
Sc015	351,9	324,1	309	349,8	310,4
Sc02	365,2	330,8	309,4	275,4	312,2

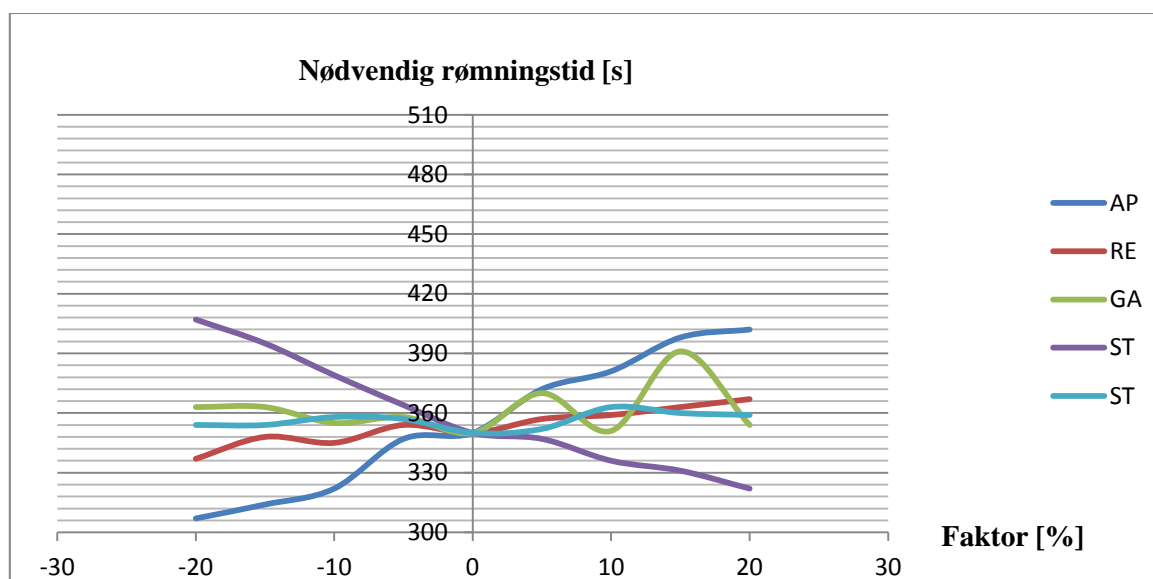
Tabell 19: Lavest evakueringstid [s] fra hvert scenario i sensitivitetsanalysen

	AP	RE	GA	ST	GT
Sc-02	247	277	303	347	294
Sc-015	254	288	303	335	294
Sc-01	262	285	295	319	298
Sc-005	287	294	298	304	297
Sc00	290	290	290	290	290
Sc005	312	297	310	287	292
Sc01	321	299	291	276	303
Sc-015	338	303	331	271	300
Sc02	342	307	294	262	299

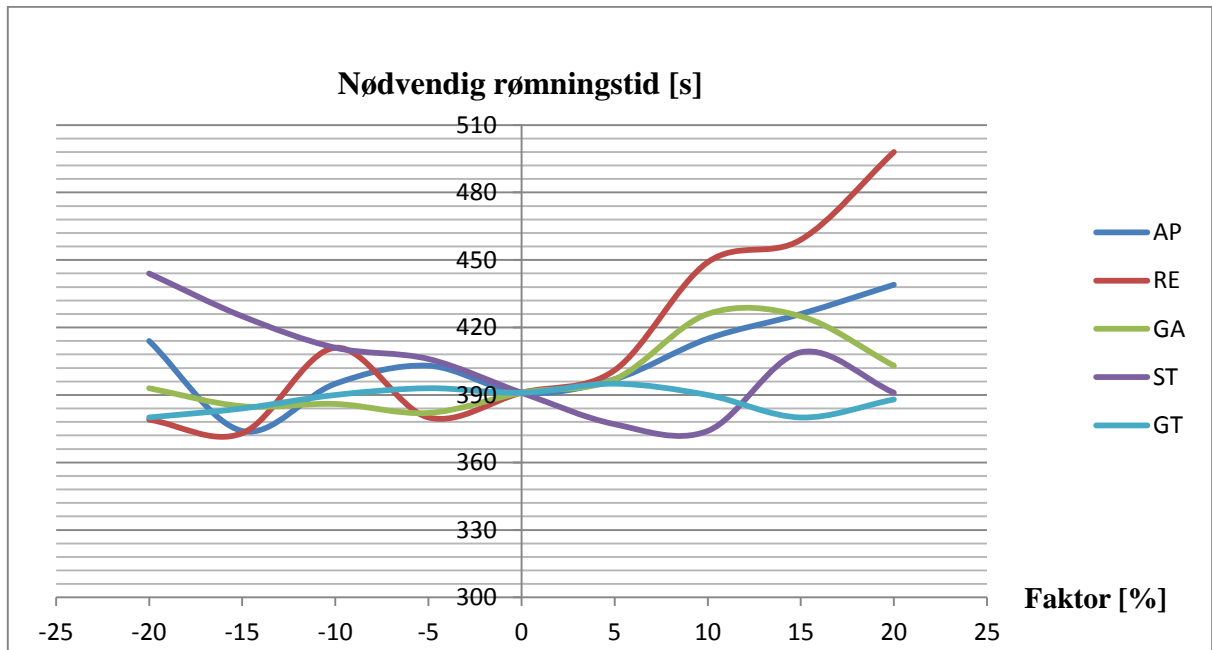
Tabell 20: Høyest evakueringstid [s] fra hvert scenario i sensitivitetsanalysen

	AP	RE	GA	ST	GT
Sc-02	354	319	333	384	320
Sc-015	314	313	325	365	324
Sc-01	335	351	326	351	330
Sc-005	343	320	322	346	333
Sc00	331	331	331	331	331
Sc005	337	341	337	317	335
Sc01	355	389	366	314	330
Sc015	366	399	365	349	320
Sc02	379	438	343	331	328

Nedenfor presenteres flere resultater fra sensitivitetsanalysen. Disse tidene er basert på henholdvis de laveste og de kortest tidene (nødvendig rømningstid) fra de 30 simuleringene fra hvert scenario.



Figur 30: Kortest nødvendig rømningstid fra hvert scenario



Figur 31: Lengst nødvendig rømningstid fra hvert scenario

E. Utregning av strukturell modellfeil

Utfallsrom for den sanne evakueringstiden Z er $(0, \infty)$, og den predikerte evakueringstiden fra modellen $G(1,3, 0,25)$ er 6 min. Strukturell modellfeil utregnes ved hjelp av ligningen:

$$\Delta_G(\mu_0, \sigma_0) = G(\mu_0, \sigma_0) - Z$$

$$\Delta_G(1,3, 0,25) = 6 - Z$$

Dersom evakueringstiden er uendelig lang ($Z = \infty$) blir den strukturelle modellfeilen:

$$\Delta_G(\mu_0, \sigma_0) = 6 - Z$$

$$\Delta_G(1,3, 0,25) = 6 - \infty$$

$$\underline{\Delta_G(1,3, 0,25)} = -\infty$$

Og ved en evakueringstid på 0 min ($Z = 0$) blir den strukturelle modellfeilen følgende:

$$\Delta_G(\mu_0, \sigma_0) = 6 - Z$$

$$\Delta_G(1,3, 0,25) = 6 - 0$$

$$\underline{\Delta_G(1,3, 0,25)} = 6$$

Den strukturelle modellfeilen for utgangsverdien til $\Delta_G(1,3, 0,25)$ vil derfor ligge i intervallet $(-\infty, 6]$.