



# Høgskulen på Vestlandet

## Master Thesis

ING5002

### Predefinert informasjon

<b>Startdato:</b>	24-05-2018 10:33	<b>Termin:</b>	2018 VÅR
<b>Sluttdato:</b>	01-06-2018 14:00	<b>Vurderingsform:</b>	Norsk 6-trinns skala (A-F)
<b>Eksamensform:</b>	Masteroppgave		
<b>SIS-kode:</b>	203 ING5002 1 MOPPG 2018 VÅR		
<b>Intern sensor:</b>	(Anonymisert)		

### Deltaker

<b>Navn:</b>	Eirik Hugnastad
<b>Kandidatnr.:</b>	1
<b>HVL-id:</b>	133063@hvl.no

### Informasjon fra deltaker

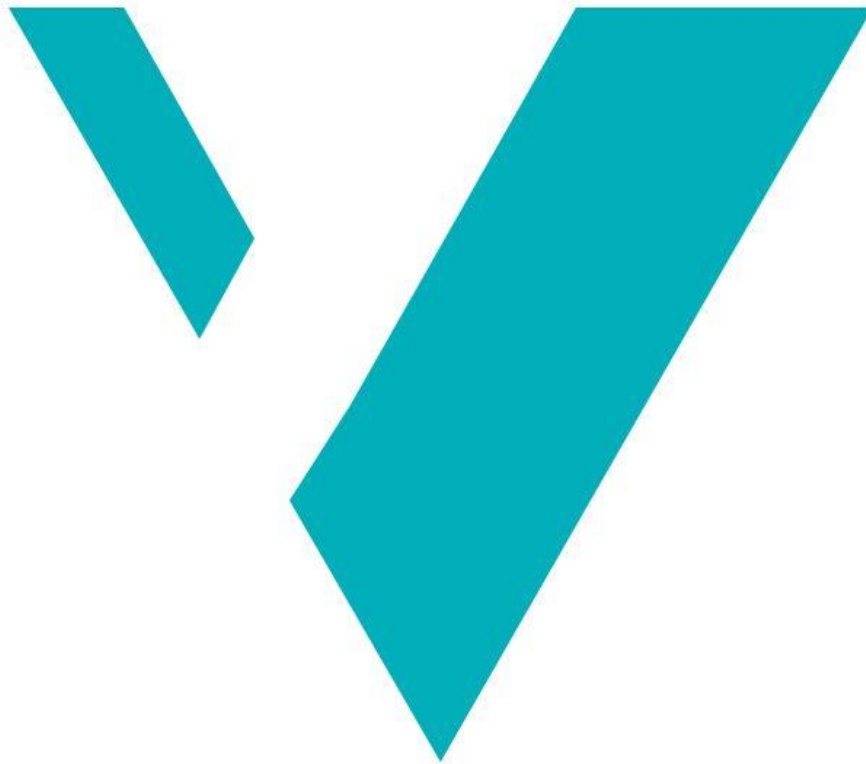
<b>Tittel *:</b>	Rømning i røyk - Evakueringsforsøk med ledesystem og simulering av forflytning i røyk		
<b>Engelsk tittel *:</b>	Evacuation through smoke - Experiments with safety way guidance systems and simulating movement through smoke		
<b>Tro- og lovetilkløring *:</b>	Ja	<b>Inneholder besvarelsen konfidensiell materiale?:</b>	Nei
<b>Jeg bekrefter at jeg har registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:</b>	Ja		

Jeg godkjenner avtalen om publisering av masteroppgaven min \*

Ja

# Rømning i røyk

Evakueringsforsøk med ledesystem og simulering av  
forflytning i røyk



Eirik Hugnastad  
Høgskulen på Vestlandet  
Masteroppgave i Brannsikkerhet

Haugesund  
Juni 2018





Høgskulen  
på Vestlandet

## Rømning i røyk

Evakueringsforsøk med ledesystem og simulering av  
forflytning i røyk

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter:  
Eirik Hugnastad

Forfatter sign.

Oppgaven uttatt:  
Høst 2017

Åpen oppgave

Veileder: Bjarne Christian Hagen - HVL

Ekstern veileder: Henrik Bjelland – Multiconsult Norge AS

Stikkord:  
Ledesystem, evakuering, rømning, røyk,  
rømningssimulering, brannsikkerhet

Antall sider: 70 sider  
+ 12 vedlegg: 46 sider

Haugesund, 1. juni 2018

Dette arbeidet er gjennomført som ledd i masterprogrammet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Studenten står selv ansvarlig for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.



# Forord

Denne oppgaven utgjør det avsluttende arbeidet på det toårige masterstudiet i brannsikkerhet ved Høgskolen på Vestlandet (HVL). Arbeidet med oppgaven har gått over to semestre i 2017/2018 og teller 60 studiepoeng.

Masteroppgaven omhandler rømning i røykfylte omgivelser og bruk av etterlysende ledesystemer i ulike belysningsforhold. Valg av tema til oppgaven ble gjort i visshet om at ledesystemer ville være et utfordrende forskningsområde og at det finnes ulike meninger om behov og effekt av ledesystem blant aktører i bransjen. I utforming av oppgaven har også mer generelle betraktninger rundt rømning i røyk og bruk av simuleringsverktøy for å modellere menneskelig atferd i røyk blitt inkludert. Det har vært et interessant tema å fordype seg i, og underveis i arbeidet har det dukket opp problemstillinger som har krevd en tilnærming med både stor bredde og dybde for å besvare.

Studieløpet og avsluttende arbeid med masteroppgave har vært kombinert med jobb som branningeniør i Multiconsult. Dette har vært krevende å balansere, men jeg har hatt stort utbytte av å kunne anvende ny kunnskap fra studier i arbeidsrelaterte prosjekter og vice versa.

Jeg vil spesielt takke mine veiledere, Bjarne Christian Hagen ved HVL og Henrik Bjelland fra Multiconsult: Takk for god hjelp til å definere problemstillinger og struktur i oppgaven og takk for innsiktsfulle tilbakemeldinger og gode innspill til diskusjonselementer.

Takk til SmartSigns for sponning av etterlysende ledesystem. En stor takk rettes til Hordaland fylkeskommune og Voss Gymnas for at dere stilte skolen til disposisjon for evakueringsøvelser og takk til alle forsøksdeltakerne for deres innsats og tålmodighet. Voss Brannvern takkes for hjelp til gjennomføring av forsøk og utlån av røykmaskin. Takk til kollegaer i Multiconsult for nyttige diskusjoner og hjelp med forsøk. Til slutt vil jeg takke venner og familie som har støttet meg på veien frem til levert avhandling.

En solfylt dag i Bergen, juni 2018

---

Eirik Hugnastad

# Sammendrag

En brann kan utvikle store mengder røyk som vanskeliggjør evakuering dersom røyken sprer seg til flukt- og rømningsveier. I byggteknisk forskrift TEK 17 er det krav om at det ikke skal kunne forekomme røykgasskonsentrasjoner som hindrer rømning i nødvendig rømningstid. Erfaring fra tidligere branner viser likevel at røykfylte rømningsveier kan være et problem, og det bør derfor vurderes tiltak for å lette rømning i røyk, slik at de røykgasskonsentrasjonene som forventes ikke hinder rømning.

Ledesystemer bestående av lavtmonterte kontinuerlige linjer av etterlysende komponenter er i henhold til tidligere forskning funnet å ha positiv effekt på forflytningstid ved rømning i røyk. Det er likevel usikkerhet knyttet til hvordan etterlysende ledesystemer fungerer i kombinasjon med elektrisk belysning. I denne avhandlingen har det blitt utført evakueringsforsøk i en rømningskorridor med etterlysende ledesystem. Korridoren ble fylt med kunstig røyk og forflytningstider ble testet i ulike belysningsforhold. Deltakerne ble bedt om å fylle ut et spørreskjema etter forsøkene.

Resultater fra forsøkene viste at raskest forflytningstid ble oppnådd med kombinasjon av etterlysende ledesystem og elektrisk belysning i himling. Det ble ikke observert noen negativ blendingseffekt av å kombinere elektrisk belysning med etterlysende ledesystem. Besvarelser i spørreundersøkelsen indikerte at lavtmontert ledesystem hjalp de fleste deltakerne med å finne veien. Det ble avdekket at et ledesystem kan øke en persons tilbøyelighet for å forsøke å evakuere gjennom røykfylt korridor fremfor å bli værende i en branncelle og vente på hjelp.

Evakueringsforsøkene ble forsøkt simulert med bruk av simuleringsprogrammene FDS+EVAC og Pathfinder. Rømningsmodellene ble koblet mot brannsimulering utført i FDS for å simulere personers evakuering i røyk. FDS+EVAC har innebygget funksjon for redusert ganghastighet til personer i modell som utsettes for røyk. Resultater for gjennomsnittlig ganghastighet tilsvarte observasjoner i evakueringsforsøkene med lys av, men simuleringene hadde en mindre variasjonsbredde enn forsøkene. Pathfinder har ingen funksjon for redusert ganghastighet i røyk, annet en visuell fremstilling og FED-beregninger. Bruker må derfor manuelt legge inn hastighetsreduksjon for å simulere røykens effekt på evakuerende. I sammenligning mellom teori, forsøk og simuleringer ble det avdekket at menneskers ganghastigheter i røyk vil være svært avhengig av individuelle forutsetninger. Det finnes dog begrenset forskningsgrunnlag for å simulere dette uten store usikkerheter.

# Abstract

A fire can produce large amounts of smoke that affects the ability for safe evacuation if the smoke spreads to a fire exit or exit access. The Norwegian building code *TEK 17* specifies that an exit or exit access must not contain smoke concentrations that can prevent safe evacuation in the required safe egress time. Experience from previous fires has shown that smoke in fire exits can be a threat, and safety measures that assist people to evacuate in smoke should be considered. Safety way guidance systems consisting of low located guidance lines from photoluminescent materials is, according to previous research, found to have a positive effect on movement time for people evacuating through smoke. There are uncertainties associated with how a photoluminescent guidance system in smoke-filled environment will be affected by electrical lights. This dissertation has examined uncertainties through experimental studies. An exit corridor was filled with artificial smoke and movement time for thirteen participants was tested in different lighting conditions. A questioner was filled out by the participants after the tests.

Results from the experiments indicated that a combination of low located photoluminescent guidance system and electrical lights mounted in the ceiling gave the shortest movement time. There were no observations that indicated a negative effect from scattering light in smoke. Answers from the questioner indicated that a low located guidance system helped the majority of participants in wayfinding. The guidance system may increase a persons inclination to evacuate through a smoke filled corridor instead of waiting for assistance in a fire compartment.

It was attempted to simulate the experimental tests using evacuation models in FDS+EVAC and Pathfinder. The evacuation models were combined with results from fire simulations generated in FDS. FDS+EVAC has the ability to incorporate fire effects so that walking speed is reduced as a function of smoke density. This effect corresponded with observations from the average walking speed in experimental tests with lights out. The statistical range in walking speed was larger for experimental tests than simulations in FDS+EVAC. Pathfinder did not have the possibility to incorporate fire effects in the same manner as FDS+EVAC, only visualisation and FED-calculations were available. Walking speed in the model was not automatically reduced, the user has to do this manually in Pathfinder. When comparing theory, experiments and simulations, it was discovered that human walking speed in smoke is highly dependent on individual characteristics. There is little research available and simulations of evacuation in smoke is related to great uncertainty.



# Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon .....	1
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Målsetting .....	3
1.3	Hypoteser .....	3
1.4	Avgrensninger .....	3
2	Lovverk og standarder .....	4
2.1	Byggteknisk forskrift med veiledning .....	4
2.2	Arbeidsplassforskriften .....	5
2.3	NS 3926:2017 - Visuelle ledesystemer for rømning i byggverk .....	6
2.4	NS-EN 1838 Anvendt belysning - Nødbelysning .....	6
3	Teoretisk bakgrunn .....	7
3.1	Evakueringsteori .....	7
3.1.1	Faser under rømning .....	7
3.1.2	Menneskelig atferd ved brann .....	8
3.1.3	Rømning i røyk .....	10
3.1.4	Ledesystemers effekt på veivalg og ganghastigheter .....	13
3.2	Ledesystemer og nødbelysning .....	14
3.2.1	Ledesystemer .....	15
3.2.2	Nødbelysning .....	16
3.2.3	Lys og syn .....	16
3.3	Effekter av røykpåvirkning .....	17
3.3.1	Irriterende og kvelende effekter av røyk .....	17
3.3.2	Sikt i røyk .....	18
3.3.3	Ganghastighet i røyk .....	21
3.4	Datamodeller for evakuering og brannsimulering .....	21
3.4.1	Representasjon av personer og geometri i modeller .....	21
3.4.2	FDS+EVAC .....	22
3.4.3	Pathfinder .....	25
4	Metode .....	26
4.1	Evakueringsforsøk og spørreundersøkelse .....	26
4.1.1	Avgrensninger .....	27

4.1.2	Oppsett i rømningskorridor .....	27
4.1.3	Forsøksgjennomføring .....	30
4.1.4	Datainnsamling.....	31
4.1.5	Spørreundersøkelse .....	33
4.2	Simuleringer .....	34
4.2.1	Mål med simuleringer .....	34
4.2.2	Fremgangsmåte .....	34
4.2.3	Geometri.....	35
4.2.4	Brannsimuleringer.....	36
4.2.5	Rømningssimulering i FDS+EVAC.....	38
4.2.6	Rømningssimulering i Pathfinder.....	39
5	Resultater.....	41
5.1	Resultater fra evakueringsforsøk.....	41
5.1.1	Evakueringstider.....	41
5.1.2	Lys og røyk.....	44
5.1.3	Atferd .....	45
5.2	Resultater fra simuleringer .....	48
5.2.1	Brannsimuleringer i FDS .....	48
5.2.2	FDS+EVAC .....	51
5.2.3	Pathfinder .....	52
5.2.4	Sammenstilling av simuleringer i FDS+EVAC og Pathfinder.....	53
5.3	Sammenstilling av resultater fra evakueringsforsøk og simuleringer .....	54
6	Diskusjon.....	55
6.1	Evakueringsforsøk.....	55
6.2	Simuleringer .....	57
6.2.1	Brannsimuleringer i FDS .....	57
6.2.2	Rømningssimuleringer i FDS+EVAC.....	57
6.2.3	Pathfinder .....	59
6.2.4	Usikkerheter ved bruk av evakueringsmodeller.....	59
6.3	Rømning i røyk og visuelle ledesystemer .....	61
7	Konklusjon .....	63
8	Videre arbeid.....	64
	Vedlegg .....	71

Vedlegg A Utstyrliste til evakueringsforsøk .....	A1
Vedlegg B - Brannsimuleringer i FDS .....	B1
Vedlegg C - Prosedyre for midlertidig utkobling av brannalarmanlegg .....	C1
Vedlegg D - Prosedyre for evakueringsøvelse .....	D1
Vedlegg E - Detaljprosjektering av etterlysende ledesystem etter NS 3926:2017 del 1.....	E1
Vedlegg F - Spørreskjema og sammenstilling av besvarelser.....	F1
Vedlegg G - Sikker gjennomføring av forsøk.....	G1
Vedlegg H - Informasjonsskriv .....	H1
Vedlegg I - Samtykkedokument til deltakere.....	I1
Vedlegg J - Måleprotokoll.....	J1
Vedlegg K – Teknisk målerapport for ledesystem.....	K1
Vedlegg L – FDS+EVAC inputfil for brann-og rømningssimulering .....	L1

## Figurliste

Figur 1 - Ulike faser under rømning ved brann.....	7
Figur 2 - Oversikt over komponenter i et ledesystem .....	15
Figur 3 - Omriss av person i FDS+EVAC .....	23
Figur 4 - Rømningskorridor på Voss gymnas .....	28
Figur 5 - Fotografi av ledelinje bestående av enkeltstående sirkler på gulv og hindringsmarkering av søyle .....	29
Figur 6 - Fotometer Hagner S4. bilde hentet fra Hagners hjemmeside [66].....	32
Figur 7 - Målepunkter på etterlysende skilter og gulvmarkering.....	33
Figur 8 - Perspektivfigur av rømningskorridor hentet fra modell i PyroSim.....	36
Figur 9 - Besvarelser på spørsmål: «Hadde du hjelp av ledesystemet for å finne veien ut?»..	46
Figur 10 - Besvarelser på spørsmål: «Hvor godt kunne du se ledelinjene/sirklene på gulv?»	46
Figur 11 - Besvarelser på spørsmål: «I et tenkt scenario befinner du deg på et hotellrom og brannalarmen går, du åpner døren og ser at korridoren utenfor er fylt med røyk tilsvarende som under forsøkene i dag, hva gjør du?» .....	47
Figur 12 - 180 sekunder etter brannsstart, røykspredning visualisert i Smokeview .....	48
Figur 13 - Temperaturutvikling i rømningskorridor for brannscenario 1 .....	49
Figur 14 - Horisontalsnitt for sikt 2,0 meter over gulvnivå , 200 sekunder etter brannstart....	50
Figur 15 - Temperaturutvikling i rømningskorridor for brannscenario 2 .....	50
Figur 16 - Visualisering av rømningssimulering fra FDS+EVAC, vist i Smokeview.....	51
Figur 17 - Punktdiagram med ganghastigheter og sikt for brannscenario 1 og 2 sammenlignet med matematisk beregningsmodell.....	52
Figur 18 - Visualisering av rømningssimuleringer fra Pathfinder, vist i Pyrosim Result viewer .....	52

Figur 19 - Spredningsdiagram for simuleringer i FDS+EVAC og Pathfinder.....	53
Figur 20 - Sammenstilling av ganghastigheter for forsøk og simuleringer.....	54

## Tabelliste

Tabell 1 - Begreper og definisjoner.....	VII
Tabell 2 - Sentrale lover med tilhørende forskrifter og veiledninger.....	4
Tabell 3 - Fordelinger for fysiske størrelser og ganghastigheter til personer i FDS+EVAC.	23
Tabell 4 - Målinger av belysningsstyrke på etterlysende komponenter for forsøk.....	33
Tabell 5 - Utforming av rømningskorridor i modell .....	35
Tabell 6 - Beskrivelse av brannscenarioer.....	37
Tabell 7 - Evakueringstider og ganghastigheter.....	41
Tabell 8 - Beregning av forbedringsfaktor som følge av å ha utført forsøket to ganger.....	44
Tabell 9 - Restluminans etter fullførte forsøk .....	44

## Definisjoner/terminologi

Tabell 1 gir definisjoner som gjelder for denne oppgaven. Ledesystemer dekkes av flere regelverk, standarder, veiledninger og publikasjoner, og de ulike kildene bruker til dels ulik terminologi. Det er i hovedsak benyttet definisjoner som er gitt i standarder. I tvilstilfeller har definisjoner gitt av Kollegiet for brannfaglig terminologi (KBT) [1] blitt benyttet.

*Tabell 1 - Begreper og definisjoner*

Begrep	Definisjon	Kilde
<b>Belysningsstyrke (illuminance)</b>	Hvor mye lys som faller på en flate ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ). Måleenheten er lux (lx).	Lyskultur publikasjon 7 [2]
<b>Belysning av fluktveier</b>	Del av rømningsbelysning som skal bidra til å forhindre panikk og som skal sørge for belysning slik at folk når frem til et sted der de kan finne en rømningsvei. Kalles også antipanikkbelysning.	NS-EN 1838 [3]
<b>Belysning av rømningsveier</b>	Del av rømningsbelysning som gjør at det er lett å finne frem til rømningsveiene, og som sikrer trygg bruk av disse når området er i bruk.	NS-EN 1838 [3]
<b>Evakuering</b>	Prosess der mennesker og dyr ved egen hjelp eller assistert av andre forflytter seg eller forflyttes til et sikkert sted etter at varsling om evakuering er gitt.	KBT [1]
<b>Etterlysende materiale</b>	Materiale med evne til å oppta, lagre og avgi lysenergi.	NS 3926 [4]

<b>Fluktvei</b>	Del av branncelle som brukes til rømning og evakuering fram til rømningsvei eller til et sikkert sted.	NS 3926 [4]
<b>Ledelys</b>	Nødlys som tennes automatisk ved svikt i normalbelysningen og som gir tilstrekkelig lys til og i rømningsveien.	KBT [1]
<b>Luminans</b>	Mål på hvor lys en flate er. Måleenheten er candela per kvadratmeter (cd/m <sup>2</sup> ).	NS 3926 [4]
<b>Luminanskontrast</b>	Kontrast som oppstår grunnet synlige forskjeller mellom objektets og bakgrunnens luminans.	NS 11001-1 [5]
<b>Markeringskilt</b>	Belyst, gjennomlyst eller etterlysende skilt som er en del av et ledesystem.	NS 3926 [4]
<b>Nødbelysning</b>	Belysning for bruk når strømforsyningen til den normale belysningen svikter. Synonym for nødlys.	NS-EN 1838 [3] (henviser videre til NEK IEC 60050- 845)
<b>Rømning</b>	Prosess der mennesker ved egen hjelp eller assistert av andre forflytter seg eller forflyttes til et sikkert sted.	KBT [1]
<b>Rømningsvei</b>	En eller en rekke brannceller tilrettelagt for rømning mellom oppholdsrom/branncelle og sikkert sted.	KBT [1]
<b>Rømningsbelysning</b>	Del av nødbelysning som sørger for belysning slik at folk trygt kan gå ut av et lokale eller forsøke å avslutte en potensielt farlig prosess før de går ut.	NS-EN 1838 [3]
<b>Sikkert sted</b>	Område hvor kritiske forhold ikke er eller vil kunne være en trussel for mennesker og dyr.	KBT [1]
<b>Sikt</b>	Lengste avstand der man kan se og gjenkjenne et objekt med definert størrelse, lysstyrke og kontrast. Synonym for synsavstand og oppgis i meter.	KBT [1]
<b>Sikkerhetsskilt</b>	Skilt som inneholder et generelt sikkerhetsbudskap som oppnås ved å kombinere farger og geometrisk form, og som ved å tilføye et geografisk symbol inneholder et særskilt sikkerhetsbudskap.	NS-EN 1838 [3]
<b>Visuelt ledesystem for rømning</b>	System bestående av etterlysende og/eller elektrisk merking og retningsinformasjon som bidrar til å lede personer til sikkert sted.	NS 3926 [4]
<b>Visuell ledelinje for rømning</b>	Lett synlige sammenhengende markeringer som oppfattes kontinuerlig, og som utgjør en del av det visuelle ledesystemet.	NS 3926 [4]

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Når det oppstår brann i et byggverk er førsteprioritet å sikre liv og helse til personer som oppholder seg i bygget. Normal rømningsstrategi er at personer går til sikkert sted når det varsles om brann. Under evakuering er det essensielt at personer velger den mest egnede veien til sikkerhet for å unngå eksponering for røyk og varme. Erfaring fra tidligere branner har vist at mange brannofre har forsøkt å evakuere fra en brann, men har mistet sikt og evne til å ta seg frem i møte med tett røyk [6].

Byggverk som er prosjektert og utført etter dagens regelverk er designet for å holde rømningsveier frie for røyk i nødvendig tid for rømning og redning [7]. Når erfaring likevel viser at dette ikke alltid er tilfellet, må det vurderes tiltak som kan forenkle rømning i røyk. Visuelle ledesystemer er tiltak som skal sørge for at egnede rømningsveier benyttes under evakuering og skal bidra til at rømnings- og fluktveier holdes synlige i nødvendig tid for rømning og redning. Ledesystemer kan omfatte markeringsskilt, retningsskilt, ledelinjer og nødlys [7].

Norsk standard *NS 3926:2017 Visuelle ledesystemer for rømning i byggverk* [4] beskriver løsninger for utforming av ledesystemer basert på både elektrisk lysende komponenter og etterlysende komponenter. Etterlysende komponenter består av fotoluminescerende materialer som lades opp ved lypåvirkning og avgir energien i form av synlig lys i en gitt tid etter ladelys tas bort. I tidligere versjon av standarden [8] har det ikke vært tillatt å kombinere elektriske og etterlysende komponenter innad i samme branncelle. Begrunnelsen har vært at elektrisk lys har høyere luminans enn etterlysende komponenter og kan dermed virke blendende slik at etterlysende komponenter ikke blir synlig. I den siste utgaven av standard NS 3926:2017 er det åpnet opp for bruk av kombinerte systemer, men forskning viser fremdeles at elektrisk belysning kan ha en negativ effekt på synligheten til skilter og rømningsmerkinger i et ledesystem i røykfylte omgivelser. Blendingseffekt fra belysning i røyk støttes av blant annet Yamada & Akizuki [9] som angir at redusert sikt i røyk kan skyldes to fenomen:

- Redusert sikt som følge av at lys fra et objekt blokkeres av røykpartikler.
- Redusert sikt som følge av at lysstråler fra generell belysning treffer røykpartikler som igjen sprer lyset i alle retninger. Denne typen spredning av lys kan føre til at kontraster viskes ut og orienteringsevne svekkes.

Normalbelysning og nødbelysning har til hensikt å gi personer mulighet til å orientere seg ved å lyse opp omgivelsene, hvor nødbelysning også skal fungere ved bortfall av primær strømforsyning. Denne typen belysning viser ikke lokalisering av rømningsveier og har dermed ikke nødvendigvis en ledende effekt. I følge Jensen [10] vil belysning som ikke har ledeeffekt gi negativ påvirkning på synlighet og lesbarhet til skilt og informasjon som er relevant for å kunne oppnå vellykket evakuering i røyk. Byggteknisk forskrift, TEK 17 [11], krever at rømningsveier skal ha god belysning til tross for at forskning angir at normalbelysning og nødbelysning kan ha negativ effekt på sikt når rømningsveiene er røykfylte. På bakgrunn av dette er det ønskelig å undersøke nærmere om elektrisk belysning vil svekke effekten av lavtmonterte ledelinjer på grunn av blindingseffekt, samt undersøke om lysspredning i røyk vil føre til at konturer viskes ut slik at det blir vanskeligere å orientere seg.

Bedre ytelse til datamaskiner sammen med introduksjon av funksjonsbasert regelverk har ført til økt bruk av rømningssimuleringer. Simuleringsverktøy benyttes i økende grad for å undersøke og dokumentere om utforming og bruk av byggverk tilfredsstiller forskriftskrav til sikkerhet ved brann. I branntekniske analyser som skal dokumentere personsikkerhet benyttes det gjerne akseptkriterier for sikt, røyklagshøyde, temperatur, varmestråling eller giftighet til røyk [12]. Flere datamodeller for rømningssimulering kan kombineres mot brannmodeller slik at personer i evakueringsmodellen blir påvirket av røyk. Det er gjort relativt lite forskning på rømning i røyk og datagrunnlag for blant annet ganghastigheter i røyk er forbundet med store usikkerheter [13]. Det er ønskelig å undersøke om simuleringsmodeller er egnet for å modellere rømning i røyk ved å sammenligne resultater fra datasimuleringer med praktiske evakueringsforsøk i kunstig røyk.

Oppgaven tar en bred tilnærming til problemstillinger rundt rømning i røyk. Teoretisk bakgrunn som presenteres i kapittel 3 underbygger usikkerheter til menneskelig atferd, effekt av ledesystemer og bruk av rømningssimuleringer for scenarier med røykfylte rømningsveier. Denne oppgaven har til hensikt å belyse disse usikkerhetene. Det er videre valgt å se nærmere på problemstillinger som er presentert i kapittel *1.2 målsetting* og *1.3 hypoteser*.

## 1.2 Målsetting

Det er satt opp tre generelle og overordnede mål med denne studien:

1. Vise effekt av lavtmonterte, etterlysende ledelinjer i røykfylte omgivelser og ulike belyningsforhold. Det er ønskelig å undersøke om synlighet av etterlysende ledelinjer kan påvirkes av elektrisk belysning.
2. Klargjøre hvilken effekt visuelle ledesystem for rømning av byggverk har og spesielt hvordan mennesker oppfatter og benytter seg av informasjonen som formidles ved hjelp av visuelle ledesystemer.
3. Kartlegge om rømningsmodeller er egnet for å vurdere rømning i røykfylte omgivelser og eventuelt hvilke tilpasninger som må gjøres.

## 1.3 Hypoteser

Ved hjelp av litteraturstudium, praktiske evakueringsforsøk og rømningssimuleringer skal følgende hypoteser besvares:

**Hypotese 1:** I røykfylte omgivelser vil høytmontert elektrisk belysning i kombinasjon med lavtmonterte etterlysende ledelinjer gi kortere forflytningstid enn ledesystem kun med etterlysende komponenter.

**Hypotese 2:** Datamodeller for simulering av rømning kan benyttes for å estimere forflytningstid i røykfylte omgivelser og vil gi tilnærmet likt resultat som praktiske evakueringsforsøk i røyk.

## 1.4 Avgrensninger

I denne oppgaven skal det ses på hvordan etterlysende ledesystem fungerer i kombinasjon med ulike belyningsforhold. Det skal gjennomføres forsøk, spørreundersøkelse og simulering av rømning i røyk. Oppgaven avgrenses til å omfatte visuelle ledesystemer i landbaserte byggverk. Maritimt regelverk omfattes ikke. Taktile og akustiske ledesystemer omfattes ikke av oppgaven.



## 2 Lovverk og standarder

I dette kapittelet gis det en kort presentasjon av styrende regelverk for krav til og utforming av ledesystemer. Regelverket angir hvilke funksjoner et ledesystem skal ha og hvor dette er påkrevd. Detaljert utforming av ledesystemer er beskrevet i standarder og normer. Regelverket har en sentral rolle ettersom dette former rammebetingelsene som gjelder for planlegging, utforming og vedlikehold av ledesystemer. I Norge stilles det krav til nødlys og ledesystemer i flere ulike lover, forskrifter og veiledninger. Regelverket er delt inn i et hierarki hvor lover stiller sterkere enn forskrifter og forskrifter stiller sterkere enn veiledninger [4]. Standarder, normer og annen anerkjent litteratur som blant annet byggforskblader utgitt av SINTEF og publikasjoner fra Lyskultur [2] beskriver løsninger som anses å tilfredsstille regelverket, men er ikke obligatorisk å følge. De fire mest sentrale lovene med tilhørende forskrifter, veiledninger og kommentarer som omtaler ledesystem er gjengitt i tabell 2.

Tabell 2 - Sentrale lover med tilhørende forskrifter og veiledninger

LOV	Plan og bygningsloven (pbl)	Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver (Brann- og eksplosjonsvernloven)	Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (Arbeidsmiljøloven)	Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr (EL-tilsynsloven)
FORSKRIFT	Byggteknisk forskrift (TEK)	Forskrift om brannforebygging	Forskrift om arbeidsplasser og arbeidslokaler (Arbeidsplassforskriften)	Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg (FEL) Forskrift om kvalifikasjoner for elektrofagfolk (FKE)
VEILEDNING	Veiledning til byggteknisk forskrift (VTEK)	Veiledning til forskrift om brannforebygging	Arbeidstilsynets kommentarer til arbeidsplassforskriften	Veiledning til FEL Veiledning til FKE

### 2.1 Byggteknisk forskrift med veiledning

I følge forskrift om tekniske krav til byggverk, TEK 17 § 11-12 tredje ledd [11] skal det være ledesystem i store byggverk, byggverk beregnet for et stort antall personer, og byggverk hvor personer ikke kjenner rømningsveier og/eller ikke er i stand til å bringe seg selv i sikkerhet (risikoklasse 5 og 6). Veiledning til teknisk forskrift, VTEK 17 [7], angir at ledesystem skal kunne benyttes under følgende enkeltscenarier eller kombinasjoner av disse:

- a. Ved evakuering som følge av en utløst brannalarm der det ikke er tegn til brann- eller røykutvikling i bygget.
- b. Ved rømning og evakuering ved bortfall av kunstig belysning.
- c. Ved rømning og evakuering som følge av uforutsette hendelser som brann- og røykutvikling.

De ulike scenarioene kan representere ulike belysningsforhold. Scenario a. representerer fungerende normalbelysning, scenario b. kan være mørklagt rømningsvei (eller kun nødbelysning der dette er påkrevd) og scenario c. kan være røykfylt rømningsvei.

I TEK 17 § 11-11 sjette ledd [7] er det krav om at skilter, symbol og tekst som viser rømningsveier og sikkerhetsutstyr skal kunne leses og oppfattes når det er brann- eller røykutvikling. Det er henvist til norsk standard NS 3926 [4] for prosjektering av ledesystem. Der et byggverk også er underlagt krav i arbeidsplassforskriften er det angitt at nødbelysning og ledesystem kan prosjekteres slik at disse installasjonene samlet sett gir de beste forutsetningene for rask og effektiv rømning. Det er ikke angitt hvordan en slik kombinasjon av systemer bør gjøres og det er ikke henvist til annen litteratur som beskriver dette.

I forskriftens § 11-11 er det angitt krav om at en branncelle eller rømningsvei som skal benyttes til rømning av personer, ikke skal være utsatt for temperaturer, røykgasskonsentrasjoner eller andre forhold som hindrer rømning i nødvendig rømningstid [7]. I brev fra Direktoratet for byggkvalitet [14] er det presisert at dette kravet ikke er en garanti for at det aldri vil være røyk i rømningsveier, men at det skal prosjekteres for at rømningsveier skal kunne benyttes i nødvendig rømningstid og at konsentrasjoner av røyk ikke skal være så store at de hindrer rømning.

## 2.2 Arbeidsplassforskriften

Forskrift om utforming og innretning av arbeidsplasser og arbeidslokaler (arbeidsplassforskriften) [15] § 2-13 *Nødbelysning* angir at rømningsveier og nødutganger skal være utstyrt med nødlys tilstrekkelig til å dekke behovet i tilfelle svikt i den ordinære belysningen. I tillegg angir forskriften at arbeidsplasser hvor arbeidstakere kan bli utsatt for svikt i den kunstige belysningen, skal være forsynt med nødbelysning av tilstrekkelig styrke. I arbeidstilsynets kommentarer til § 2-13 [16] er det presisert at arbeidsgiver må selv vurdere risikoen for fare som kan oppstå ved svikt i den kunstige belysningen. Videre er det henvist til Lyskulturs publikasjon 7 [2] og NS-EN 1838 [3].

## **2.3 NS 3926:2017 - Visuelle ledesystemer for rømning i byggverk**

NS 3926 ble først utgitt i 2009 og sist revidert i 2017. Standarden omhandler både etterlysende og elektriske visuelle ledesystemer for rømning i byggverk. Denne standarden er den eneste norske standarden som tar hensyn til at ledesystem skal fungere i røykfylte omgivelser. Siste revisjon av standarden er i to deler hvor del 1 beskriver planlegging, utforming og kontroll av ledesystemer og del 2 beskriver laboratoriemålinger av etterlysende produkter. Standarden er basert på ISO 16069 [17] og har blant annet som formål å gi en mer standardisert utforming av ledesystemer internasjonalt slik at det skal være lettere å følge retningsopplysninger gitt av slike systemer på kryss av landegrenser.

NS 3926 angir at visuelle ledesystemer for rømning vil være effektive for å ivareta evakuering i røykfylte omgivelser. Standarden beskriver altså et ledesystem som skal fungere i scenarier med røykfylling. For å ivareta krav om god belysning av rømningsveier kan det være nødvendig å kombinere ledesystem med nødbelysning. Hovedkomponenten i visuelle ledesystemer er en lavtmontert ledelinje som oppfattes som kontinuerlig. Brudd i ledelinje skal ikke være større enn 0,2 m med mindre det er dører langs flukt- eller rømningsveien hvor det tillates maksimalt 1,0 m brudd. Etterlysende komponenter skal ha luminans minst  $10 \text{ mcd/m}^2$  i mørket etter 30 minutter for bygg i brannklasse 1 og 60 minutter for bygg i brannklasse 2 og 3. Høyere luminans kreves dersom bredden på ledelinjer skal reduseres. Elektriske markeringsskilter skal lyse med minst  $500 \text{ cd/m}^2$  etter 5 sekunder. Elektriske komponenter må ha batteribackup som sikrer drift i tiden som er nødvendig for rømning og redning. Etterlysende komponenter må ha tilstrekkelig ladelys slik at de etterlysende komponentene ikke utlades i nødvendig tid for rømning og redning, dette kan sette begrensninger for strømsparingstiltak og valg av lyskilder.

## **2.4 NS-EN 1838 Anvendt belysning - Nødbelysning**

Nødbelysning benyttes når forsyningen til den normale belysningen faller bort, og nødbelysning skal derfor drives fra en strømkilde som er uavhengig av forsyningen til den normale belysningen. Standarden angir løsninger for å ivareta muligheten for å komme trygt ut fra et lokale hvis det oppstår svikt i normalbelysning. I flukt- og rømningsveier er det beskrevet løsninger for retningsangivelse mot utganger. Alle komponenter i nødbelysningsanlegg kan være høyt plassert og standarden omtaler ikke røyk i flukt- og rømningsveier.

# 3 Teoretisk bakgrunn

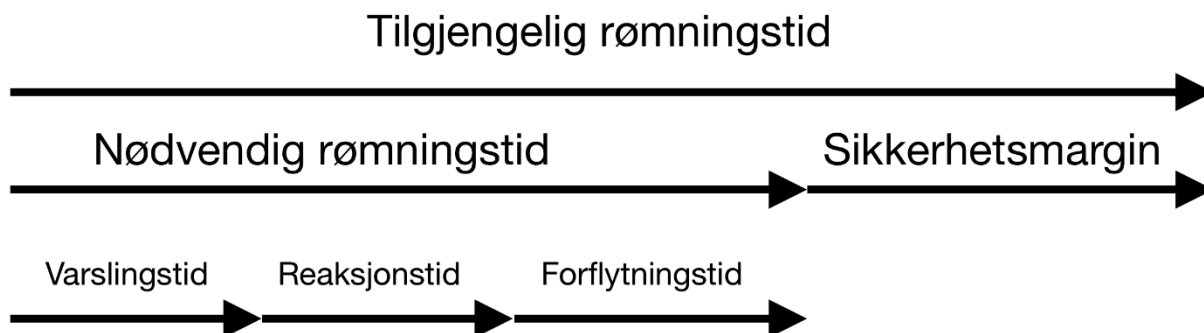
## 3.1 Evakueringsteori

Et overordnet mål for brannteknisk prosjektering av byggverk er å sikre at det er tilstrekkelig mulighet for rask og sikker rømning og redning [7]. Valg av rømningsstrategi vil avhenge av byggets virksomhet, størrelse og kompleksitet, samt brukernes kjennskap til bygget og evne til å bringe seg selv til sikkerhet. En alternativ strategi til å evakuere personer, er å beskytte personer fra en brann der de oppholder seg (protect in place) [18].

En metode for å verifisere at rømningssikkerhet er ivaretatt er å dokumentere at tilgjengelig rømningstid er større enn nødvendig tid for rømning, se kap. 3.1.1 for detaljer. Metoden har utstrakt bruk og i engelskspråklige regelverk er dette omtalt som ASET/RSET-analyse (Available Safety Egress Time vs. Required Safety Egress Time) [18].

### 3.1.1 Faser under rømning

I branntekniske analyser brytes gjerne rømningsprosessen ned i mindre faser [19]. Inndeling for de ulike fasene er illustrert i figur 1.



Figur 1 - Ulike faser under rømning ved brann

Den tilgjengelige rømningstiden er delt opp i nødvendig rømningstid pluss en sikkerhetsmargin. Med tilgjengelig rømningstid menes det tiden før kritiske forhold oppstår som følge av brannutvikling. Kritiske forhold for personer bestemmes normalt ut fra grenseverdier for temperatur, varmestråling, røyktetthet eller giftighet [12].

Nødvendig rømningstid kan deles opp i flere underfaser. Varslingstid er tiden fra en brann starter til brannen detekteres og varsles av røykvarsler/brannalarmanlegg eller til personer oppdager

brannen og varsler andre. Reaksjonstid er tiden fra personer blir gitt informasjon eller søker informasjon for å finne ut om det er nødvendig å evakuere frem til det blir tatt en beslutning. Reaksjonstiden har stor usikkerhet ettersom fortolkning og beslutning av en situasjon vil variere fra person til person. Normalt velges reaksjonstid basert på bakgrunn av tilgjengelig anerkjent litteratur. Det er vanlig å benytte forhåndsdefinerte konstante verdier ut fra virksomhet, deteksjonsform og type varsling [20]. Forflytningsfasen er tiden fra bevegelse mot en utgang starter, til alle personer er på sikkert sted. I forflytningsfasen kan det oppstå situasjoner hvor fortolkninger og beslutninger må gjentas dersom personer møter hindringer. I tillegg til avstand er det i hovedsak tre faktorer som virker inn på forflytningstiden: ganghastighet, veivalg og strømningsrater gjennom passasjer på veien [20]. Sikkerhetsmargin er differansen mellom tilgjengelig rømningstid og nødvendig rømningstid [19], en sikkerhetsmargin er nødvendig for å kompensere for usikkerheter i branntekniske analyser og mulige mindre endrede forutsetninger gjennom byggets livsløp. Ved bruk av datasimuleringer for rømning legges det ofte stort fokus på forflytningstid, men i mange tilfeller kan varslingstid og reaksjonstid være lengre enn faktisk forflytningstid [21].

### **3.1.2 Menneskelig atferd ved brann**

Mye av forskningen på menneskelig atferd ved brann er basert på intervjuer av overlevende etter brannulykker, samt praktisk testing av evakuering under ulike kontrollerte forhold [22]. Det er også lagt ned et betydelig arbeid i å utarbeide dataprogrammer som simulerer rømning. Realistisk simulering av rømning kan være svært komplekst ettersom man ikke kan forutse nøyaktig hvordan hver enkelt person reagerer og hvordan mennesker vil samhandle i et brannscenario. En forutsetning for å kunne simulere rømning er derfor at mennesker oppfører seg rasjonelt i en nødssituasjon, noe som har vist seg å være tilfelle i de fleste situasjoner [20].

#### **Handlingsmønstre ved brann**

Nedenfor er det gitt en overordnet beskrivelse av typiske menneskelige handlingsmønstre i nødssituasjon med referanser til forskning og anerkjent litteratur. I henhold til Fratzich [23] kan atferd ved en nødssituasjon deles opp i tre deler:

- Forståelse og fortolkning av en situasjonen.
- Forberede en handling.
- Gjennomføring av handling.

I hvilken grad en brann oppfattes som en trussel kan variere i ulike situasjoner. Påvirkende faktorer kan være varslingsstype, om brannen er synlig, personenes forhold til omgivelsene og sosiale påvirkninger fra andre personer [24]. Menneskelig atferd i tidligfase av en brann vil ofte karakteriseres av usikkerhet, misforståelser og ineffektivitet [23]. Indikasjoner på en brann kan vær røyklukt, synlige flammer, varme eller lyder, og disse signalene vil kunne tolkes forskjellig ut fra hvor farlig situasjonen oppfattes. I enkelte brannhendelser er det vist at personer ikke velger å evakuere før de innser at det er en overhengende fare for liv og helse [21]. Dette er spesielt dokumentert i grupper av mennesker hvor personene ikke ønsker å være den første til å reagere på signal om brann eller der det er forventet at personer som har en autoritær rolle skal ta ledelsen.

Det at mennesker overser brannvarsling og venter med å evakuere er i strid med oppfatningen om at det vil oppstå panikk ved brann. Ved bruk av intervjuer og spørreskjema for ulike hendelser de siste 50-60 årene er det fastslått at panikk, i ordets rette forstand, sjeldent inntreffer under en brann [24]. Det er likevel ikke uvanlig at personer som har opplevd en ulykkeshendelse eller media som rapporterer fra en hendelse beskriver at det har oppstått panikk. Ordet ”panikk” assosieres gjerne med alvorlige ulykkeshendelser, situasjoner der en gruppe mennesker flykter, følelse av redsel, stress og lignende. Det finnes flere definisjoner av ordet, hvor de fleste involverer en fare som utløser et irrasjonelt, egoistisk handlingsmønster hvor sosiale normer og hensyn til andre mennesker blir satt til side [25]. I mange tilfeller er det altså et skille mellom virkelige panikkhandlinger og handlinger som omtales som panikk. Ordet har flere konnotasjoner som omhandler følelse av frykt og angst, men som ikke er i tråd med selve definisjonen. I kontrast til antagelsen om at panikk vil bryte ut, vil i realiteten første respons til personer som blir varslet om brann være at ingenting unormalt skjer [21] og man fortsetter gjerne den aktiviteten som bedrives [26]. Videre vil informasjonssøking være en normal respons. Interaksjon med andre mennesker og generelt altruistisk atferd er tidligere rapportert som sannsynlig atferd.

Det finnes også få rapporterte hendelser om frysreaksjoner som følge av psykisk sjokk ved brann [21]. Psykisk sjokk kan utløses ved plutselige ytre hendelser som er truende, skremmende eller som innebærer trussel eller tap. Sjokk kan arte seg som sterk uro, angst eller apati hvor mennesker «fryser» og er ikke i stand til å bevege seg [27]. I kontrast til frysreaksjon er normal atferd at personer deltar i søk og redning, førstehjelp eller forsøk på å yte annen bistand [21].

Når personer har samlet nok informasjon om en hendelse, vil det bli tatt en beslutning. Beslutningen betyr ikke nødvendigvis at man velger å evakuere, det kan også være at man velger å ignorere signaler, venter på venner/familie før man evakuerer, eller at man forsøker å slokke

brannen. I brannsituasjoner vil ofte beslutninger bli tatt under høyt stressnivå [21]. Tiden det tar å forstå en situasjon, fortolke, forberede og beslutte en handling kan ha store individuelle variasjoner [23].

Personer velger som regel å gå mot den veien de kjenner best. Det er sjeldent at man utforsker nye veier når det er varslet om evakuering [26]. Forflytning i trapper med mange mennesker går som regel sakte når det er kø inn til trappene fra flere etasjer. Det er observert at evakuerende hjelper de som har vanskelig for å bevege seg og forsøker å oppmuntre de som er engstelige [26].

Sime [28] har beskrevet hvordan mennesker i en rømningsprosess føler tilhørighet og trekkes mot kjente rømningsveier og kjente personer. I Simes rapport fra 1985 [28] er det foreslått at personers tilhørighet til kjente veier og personer ikke brytes ned i en alvorlig brannsituasjon. Tilhørighetsmetode (affiliative method) bygger på at veivalg er i større grad knyttet til personens tilknytning til andre mennesker og til kjente veier i bygget enn til fysisk utforming som for eksempel avstand til utgang og frie bredder [28]. Teorien er grunnet i at man ønsker helst å evakuere som en gruppe med dem man kjenner, via en vei man er kjent med. Ønske om tilhørighet vil i mange tilfeller overgå ønske om å evakuere så raskt som mulig, dette kan vises ved at personer hjelper andre eller venter på andre i stedet for å evakuere alene umiddelbart.

### **3.1.3 Rømning i røyk**

Forskning har vist at mennesker har en tendens til å evakuere gjennom røyk for å komme seg ut av bygningen de oppholder seg i [29]. Dette er vel dokumentert for bygninger som kun har én rømningsvei [13], det vil si situasjoner der personer kun har valget mellom å vente på assistanse, hoppe fra vindu eller forsøke å gå gjennom røykfylt korridor/trapp. Forskning utført på 70-tallet viste at personer også forsøkte å rømme gjennom røyk der det var en alternativ røykfri rømningsvei tilgjengelig [13]. Generelt har mennesker god kunnskap om at røyk er farlig og at det er giftigheten til røyk som tar flest menneskeliv i brann. Det er likevel få som innser hvor små doser som kan være dødelige, i enkelte tilfeller kan noen få åndedrag være fatalt [26].

## Trapperom

Trykksetting av trapperom er et mye brukt sikringstiltak for å unngå røykspredning til rømningsvei i høye byggverk [7]. Ved dimensjonering av trykksetting er det normalt å ta hensyn til et fåtall åpne dører mot trapperommet, gjerne kun én eller to dører i henhold til anerkjent litteratur [30]. Problemer kan oppstå når en evakueringsplan angir at alle skal evakuere samtidig fra flere etasjer i samme trapp. Dører blir gjerne stående åpne dersom det er kø inn til trapp eller når brannvesen trekker slanger gjennom dører. Personer som befinner seg i etasjer over brannen kan bli nødt til å rømme gjennom røykfylt trapperom. Et eksempel på en brann der trapperom ble røykfylt er det 36 etasjers kontorbygget Cook County Administration building i Chicago som brant 17. oktober 2003. Brannen førte til at seks personer omkom og et titalls personer ble skadet. I bygget var det ca. 2000 arbeidsplasser. Brannen brøt ut en fredags ettermiddag og det var kun 250 personer i bygget. Bygget hadde to trapperom hvor begge ble fylt med røyk. Ett av trapperommene ble benyttet som innsatsvei for brannvesenet, og døren inn til etasjen hvor det brant ble blokkert åpen av brannvesenets innsats. Personer som befant seg i trapperommet over brannetasjen forsøkte å rømme tilbake til kontorene, men dørene hadde smekklås som hindret tilbakerømning. Alle de omkomne ble funnet i trapperommet [26].

Røykfylte rømningsveier har også forårsaket dødsfall i boligbygninger. I 2008 inntraff en brann i eldre murgård i Urtegata i Oslo, der 6 mennesker omkom, hvor samtlige ble funnet i rømningsveier (trapp og korridor) [31]. Brannen startet i hovedtrappeløpet i første etasje og spredde seg opp trapp og inn i korridorer gjennom branndører som var blokkert i åpen stilling. De omkomne ble funnet i korridorer i andre og tredje etasje og i hovedtrappeløp [32]. I intervju med overlevende etter ulykken ble røyken i rømningsvei beskrevet som en ”vegg av røyk som var helt sort” [33], beskrivelsen tyder på at det var svært dårlig sikt.

## Rømningskorridorer

Forsøk fra USA og Storbritannia [34], [35] har vist at personer generelt er uvillige til å evakuere gjennom røykfylte omgivelser når sikt blir mindre enn omtrent 3 meter, spesielt dersom det er mulig å vende tilbake til midlertidig sikkerhet eller benytte alternativ rømningsvei som rømningsvindu eller tilkalle hjelp fra brannvesen.

I følge Purser & McAllister [36] vil tilbøyelighet til å forsøke å rømme gjennom røykfylt rømningsvei være avhengig av blant annet kjønn (menn er mer tilbøyelig for å forsøke å rømme,



mens kvinner snur tilbake), om røyken ligger i sjikt slik at det er bedre sikt langs bakken, samt om det er lavtmontert ledesystem.

I en granskning av brann som tok sted i ”Summerland”, Isle of Man, UK i 1973 ble det fastslått at de fleste forsøkte å rømme ut den samme veien man kom inn, selv om det var alternative rømningsveier som ville vært et bedre valg [28]. Rømning ut fra et stort rom som ble kalt The Marquee Showbar (MSB) ble undersøkt. Av evakuerende som møtte på røykfylt rømningsvei var det kun tre av 75 personer som snudde og byttet rømningsvei underveis [28]. En faktor som kommer svært tydelig frem fra granskingen av denne brannen er at personell som var kjent i bygget hadde en langt større sannsynlighet for å velge en egnet rømningsvei enn gjester som ikke var kjent [28]. Tilbøyelighet for å evakuere gjennom røyk kan derfor korreleres mot hvor lite kjente personene er i bygget. Rømningsveier som ikke er del av den normale sirkulasjonen i bygg er mindre sannsynlig å bli brukt i en rømningssituasjon [28].

## **Tunneler**

23. juni 2011 førte motorhavari i et vogntog til branntilløp i Oslofjordtunnelen. Brannventilasjon var predefinert ut fra brannvesenets tilkomst slik at den tunnelenden som hadde kortest forventet innsatstid for brannvesenet skulle være fri for røyk. Styring av brannventilasjonen førte til at over 5,5 km av tunnelen på Hurum-siden ble fylt med tett røyk og mange trafikanter fikk problemer med å evakuere. Det var 34 personer fordelt på 21 kjøretøy i tunnelen da brannen startet. 25 av disse personene kom seg ut på egen hånd, mens de resterende ni ble reddet av brannvesenet. Ingen omkom i ulykken [37]. Statens Havarikommisjon for transport har gransket hendelsen og gitt ut en rapport som trekker frem noen viktige funn for hvordan røyk i tunnel påvirker trafikanters evakuering.

Det fremkom fra intervjuer av personene som ble reddet ut at trafikantene forsøkte å snu bilen i møte med tett røyk eller etter varsel over radio. Én trafikanter lyktes ikke med å snu bilen i tett røyk og begynte å gå til fots. Denne personen ble plukket opp av en annen trafikanter som hadde klart å snu bilen og forsøkte å kjøre gjennom røyken. Etter flere mindre kollisjoner og flere tilfeller av motorstans valgte alle de resterende 9 trafikanter å forlate kjøretøyene og fortsette til fots. Personene som gikk inne i den røykfylte tunnelen har beskrevet at det var ingen sikt og de brukte tunnelveggen for å føle seg frem. Røyken ble etterhvert så plagsom at det var vanskelig å puste og bevege seg. Etter om lag to timer ble personene evakuert av røykdykkere fra brannvesenet. Røykdykkere fra Hurum brannvesen angrep fra røykfylt side i tunnelen og rapporterte om ca. 10-20 cm sikt 20 minutter etter at brannvesenet var varslet.

### 3.1.4 Ledesystemers effekt på veivalg og ganghastigheter

På begynnelsen av 1970-tallet ble det utført forskning på sikt i røyk og utforming av merking for å lette rømning i røyk [22]. I senere år har fokus også flyttet seg over til faktisk effekt av ledesystem og hvordan dette benyttes av evakuerende personer fremfor å kun se på synligheten til komponenter. Informasjonen som formidles via ledesystemet skal være lett å forstå for alle. Forskning har vist at mange likevel ikke benytter seg av ledesystemer i en evakueringssituasjon [38], [39]. Dette er blant annet begrunnet i at mennesker har en evne til å stenge ute informasjon som man ikke anser som nyttig i det daglige liv [40], såkalt tillært irrelevans [4]. Selv om man kan se grønne skilter som peker mot en utgangsdør er det ikke sikkert at reaksjonen er å gå i denne retningen, mange velger heller å gå ut samme vei som man kom inn i stedet for å benytte nærmeste rømningsvei. Det kan i følge Galea et al. [38] og Jensen [10] være behov for å revurdere utformingen av ledesystemer for å oppnå bedre styring av personer.

I 2009 presenterte forskere ved Fire Safety Engineering Group fra University of Greenwich, resultater fra praktiske forsøk hvor ledeeffekt fra markerings- og henvisningsskilter ble testet [38]. Forsøkene gikk ut på at 68 forsøkspersoner, både kjente og ukjente i bygget, skulle så raskt som mulig individuelt evakuere ut fra et bygg ved å benytte den veien de selv ønsket. På veien var det flere veivalg hvor høyt monterte markerings- og henvisningsskilt viste vei til nærmeste rømningsutgang. Rømningsskiltene var av typen etterlysende og forsøkene ble utført i normal belysning. Resultatene viste at kun 38 % av personene som ikke var kjent i bygget oppdaget de etterlysende skiltene i rømningskorridoren og 28 % av personer som var kjent i bygget rapporterte at de hadde sett skiltene under forsøkene. Blant de som rapporterte at de hadde sett skiltene var det ca. 95 % som fulgte retningshenvisningen som var vist på skiltene.

Forsøk utført i 2001 ved Building Research Establishment (BRE) i Storbritannia testet seks ulike typer ledesystemer/belysningsforhold i røyk [41]. Forsøkene viste at ledesystemer basert på kontinuerlig merking førte til at forsøksdeltakerne presterte langt bedre enn kun normalbelysning eller kun nødbelysning i røyk. Dette til tross for langt lavere lysstyrke fra de kontinuerlige linjene av LED og etterlysende materiale enn normalbelysning og nødbelysning. Optisk røyktetthet var mellom 1,1 og 1,2  $\text{m}^{-1}$  i testene som tilsvarer i underkant av 2 meter sikt ved normal belysning. Det henvises til kapittel 3.3.2 for metode for beregninger av sikt i røyk og optisk røyktetthet (OD).

Paulsen [42] utførte forsøk på rømning i røyk hvor 200 forsøkspersoner evakuerte gjennom korridor og trapp over en total distanse på ca. 30 meter i røyktetthet med  $\text{OD}=1 \text{ m}^{-1}$  som tilsvarer

ca. 0,9 meter sikt. Resultatene fra forsøksserien viste at kontinuerlig merking er den beste løsningen i røyk. Taktill merking ble funnet å være det beste systemet i ekstremt tykk røyk  $OD > 1,5$ , kontinuerlig visuell merking egner seg for situasjoner med moderat tykk røyk  $1,5 > OD > 0,1$  og tradisjonelle skilt egner seg kun i situasjoner med lett røyk  $OD < 0,1$ .

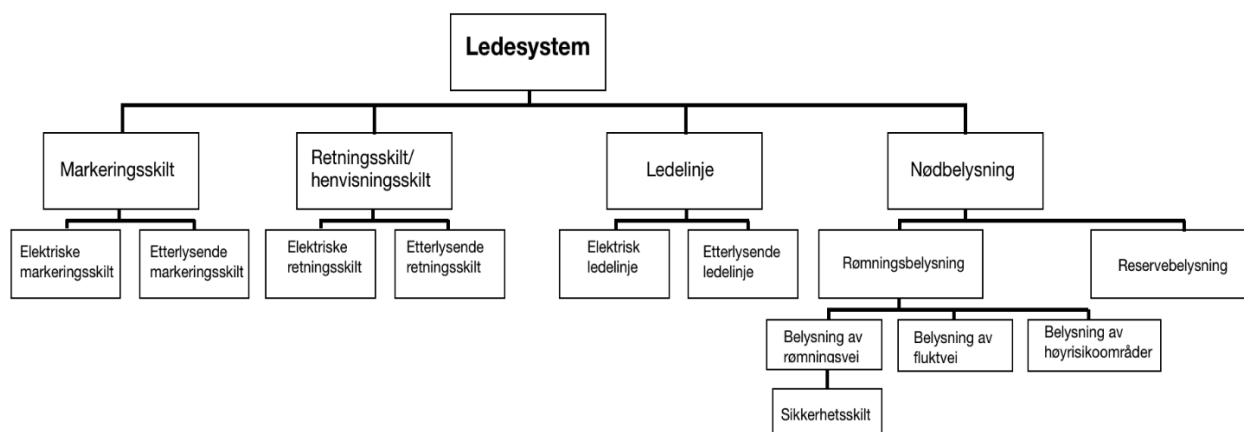
Jensen [10] utførte forsøk hvor 84 testpersoner evakuerte gjennom en 48 meter korridor fylt med røyk. Sammendragsrapport konkluderer med at synsavstand til komponenter i ledesystem er av større betydning enn luminans fra punktkilder. Det ble derfor anbefalt kontinuerlige ledelinjer som egnet ledesystem i røyk. I sammendragsrapport fra Jensen [10] er det konkludert at nødlys og skilting har vist en betydelig mindre rolle for katastroferesultatene enn det forskrifter og bransje forventer. Tradisjonell skilting og nødbelysning blir ikke oppfattet og brukt av publikum slik det har vært forventet. Her menes høytmontert elektrisk anlegg. Lavtmonterte linjer er i rapporten beskrevet å ha god effekt i røyk ettersom en kontinuerlig utforming vil gi mye kortere synsavstand enn skilter i tak og dermed vil være bedre synlig i røyk.

## 3.2 Ledesystemer og nødbelysning

I følge Byggeteknisk forskrift TEK 17 [11] kan et ledesystem omfatte markeringsskilt, retningsskilt, ledelinjer og nødlys. Komponentene i ledesystemet kan være elektriske, belyste eller etterlysende. Nødlys og visuelle ledesystemer omfattes av ulike standarder og har ulike funksjoner. Nødbelysning som beskrives i NS-EN 1838 [3] skal sørge for tilstrekkelig synsforhold og retningsangivelse ved bortfall av normalbelysningen. Ledesystem i henhold til NS 3926 [4] skal identifisere flukt- og rømningsveier og utganger, samt hjelpe personer å forflytte seg under alle forhold (lys, mørke og røyk). Hovedkomponent i et ledesystem er kontinuerlig merking av flukt og rømningsveier.

Ledesystemer og nødbelysning er beskrevet i egne underkapitler her, men det bemerkes at disse må sees i sammenheng når det skal prosjekteres inn i et byggverk.

Figur 2 gir en oversikt over begreper innenfor visuelle ledesystemer [29], [3]. I følge SP Fire Research [29] kan det være uheldig at nødbelysning er en del av et ledesystem ettersom nødbelysningens primære funksjon ikke er å lede personer mot en utgang, men å erstatte lys ved bortfall av normalbelysningen.



Figur 2 - Oversikt over komponenter i et ledesystem

### 3.2.1 Ledesystemer

#### Etterlysende ledesystemer

Etterlysende ledesystemer er bygget opp av fotoluminescerende materiale som gjennomgår en eksitasjonsprosess når det blir utsatt for UV-stråling eller synlig lys [17], [43]. Eksitasjon av etterlysende komponenter i et ledesystem skjer som følge av at materialet opptar energi når det blir utsatt for lys med riktig bølgelengde, energien lagres midlertidig og frigis over tid i form av synlig lys [44]. På kvante-nivå kan dette beskrives ved at elektroner i et atom eller molekyl som treffes av lysenergi, eksiteres til et høyere energinivå. Når elektronene faller tilbake til et lavere energinivå blir den tilførte energien strålt ut i form av synlig lys [45]. Fotoluminescerende materialer som benyttes i etterlysende ledesystemer er av typen fosforescens [17].

Etterlysende ledesystem er gunstig ettersom de ikke er avhengig av strømtilførsel for å fungere og de trenger generelt lite vedlikehold. Det er likevel viktig at de etterlysende komponentene blir ladet slik at de lyser tilstrekkelig i en nødsituasjon. Lading av etterlysende ledesystem skjer normalt ved belysning fra normalbelysning [2]. Ved bruk av etterlysende ledesystem stilles det strenge krav til bruk av lyskilder og lysstyring. Det kan blant annet begrense muligheten for strømsparing med automatisk lysstyring og bruk av LED-belysning som kan avgi mindre UV-lys og dermed gir svakere lading av etterlysende komponenter [2].

#### Elektriske ledesystemer

Et komplett ledesystem utført etter NS 3926 kan bygges opp av elektriske komponenter [4]. Elektriske ledesystemer kan være aktive i normaltilstand eller aktiveres automatisk ved nettutfall

eller utløst brannalarm [4]. I en ledelinje skal avstand senter-senter mellom punktluskilder være maks 250 mm som avgir luminans minst  $100 \text{ mcd/m}^2$  eller ledelinjen kan utføres som en sammenhengende lysende flate med gjennomsnittsluminans lik  $20 \text{ cd/m}^2$ .

### 3.2.2 Nødbelysning

Nødbelysning er en samlebetegnelse for ulike belysningsformer som skal benyttes når forsyningen til den normale belysningen faller bort [3]. Nødbelysningssystemer kan generelt deles inn i reservebelysning og rømningsbelysning. Reservebelysning skal gi tilstrekkelig belysning for å fortsette viktig arbeid ved svikt i hovedbelysning. Rømningsbelysning har til hensikt å sørge for at det er mulig å komme trygt ut fra et område når normal strømforsyning faller bort. Rømningsbelysning kan omfatte belysning av rømningsveier, fluktveier og høyrisikoområder, samt markeringsskilt og sikkerhetsskilt.

### 3.2.3 Lys og syn

*Luminans* er et mål på hvor lys en flate er og har SI-enhet candela per kvadratmeter [ $\text{cd/m}^2$ ]. Luminans avhenger av overflateegenskaper som farge og refleksjon. For etterlysende materialer oppgis gjerne luminans i millicandela/ $\text{m}^2$  [ $\text{mcd/m}^2$ ]. Belysningsstyrke, dvs. mengden lys som treffer en flate, har enhet lumen/ $\text{m}^2$  eller lux og kan enkelt måles med et lux-meter.

Synlig lys er elektromagnetisk stråling innenfor området 380 nanometer til 780 nanometer [46]. Stråling utenfor dette spekteret oppfattes ikke av det menneskelige øyet. Øyet har stor tilpasningsevne til ulike lysnivåer, fra høye luminanser i fullt sollys opp mot  $100\,000 \text{ cd/m}^2$  ned til  $0,000001 \text{ cd/m}^2$  ( $0,001 \text{ mcd/m}^2$ ) ved tilstrekkelig lang tilpasningstid [46]. For et øye som er adaptert til lys tar det minst en halv time i tilnærmet fullstendig mørke før øyet er helt adaptert til mørke [46].

Blending kan oppstå hvis det er spesielt høye luminanser eller store luminanskontraster i synsfeltet [46]. Det finnes både synsnedsettende blending (fysiologisk blending) og ubehagsblending (psykologisk blending), disse opptrer vanligvis samtidig og kan være vanskelig å skille. Synsnedsettende blending forekommer når lyset fra en blendingskilde (annen lyskilde enn den man ønsker å se) spres i øyet og skaper en sløringseffekt [46]. Hvor sterk blendingseffekten er avhenger av luminanskontraster, synsvinkel og individuelle forhold.

Synlighet til et objekt er avhengig av tre faktorer: visuelt miljø (omgivelser), objektets utforming og menneskelig synsevne [9]. Det kan også deles inn som visuell stimulus – det som treffer øyet, og visuell sensitivitet – hvordan øyet oppfatter informasjonen. Den menneskelige synsevnen har flere funksjoner, som synsfelt og fargesensitivitet, men normalt er den viktigste faktoren synsstyrke (visus). Visus angir øyets evne til å se skarpt [47]. Det er store individuelle forskjeller i synsstyrke, generelt avtar synsstyrke med alder, men også store variasjoner forekommer hos jevnaldrende.

### **3.3 Effekter av røykpåvirkning**

Årsaken til at mennesker omkommer i brann er primært forårsaket av to effekter: varmpåvirkning, eller røyk som er giftig eller virker kvelende. Giftige røykgasser er den største årsaken til at mennesker omkommer i brann [36]. Brannrøyk består av luftbårne faste partikler, væsker og gasser som dannes ved forbrenning eller pyrolyse [48]. Oppdrift fører til at varm røyk og luft fra omgivelsene blandes inn i røyksøylen, dette fører igjen til at konsentrasjonene av brenselprodukter tynnes ut og røyken opptar et større volum. Brannrøyk kan hindre evakuering på flere måter. I følge Paulsen [42] har brannrøyk følgende egenskaper som skaper problemer for evakuerende:

- Redusert sikt som følge av absorpsjon og spredning av lys.
- Redusert sikt som følge av irritasjon i øynene.
- Irriterende effekt på slimhinne i nese og hals.
- Varmer gasser, kvelende gasser, stress, angst etc. som kan hindre mennesker i å utføre handlinger.

#### **3.3.1 Irriterende og kvelende effekter av røyk**

Det finnes en rekke forskjellige kjemiske sammensetninger i røyk som er vurdert som helseskadelige. Det er likevel noen få bestanddeler som ofte trekkes frem som de mest dødelige, disse inkluderer kvelegassene karbonmonoksid (CO), karbondioksid (CO<sub>2</sub>) og hydrogencyanid (HCN). I tillegg vil fortrenging av oksygen være farlig ettersom lave oksygenkonsentrasjoner kan føre til kvelende effekt [36].

Karbonmonoksid (CO) er identifisert å være den gassen som forårsaker flest dødsfall [36]. En studie utført i Storbritannia undersøkte i underkant av 200 dødsbranner hvor det ble påvist dødelige konsentrasjoner av karbonmonoksid i 52 % av tilfellene [49]. Studien viste at 91 % hadde sotavsetninger i åndedrett. Dødsårsak vil være avhengig av flere faktorer og det er viktig å se de ulike effektene av røyk i sammenheng. Selv om siktreduksjon i brannrøyk eller irriterende effekter av røyken ikke er helsefarlig i seg selv, kan det gjøre at mennesker ikke er i stand til å evakuere selvstendig. Det at personer bruker lang tid på å evakuere eller ikke er i stand til å evakuere i det hele tatt kan igjen føre til at man blir utsatt for varme eller giftige gasser som kan være dødelig. Effektene fra lave oksygennivåer eller høye CO<sub>2</sub>-nivåer kan også være dødelige. CO<sub>2</sub> vil alltid være tilstede i høye konsentrasjoner ved en brann, og eksponering av CO<sub>2</sub> kan føre til hyperventilering og dermed øker også opptaket av andre giftige gasser. Branner i elektriske artikler er funnet å ha spesielt irriterende effekt på øyne og åndedrett. Slike branner har gjerne høyt innhold av hydrogenklorid (HCl) [50].

En metode for å vurdere giftigheten til røyk kalles FED/FEC-analyse og står for henholdsvis *Fractional Effective Dose* og *Fractional Effective Concentration* [36]. Metoden baseres på å beregne summen av alle akkumulerte giftige og kvelende gasser over eksponert tid hvor konsentrasjoner av hver enkelt gass har en vektet verdi ut fra giftighet. Når FED- eller FEC-verdi er lik 1 er det antatt at tålegrenser til 50 % av en befolkning vil være nådd og personer vil da ikke å være i stand til å evakuere videre. Det benyttes en log-normalisert kurve for å bedømme tålegrenser til en befolkning [51], det vil for eksempel si at ca. 11 % av en befolkning forventes å bli udyktiggjort ved FED lik 0,3, 50 % ved FED lik 1 og ca. 89 % av en befolkning forventes å ikke være i stand til å evakuere ved FED lik 3. Metoden kan også utvides til å inkludere effekter av varmepåvirkning, optisk røyktetthet og irriterende effekter av røyk.

### 3.3.2 Sikt i røyk

I mange dødsbranner er det rapportert om røykfylte rømningsveier som gjør at personer ikke finner veien ut, eller vender tilbake. Optisk tett røyk og røykens irriterende effekt på øyne og åndedrett er vanligvis de første farene som møter evakuerende [36]. Reduksjon av sikt forekommer før livstruende konsentrasjoner av giftige gasser, indirekte vil derfor siktreduksjon i røyk være en svært viktig faktor som fører til at personer omkommer i brann.

Røyktetthet kan angis med ekstinksjonskoeffisienten,  $C_s$  [m<sup>-1</sup>], som beregnes ut fra avstand til en lyskilde og den naturlige logaritmen til relativt tap av lysstyrke i røyk.

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

$I_0$  er intensiteten til lys som stråler inn på en flate [cd],  $I$  er lysintensitet som stråler gjennom røyk [cd],  $D$  er lengde fra lyskilde til bestrålt punkt.

Ekstinksjonsfaktor kan også uttrykkes som OD (Optical Density) [52]. OD baseres på samme forhold som ekstinksjonskoeffisient, men den briggske logaritmen benyttes i utregning [39].

Det finnes flere ulike beregningsmetoder for å vurdere hvordan røyk påvirker sikt. Noen modeller tar kun hensyn til redusert sikt som følge av absorpsjon og spredning av lys, mens andre modeller også tar hensyn til røykens irriterende effekt på øynene, spredning av bakgrunnsbelysning i røyk og kontrastforhold for rømmingsskilter. En av de mest anvendte metodene for å evaluere sikt i røyk ble utarbeidet av Jin [53] på 70-tallet. I følge Jin er det to grunner til at sikt reduseres i røyk [54]:

1. Lysstråler fra en lyskilde brytes av røykpartikler og dette reduserer intensiteten til lyset når det når øyet.
2. Lys fra normalbelysningen spres når de treffer røykpartikler, lysstråler fra ulike kilder spres og treffer øyet som dermed ikke klarer å skille ut hvor lyskilden kommer fra

Rea et.al. [55] viste i 1985 at lyset fra omgivende lyskilder ble spredd i røyk slik at først og fremst lesbarheten til skilt, men også synligheten til markeringsskilt, ble dårligere. Det ble funnet at spredd lys reduserte lesbarheten av skilt med lav kontrast mer enn skilt med høy kontrast. Likeledes var det med lesbarheten av små bokstaver i forhold til store. Tilsvarende funn ble gjort av Jensen [39]:

«Almenbelysning, nødbelysning og annen belysning som ikke er beregnet på å visualisere evakueringsruter, vil bare distrahere de evakuerende og redusere synligheten og lesbarheten av merking og annen relevant informasjon for evakuering i røyk. Hvis en pålitelig metode kunne etableres for å *slå av* denne belysningen ved en kritisk røyktetthet, ville mye vært vunnet.»

Et skilt i røyk vil kunne skilles fra bakgrunnen når differansen mellom luminans fra skiltet og bakgrunnen er større enn en gitt grense for luminanskontrast [46]. Bestanddeler og partikkelstørrelser i røyk vil avhenge av type brensel, ventilasjonsforhold, temperaturer og vil variere med tid. Det er derfor usikkerheter knyttet til matematiske modeller for sikt i brannrøyk.



Det er likevel observert en korrelasjon som er tilnærmet lineær mellom synsavstand og røyktetthet ut fra ekstinksjonskoeffisient i forsøk med ikke-irriterende røyk [9].

Matematisk formel som presentert av Jin [22] tar for seg siktavstand til et skilt i røyk og baseres på terskelverdien der et skilt akkurat er synlig gjennom røyk. Formel hensyntar luminans fra skilt, kontrastforhold, belysning fra omgivelsene, røyktetthet, samt absorpsjon og spredning av lys i røyk. Basert på empiriske forsøk er det funnet forenklede formler:

$$V = \frac{5}{C_s} \sim V = \frac{10}{C_s} \quad (2)$$

for lysende skilt, ligningen angir omtrentlig størrelsesorden for verdi mellom 5 til 10 i brøkens teller, og

$$V = \frac{2}{C_s} \sim V = \frac{4}{C_s} \quad (3)$$

for reflekterende skilt, hvor  $V$  er avstand til skilt hvor det akkurat er synlig gjennom røyk [m], og  $C_s$  er ekstinksjonsfaktor [ $m^{-1}$ ]

Der man evaluerer siktavstand til vegger, gulv og andre objekter som er normalt belyst, er det vanlig å beregne sikt som funksjon av ekstinksjonsfaktor med følgende formel [56]:

$$V = \frac{2}{C_s} \quad (4)$$

Synlighet til gjennomlyste skilt i røyk med ulike farger er undersøkt. Elektromagnetisk lys med lange bølgelengder (rødt lys) vil bli mindre påvirket av røyk og syns derfor bedre enn kortbølget lys (blått lys). Det er dog bare marginale forskjeller – skilt med ulik farge og samme luminans har bare noen få promille forskjeller i synsavstand. Faktorer som at grønn oppleves som en tryggere farge enn rød vil derfor kunne telle mer enn en marginal økning i synsavstand. Paulsen [42] anbefaler derfor grønne skilter.

Forsøk utført av SP Fire Research [57] (nå RISE) i 2015 – viste at høytmonterte markeringsskilter som er elektriske vil være mer synlig i brannrøyk enn etterlysende skilt. Forskningen viser at luminans fra skilt kan være avgjørende for synlighet i lett til middels tett røyk som ikke er turbulent. Ved tett, mørk og turbulent brannrøyk var ingen av markeringsskiltene synlige i en avstand på 7,5 meter og et lavtmontert ledesystem vil trolig være mer egnet.

### 3.3.3 Ganghastighet i røyk

Frantzich og Nilsson [56] viste at ganghastighet ble redusert med økt røykgasskonsentrasjon etter følgende formel:

$$v(K_s) = \alpha + \beta C_s \quad (5)$$

Hvor  $C_s$  er ekstinksjonskoeffisient [ $\text{m}^{-1}$ ] og koeffisientene  $\alpha$  og  $\beta$  er konstanter med verdier henholdsvis 0,706 m/s og -0,057  $\text{m}^2/\text{s}$ . I forsøkene ble det registrert store individuelle forskjeller i ganghastigheter. Standardavvikene ble funnet å være  $\sigma_\alpha = 0,069$  m/s og  $\sigma_\beta = 0,015$   $\text{m}^2/\text{s}$ . Det ble observert en trend i ganghastighet som funksjon av røyktetthet, men det knyttes stor usikkerhet til individuelle forutsetninger [56].

## 3.4 Datamodeller for evakuering og brannsimulering

I dette kapittelet presenteres en overordnet beskrivelse av evakueringsmodeller generelt og en spesiell beskrivelse av to modeller som ble benyttet for å utføre rømningssimuleringer i forbindelse med denne oppgaven. Evakueringsmodeller benytter en forenklet fremstilling av et rømningsscenario for å simulere personflyt. Flere modeller har, til en viss grad, også funksjoner for å simulere menneskelig atferd ved evakuering. Noen modeller kan kobles direkte mot brannsimuleringer for visuell fremstilling av rømning mot brannutvikling, samt simulere hvordan brann og røyk påvirker personer i modellen [58]. I hovedsak begrenses evakueringsmodeller til å vurdere forflytningstid. Deteksjonstid og reaksjonstid må bestemmes og eventuelt legges inn i modeller manuelt.

### 3.4.1 Representasjon av personer og geometri i modeller

De første evalueringsmodellene som ble utviklet baserte seg på hydraulisk prinsipp [20]. Hydrauliske modeller betrakter menneskers forflytning med en bestemt ganghastighet og strømningsrate gjennom åpninger, personer blir fremstilt uten individuelle karakteristikk. Modeller som ikke har muligheter for å tilegne individuelle egenskaper til personer kalles også makroskopiske modeller [20]. Makroskopiske modeller tar ikke hensyn til interaksjon mellom mennesker og omgivelser. Det er i dag få evakueringsmodeller som benytter makroskopisk representasjon av evakuerende [20]. Når evakuerende i modell presenteres som individuelle personer, har man en mikroskopisk representasjon. Personer i modellen kan påvirkes av

interaksjon med omgivelser og andre, samt atferds-regler som ligger inne i modellen. De fleste programmer for rømningssimulering har fire kjerneelementer for atferd [20]:

1. Før-evakueringstid (varslingstid + reaksjonstid)
2. Ganghastighet
3. Veivalg
4. Strømningsrater (f.eks. gjennom døråpninger)

I følge Ronchi & Nilsson [59] finnes det tre grunnleggende måter å representere geometrien til en bygning i rømningssimuleringer: Grovt nettverk (course network), fint nettverk (fine network) og kontinuerlige modeller (continuous models). Grovt nettverk og fint nettverk fører til relativt store forenklinger av geometri. I kontinuerlige modeller kan personer i modell bevege seg fritt i et plan. Hver enkelt person opptar sin gitte plass i modellen og vil styre unna objekter og andre personer for å hindre kollisjon.

### **3.4.2 FDS+EVAC**

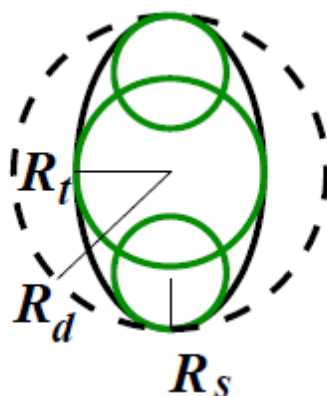
FDS+EVAC er en evakueringsmodul som er implementert i CFD-simuleringsprogrammet Fire Dynamics Simulator (FDS) [60]. FDS er utarbeidet av National Institute of Standards and Technology (NIST). FDS+EVAC er utarbeidet av VTT Technical Research Centre of Finland. Det vises til vedlegg B for mer utfyllende informasjon om brannsimuleringer i FDS.

FDS+EVAC gir mikroskopisk representasjon av personer, dvs. modellen behandler hver enkelt person med individuelle egenskaper og rømningsstrategier. Programmet er stokastisk, som betyr at personene (agents) genereres ved bruk av tilfeldige parametere. Hver simulering av samme situasjon vil derfor gi små endringer i resultat [61].

I likhet med FDS behandles alle geometrier som rektangulære celler. Modellen henter ut geometri og bruker cellestørrelsene til å avgjøre hvilke «forflytningskrefter» som virker på en person, dette kan visualiseres med vektorfelter. Personene i modell er likevel i stand til å bevege seg fritt uavhengig av cellestørrelsene. cellestørrelse har derfor kun innvirkning på veivalg og ikke på hvor mange personer som får plass i en celle. Rømningssimuleringer må dog ikke utføres med for små celler da dette kan forårsake problemer med evakueringsruter som personene velger. Cellestørrelser kan normalt være 0,25 m x 0,25 m uten problemer. Persontettheter på over 4 personer/m<sup>2</sup> kan føre til feilmeldinger i programmet [60].

FDS+EVAC regner ut posisjon, ganghastighet og doser med spesifiserte giftige gasser for hver enkelt person i hvert tidssteg. Tidssteg bestemmes normalt automatisk i FDS, det er generelt ikke anbefalt å stille inn tidssteg manuelt ettersom man kan tape viktig informasjon dersom tidsstegene blir for store.

FDS+EVAC tillater simultan simulering av brann og evakuering av personer. Algoritmene som ligger til grunn er basert på kontinuerlig bevegelse av personer i et to-dimensjonalt plan hvor hver enkelt person opptar et gitt areal i planet [60]. Størrelse til personer er basert på tre sirkler som sammen utgjør en ellipse som er arealet hver enkelt person tar opp i plan, figur 3 viser omriss av en person i modellen og tabell 3 angir fordelinger av fysiske størrelser og uforstyrret ganghastighet til ulike persontyper. I smokeview illustreres personer tredimensjonalt. Størrelse til hver enkelt person bestemmes tilfeldig i hver simulering ut fra en statistisk fordeling.



Figur 3 - Omriss av person i FDS+EVAC

Tabell 3 - Fordelinger for fysiske størrelser og ganghastigheter til personer i FDS+EVAC

Body type	$R_d$ (m)	$R_t/R_d$ (-)	$R_s/R_d$ (-)	$d_s/R_d$ (-)	Speed (m/s)
Adult	$0.255 \pm 0.035$	0.5882	0.3725	0.6275	$1.25 \pm 0.30$
Male	$0.270 \pm 0.020$	0.5926	0.3704	0.6296	$1.35 \pm 0.20$
Female	$0.240 \pm 0.020$	0.5833	0.3750	0.6250	$1.15 \pm 0.20$
Child	$0.210 \pm 0.015$	0.5714	0.3333	0.6667	$0.90 \pm 0.30$
Elderly	$0.250 \pm 0.020$	0.6000	0.3600	0.6400	$0.80 \pm 0.30$

### Kobling av brann- og rømningsmodellering

FDS+EVAC tillater å koble sammen brann- og rømningsmodelleringene. Røykkonsentrasjoner påvirker bevegelsehastighetene og veivalgene til personene. Gasskonsentrasjoner av O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> og CO er knyttet opp mot Purses [50] *Fractional Effective Dose* (FED) som angir menneskers tåleevne. FDS+EVAC tar ikke hensyn til at personer i realiteten har svært ulike tåleevner, men simulerer personer hvor alle har lik tåleevne. Ved akkumulert FED lik 1,0 vil personene i

modellen stoppe opp og skifter farge for å representere at personen har nådd tålegrense og er ikke i stand til videre evakuering. Ytterligere andre giftige og irriterende gasser kan inkluderes dersom brukeren spesifiserer dette i en egen kommando. Røyktetthet bestemmer bevegelseshastighet og veivalg til personer. Effekten av høye temperaturer og stråling er ennå ikke implementert i programmet, personer prøver derfor ikke å styre unna brannen og påvirkes heller ikke av varme og stråling.

### **Sikt i røyk**

Røykgasskonsentrasjoner som beregnes i FDS benyttes til å redusere ganghastigheten til evakuerende. Reduksjonsfaktor for ganghastighet er basert på forsøk utført av Frantzich og Nilsson [56], hvor deres forsøk har dokumentert effekt for høyere røyktettheter enn det forsøk fra Jin tidligere har dokumentert [53]. Forsøkene som algoritmene i FDS+EVAC er basert på inneholder stor spredning for ganghastigheter, men FDS+EVAC benytter kun en gjennomsnittshastighet for alle personer.

### **Verifisering og validering av FDS+EVAC**

Verifisering er prosessen for å bestemme om valgt metode utføres riktig. Verifisering kan være å kontrollere om en beregning er utført riktig med bruk av en bestemt metode. Validering er prosessen for å bestemme om modellen stemmer med observasjoner i virkeligheten [62]. Validering kan være å kontrollere at en programvare er egnet for en gitt problemstilling.

Verifiseringen av programvaren er utført av VTT Technical Research Centre of Finland ved å kontrollere at de numeriske løsningene gir tilstrekkelig lav usikkerhet og at programmet utfører operasjoner riktig etter beskrivelser fra bruker.

Validering er gjort ved å sammenligne resultater mot praktiske forsøk og andre evakueringsmodeller. FDS+EVAC er primært et forskningsverktøy for å studere evakueringsprosesser i bygninger. I følge programmets brukerveiledning har resultater vist seg å være sammenlignbare med eksperimentelle rømningsmodeller og andre simuleringsprogrammer, men programmet er ikke fullverdig validert. Simuleringer i skrått terreng, som for eksempel ramper, er ikke validert. Programmet passer derfor best for horisontal forflytning i bygninger uten særlig komplisert geometri. Generelt gjelder det at bruker også må validere om programmet er egnet i hvert enkelt tilfelle som simuleres.

### 3.4.3 Pathfinder

Pathfinder er en rømnings- og personflytsimulator som benytter mikroskopisk representasjon av personer. Programmet har et grafisk brukersnitt med visualisering i 2D og 3D. Hver enkelt person defineres av en posisjon og en spesifikk profil som angir egenskaper som størrelse, ganghastigheter og atferder med mer.

Det finnes to ulike simuleringsmodeller i Pathfinder. «SFPE mode» gir resultater basert på forenklet beregningsmetode hvor personer ikke opptar plass i rommet. Personer flyter sammen i stedet for å kolliderer, bevegelse styres av persontettheter, forutbestemte ganghastigheter og strømningsrater gjennom dører. «Steering mode» er en mer sofistikert simuleringsmodell hvor personer i modellen agerer med hverandre. Modellen simulerer i større grad menneskelige bevegelser og atferder enn SFPE mode.

Pathfinder støtter importering av ulike underlagsfiler som grunnlag for å utforme rømningsveier, deriblant Revit-filer, psm-filer laget i PyroSim, dwg-filer fra AutoCad med flere. Personer i modell beveger seg fritt i et plan, men begrensninger i z-akse der det er lave høyder blir også tatt hensyn til i modellen [63].

#### **Kobling av brann- og rømningssimulering**

Pathfinder kan kobles med 3D-data fra FDS-simuleringer for å visualisere røykspredning i rømningsmodellen, samt generere data for sikt i røyk og FED beregninger basert på konsentrasjoner av CO, CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub>. Røyk og FED-beregninger vil dog ikke ha innvirkning på personers ganghastigheter eller veivalg i modellen og er derfor kun nyttig for visualisering. FED-beregninger er kun gitt som informasjonstillegg kalt *CSV data* [63].

#### **Verifisering og validering av Pathfinder**

Verifiseringen av programvaren er utført av Thunderhead Engineering ved å kontrollere at programmets resultater er som beskrevet i *Pathfinder Technical References* [63]. Testene består av å se isolert på enkeltparametere og kontrollere om dette er implementert riktig i modellen.

Valideringen av programmet er basert på sammenligning av eksperimentelle data og erfaringer. I validering er det simulert større modeller hvor flere effekter for rømning samvirker for å produsere et resultat. Generelt gjelder det at bruker også må validere om programmet er egnet i hvert enkelt tilfelle som simuleres.

## 4 Metode

Det er i hovedsak benyttet to metoder i arbeidet med denne oppgaven. Praktiske evakueringsforsøk er utført ved undervisningsbygget Voss Gymnas, hvor en rømningskorridor ble utstyrt med et etterlysende ledesystem. Korridoren ble fylt med scenerøyk og evakueringsforsøk ble utført i to ulike belsningsforhold. Deltakere i evakueringsforsøkene ble også bedt om å fylle ut et spørreskjema med formål å kartlegge opplevd effekt av ledesystem i ulike belsninger, og atferdsmønster hos deltakerne. Evakueringsforsøkene er utført med bruk av kunstig røyk som produserte optisk røyktetthet som ga ca. 0,5-1,0 meter sikt, dette tilsvarer ekstinksjonsfaktor mellom ca. 2-4 m<sup>-1</sup>.

Det er også utført rømningssimuleringer som har til hensikt å undersøke om moderne simuleringverktøy kan benyttes til å vurdere rømning gjennom røyk. Rømningssimuleringer er gjennomført i en datamodell for samme rømningskorridor som ble benyttet i praktiske forsøk. Simuleringer tar for seg en brann i utvikling som fører til gradvis mer utfordrende forhold for sikt i røyk og giftige røykgasskonsentrasjoner for evakuerende. Ganghastigheter og FED-beregninger fra simuleringene skal vurderes for å undersøke hvilke effekter brannrøyk har på evakuerende i modellen. Resultater fra simuleringer og evakueringsforsøk sammenstilles og evalueres for å kunne besvare oppgavens hypotese.

### 4.1 Evakueringsforsøk og spørreundersøkelse

Evakueringsforsøkene ble utført i tett scenerøyk hvor etterlysende skilt var akkurat synlige i en avstand på 0,5-1,0 meter. Tett røyk ble benyttet ettersom effekten av lysbrytning i røyk ble antatt å være proporsjonal med optisk røyktetthet, dvs. effekt av ulike belsninger i røyk ble antatt å komme tydelig frem ved å benytte tett røyk i forsøkene. Bakgrunnen for valgt forsøksoppsett er at man foretrekker å evakuere med god belsning dersom det er røykfrie omgivelser. Med økende røyktetthet vil det muligens finnes et punkt hvor det er å foretrekke at all belsning som ikke er del av ledesystem slås av og kun lys fra ledesystemet er på for å unngå blinding slik dette er angitt i tidligere forskning [10], [22], [42], [55]. Det ble undersøkt hvordan etterlysende ledelinjer oppfattes når en rømningsvei er røykfylt og har ulike belsningsforhold.

Evakueringsforsøk ble gjennomført ved Voss Gymnas den 19.02.2018. 13 personer deltok og alle gjennomførte to evakueringsforsøk hver. En del av rømningskorridor ble fylt med scenerøyk og deretter evakuerte én og én deltaker gjennom korridoren. To ulike belsningsforhold ble

undersøkt: uten elektrisk belysning og med normalbelysning på. Etter gjennomført forsøk ble deltakerne bedt om å fylle ut et spørreskjema hvor de skulle evaluere ledesystemet og rømning i røyk i avkryssingsbesvarelser.

#### **4.1.1 Avgrensinger**

13 personer deltok i forsøkene. Det ble gjennomført to forsøksserier for hver deltaker hvor ett forsøk var med elektrisk belysning fra armaturer i tak og ett forsøk var uten elektrisk belysning. Korridoren hadde kun én ”riktig” rømningsretning, forsøkene kartlegger derfor i liten grad ledeeffekt med hensyn til veivalg.

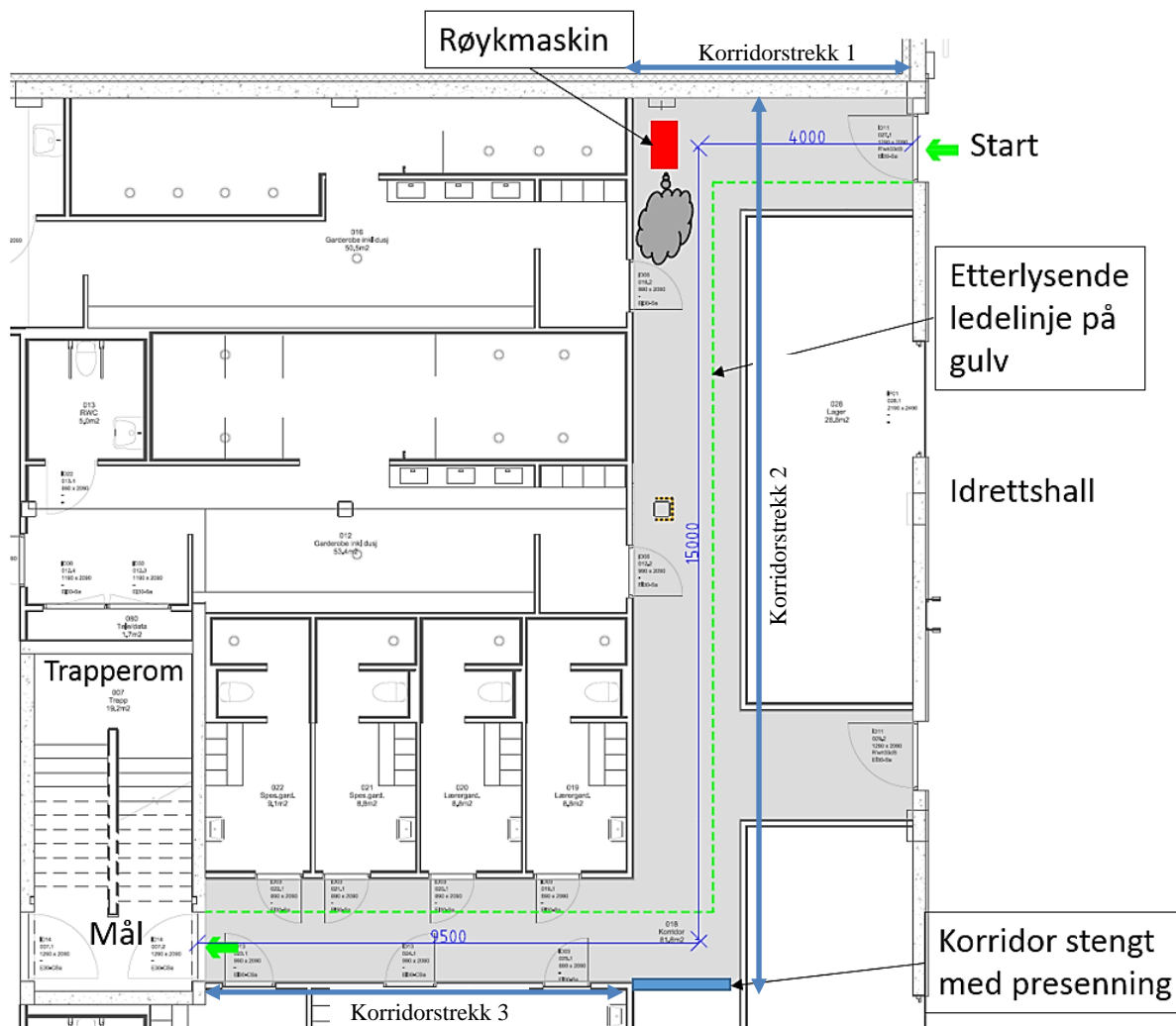
Det ble benyttet scenerøyk/øvelsesrøyk av sikkerhetsmessige årsaker. Flere forhold ville vært annerledes ved bruk av ekte brannrøyk, men dette ble vurdert til å være verken etisk forsvarlig eller gjennomførbart. Kun én type/produsent av etterlysende ledesystem ble testet. Det ble benyttet en leverandør som hadde godkjenninger for å tilfredsstille dagens regelverk og standard.

#### **4.1.2 Oppsett i rømningskorridor**

Rømningskorridor mellom garderober og idrettshall i underetasje på Voss Gymnas ble benyttet som arena for evakueringsforsøk. Rømningstraseen var ca. 30 meter lang og besto av tre korridorstrekninger som ga to retningsendringer langs veien. Fri bredde i korridor var 2,0 meter med unntak av én passasje forbi en søyle hvor minstebredde var 1,30 meter. Høyde fra gulv til systemhimling var ca. 3 meter og ca. 4 meter opp til underkant av etasjeskille. Korridor hadde 9 dørforbindelser inn til garderober, én dør inn til trapperom og to dører til idrettshallen. Under forsøkene ble alle dørene holdt lukket. Deler av korridor som ikke ble benyttet i forsøkene ble stengt med en presenning. Dette for å hindre unødig mye røykspredning.

Figur 4 viser plantegning for rømningskorridoren med skissert plassering av ledelinje i gulv, avstander, plassering av røykmaskin og angivelse av hvor korridoren ble stengt av med presenning under forsøkene. Avstandsmål viser gangavstand dersom man følger midten av korridoren fra start til slutt av forsøksløypen. Til sammen utgjør denne avstanden 28,5 meter. I beregning av gjennomsnittlig ganghastigheter er denne avstanden benyttet.





Figur 4 - Rømningskorridor på Voss gymnas

Som del av forarbeidet til evakueringsforsøk ble det prosjektert og montert et etterlysende ledesystem i henhold til NS 3926:2017 i rømningskorridoren. Det henvises til vedlegg E for kort notat vedrørende detaljprosjektering av ledesystemet. Komponenter til etterlysende ledesystem ble levert av SmartSigns AS og var av typen vinylskilt som ble limt direkte på rengjort underlag. Ledesystemet besto av ledelinje i gulv, hindringsmarkeringer på søyle, ledelinje langs dørkarm på rømningsdør og skilt for åpningsmekanisme på dør. I korridoren var det allerede montert flere etterlysende markering- og retningsskilt, disse skiltene ble beholdt og benyttet i forsøkene. Det ble forutsatt at skiltene var montert med riktig kvalitet etter den belysningen som var i korridoren og med riktig størrelse på skiltene. Ettersom Voss Gymnas er prosjektert og bygget etter nyere regelverk og ble åpnet 2017 er dette en god antagelse. Skiltene ble beholdt og benyttet i forsøkene.

## Ledelinjer montert i gulv

Ledelinjer bestående av enkeltstående elementer, dvs. sirkulære merker med diameter 40 mm som plasseres med senteravstand inntil 25 cm mellom hvert punkt ble benyttet. Merkene ble limt direkte på gulv. Det ble benyttet retningsmerker (piler) ca. hver 3. meter som viser rømningsretning der det er blindkorridor, dvs. i korridorstrekk 1 og 2. Der det er to mulige retninger som leder til utganger/trapper skal det generelt benyttes ledelinjer uten retningsangivelse. Søyler i rømningskorridor ble markert med hindringsmarkering med svarte og gule striper og 50 mm bredde. Søylen ble merket på gulv og 40 cm opp på to sider slik at disse var synlig i gangretning.



Figur 5 - Fotografi av ledelinje bestående av enkeltstående sirkler på gulv og hindringsmarkering av søyle

## Luminanskrav til etterlysende komponenter

Etterlysende komponenter i bygget har krav til minste luminansverdi,  $L = 10 \text{ mcd/m}^2$  med varighet i minst 60 minutter (brannklasse 3). For ledelinjer gjelder kravet om  $10 \text{ mcd/m}^2$  dersom bredde er minst 50 mm. For smalere ledelinjer må luminanskravet økes i henhold til ligning:

$$L' = L \frac{50}{b} \quad (6)$$

Der

$L'$  er øking i luminans i  $\text{mcd/m}^2$  (avhengig av reduksjon i ledelinjens bredde).

$L$  er luminans lik  $10 \text{ mcd/m}^2$ , som er minstekravet.

$b$  er ledelinjens etterlysende bredde i mm, der  $25 \text{ mm} < b < 50 \text{ mm}$ .

Valgte ledelinjer var punktmarkeringer med sirkler i størrelse Ø40 mm. Bredden var derfor under minstekravet i standard og måtte kompenseres med høyere luminans etter 60 minutter:

$$L' = 10 \text{ mcd/m}^2 \times \frac{50\text{mm}}{40\text{mm}} = 12,5 \text{ mcd/m}^2$$

Ledelinjer har krav om minst 12,5 mcd/m<sup>2</sup> etter 60 minutter.

### **Merking av dører**

Rømningsdør (dør til trapperom < 15 M bredde i modulmål) ble merket på følgende vis:

- Høyre side av dørkarm markert med vertikal, etterlysende list fra gulvet og opp til samme høyde som dørvrideren. 50 mm bred list.
- Åpneanordningen ble merket med dørvridereskilt på dørhåndtak.
- Over dør var det markeringsskilt med dimensjoner 150×300 mm. Piktogram med pil opp.

### **Belysning**

Ledelinjene i korridoren var ikke eksponert for dagslys og var avhengig av nødvendig opplading fra elektrisk belysning. Alle komponenter i det etterlysende ledesystemet var belyst med minst 100 lux og fargetemperatur på 3000 K fra normalbelysning.

### **Røykmaskin**

Røykmaskin av merket Trainer 201 fra MSS Professional A/S ble benyttet i forsøkene. Maskinen ble lånt fra Voss Brannvern. Røykmaskinen ble plassert i hjørne mellom korridorstrekk 1 og 2, som vist i figur 4. Det ble benyttet en røykvæske som produserte tett hvit røyk, uten tilsetninger som førte til irritasjon i øyne eller åndedrett. Maskinen skulle i henhold til brukermanual [64] varmes opp i minst 7 minutter før den ble satt i gang. Det ble benyttet funksjon for periodevis påfylling av røyk for å sørge for at røyktettheten i korridoren ikke falt mellom forsøkene.

#### **4.1.3 Forsøksgjennomføring**

Evakueringsforsøkene startet i idrettshall og ble avsluttet når deltaker nådde trapperommet. Ca. 2 timer før forsøkene ble lys slått på i korridor slik at ledesystemet ble ladet av normalbelysning. Deltakerne ble informert om at deres deltakelse var frivillig og at de kunne trekke seg når som

helst uten å oppgi grunn. Det ble informert at oppgaven var å gå gjennom røykfylt rømningskorridor så raskt som man følte seg komfortabel med. Målet var å finne veien til nærmeste trapperom og det ble informert at det var et ledesystem i korridoren som deltakeren kunne benytte seg av. Det ble levert ut et samtykkeskjema (se vedlegg I) som deltakere måtte signere for å delta på forsøkene.

Forsøkene ble utført med én og én deltaker av gangen. Deltaker åpnet dør til korridor på signal klar-ferdig-gå. Når deltaker hadde kommet gjennom korridoren og til trapperom ble deltakeren ledsaget tilbake til starten av forsøket via en annen (ikke-røykfylt) vei. Det samme forsøket ble gjentatt, men med annen belysning.

Lysset ble styrt ved å slå av og på sikringskurs for korridoren mellom hvert 2. forsøk. I praksis betyr dette at deltaker 1 utførte forsøkene i rekkefølgen lys av – lys på. Deltaker 2 med rekkefølgen lys på – lys av osv. Det var flere årsaker til at denne lysstyringen ble benyttet. En slik lysstyring ga minst mulig arbeid mellom forsøkene, og på denne måten begynte annenhver deltaker forsøkene med ulike lysforhold slik at effekten av å lære seg veien ble kompensert i resultatsammenstilling. Ved å alternere belysningen ble det antatt at ledesystemet fikk noe lading, selv om det var røyk i korridoren, og dermed ville lysstyrken fra ledesystemet holdes mer jevnt mellom forsøkene. Deltakerne fikk gjort ferdig sin forsøksserie på kort tid og ble ikke oppholdt lengre enn nødvendig.

Voss Brannvern var tilstede under alle forsøkene med to personer, hvor én person styrte røykmaskin og én person observerte deltakere i rømningskorridoren og var klar til å bistå dersom deltaker ønsket å avbryte.

#### **4.1.4 Datainnsamling**

##### **Tidtaking**

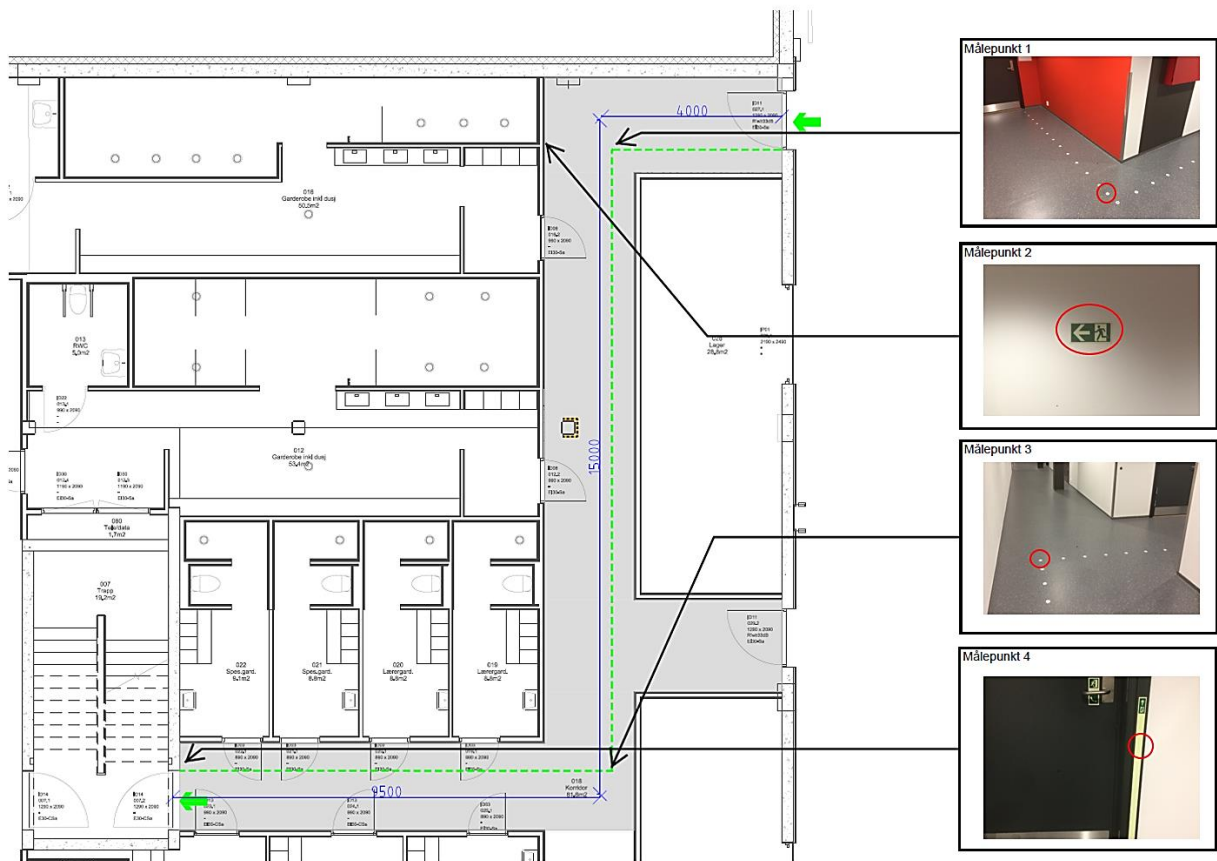
Evakueringstid ble logget med stoppeklokke av forsøksassistent i trapperom som fikk beskjed over telefon når forsøket startet. Det ble også benyttet et videokamera i trapp som ekstratiltak for å sikre riktig tidtaking. Videokamera ble linket mot en referansetid og starttider ble notert av person som startet forsøkene mot referansetiden. På denne måten ble det alltid logget to evakueringstider som sikkerhet dersom en av målingsmetodene skulle svikte.

## Lysmålinger

Før forsøkene ble belysningsforholdene i rømningskorridoren målt. Gjennomsnittlig belysningsstyrke på gulv var ca. 200 lux. Det ble valgt ut 4 målepunkter på etterlysende skilt som ble målt før forsøkene startet. Målepunktene er vist i figur 7 og resultater fra målinger er vist i tabell 4. Alle lysmålingene ble utført med fotometer av merket Hagner S4 med kombinert måler for luminans [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ] og illuminans [ $\text{lux}$ ]. Fotometer ble lånt fra Multiconsult Norge AS avd. Bergen. Det ble opplyst at fotometeret var kalibrert. Til lux-målinger ble det benyttet en ekstern sensor som ble koblet til fotometeret hvor målinger ble avlest som vist på figur 6. Luminansmålinger ble tatt ved å se gjennom en optisk søker og sikte på et punkt og låse dette punktet med en knapp, tilsvarende som å ta bilde med et fotoapparat. Fotometeret målte da hvor lys flaten var og ga ut et resultat i  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Et Fotometer er basert på en lyssensitiv komponent som består av to silikondioder som filtrerer lys i et spekter som ligner menneskers øyne. Luminansmålinger kan bli gjort mellom 0,01 – 200 000  $\text{cd}/\text{m}^2$  og målinger for illuminans mellom 0,01 – 200 000 lux [65].



Figur 6 - Fotometer Hagner S4. Bilde fra lysmålinger ved Voss Gymnas [65]



Figur 7 - Målepunkter på etterlysende skilter og gulvmarkering

Tabell 4 - Målinger av belyningsstyrke på etterlysende komponenter for forsøk

Målepunkt nr.	Type	Sted	Ladelys [lux]	Type lyskilde
1	Gulvmerking	Hjørne mellom korridorstrekk 1 og 2	364	26 W kompaktlysrør, 3000 K
2	Henvisningsskilt	Retningsendring mellom korridorstrekk 1 og 2	288	26 W kompaktlysrør, 3000 K
3	Gulvmerking	Hjørne mellom korridorstrekk 2 og 3	303	26 W kompaktlysrør, 3000 K
4	Vertikal	Dør til trapperom, dørkarm	101	26 W kompaktlysrør, 3000 K

#### 4.1.5 Spørreundersøkelse

Etter deltaker hadde utført forsøket med begge belyningsforholdene ble vedkommende bedt om å fylle ut et spørreskjema. Spørreskjemaet ble besvart anonymt og forsøksdeltakere ble ikke observert under besvarelsen. Spørreskjema ble gitt til deltaker først etter at forsøkene var utført, deltakernes observasjoner under forsøksgjennomføring var derfor ikke påvirket av spørsmålene. Spørreskjema og sammenstilling av alle besvarelser finnes i vedlegg F. Hovedfunn fra besvarelser er presentert i kapittel 5.

Besvarelser fra spørreskjema gjengir forsøksdeltakernes subjektive oppfatninger og kan ikke knyttes direkte mot målbare resultater. Det er likevel svært viktige funn som fremkommer av spørreskjema ettersom det i en reell brannhendelse er menneskers oppfatningsevner og atferd som avgjør hvordan ledesystemer blir benyttet. For å optimalisere utforming av ledesystem er det viktig å vite hvordan mennesker i en evakuerings situasjon oppfatter ledesystem, hvordan man gjennomfører evakuering i røyk, hva man ser etter og hva man gjør når man ikke finner veien.

## 4.2 Simuleringer

### 4.2.1 Mål med simuleringer

Datasimuleringer av rømning ble gjennomført for å finne forventet forflytningstid og gjennomsnittlig ganghastighet ved hjelp av to moderne simuleringssystemer: FDS+EVAC og Pathfinder. Disse to programmene ble valgt ettersom de har utbredt bruk og begge støtter til en viss grad implementering av resultater fra brannsimuleringer i rømningsmodellen. Valg av simuleringssystem ble også tatt på bakgrunn av at begge programmene er validert mot rømningsøvelser, tidligere forsøk og andre simuleringssystemer [66].

Rømnings simuleringene ble kombinert med brannsimuleringer for å vise hvordan røyk påvirker personene i modellen med hensyn til redusert ganghastighet i røyk og FED-beregninger for tålegrenser i røyk. Resultater ble sammenstilt med observasjoner fra praktiske forsøk. Det er gjort relativt lite forskning på rømning i tett røyk. De fleste beregningsmodeller for ganghastigheter i røyk baseres på forsøk utført av Jin [67], men disse forsøkene dokumenterte kun siktavstander for lysende skilt mellom 5-15 meter. Modelle baseres også på forsøk som Fratzich og Nilsson [56] gjorde med tettere røyk i tunnel, men disse forsøkene viste stor spredning i ganghastighet mellom forsøksdeltakerne og det er derfor ønskelig med et større datagrunnlag for å bestemme ganghastighet og usikkerheter. Det skal derfor undersøkes om simuleringer gir tilsvarende evakueringstider/ganghastigheter som forsøk.

### 4.2.2 Fremgangsmåte

En modell av rømningskorridoren på Voss Gymnas ble bygget opp ved hjelp av programvaren *PyroSim*, utviklet av Thunderhead engineering. *PyroSim* gir en visuell framstilling av modellens geometri og genererer en input-fil som kan prosesseres i FDS. I *PyroSim* beskrives geometri, målepunkter, brannens egenskaper og utvikling, ventilasjonsforhold med mer.

Evakueringsmodulen til FDS støttes ikke av PyroSim, og må derfor kodes manuelt i tekstbehandlingsprogram før prosessering i FDS. Resultater fra brannsimuleringer i FDS blir kombinert med rømningssimuleringer utført i FDS+EVAC og i Pathfinder. Forhåndsinnstilte verdier (default values) benyttes der ikke annet er angitt. Det er forsøkt å benytte standardinnstillinger i størst mulig grad for å ikke påvirke resultatene med egendefinerte brukerinnstillinger. Følgende versjoner av programvarene er benyttet:

- PyroSim versjon 2018.1.0417
- FDS 6.6.0 med tillegget FDS+EVAC 2.5.2
- Pathfinder 2018.2.0417

### 4.2.3 Geometri

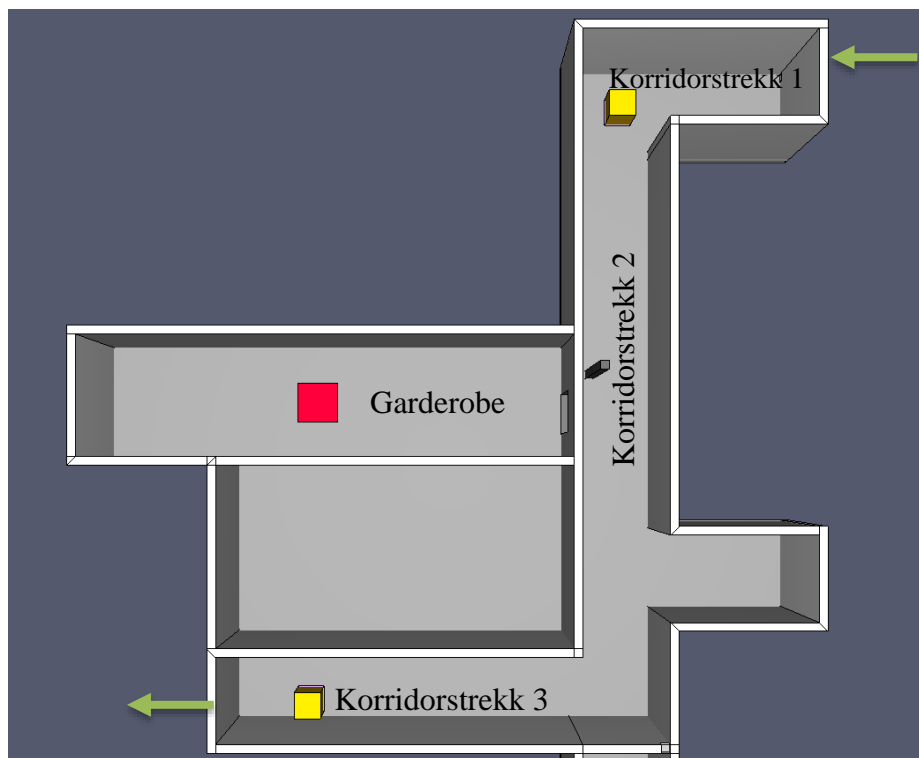
Evakueringsmodellen er basert på samme korridor som ble benyttet i praktiske forsøk, det henvises til kapittel 3.2 for beskrivelse av praktiske evakueringsforsøk. Dimensjoner og mål er hentet fra arkitekttegninger for Voss Gymnas i dwg-format utarbeidet av HLM Arkitektur datert 23.2.2016. Utforming og plassering av de viktigste bygningsdelene er gjengitt i tabell 5. Figur 8 viser en illustrasjon av modell i PyroSim.

Tabell 5 - Utforming av rømningskorridor i modell

	Verdi	Kommentarer
<b>Bredde rømningskorridor</b>	2,0 m	
<b>Høyde rømningskorridor og garderobe</b>	4,0 m	Høyde fra overkant gulv til underkant etasjeskille, systemhimling er ikke regnet som himlingshøyde.
<b>Lengde korridor</b>	Strekk 1 – 3,3 meter Strekk 2 – 16,7 meter Strekk 3 – 8,3 meter	Se figur 8 for beskrivelse
<b>Brannrom (garderobe)</b>	11,4 m · 2,8 m · 4 m	
<b>Søyle i rømningskorridor</b>	Plassert ved dør til garderobe	
<b>Ventilasjon</b>	<b>Tilluftsentil:</b> 0,6 m · 0,6 m ventil plassert 3,0 m over gulv midt i korridor ved utgang til trapperom <b>Avtrekksvetil:</b> 0,6 m · 0,6 m ventil plassert 3,0 m over gulv midt i korridor ved strekk 1 og 2 <b>Ventilasjonsåpninger:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0,4 m · 0,2 m åpning plassert i gulvhøyde ved start av evakueringsrute</li> <li>• 0,4 m · 0,2 m åpning plassert i himlingshøyde mellom korridorstrekk 2 og 3</li> <li>• 0,6 m · 0,2 m åpning plassert i gulvhøyde i brannrom</li> </ul>	Tilluft- og avtrekksvifte med maks kapasitet på 0,1 m <sup>3</sup> /s og 100 Pa.  Mindre ventilasjonsåpninger er benyttet for å unngå urealistisk overtrykk i modellen. De fleste bygg vil ikke ha rømningskorridorer som er hermetisk tett og det forventes noe lekkasjer i bygningsdeler og dører



<b>Døråpning mellom brannrom og korridor</b>	1,0 m bredde · 2.2 m høyde	Dør holdes åpen under hele simuleringen
<b>Overflater</b>	Alle overflater er ”inert”, dette følger standardinnstillingene i PyroSim og FDS	Unntak er brannoverflate og ventilasjonsflater som har spesifiserte overflater
<b>Cellesystem (mesh size)</b>	0,1 m · 0,1 m · 0,1 m for brannrom (garderobe)	
	0,2 m · 0,2 m x 0,2 m for øvrige deler	
<b>Temperaturmålere – Thermocouples</b>	Målinger i 3 ulike høyder (1,0 m, 1,5 m og 2,0 m over gulvnivå) midt på korridorstrekk 1, 2 og 3	Orientert i negativ Z-retning
<b>Røykgassmålere – Visibility</b>	Målt på samme lokasjon som temperaturmålere	Siktmålere orientert i gangretning
<b>2D kontrollsnitt – slice files</b>	Relativt trykk: vertikalsnitt gjennom korridorstrekk 2 og 3	
<b>3D plot</b>	Temperatur, sikt, konsentrasjon av O <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>	Utdata hvert 10. sekund



Figur 8 - Perspektivfigur av rømningskorridor hentet fra modell i PyroSim.

#### 4.2.4 Brannsimuleringer

Simuleringer av brann og røykspredning ble utført i programmet FDS. Det ble valgt å simulere to scenarier med ulike brannegenskaper for å illustrere ulike grader av røykfylling i korridoren. Hensikten er å simulere en troverdig brann i garderobe, som vil skape utfordrende rømningsforhold for evakuering hvor sikt faller ned mot 0,5 – 1,0 m. For detaljer, begrunnelser for valg i brannsimuleringer og sensitivitetsanalyser henvises det til vedlegg B. Kun overordnede beskrivelser er gitt i dette kapitlet.

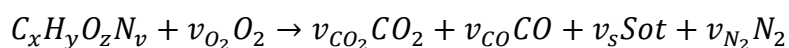
I modellen ble brannen plassert midt i garderobe som ligger i tilknytning til rømningskorridor. Dør mellom brannrom og rømningskorridor var åpen i alle scenarioene slik at røyk ble spredt til rømningskorridor. I modellen spesifiseres en brann med ønsket brensel, effekt, areal, vekstrater, fraksjoner for produkter med mer. Valg av brannscenarier er basert på anbefalinger fra temaveileder HO-melding 3/2000 [30] og det svenske Bovekets författningssamling [68]. Tabell 6 gir beskrivelse av brannscenario 1 og 2:

Tabell 6 - Beskrivelse av brannscenarioer

	Brannscenario 1	Brannscenario 2
<b>Branneffekt <math>Q_{max}</math></b>	900 kW	2000 kW
<b>Brannveksttid</b>	$\alpha = 0,020 \text{ kW/s}^2$ $Q_{\tau} = 210 \text{ s}$	$\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$ $Q_{\tau} = 400 \text{ s}$
	$\alpha^2$ med 225 s til 1000 kW. Sprinklerutløsning etter 210 s. Konstant branneffekt etter sprinklerutløsning.	$\alpha^2$ brannutvikling. konstant branneffekt etter 400 s.
<b>Forbrenningsvarme</b>	16 MJ/kg	20 MJ/kg
<b>Sotfraksjon (soot yield)</b>	0,1 g/g	0,06 g/g
<b>CO-produksjon</b>	0,1 g/g	0,06 g/g
<b>CO<sub>2</sub>-produksjon</b>	2,5 g/g	2,5 g/g
<b>Simuleringstid</b>	600 s	600 s

## Forbrenningsreaksjon

Det er valgt å benytte forenklet forbrenningskjemi i simuleringene (simple chemistry). Det vil si at FDS simulerer en brann hvor kun én kjemisk reaksjon skjer i forbrenningssonen der brennbar gass blandes med luft og antennes. På molekylært nivå beskrives dette ved at én reaktant bestående av karbon, hydrogen, oksygen og nitrogen reagerer med luft og danner produkter som kan bestå av karbondioksid, karbonmonoksid, vann, sot, nitrogen og oksygen.



I kjemisk formel over er  $v$  betegnelse for støkiometrisk koeffisient som beregnes i FDS. Alle andre reaktanter og produkter som man normalt kan finne i virkelige branner vil ikke simuleres ved bruk av «simple chemistry»-modellen [69]. Dette betyr at kjemiske forbindelser som har irriterende effekter på øyne og åndedrett som blant annet hydrogencyanid, hydrogenklorid og formaldehyd ikke blir hensyntatt i simuleringene.

## Sikt

I FDS kontrolleres røykproduksjon og sikt av tre faktorer. Den første er sotfraksjon, som angir hvor mye brensel som omgjøres til sot. Den andre faktoren er masseektstinkskoeffisient, som benyttes for å beskrive hvor mye lys som absorberes når lys går gjennom en gass, forhåndsdefinert verdi på  $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$  er benyttet i simuleringene og denne verdien er basert på flammebrann i treverk og plastmaterialer. Den tredje parameteren er siktfaktor, denne faktoren er avhengig av hvilken gjenstand som blir betraktet [69].

## Stråling

Strålingstransport fra en brann beregnes med RTE-funksjon (Radiation Transport Equation) i FDS. RTE-funksjonen kan slås av og dette reduserer simuleringstid med ca. 20% [69]. Det er generelt ikke anbefalt å neglisjere stråling i simuleringer av flammebranner, men det kan være hensiktsmessig i enkelte tilfeller. Resultater fra brannsimuleringer skal kombineres med rømmningssimuleringer i FDS+EVAC og Pathfinder, men disse programmene støtter ikke påvirkning av varme eller stråling mot personer i modellen [60], [63]. Effekten av at strålingstransport er slått av vil ikke påvirke rømningsresultater direkte, men kan påvirke resultater i brannsimuleringen ved at varmestråling til overflater ikke blir hensyntatt. Ved å slå av RTE-funksjon vil modellen simulere en konstant energifraksjon på 35% som utstrålt energi fra brannen. Det er utført en sensitivitetsanalyse for å analysere om RTE-funksjon kan deaktiveres, det vises til vedlegg B for sensitivitetsvurderinger. Basert på resultater fra sensitivitetsanalysen er det vurdert at strålingsfunksjon kan slås av uten signifikant påvirkning på resultater.

### 4.2.5 Rømmningssimulering i FDS+EVAC

De viktigste input-verdiene er gjengitt. Ytterligere detaljer til modell kan leses av inputfil til FDS+EVAC i vedlegg L.

For å benytte evakueringsmodulen i FDS må det legges til et eget kontrollvolum (mesh) for evakuering. Kontrollvolumet er et plan hvor evakuerende kan bevege seg i to dimensjoner. Cellestørrelse er valgt til å være  $20 \text{ cm} \cdot 20 \text{ cm}$ , med denne størrelsen passer geometri til vegger, søyler og døråpninger uten behov for tilpassing. Det anbefales ikke mindre cellestørrelser ettersom retningssans til personer i modell kan påvirkes av for små celler [60].

Beregninger for sikt og FED utføres for hvert tidssteg i posisjon til en person i modellen ved et gitt tidspunkt. Høyden disse målingene gjøres ved vil spille inn på resultater, hvor det normalt vil være mer kritiske forhold høyt i et rom enn ved gulv. I FDS+EVAC er standardinnstilling at målinger tas 1,6 meter over bakkenivå. Personer som simuleres er voksne ('adult'), det representerer både kvinner og menn. Egenskaper for blant annet personers størrelse og upåvirket ganghastighet er automatisk valgt ut fra en normalfordeling.

Det er lagt inn én utgangsdør i modellen som er dør til trapperom. Denne døren er satt som kjent utgang for alle. I modellen er det valgt å starte rømning samtidig som en brann starter, deretter introduseres det én ny forsøksperson hvert 10. sekund, inntil det har gått 580 sekunder. Med 10 sekunds mellomrom vil det til enhver tid være minst én person i korridor, men det er antatt at det likevel ikke vil oppstå kø. I en simulering vil det logges personer som evakuerer gjennom hele brannforløpet i gradvis mer utfordrende forhold og det blir logget tilstrekkelig mange evakuerende til å få et statistisk sammenligningsgrunnlag fra modelleringen. Etter 600 sekunder avsluttes simuleringen.

#### **4.2.6 Rømningssimulering i Pathfinder**

Programvaren *Pathfinder*, utviklet av Thunderhead engineering, ble i tillegg til FDS+EVAC benyttet for å simulere rømning i testkorridoren som beskrevet i kap. 3.1.3.

I modellen ble det lagt inn at én person kommer inn i korridor fra idrettshall hvert 10. sekund og går mot utgang til trapperom som ble lagt inn som eneste utgang. Standardinnstilling for atferd «Go to any exit» kunne dermed legges til grunn. Det ble benyttet *Steering mode* for alle personer i modellen. *Steering mode* gir mer realistisk kollisjonshåndtering mellom personer-omgivelser og mellom ulike personer. *Steering mode* er også vist å gi resultater som stemmer bedre overens med praktiske forsøk enn alternativet som er *SFPE mode*, denne modellen er omtalt i kapittel 3.4.3.

Modellen som ble laget i Pyrosim, ble importert til Pathfinder. Alle input til modellen angis i programmet brukergrensesnitt som også visualiserer geometrier og andre inn-verdier. I modellen ble det lagt inn et todimensjonalt plan over gulv som i Pathfinder blir definert som området hvor personer kan bevege seg fritt. Søyler i korridoren ble klippet ut fra dette planet slik at personer ikke kunne bevege seg på det arealet søylen opptar. Det ble lagt inn en utgangsdør med bredde 1,2 meter lysåpning mellom trapperom og korridor. Personer som når utgangsdøren forsvinner ut av modellen og anses å være på sikkert sted.

Det ble benyttet standardinnstillinger for personprofiler. Det betyr at alle personene går med konstant ganghastighet på 1,19 m/s og har skulderbredde lik 45,58 cm. Personer visualiseres som voksne kvinner og menn.

3Dplot fra FDS kan visualiseres sammen med rømningsmodellen og Pathfinder beregner FED-doser for hver enkelt person når volumfraksjoner for CO, CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub>, samt sikt er modellert i FDS. Personer i modellen påvirkes likevel ikke av disse forholdene mht. ganghastighet og retningsvalg.

# 5 Resultater

I dette kapittelet presenteres resultater fra evakueringsforsøk, spørreundersøkelser og simuleringer. I siste del av kapittelet sammenstilles resultater fra evakueringsforsøk og simuleringer.

## 5.1 Resultater fra evakueringsforsøk

13 personer deltok i forsøkene. Alle deltakerne var ansatte ved Hordaland Fylkeskommune og hadde arbeidssted på Voss gymnas. Deltakerne var mellom 31-70 år, det var ni kvinner og fire menn. Kun én deltaker hadde vært med på lignende evakueringsforsøk tidligere. Deltakerne var alle kjent i bygget, men hadde noe ulik grad av kjennskap til korridoren hvor forsøkene ble utført. Resultater fra forsøkene og spørreundersøkelsen er beskrevet nedenfor.

### 5.1.1 Evakueringstider

Evakueringstiden som ble målt var tid fra deltakeren ble bedt om å starte (på signalet klar-ferdig-gå) til deltakeren tok i dørhåndtak i dør til trapperom. Resultater for evakueringstider og gjennomsnittlig ganghastighet i ulike belysningsforhold er gjengitt i tabell 7.

Tabell 7 - Evakueringstider og ganghastigheter

Deltaker nr.	Evakueringstid [s] lys på	Evakueringstid [s] lys av	Gjennomsnittlig ganghastighet - lys på [m/s]	Gjennomsnittlig ganghastighet - lys av [m/s]
1	46	75	0.62	0.38
2	27	29	1.06	0.98
3	25	37	1.14	0.77
4	41	46	0.70	0.62
5	37	57	0.77	0.50
6	75	86	0.38	0.33
7	67	90	0.43	0.31
8	51	56	0.56	0.51
9	54	73	0.53	0.39
10	31	40	0.92	0.71
11	36	55	0.79	0.52
12	Bryt (deltaker snudde)	103		0.28
13	35	43	0.81	0.66
<b>Gjennomsnitt</b>	44	61	0,72	0,54

Deltaker 12 har kun registrert evakueringstid for forsøk med lys på ettersom deltakeren ikke fant veien i korridoren og kom tilbake til start i forsøk med lys av. Deltaker 11 snudde også i sitt første forsøk, men utførte forsøket på nytt og begge evakueringstider for deltaker 11 benyttes derfor i videre arbeid. Videre beregninger av usikkerheter har hensyntatt manglende data for deltaker 12.

Ettersom det ikke ble målt noen mellomtider i rømningsveien, vil alle resultater for ganghastighet være gjennomsnittshastighet for hele evakueringsruten. For å beregne gjennomsnittlig ganghastighet er det benyttet gangavstand lik 28,5 meter for alle deltakere, denne avstanden ble dividert på evakueringstiden til hver enkelt deltaker for å finne ganghastighet.

Det er store individuelle forskjeller i evakueringstider. Det er antatt at et utvalg menneskers ganghastigheter i røyk vil følge en standard normalfordeling. Det vil si at de fleste personer vil holde en ganghastighet som ligger nært gjennomsnittsverdien for en befolknings ganghastighet mens færre holder svært lave eller svært høye ganghastigheter. Antakelsen er begrunnet i tidligere forskning for ganghastigheter uten røykpåvirkning [70] og én studie av ganghastigheter i røyk [56]. For å gi et uttrykk av usikkerheter og spredning i resultater er det valgt å regne ut standardavviket for ganghastigheter, dette tallet sier hvor stort forventet avvik fra gjennomsnittet er. Standardavvik er knyttet mot en normalfordeling og er definert som kvadratroten til summen av kvadratet av hver observasjons avstand fra gjennomsnittet dividert med det totale antallet observasjoner [71].

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\chi - \bar{\chi})^2}{n}} \quad (7)$$

Hvor:

$\sigma$  er standardavvik

$\chi$  er en verdi i datautvalget

$\bar{\chi}$  er gjennomsnittet av alle dataene i utvalget

$n$  er antall verdier i datautvalget

Standardavvik for ganghastigheter med lys på er beregnet til  $\sigma_{lys\ på} = 0,23$

Standardavvik for ganghastigheter uten lys er beregnet til  $\sigma_{lys\ av} = 0,20$

I en standard normalfordeling vil ca. 95 % av et utvalg ligge innenfor to standardavvik fra gjennomsnittet. Med antagelse om at ganghastigheter i røyk følger standard normalfordeling vil ganghastighet med 95 % konfidens ligge innenfor følgende verdier, basert på resultater fra evakueringsforsøk ved Voss Gymnas:

$$v_{røyk-lys\ på} = 0,72 \pm 0,46\text{ m/s}$$

$$v_{røyk-lys\ av} = 0,54 \pm 0,40\text{ m/s}$$

Standardavvikene er i samme størrelsesorden for forsøk med lys av og forsøk med lys på, det er derfor ingenting som tyder på at det er større variasjon for evakueringstid i ulike belyningsforhold.

For å bedømme om observerte trender med lavere ganghastigheter for forsøkene med belysning på er en tilfeldighet, er  $p$ -verdien mellom evakueringstidene for ulike belyningsforhold beregnet.  $P$ -verdien angir hvilket signifikansnivå observerte fravik mellom datasettene har, basert på normalfordeling.  $P$ -verdi gir sannsynligheten for at observerte forhold mellom to datasett er tilfeldig i en verdi mellom 0 og 1. I beregningen av  $p$ -verdi ble deltaker 12 tatt ut slik at datasettene hadde like stort utvalg. Resultat ble beregnet med regresjonsanalyse i Excel. Resultat fra beregningen er  $p$ -verdi lik 0,000064.  $P$ -verdien indikerer et signifikansnivå med under 1% sannsynlighet for at observerte trender er forårsaket av tilfeldigheter.  $P$ -verdi er kun en statistisk metode å vurdere et datasett og tar ikke hensyn til andre forhold rundt forsøkene enn resultattallene for evakueringstider.

Det ble antatt at forsøkspersonene ville prestere bedre i forsøk nummer 2 ettersom de ble kjent med rømningsveien og ble mer komfortabel med situasjonen i andre forsøk. Det er forsøkt å gi et estimat på hvor stor denne effekten var ved å beregne en ”forbedringsfaktor”. Metoden er basert på å sammenligne gjennomsnittlige evakueringstider for alle deltakerne som startet med belysning på som første forsøk mot de som hadde belysning på som andre forsøk og tilsvarende med belysning av. Beregning av gjennomsnittlig forbedringsfaktor er vist i tabell 8. Beregnet forbedringsfaktor var størst for forsøk med belysning, hvor ca. 5 % forbedring ble funnet basert på gjennomsnittlige verdier



Tabell 8 - Beregning av forbedringsfaktor som følge av å ha utført forsøket to ganger

	Lys på		Lys av	
	Forsøk 1 - lys på	Forsøk 2 - lys på	Forsøk 1 - lys av	Forsøk 2 - lys av
Forflytningstider	27	46	75	29
	41	25	37	46
	75	37	57	86
	51	67	91	56
	31	54	73	40
	-	36	55	103
	-	35	43	-
<b>Gjennomsnitt</b>	45	43	62	60
<b>Forbedringsfaktor</b>	1,05		1,03	

Resultatene viser at samtlige deltakere hadde raskere evakueringstid når normalbelysningen var på. I gjennomsnitt var evakueringstiden 1,4 ganger lengre med belysning av i forhold til belysning på. I statistisk analyse av  $p$ -verdi er observerte ganghastigheter i ulike belysningsforhold dokumentert med statistisk signifikans under 0,01 % for tilfeldigheter i registrerte data.

### 5.1.2 Lys og røyk

Etter siste deltaker var ferdig ble lyset slått av og det ble foretatt kontrollmålinger på 4 målepunkter som beskrevet i kapittel 4.1.4. Resultater er gjengitt i tabell 9. Luminansverdier målt etter forsøkene tilfredsstilte krav i standard NS 3926 om minst 10 mcd/m<sup>2</sup> i nødvendig rømningstid. Målte verdier kan tyde at det etterlysende ledesystemet fikk lading fra normalbelysning under forsøkene selv om det var tett røyk som blokkerte mye av lyset.

Tabell 9 - Restluminans etter fullførte forsøk

Målepunkt nr.	Type	Sted	Ladelys [lux]	Type lyskilde	Målt luminans etter gjennomførte forsøk [mcd/m <sup>2</sup> ]
1	Gulvmerking	Hjørne mellom korridorstrekk 1 og 2	364	26 W kompaktlysrør, 3000 K	200
2	Henvisningsskilt	Retningsendring mellom korridorstrekk 1 og 2	288	26 W kompaktlysrør, 3000 K	470
3	Gulvmerking	Hjørne mellom korridorstrekk 2 og 3	303	26 W kompaktlysrør, 3000 K	220
4	Vertikal	Dør til trapperom, dørkarm	101	26 W kompaktlysrør, 3000 K	180

Målinger av røyktetthet ble gjort med visuelle betraktninger av synsavstand til etterlysende skilt under forsøkene. Det ble observert noe varierende røyktetthet lokalt i korridor hvor det generelt var tettest røyk i starten av korridor der røykmaskin var plassert og lavere røyktetthet mot slutten av rømningsveien hvor større avstand til røykmaskin, samt noe luftlekkasje i presenning som var satt opp i forbindelse med forsøkene. Siktavstand til etterlysende skilt i rømningskorridoren var ca. 0,5 meter til 1,0 meter, som tilsvarer røyktetthet uttrykket med ekstinksjonskoeffisient  $2 \text{ m}^{-1} < C_s < 4 \text{ m}^{-1}$ .

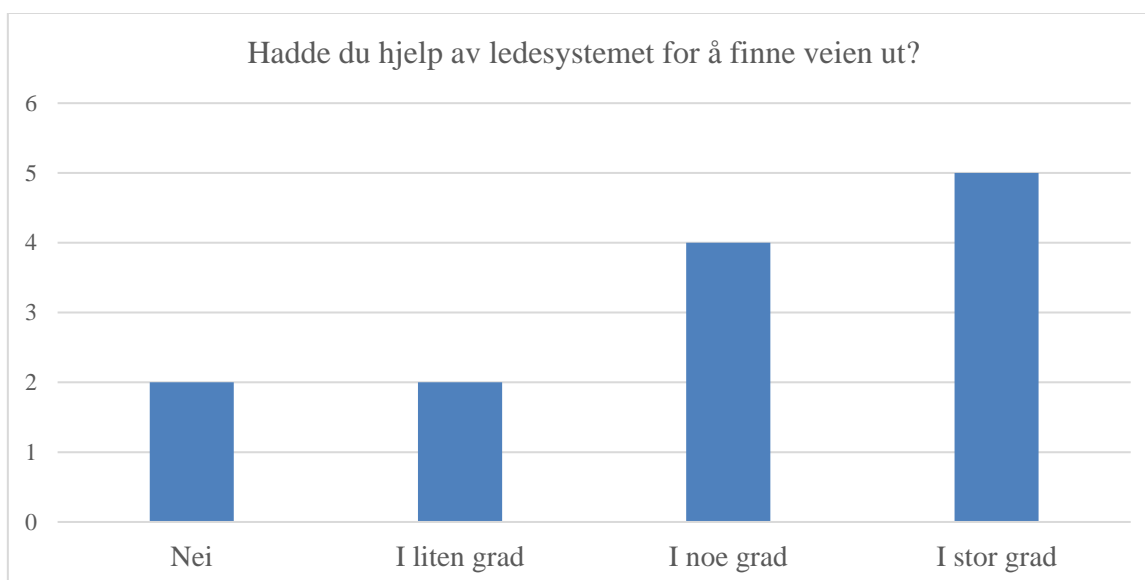
### 5.1.3 Atferd

Ved starten av forsøkene åpnet deltakerne selv døren inn til rømningskorridoren. De fleste bøyde seg ned og rettet blikket mot gulvet da de gikk inn i røyken. Dersom deltakerne ikke hadde fått informasjon om ledesystem på forhånd kunne denne atferden vært annerledes ettersom deltakerne da ikke nødvendigvis hadde forventet å finne ledelinjer som viste vei langs gulv.

Deltakere besvarte spørreundersøkelsen etter forsøk var utført. Resultater knyttet til atferd er presentert under, spørreskjema og sammenstilling av alle besvarelser kan finnes i vedlegg F.

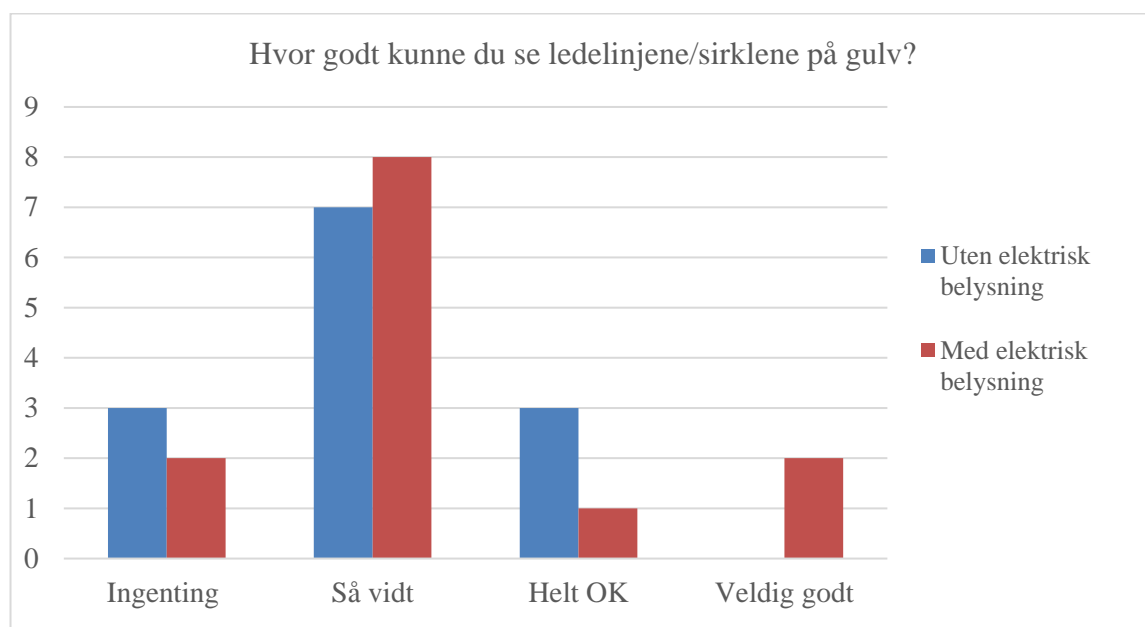
Figur 9 viser at de fleste evakuerende hadde hjelp av ledesystemet for å finne veien. Det at 2 personer ikke hadde noen hjelp kan forklares med at røyken var så tett at personene valgte å føle seg frem langs vegg i stedet for å se etter ledelinjene. Det kan også tenkes at personer som var veldig godt kjent valgte å føle etter kjennetegn som dører og brannskap for å orientere seg i korridoren.

Til spørsmålet «Hadde du på noen tidspunkt problemer med å finne veien?» svarte fem personer at de hadde problemer med å finne veien, mens åtte svarte at de ikke hadde problemer.



Figur 9 - Besvarelser på spørsmål: «Hadde du hjelp av ledesystemet for å finne veien ut?»

Forsøkspersonenes tilbakemelding på synligheten til ledesystemene er vist i figur 10. Det ble registrert at ledesystemene var noe bedre synlig med belysningen på. To personer svarte at de kunne se ledelinjene/sirkelene på gulv svært godt med lys på, ingen mente at ledelinjene var veldig godt synlige med lyset avslått. Derimot var det tre personer som så ledesystemet helt OK uten normalbelysning, mens én person så ledesystemet helt OK med lyset på.

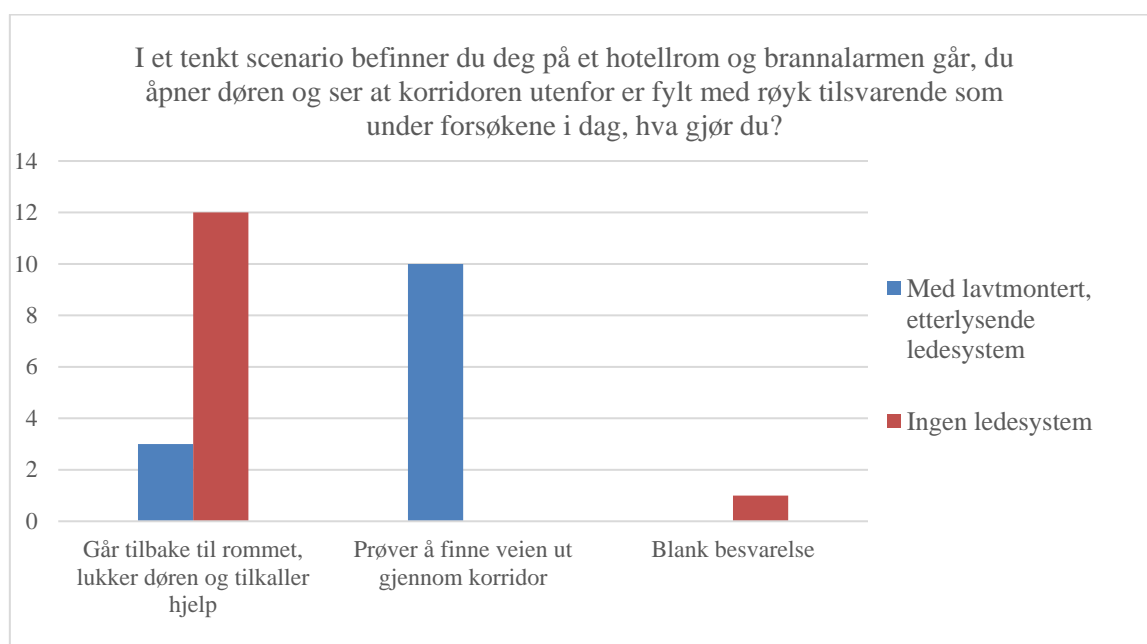


Figur 10 - Besvarelser på spørsmål: «Hvor godt kunne du se ledelinjene/sirkelene på gulv?»

Deltakerne fikk spørsmål om hvilken ganghastighet de gikk med. De aller fleste svarte at de gikk sakte i forsøk både med og uten belysning. Noen få svarte at de gikk normalt eller gikk fort. Ingen svarte at de løp eller krabbet. 11 av 13 personer svarte at de brukte hendene for å føle seg frem

langs veggen. Det kan tyde på at et rekkverk med etterlysende ledelinjer eller elektrisk belysning kan være et godt egnet tiltak der det kan forekomme svært tett røyk i nødvendig rømningstid.

Besvarelser til de siste spørsmålene i spørreundersøkelsen er vist i figur 11. Spørsmålene var knyttet til deltakernes tilbøyelighet for å evakuere gjennom røykfylt korridor med og uten etterlysende ledesystem. Samtlige av deltakerne ville valgt å gå tilbake til branncellen og tilkalle hjelp dersom det ikke var ledesystem i korridoren. Ti av deltakerne ville forsøkt å gå gjennom korridoren dersom det var et ledesystem der.



Figur 11 - Besvarelser på spørsmål: «I et tenkt scenario befinner du deg på et hotellrom og brannalarmen går, du åpner døren og ser at korridoren utenfor er fylt med røyk tilsvarende som under forsøkene i dag, hva gjør du?»

## 5.2 Resultater fra simuleringer

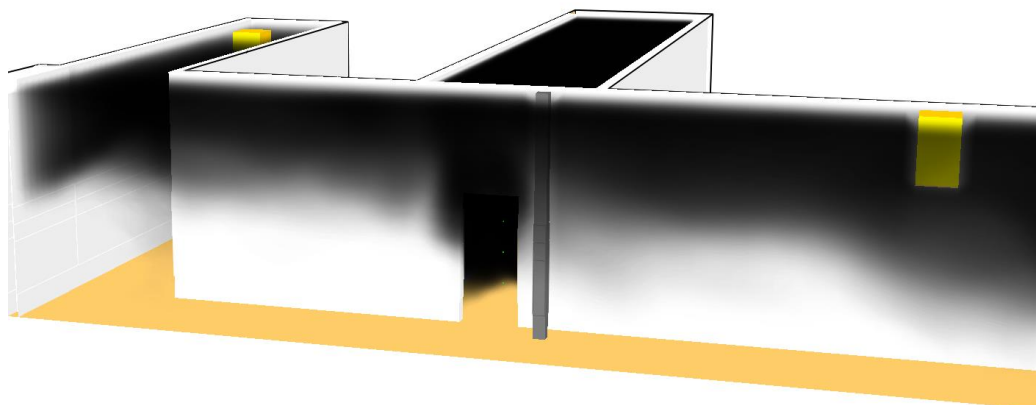
Hovedfunn fra simuleringer er beskrevet under. De er valgt å presentere resultater fra brannsimuleringer for å synliggjøre hvordan rømningsforhold vil være i korridoren. Presenterte resultater fra rømningssimuleringer fokuserer på røykutvikling, sikt og ganghastighet, samt FED-doser forårsaket av CO, CO<sub>2</sub> og oksygenfortrenging. Simuleringene genererte en stor mengde data og kun de resultatene som er ansett som hensiktsmessige for å besvare problemstilling er presentert.

### 5.2.1 Brannsimuleringer i FDS

#### Brannscenario 1 – 900 kW brann

Utdata fra FDS-simuleringer genereres automatisk og lagres i form av Excel-regneark, tekstfiler og en .smv-fil som kan åpnes i programmet Smokeview hvor simuleringen visualiseres.

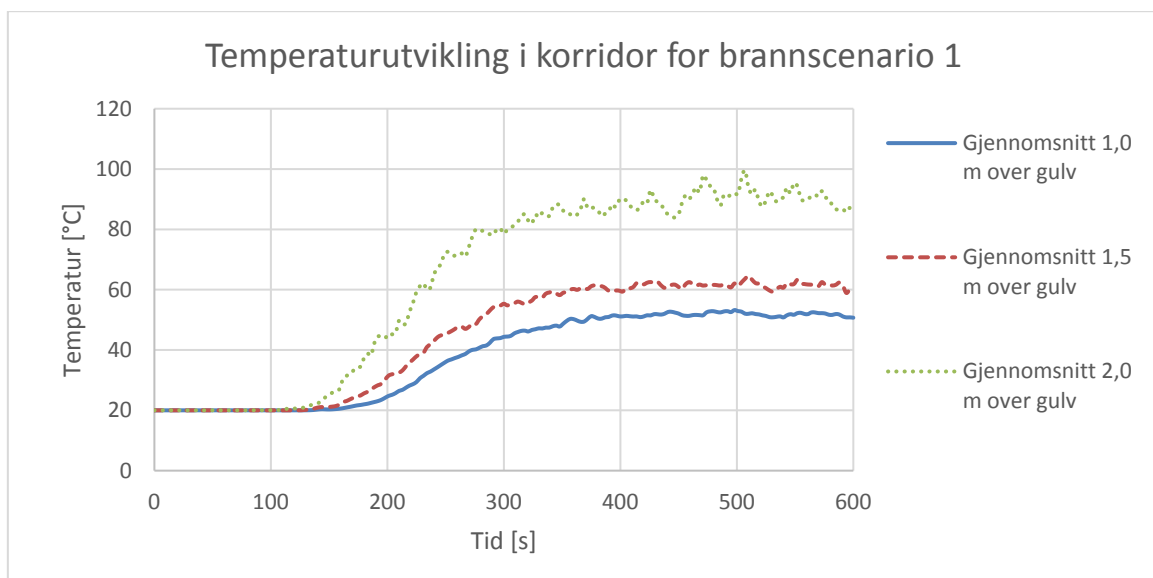
Brannen i brannscenario 1 vokste eksponentielt i 210 sekunder før den stabiliserte seg på ca. 900 kW. Omtrent ett minutt etter brannstart begynte røyk å strømme inn til rømningskorridor fra garderobe hvor brannen var plassert. Røyken som trengte inn i korridor holdt høyere temperatur enn den øvrige luften og oppdrift førte til at røyken beveget seg langs himling og ut til vegger før det ble dannet et røyklag. Etter 180 s var røyklaget kommet ned til ca. 2,0 meter over gulvnivå og temperatur var omtrent 50 °C ved himling i rømningskorridoren, se figur 12. Sikt ble beregnet fra tre ulike målepunkter plassert i senter av hvert korridorstrekk og 2,0 meter over gulv. I gjennomsnitt var sikten beregnet til 0,72 meter etter 180 s. Siktavstanden som beregnes gjelder generelt for diffust belyste overflater og det skilles ikke mellom siktavstand til ulike deler [69].



Figur 12 - 180 sekunder etter brannsstart, røykspredning visualisert i Smokeview

Etter 240 sekunder var hele korridoren fylt med røyk og sikt var hovedsakelig under 1,0 meter. Kun mindre områder langs gulv har noe bedre sikt.

Temperatur i korridor er vist med gjennomsnitt fra tre målepunkter i tre ulike høyder i figur 13. Generelt ble det registrert økende temperatur med høyde i rommet. Det går ca. to minutter før det målinger registrerer temperaturøkning, dette kommer av at branneffekten er lav i starten og vokser deretter eksponentielt, samt at det tar tid før for røyken å danne et røyklag i garderobe før det begynner å sive røyk inn til korridoren. Temperatur stabiliserer seg ettersom branneffekten holdes konstant etter ca. 200 sekunder og luftutskifting fra ventilasjonsanlegg og åpninger i konstruksjonene fører til at noe av varmen forsvinner ut mens frisk luft som holder lavere temperatur kommer til.



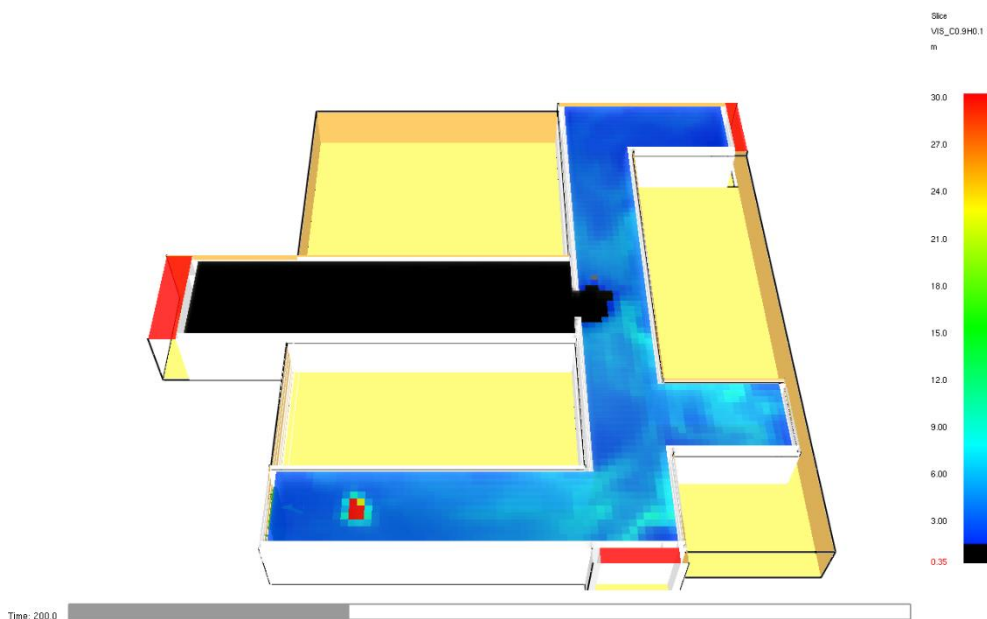
Figur 13 - Temperaturutvikling i rømningskorridor for brannscenario 1

## Brannscenario 2 – 2 MW brann

I brannscenario 2 vokser branneffekten eksponentielt i 400 sekunder før den stabiliseres på ca. 2 MW. Omtrent 60 sekunder etter brannstart begynner røyk å strømme røyk fra garderobe til rømningskorridor. Etter 200 s er røyklaget kommet ned til ca. 2,0 meter over gulvnivå og temperatur er omtrent 50 °C ved himling i rømningskorridoren.

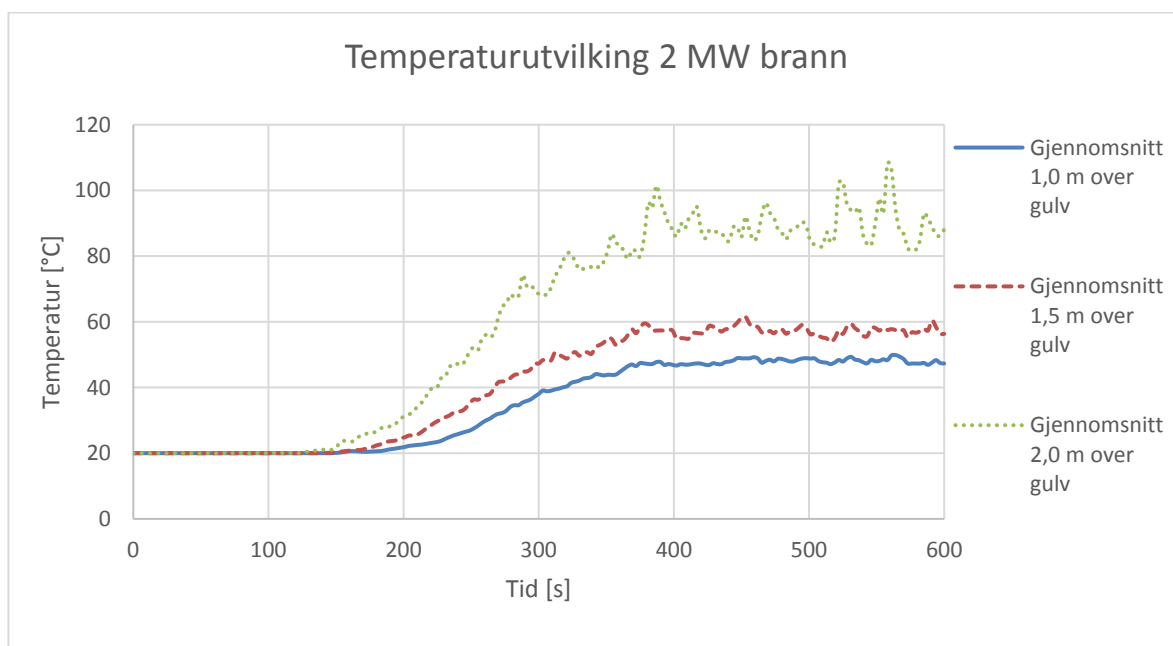
Gjennomsnittlig sikt beregnet fra tre ulike målepunkter viser 3,1 meter sikt 2,0 meter over gulv etter 200 s. Figur 14 viser beregnet sikt i et horisontalsnitt 2,0 meter over gulvnivå etter 200 sekunder, i beregningene er 30 meter sikt satt som maksimal siktavstand. I korridor er det mellom 0,5 – 9,0 meter sikt. Unntak er rett under tilluftsventil i korridorstrekk 3 hvor tilførsel av frisk

luft gir bedre siktforhold som vist med en rød sone i figur 14. I brannrommet er det under 0,3 meter sikt.



Figur 14 - Horisontalsnitt for sikt 2,0 meter over gulvnivå , 200 sekunder etter brannstart

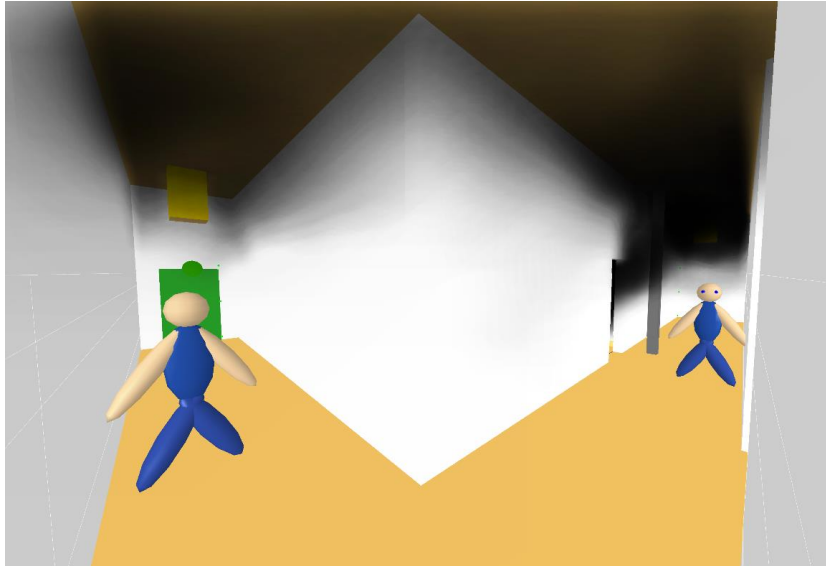
Etter ca. 300 sekunder er hele korridoren fylt med røyk. Sikt er ca. 1,0 meter med noe bedre sikt langs gulv under 1,0 meter over gulv hvor sikt er ca. 2,2 meter. Etter 400 sekunder er sikt ca. 0,3 meter ved høyde lik 2,0 meter. Temperatur i korridor er vist med gjennomsnitt fra tre målepunkter i tre ulike høyder i figur 15.



Figur 15 - Temperaturutvikling i rømningskorridor for brannscenario 2

## 5.2.2 FDS+EVAC

Resultater som ble funnet fra rømmingssimuleringer i FDS+EVAC omfatter evakueringstider, gjennomsnittlig ganghastighet og akkumulert FED for hver enkelt person i modellen. FDS+EVAC benytter stokastiske variabler som tilfeldig bestemmer egenskaper til personer som blant annet påvirker ganghastighet til hver enkelt person, skulderbredder og atferder.



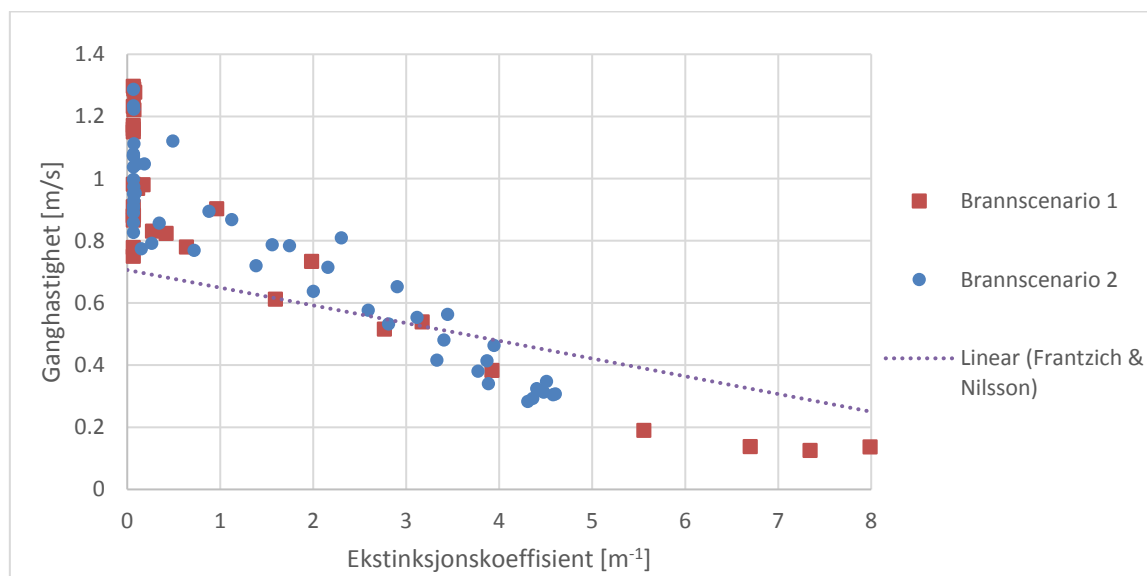
Figur 16 - Visualisering av rømmingssimulering fra FDS+EVAC, vist i Smokeview

Gasskonsentrasjoner av CO, CO<sub>2</sub> og O<sub>2</sub> er benyttet for å beregne akkumulert FED. Effekter av irriterende gasser og hydrogencyanid er ikke inkludert ettersom simuleringer er utført med forenklet kjemisk forbrenningsreaksjon. FED-verdier øker avhengig av konsentrasjoner og eksponeringstid. De første personene som evakuerer i modellen har FED-verdier lik 0,0 ettersom brannen ikke påvirker personene. Høyeste akkumulerte FED-verdi er beregnet til 0,51 for person som er i korridor i 219 sekunder, mellom 380 og 599 sekunder etter brannstart i brannscenario 1. FED-verdi på 0,51 tilsier at ca. 30 % av befolkningen forventes å ikke være i stand til å evakuere videre i slike forhold, dette basert på en log-normal kurve for en befolknings tåleevne. Optisk røyktetthet virker indirekte inn på FED-verdier: Når sikten reduseres, reduseres også ganghastigheten og eksponeringstiden for røykgasser blir større. Giftige gasser og lave konsentrasjoner av O<sub>2</sub> virket ikke inn på ganghastigheter til personer i modellen. Dersom FED-verdier hadde oversteget 1,0 ville personer blitt stående på samme sted uten å bevege seg videre.

Punktdiagram for ganghastigheter og ekstinksjonskoeffisient er presentert i figur 17. Stiplet linje er lineær formel for gjennomsnittlig forflytningstid som funnet av Frantzich og Nilsson [56]. I FDS+EVAC er beregninger for redusert ganghastighet i røyk basert på denne forskningen og det forventes derfor tilsvarende resultat i simuleringer som teoretisk modell. Rømningskorridoren



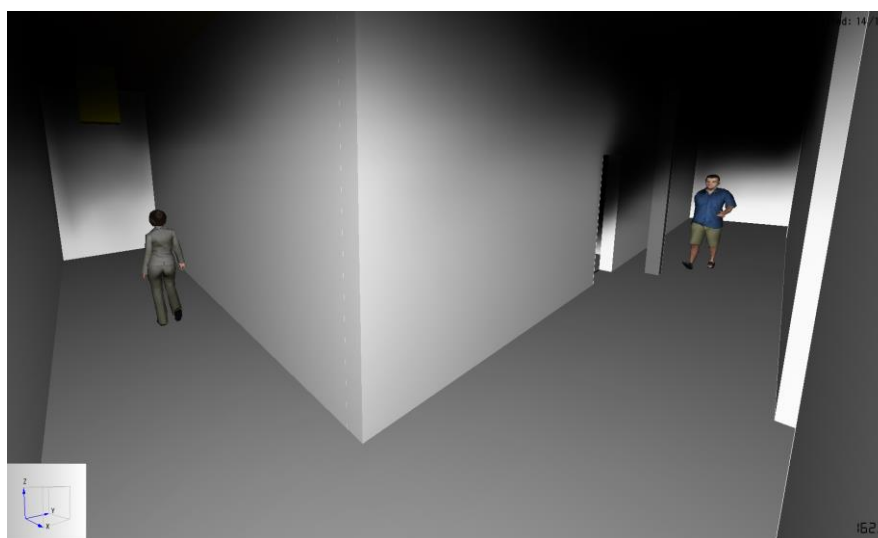
ved Voss Gymnas hadde flere retningsendringer og et hinder i form av søyle som kan virke inn på resultater for evakueringstid/ganghastigheter.



Figur 17 - Punktdiagram med ganghastigheter og sikt for brannscenario 1 og 2 sammenlignet med matematisk beregningsmodell

### 5.2.3 Pathfinder

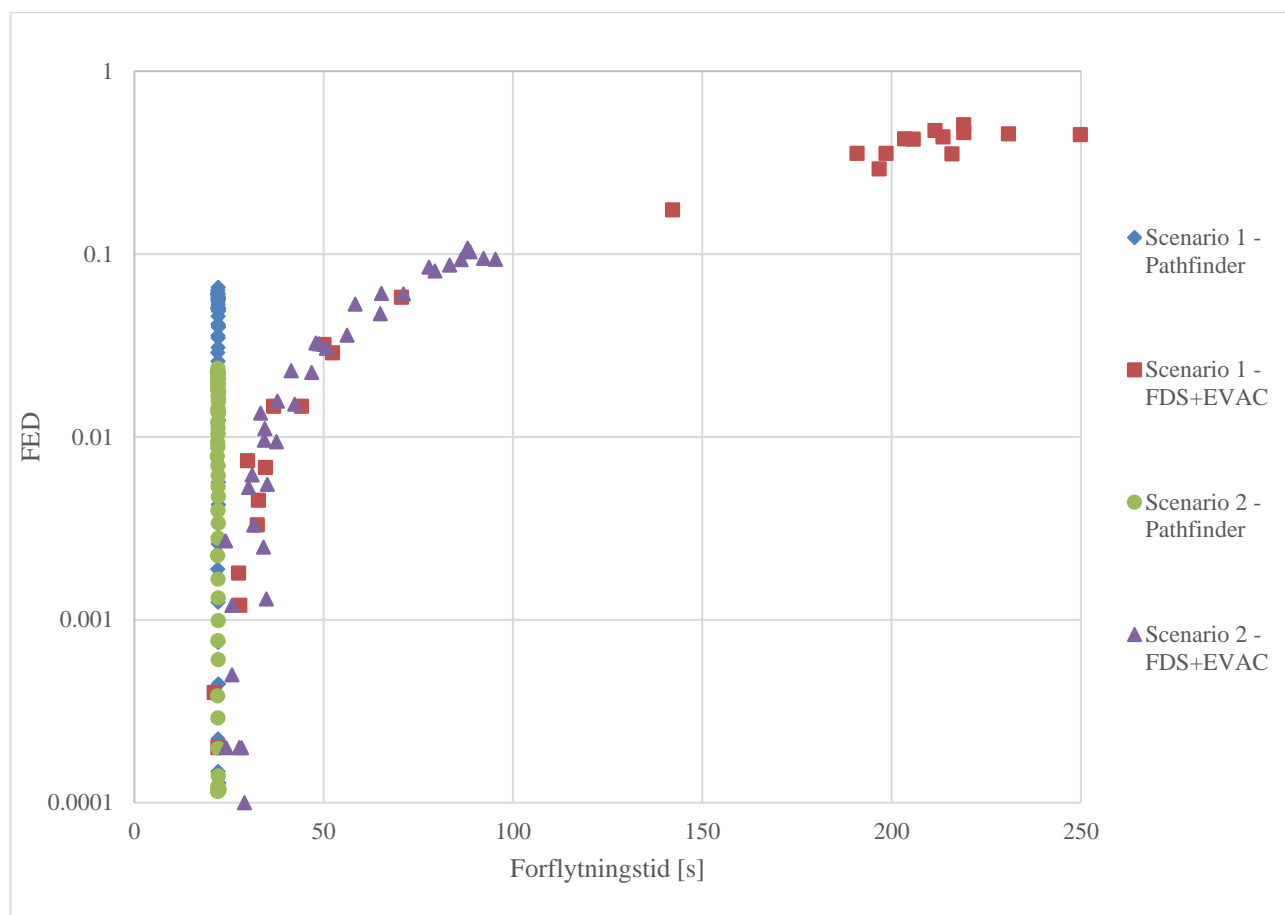
Rømningstider som ble simulert i Pathfinder gir konstante ganghastigheter for alle personer i modellen, uavhengig av brannens utvikling. Dette er fordi Pathfinder ikke har innebygget funksjon som sørger for redusert ganghastighet i røyk. Programmet støtter likevel visuell kobling mellom rømningsmodell og brannmodell som vist i figur 18. Det er utført FED-beregninger i Pathfinder basert på data for volumfraksjon av CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, sikt (soot visibility) og FED-output fra FDS-resultater.



Figur 18 - Visualisering av rømningssimuleringer fra Pathfinder, vist i Pyrosim Result viewer

## 5.2.4 Sammenstilling av simuleringer i FDS+EVAC og Pathfinder

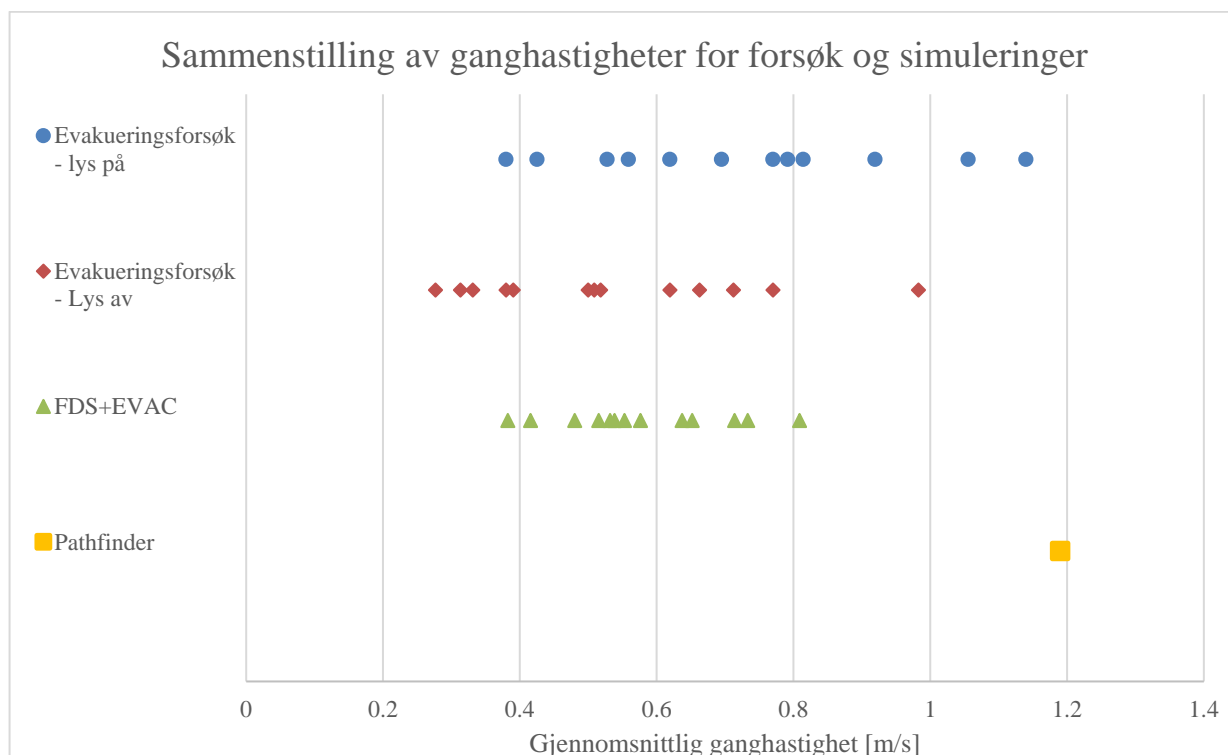
Figur 19 viser resultater av forflytningstid mot akkumulert FED-verdier for de to simuleringssystemene, y-aksen som viser FED-verdier er vist med logaritmisk skala. Som forventet vil ikke ganghastighet til evakuerende personer i Pathfinder påvirkes av brannen, standardinnstilling for ganghastighet på 1,19 m/s holdes av alle personer i Pathfinder-simuleringen. Evakuerende i FDS+EVAC-modellen har en tydelig korrelasjon mellom akkumulert FED-verdi og forflytningstid. Dette forklares med at økt forflytningstid fører til større eksponeringstid i den røykfylte korridoren og dermed også høyere doser av giftige gasser. Pathfinder-simuleringene viser også at ulike FED-verdier for de evakuerende, men modellen tar ikke hensyn til at redusert sikt i rømningsveien vil redusere ganghastigheten og dermed får ikke personene i Pathfindermodellen den økte eksponeringstiden som kan observeres i FDS+EVAC.



Figur 19 - Spredningsdiagram for simuleringer i FDS+EVAC og Pathfinder

## 5.3 Sammenstilling av resultater fra evakueringsforsøk og simuleringer

Data fra rømningssimuleringer i FDS+EVAC og Pathfinder er sammenstilt med evakueringsforsøkene med og uten belysning i figur 20. Evakueringstider fra brannscenario 1 og 2 hvor sikt var mellom 0,5 til 1,0 meter (ekstinksjonskoeffisient mellom 2-4 m<sup>-1</sup>) er hentet ut fra resultater og benyttet i sammenligningen, resultater fra simuleringer i røyktetthet utenfor 2-4 m<sup>-1</sup> er ikke tatt med i figur 20.



Figur 20 - Sammenstilling av ganghastigheter for forsøk og simuleringer

FDS+EVAC gav tilsvarende resultater for gjennomsnittlig ganghastighet som forsøkene med belysning av. Gjennomsnittlig ganghastighet var 0,54 m/s for både simuleringer og forsøk. Det var likevel en større spredning i ganghastigheter for forsøkene som ikke ble simulert i FDS+EVAC. Variasjonsbreddene for forsøk var i størrelsesorden 0,7-0,8 m/s forskjell mellom raskeste og tregeste deltaker, mens personer i FDS+EVAC hadde variasjonsbredde ca. 0,4 m/s.

Pathfinder støttet ikke redusert ganghastighet som følge av røykpåvirkning og konstant ganghastighet lik 1,19 m/s ble simulert for alle personer i modellen. For å benytte Pathfinder til simulering av rømning i røyk må det legges manuelt inn reduserte ganghastigheter basert på håndberegninger. Alternativt kan visualiseringsverktøyet benyttes til å sette absoluttgrenser for f.eks røyklagshøyde.

## 6 Diskusjon

Det er gjennomført evakueringsforsøk, spørreundersøkelse og simuleringer av rømning i røyk. I dette kapitlet diskuteres resultater og observasjoner mot tidligere forskning og usikkerheter. Diskusjon har til hensikt å belyse usikkerheter i anvendte metoder og resultater for denne avhandlingen, samt usikkerheter i tidligere forskning innenfor rømning i røyk, ledesystemer og rømningssimuleringer.

### 6.1 Evakueringsforsøk

Resultater fra forsøkene viste at samtlige deltakere hadde kortere forflytningstid når korridoren var belyst med elektrisk belysning i tak, sammenlignet med mørklagt korridor. Det er funnet at ledesystem bestående av lavtmonterte, etterlysende komponenter kombinert med elektrisk belysning i tak gir raskere forflytningstid enn ledesystem kun med etterlysende komponenter og ingen elektrisk belysning. Gjennomsnitt for alle deltakernes ganghastighet var omtrent 1,4 ganger lengre for forsøk med lys av sammenlignet med lys på. Fra tidligere forskning [10], [22], [42], [55] er det påstått at normalbelysning vil føre til lysspredning i røyk som virker blendende og reduserer synlighet av etterlysende komponenter. Det har vært antatt at blindingseffekten vil føre til reduserte ganghastigheter, men dette ble ikke observert i evakueringsforsøkene som ble utført på Voss Gymnas. Det ble utført en test av  $p$ -verdi for å undersøke om datasett mellom evakueringstid med belysning og uten belysning hadde signifikans.  $P$ -verdi viste at resultatene med svært lav sannsynlighet var forårsaket av tilfeldigheter. Det må likevel bemerkes at utvalget av forsøksdeltakere var kun basert på 13 deltakere. Basert på resultatene kan ikke lysspredning i røyk avkreftes. Det er et kjent fenomen at lysstråler som treffer røykpartikler vil enten bli blokkert av røykpartiklene, eller reflektert i andre retninger [72]. Prinsippet med spredning av lys i røyk benyttes blant annet for å detektere røyk i optiske røykdetektorer. Påvirkningen spredning av lys i røyk har på personers ganghastighet når de følger et ledesystem er testet med evakueringsforsøk og resultater tilsier at lysspredning i røyk ikke reduserer ganghastighet. Det kan tenkes at forsøkspersonene følte større trygghet når rømningsskorridoren var belyst og at de av den grunn holdt en høyere ganghastighet sammenlignet med mørklagt korridor.

Spredningen i målinger av ganghastighet var stor mellom forsøksdeltakerne. Store forskjeller i ganghastigheter mellom ulike personer er også funnet i tidligere forskning [9], [56]. Spredninger i ganghastigheter kan generelt forklares med at deltakere har individuelle forskjeller. For forsøk ved Voss Gymnas kan det også være en følge av at røyktettheten ikke ble holdt helt konstant

mellom forsøkene. Det ble ikke målt noen mellomtider i forsøkene, og alle ganghastigheter er basert på at forsøkspersoner tilbakela en avstand på 28,5 meter. Dette er en god antakelse ettersom rømningskorridoren kun hadde én riktig rømningsvei, det kan likevel tenkes at noen forsøksdeltakere stoppet opp i kortere perioder for å finne veien videre. Dette støttes av besvarelser fra spørreundersøkelsen hvor fem av tretten svarte at de på et tidspunkt hadde problemer med å finne veien.

I evakueringsforsøkene utførte samme person forsøkene to ganger hvor eneste forskjellen var belyningsforholdene. Det må forventes at deltakeren vil bli kjent med evakueringsruten og presterer bedre i forsøk nummer to. Det kan også tenkes at deltakerne blir mer trygg på situasjonen og av den grunn tør å gå fortere i forsøk to. For å kompensere for gjenkjenningseffekten startet annenhver deltaker med ulik belysning. Gjenkjenningseffekten ble på forhånd antatt å ha stor innvirkning på resultatene, men dette var trolig ikke tilfellet. Uavhengig av hvilke lysforhold deltakeren startet med, var ganghastigheten raskere når normalbelysning var slått på. Det er beregnet en forbedringsfaktor for gjenkjenningseffekt som angir mindre enn 5 % forbedring i gjennomsnitt. Forbedringsfaktoren er basert på et lite utvalg og har derfor relativt stor usikkerhet.

Røyktettheten i forsøkene ble ikke målt på annen måte enn visuell vurdering av siktavstand hvor etterlysende skilt var akkurat synlige (terskelavstand for sikt). Tidligere forskning fra blant annet Jin [53] og Frantzich & Nilsson [56] hadde som formål å estimere ganghastighet som funksjon av røyktetthet, målinger var derfor viktig i tidligere forskning. I denne avhandlingen er problemstilling knyttet til lysspredning i røyk og hvordan dette som et fenomen påvirker muligheter for å evakuere. Det ble derfor vurdert som mindre viktig å måle nøyaktig røyktetthet. Det bemerkes også at i en ekte brannsituasjon forventes det at røyktetthet kan ha store variasjoner ut fra lokasjon og over tid. Det ble registrert at røyktettheten ikke holdt seg konstant over tid for forsøkene ved Voss Gymnas, men ettersom hver deltaker utførte sine to forsøk uten pauser, er det vurdert at differansen i røyktetthet for hver enkelt deltaker var liten. Det kan likevel tenkes at røyktetthet til tider var utenfor oppgitt grense på 0,5-1,0 meter sikt. Dette har mindre betydning for observasjoner knyttet til lysspredning i røyk.

Bruk av kunstig røyk i forsøkene vil trolig føre til flere usikkerheter sammenlignet med ekte brannrøyk. Både fysiske og psykiske faktorer vil trolig være annerledes i et ekte branntilfelle. Forsøket hadde en predefinert evakueringsrute og ledesystem som kun viste én vei. Veivalg og personers villighet til å gå gjennom en røykfylt korridor er derfor ikke vurdert i forsøkene. Ekte

brannrøyk vil kunne ha irriterende effekt på øyne som gir svie og høy tåreproduksjon, varme fra røyk vil også kunne påvirke evnen til å holde øynene åpne. Irriterende effekt fra røyk kan derfor gi ytterligere redusert sikt. Andre effekter fra ekte brannrøyk kan være pustebesvær som følge av innånding av røyk, røykens kvelende effekt kan føre til forvirring og tap av bevissthet, varme kan gi smerter i hud, øyne og åndedrett. Lysspredning i ekte røyk kan også være annerledes enn det som kan observeres fra kunstig røyk. Scenerøyken som ble benyttet i forsøkene førte ikke til sotavsetninger på skilt. I ekte brannrøyk vil det forventes at sotavsetninger reduserer utstrålt lys fra et elektrisk eller etterlysende skilt, spesielt dersom det har vært eksponert for røyk over lengre tid.

Forsøkene ble gjennomført med et relativt lite utvalg bestående av 13 forsøksdeltakere. Funnene var likevel entydige og gir en god indikasjon på at bakgrunnsbelysning kan kombineres med ledesystem for å oppnå høyere ganghastigheter og tryggere rømningsforhold. Resultater fra evakueringsforsøk indikerer at hypotese 1 stemmer: I røykfylte omgivelser vil høytmontert elektrisk belysning i kombinasjon med lavtmonterte etterlysende ledelinjer gi kortere forflytningstid enn ledesystem kun med etterlysende komponenter.

## **6.2 Simuleringer**

### **6.2.1 Brannsimuleringer i FDS**

Det ble utført brannsimuleringer med to ulike brannscenarier i garderobe. Det er valgt å ikke diskutere detaljer rundt usikkerheter i brannsimuleringer, ettersom simuleringer av brann hovedsakelig ligger utenfor omfanget av denne oppgaven. Det er ansett som tilstrekkelig å betrakte resultater fra brannsimuleringer som anvendelige for dette formål. Hensikten var å kombinere evakueringsmodeller med røyk som skaper utfordrende rømningsforhold som kan inntreffe ved en brann. Det bemerkes at utvikling av en brann i virkeligheten vil avhenge av svært mange usikre faktorer og det vil derfor alltid være store usikkerheter involvert når man forutser hvordan en brann kommer til å utvikle seg.

### **6.2.2 Rømnings­simuleringer i FDS+EVAC**

Resultater fra rømnings­simuleringer i FDS+EVAC med røyktetthet mellom 2-4 m<sup>-1</sup> ga omtrent samme gjennomsnittlige ganghastigheter som praktiske evakueringsforsøk med lys av. Resultater fra simuleringene predikterte en variasjonsbredde mellom høyeste og laveste ganghastighet på

ca. 0,4 m/s. Dette var noe mindre spredning i ganghastighet enn det som ble observert i forsøk, hvor variasjonsbredden var i størrelsesorden 0,7-0,8 m/s. Praktiske forsøk med belysning på ga noe raskere ganghastighet enn simuleringene, størrelsesorden 0,2 m/s raskere ganghastighet i snitt ble observert. Simuleringene korrelerte derfor best med forsøk uten elektrisk belysning.

I FDS er det ikke mulig å modellere ulike belyningsforhold, i modellen dempes sikten med økende røyktetthet. FDS+EVAC benytter en nedre grense for ganghastighet, i tykk røyk vil derfor personer fortsette å gå med lav hastighet inntil de når en utgang eller til tålegrenser etter akkumulert FED-dose er nådd. I modellen ble det brukt *simple chemistry*, og brannprodukter som gir irriterende effekt for øyne og åndedrett er dermed ikke hensyntatt. Disse effektene vil ikke virke inn på ganghastighet i simuleringmodell, men ville kunne ført til høyere FED-doser. Ettersom irriterende effekter ikke reduserer ganghastighet er det vurdert at usikkerheter forårsaket av forenklet kjemisk brannmodellering ikke er signifikant for resultater.

I evakueringsmodellen er det ikke tatt hensyn til effekt av ledesystemer. Det finnes svært få eller ingen rømningssimuleringsprogrammer som har verktøy for å simulere effekt av lavtmonterte ledelinjer. Det behøves mer forskning for å gi et tilstrekkelig datagrunnlag for ganghastigheter for personer som følger et ledesystem. En stor del av effekten til et ledesystem vil være å sørge for at personer tar de mest egnede veivalgene. Det å simulere menneskelig beslutningstaking for veivalg under stress kan være svært avansert, og konklusjonen kan være at simulering av ledeeffekt til ledesystemer ikke lar seg gjøre uten store usikkerheter eller med bruk av sannsynlighetsfordelinger og stokastiske variabler for veivalg som kompliserer simuleringene. I tidligere forskning er det vist at lavtmonterte ledelinjer vil ha positiv effekt på forflytningstid som følge av veivalg og i noen tilfeller også ganghastighet [10], [73], [41]. I sammenligning av evakueringstider fra forsøk og simulering er altså ikke den positive effekten av ledesystemet tatt hensyn til i simuleringer. Dette gjør at sammenligningene ikke gjøres på likt grunnlag og fører til usikkerheter i evakueringsmodellenes resultater.

I modellen bestemmes ganghastighet i røyk ut fra forsøk utført av Frantzich og Nilsson [56]. FDS+EVAC bruker kun gjennomsnittsverdier for redusert ganghastighet i røyk som ble funnet i forsøkene. Ettersom data fra forsøkene hadde stor spredning, er det også stor usikkerheter knyttet til resultater fra simulerte ganghastighet. Det å anvende statistiske fordelinger vil gi mer realistisk resultater enn kun bruk av gjennomsnittlige verdier. Ved å anvende en gjennomsnittstid for alle personer i en modell, kan man miste effekten av at noen få går veldig langsomt og skaper kø bak seg. Derfor vil resultater fra simuleringer ofte måtte ses på som minste realistiske forflytningstid.

Forsøkene benyttet ulike ledesystemer og ulike belysninger. Modellen er ikke sofistikert nok til å hensynta disse forholdene og bør dermed ikke benyttes for å vurdere effekt av ledesystemer eller belysning.

Hypotese 2 som ble satt opp innledningsvis hevdet at simuleringmodeller var i stand til å simulere rømning i røyk og ville beregne tilnærmet lik forflytningstid som praktiske forsøk. Resultater fra simuleringer gir delvis bekreftelse på at hypotese 2 stemmer, men det er svært mange usikkerheter i metoden og viktige faktorer som belysningsforhold og effekt av ledesystem er ikke tatt hensyn til i simuleringene.

### **6.2.3 Pathfinder**

I Pathfinder finnes det ingen funksjon for redusert ganghastighet i røyk. Bruker må derfor selv anvende håndberegninger og legge dette inn i modellen for å simulere røykens effekt på ganghastighet. Dette kan være møysommelig arbeid i tilfeller der mange personer evakuerer gjennom områder med ulik røykthet som varierer over tid. Pathfinder støtter bruk av FED-beregninger, og i kapittel 5.2.4, figur 19 er beregnede FED-doser i FDS+EVAC og Pathfinder sammenlignet. Resultater fra Pathfinder ligger lavere enn FDS+EVAC ettersom personer ikke får redusert ganghastighet i røyk og dermed også kortere eksponeringstid. Ved bruk av håndberegninger for å bestemme redusert ganghastighet kan det antas at modellene ville gitt resultater i samme størrelsesorden.

Resultater for rømningssimuleringer i Pathfinder kan være nyttig dersom det anvendes absolutte akseptkriterier som røyklagshøyde, temperatur og sikt ettersom dette er forhold som kan inkluderes i rømningmodellens visuelle fremstilling mot resultater fra brannsimulering. Grenseverdier for personers tåleevne må da bestemmes ut fra anerkjent litteratur/standard.

### **6.2.4 Usikkerheter ved bruk av evakueringsmodeller**

For at det skal være hensiktsmessig å benytte evakueringsmodeller er det essensielt at det som skal modelleres er en gjenskapelig og rasjonell handling. Å simulere menneskelig atferd kan være utfordrende, spesielt når man forsøker å modellere kognitive prosesser som beslutningstaking under stress. Rømningssimuleringer kan likevel være nyttig for visualisering av evakueringsprosesser og for å identifisere bygningsmessige gode og dårlige løsninger for personstrøm som blant annet flaskehalsen hvor det kan oppstå køer ved evakuering.



FED-modell som benyttes for å vurdere effekt av giftige gasser er basert på et begrenset forskningsgrunnlag. Hovedsakelig er tålegrenser funnet i lab-forsøk på dyr og resultater overføres til mennesker, eller tålegrenser er forsøkt beregnet fra brannofre, men da med begrenset kunnskap om brannen [50]. Når dette kombineres med en brannmodell som også kan ha store usikkerheter rundt blant annet CO-konsentrasjoner, som har vært rapportert som et problem i FDS [60], må det vises stor forsiktighet med anvendelse av resultater.

Modellering av ganghastighet i røyk er basert på få forsøk, hvor det er observert stor spredning i ganghastigheter mellom hver enkelt forsøksdeltaker. Det er derfor forbundet med store usikkerheter [67], [56]. I tillegg er viktige forhold som belysning og bruk av ledesystemer ikke mulig å modellere i benyttede programmer for rømningssimulering. Ved simulering av rømning i røyk bør det velges tilstrekkelig konservativ ganghastighet og gjerne med normalfordeling av ganghastigheter for ulike personer i modellen for å representere en befolkning mest mulig realistisk. Dersom man kun simulerer et lite utvalg personer, kan det oppstå tilfeldigheter som gir verdier som havner utenfor en gjennomsnittstid. God praksis for å kompensere for tilfeldigheter forårsaket av stokastiske verdier er å kjøre simuleringer som er basert på statistiske fordelinger flere ganger slik at man ikke konkluderer på et for tynt grunnlag.

Simuleringsprogrammer kommer med forhåndsinnstillinger (default values). Ved å nyttiggjøre disse innstillingene kan man bruke kortere tid på å sette opp modeller, men det øker også risikoen for feil. Dersom bruker ikke har et bevisst forhold til hvilke verdier som er valgt (f.eks. ganghastighet, skulderbredde, strømningsrater, veivalg-algoritmer etc.), kan resultatene gi langt mer optimistiske evakueringstider enn det som vil være tilfellet i en reell situasjon. Typiske forhåndsinnstilte verdier som kan gi lite konservative resultater er blant annet at evakuering starter umiddelbart, dermed settes deteksjonstid, varslingsstid og reaksjonstid lik null. I realiteten kan denne tiden være mange minutter. I mange modeller er også veivalg og kapasitetsutnyttelse optimistisk simulert. Erfaringsvis vil de fleste benytte kjente veier, gjerne samme veien man kom inn et byggverk. Dette kan føre til stor utnyttelse av få rømningsveier mens nødutganger gjerne står ubenyttet. Mange simuleringsprogrammer har algoritmer som bestemmer veivalg basert på korteste lokale utgang (fra oppholdssted til nærmeste utgang/trapp) eller globale utgang (fra oppholdssted til sikkert sted). Det er i mange tilfeller lite konservativt å anta at personer kjenner til alle utganger og avstander i et bygg.

Rømningssimuleringer er nyttig verktøy for å estimere forflytningstid, og spesielt der det er mange mennesker og der det danner seg kø ved utgangene. Simuleringsverktøyene har likevel

utfordringer med å forutse menneskelig atferd og brukere kan benytte modellene til å ønsket resultater [74]. Det kan gjøres enten bevisst ved å benytte input som gir bedre resultater enn det som kan forventes eller ubevisst ved at uerfarne brukere ikke tilpasser modellen til den aktuelle problemstillingen. Evakueringsmodeller kan i mange tilfeller gi resultater som beskriver den minste forventede forflytningstiden uten sikkerhetsmarginer. Dette gjelder spesielt enkle modeller som forutsetter maksimal utnyttelse av rømningsbredder og ideell fordeling på utganger.

## 6.3 Rømning i røyk og visuelle ledesystemer

Fra besvarelser i spørreundersøkelse og erfaringer fra tidligere branner [26], [34] er det kartlagt at mennesker kan være tilbøyelig til å evakuere gjennom røykfylte omgivelser for å komme til sikkerhet. I de senere årene har brannvesenet satt fokus på å informere befolkningen om at man ikke bør forsøke å rømme gjennom røykfylt trapperom eller korridor der det er mulig å vende tilbake til branncelle og tilkalle hjelp [75]. Likevel er det slik at personer kan være skeptiske til å bli værende i et brennende bygg og forsøker å rømme gjennom røykfylte omgivelser i tro om at de skal nå sikkerhet. I henhold til besvarelser i spørreundersøkelsen kan det også tyde på at ledesystemet oppfordrer mennesker til å forsøke å rømme gjennom røyk. Samtlige personer som svarte på spørsmålet ville ikke forsøkt å rømme gjennom røykfylt korridor dersom det ikke var et synlig ledesystem i korridoren, mens 10 av 13 svarte at de ville forsøkt å evakuere dersom korridoren hadde installert et ledesystem. Besvarelsene kan være farget av at forsøkspersonene nettopp hadde opplevd effekten av et ledesystem i røyk og hadde mestret å evakuere gjennom en korridor med hjelp av dette systemet. Deltakerne kan av den grunn følt at dette var ”riktig” besvarelse. Det bemerkes at noen av spørsmålene i spørreskjema var utformet i en åpen stil som medførte at deltakerne kunne tolke spørsmål og svaralternativer ulikt.

Ettersom personer kan være villige til å evakuere gjennom røyk bør det vurderes om tiltak for å lette rømning i røyk er hensiktsmessig. Fra et samfunnsøkonomisk perspektiv bør man søke å finne de tiltak som reduserer risiko i størst grad for lavest mulig kostnad. Det finnes begrenset dokumentasjon på ledeeffekt av visuelle ledesystemer ved brann. I følge Galea et al. [38] er det usikkerheter knyttet til om personer vil benytte seg av rømningsskilter i en rømningssituasjon. Dette ble vist i et evakueringsforsøk hvor kun 38 % i et utvalg av 82 forsøksdeltaker registrerte skilter i en rømningsskorridor. Tidligere forskning utført av Jin [67] har vist at brannrøyk som fører til svie i øynene vil føre til reduserte ganghastigheter også ved lav røyktetthet. Grunnen kan være at røyk gir så mye svie i øynene at personer ikke klarer å holde øynene åpne. I følge Yamada

og Akizuki [9] kan evakuerende holde øynene åpne kun i kort tid grunnet svie og stor tåreproduksjon i irriterende røyk med røyktetthet under  $0,5 \text{ m}^{-1}$ , som tilsvarer ca. 4 meter sikt. Evakuerende vil muligens ikke være i stand til å lese skilt, men kan trolig kjenne igjen markeringsskilt når de har en kjent utforming. Ved irriterende røyk må det også kunne forventes at mulighet for å kunne se ledelinjer reduseres.

Rømningsskilt kan av enkelte tolkes som en ukjent vei som man ikke bør gå. I mange offentlige bygg kan man se skilt som ”kun for ansatte” eller ”utgangen skal kun brukes i nødstilfelle”. Slike forhold fører til at man gjøres usikker på om utgangen kan/skal benyttes. Skepsis til ukjente utganger kan også komme av usikkerhet vedrørende vedlikehold av disse veiene. Personer kan for eksempel være usikker på om det er en låst dør i enden av en ukjent vei, om rømningsveien er blokkert av materialer som er lagret eller om den ukjente veien er kortere enn den veien man kjenner.

Det er usikkerheter knyttet til effekt av ledesystemer og det kan diskuteres om alternative tiltak som gir tilsvarende eller bedre sikkerhet finnes. Det er vanskelig å finne dokumenterte eksempler fra faktiske branner der ledesystemer har reddet liv. Lavtmonterte ledelinjer er tiltak som har til hensikt å assistere mennesker til sikkerhet når alle andre tiltak ha sviktet, det vil si sent i et brannforløp når røyk har spredt seg til flukt- eller rømningsveier. Effekten av linjene forutsetter at systemet er riktig vedlikeholdt og at etterlysende ledesystem er tilstrekkelig belyst slik at det fotoluminescerende materialet lyser sterkt og lenge nok etter bortfall av lys. Flere sikkerhetsbarrierer må feile før ledesystemet har en effekt ved brann samtidig som forholdene må være riktige for at systemet skal fungere som forutsatt.

Fra besvarelser i spørreundersøkelse ble det funnet at de fleste personene som følger et lavtmontert ledesystem i tett røyk vil gå sakte, bøye seg ned og holde blikk langs gulvet. Ingen av deltakerne krabbet, men mange følte seg frem langs vegger med hendene. Dette er også observert i tidligere forskning og tilsvarer atferd for personer som famler i mørke [54]. De fleste forsøksdeltakerne (ni av tretten) svarte i spørreundersøkelsen av de hadde noe hjelp eller stor hjelp av ledesystemet for å finne veien i rømningskorridoren. Basert på besvarelsene og tidligere forskning [10], [42], [55] vil altså et etterlysende ledesystem som er utført iht. standard NS 3926 ha positiv ledeeffekt for røykfylte rømningsveier. Det var interessant å se at tidligere forskning har lagt stor vekt på negativ effekt av elektrisk belysning i tett røyk [10], [53], [42], [55], men ved gjennomførte forsøk ved Voss Gymnas ga elektrisk belysning positiv effekt på ganghastigheter.

## 7 Konklusjon

Evakueringsforsøk ble utført i en rømningskorridor med etterlysende ledesystem i tett scenerøyk og ulike belyningsforhold. Det er funnet at ledesystem bestående av lavtmonterte, etterlysende komponenter kombinert med elektrisk belysning i tak gir raskere forflytningstid enn ledesystem kun med etterlysende komponenter og ingen elektrisk belysning. Det ble ikke observert at lysspredning i røyk hadde blendende effekt. Deltakernes besvarelser tilsa at synligheten av etterlysende komponenter var omtrent lik uavhengig av belyningsforhold. Det kan tenkes at personer føler seg tryggere når det er lyst og derfor holder høyere ganghastighet.

De fleste personene som følger et lavtmontert ledesystem i tett røyk vil gå sakte, bøye seg ned og holde blikk langs gulvet. Ingen av deltakerne krabbet, men mange følte seg frem langs vegger med hendene. Basert på besvarelser i spørreundersøkelse, kan det tenkes at et komplett ledesystem med lavtmonterte kontinuerlige ledelinjer kan øke tilbøyeligheten til å forsøke å evakuere gjennom røykfylt rømningsvei.

Simuleringsverktøyene som ble benyttet kan til en viss grad benyttes for å modellere rømning i røyk, men programmene er per tid ikke sofistikert nok til å ta hensyn til ulike belyningsforhold i røyk eller effekt av ledesystem. FDS+EVAC og Pathfinder ble benyttet, begge programmene støtter kombinerings av evakueringsmodell og brannmodell fra FDS. FDS-EVAC produserte resultater for ganghastighet som tilsvarte gjennomsnittlige verdier for evakueringsforsøk med etterlysende ledesystem uten elektrisk belysning, men med noe mindre spredning i ganghastigheter enn det som ble registret i forsøkene. Pathfinder hadde ingen funksjon for redusert ganghastighet i røyk og bruker må derfor manuelt legge inn reduksjonsfaktorer fra håndberegninger for å få realistiske tall.

## 8 Videre arbeid

- Utføre evakueringsforsøk med ekte brannrøyk og verneutstyr. Det bør undersøkes om resultater fra forsøk med bruk av kunstig scenerøyk kan sammenlignes med ekte brannrøyk med hensyn til sikt og lysbrytning.
- Undersøke hvilken effekt irriterende røyk har på sikt. Vil svie i øyne føre til at man uansett ikke klarer å se ledelinjer ved høy røyktetthet?
- Kost-nytte-analyse av ledesystemer. Det er usikkerheter knyttet til hvor ofte det faktisk er behov for komplette ledesystemer med kontinuerlige linjer og om effekten kan dokumenteres i virkelige brann-hendelser.

# Kilder og litteratur

- [1] Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, «Faguttrykk,» [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp>. [Funnet 14 05 2017].
- [2] Lyskultur, «Lyskultur publikasjon 7,» Lyskultur, 2013.
- [3] Standard Norge, NS 1838:2013 Anvendt belysning - Nødbelysning, Oslo: Standard Norge, 2013.
- [4] Standard Norge, NS 3926-1:2017 Visuelle ledesystemer for rømning i byggverk - Del 1: Planlegging, utforming og kontroll, Lysaker: Standard Norge, 2017.
- [5] Standard Norge, «Universell utfoming av byggverk Del 1: Arbeids- og publikumsbygninger,» Standard Norge, 2009.
- [6] T. Yamada, K. Kubota, N. Abe og A. Iida, «Visibility of Emergency Exit Signs and Emergency Lights through Smoke,» i *6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*, Mitaka, Tokyo 181-8633, Japan, 2004.
- [7] Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK), «Veiledning om tekniske krav til byggverk,» 12 Desember 2017. [Internett]. Available: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>. [Funnet April 2018].
- [8] Standard Norge, «NS 3926:2009 - Visuelle ledesystemer for rømning i byggverk - Del 1: Planlegging og utforming,» Standard Norge, 2009.
- [9] T. Yamada og Y. Akizuki, «Visibility and Human Behaviour in Fire Smoke,» i *SFPE Handbook of fire protection engineering*, H. M. e. al., Red., New York, NY: Springer, 2016, pp. 2181-2206.
- [10] G. Jensen, «Rømning i røyk - Sammenendragsrapport,» IGP AS, Trondheim, 1993.
- [11] Kommunal- og moderniseringspartementet, FOR 2017-06-19-840: Forskrift om tekniske krav til byggverk, 2017-07-07 red., Oslo: Kommunal- og moderniseringspartementet, 2017, sist endret 07.07.2017.
- [12] Standard Norge, «SN-INSTA/TS 950:2014 Analytisk brannteknisk prosjektering - Komparativ metode for verifikasjon av brannsikkerhet i byggverk,» Standard Norge, Lysaker, 2014.
- [13] K. Fridolf, K. Andrée, D. Nilsson og H. Frantzich, «The impact of smoke on walking speed,» *Fire and Materials*, vol. 38, pp. 744-759, 2013.

- [14] Direktoratet for Byggkvalitet, «Henvendelse fra Noralarm om forsvarlig sikkerhet ved nødvendig evakuering - ledesystemer og byggteknisk forskrift (TEK10) §11-11 og 11-12.,» DiBK, Oslo, 2013.
- [15] Arbeidsdepartementet (AD), FOR-2011-12-06-1356: Forskrift om utforming og innretning av arbeidsplasser og arbeidslokaler (arbeidsplassforskriften), Sist endret 18. april 2017 nr.473 red., Oslo: Arbeidsdepartementet, 2011.
- [16] Arbeidstilsynet, «Arbeidsplassforskriften,» 05 07 2016. [Internett]. Available: <https://www.arbeidstilsynet.no/regelverk/forskrifter/arbeidsplassforskriften/2/2-13/>. [Funnet 20 5 2018].
- [17] International Organization for Standardization, «ISO 16069 Graphical symbols - safety signs- Safety way guidance systems (SWGS),» ISO, Geneva, Switzerland, 2017.
- [18] R. W. Bukowski og J. S. Tubbs, «Egress Concepts and Design Approaches,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. H. e. al., Red., New York, Springer, 2016, pp. 2012-2046.
- [19] SINTEF Byggforsk, «520.385 Nødvendig rømningstid ved brann,» SINTEF Byggforsk, Oslo, 2016.
- [20] A. Cuesta, O. Abreu og D. Alvear, «Evacuation Modeling Trends,» Springer International, 2016.
- [21] E. D. Kuligowski, «Human Behaviour in Fire,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. H. e. al., Red., New York, Springer, 2016, pp. 2070-2114.
- [22] T. Jin, «Visibility and Human Behaviour in Smoke,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, D. e. al., Red., MA: National Fire Protection Association, 2008, pp. 2.54 - 2.66.
- [23] H. Frantzich, «Tid för utrymning vid Brand,» Räddningsverket, Karlstad, 2001.
- [24] J. L. Bryan, «Human Behaviour in fire,» i *Fire Protection Handbook Twentieth edition*, Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Assosiation, 2008, pp. Section 4, 3-47.
- [25] R. F. Fahy, G. Proulx og L. Aiman, «"Panic" and human behaviour in fire,» i *4th international symposium on human behaviour in fire*, Cambridge, UK, Interscience communications, 2009, pp. 387-398.
- [26] G. Proulx og R. Fahy, «Human behavior and evacuation movement in smoke,» National Research Council Canada, 2008.
- [27] Store Norske Leksikon, «Personlighetspsykologi - sjokk,» 20 februar 2018. [Internett]. Available: [https://snl.no/sjokk\\_-\\_psykologi](https://snl.no/sjokk_-_psykologi). [Funnet 20 april 2018].

- [28] J. D. Sime, «Movement toward the familiar: person and place affiliation in a fire entrapment setting,» *Environment and behaviour*, vol. 17, nr. 6, pp. 697-724, 1 November 1985.
- [29] SP Fire Research AS, «Rømning i brann - Funksjonen til ulike visuelle ledesystemer,» SP Fire Research, 2014.
- [30] Statens Bygningstekniske Etat, Temaveiledning Røykventilasjon HO-3/2000, Oslo: Statens Bygningstekniske Etat, 2000.
- [31] Justis- og politidepartementet, «Statsmelding nummer 35 - Brannsikkerhet,» Justis- og politidepartementet, 2009.
- [32] Brannmannen, «Brannmannen,» Oslo Brannkorpsforening, 18 desember 2009. [Internett]. Available: <http://brannmannen.no/brann/21-mennesker-reddet-tragisk-dodsbrann/>. [Funnet 4 mai 2018].
- [33] Tv2, «Nyheter innenriks,» Tv2, [Internett]. Available: <https://www.tv2.no/a/8583446/>. [Funnet 9 mai 2018].
- [34] P. Wood, «The Behavior of People in Fires,» Fire Research Station, Watford, UK, 1972.
- [35] J. Bryan, «Smoke As a Determinant of Human Behaviour in Fire Situations,» U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington DC, 1977.
- [36] D. A. Purser og J. L. McAllister, «Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat,» i *SFPE Handbook of fire protection engineering*, M. H. e. al., Red., Springer, 2016, pp. 2308-2428.
- [37] Statens Havarikommisjon for Transport, «Rapport om brann i vogntog på Rv 23, Oslofjordtunnelen 23. juni 2011,» Statens havarikommisjon for transport, Lillestrøm, 2013.
- [38] H. Xie, L. Filippidis, E. R. Galea, D. Blackshields og P. J. Lawrence, «Experimental study of the effectiveness of emergency signage,» i *4th international symposium on human behaviour i fire*, vol. 2009, Robnson College, Cambridge: Interscience Communications Ltd, 2009, pp. 289-300.
- [39] G. Jensen, «Brannkatastrofer - Bedre brannrømningsmetoder - delrapport 1,» IPG AS, Trondheim, 1991.
- [40] T. McClintock, T. Shields og A. Reindhardt-Rutland, «A Behavioural Solution to the Learned Irrelevance of Emergency Exit Signage,» i *2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire*, London, 2001.
- [41] M. S. Wright, G. Cook og G. M. Webber, «The Effects on People's Walking Speeds Using Overhead Lighting and Wayguidance Provision,» Research Group for Inclusive



- Environments, The Department of Construction Management & Engineering, The University of Reading, Berkshire. RG6 6AW, UK, 2002.
- [42] T. Paulsen, «eksperimentell utprøving av evakueringsystemer,» SINTEF sikkerhet og pålitelighet, Trondheim, 1993.
- [43] Store Norske Leksikon, «Luminescens,» Store Norske Leksikon, 20 februar 2018. [Internett]. Available: <https://snl.no/luminescens>. [Funnet 15 mai 2018].
- [44] National Research Council Canada, «Literature Review on Photoluminescent Material Used as a Safety Wayguidance System,» NRC, 2006.
- [45] Store Norske Leksikon, «Atom- og kjernefysikk - eksitere,» 19 september 2017. [Internett]. Available: <https://snl.no/eksitere>. [Funnet 22 november 2017].
- [46] Lyskultur, «Lysboken 1A,» Lyskultur, Stabekk , 2009.
- [47] Norges blindforbund, «Norges blindforbund,» [Internett]. Available: <https://www.blindforbundet.no/oyehelse-og-synshemninger/whos-definisjon-pa-blind-svaksynt>. [Funnet 10 November 2017].
- [48] NFPA National Fire Protection Association, «NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems,» NFPA, Quincy, Massachusetts, 2015.
- [49] R. Anderson, A. Watson og W. Harland, «Fire Deaths in the Glasgow Area: I General Considerations and Pathology,» *Medicine, Science and the Law*, nr. 21, pp. 175-183, 1981.
- [50] D. Purser, «Combustion Toxicity,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. H. e. al., Red., New York, Springer, 2016, pp. 2207-2307.
- [51] International Organization for Standardization (ISO), «ISO 13571 Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires,» ISO, Geneva, 2012.
- [52] SINTEF Byggforsk, «321.083 Ledesystem for rømning,» SINTEF Byggforsk, Oslo, 2003.
- [53] T. Jin, «Visibility through fire smoke (II),» *Fire Prevention Society of Japan*, vol. 21, nr. 1, pp. 17-23, 1971.
- [54] T. Jin, «Studies on human behaviour and tenability in fire smoke,» International association for Fire Safety Science, Tokyo, 1997.
- [55] M. Rea, F. Clarc og M. Ouellette, «Photometric and Psychophysical Measurements of Exit Signs Through Smoke,» DBR. Paper number 1291, 1985.

- [56] H. Frantzich og D. Nilsson, «Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning,» Lund University, Lund, Sweden, 2003.
- [57] SP Fire Research, «Studie av synlighet til høytmonterte markeringsskilt i brannrøyk,» SP Fire Research, Trondheim, 2015.
- [58] E. Ronchi, P. Colonna, S. Gwynne og D. Purser, «Representation of the Impact of Smoke on Agent Walking Speeds in Evacuation Models,» *Fire Technology*, vol. 49, nr. 2, pp. 411-431, 2013.
- [59] E. Ronchi og D. Nilsson, «Basic concepts of modelling methods,» i *Evacuation Modeling Trends*, Santander, Spain, Springer, 2016, pp. 1-24.
- [60] VTT Technival Research Centre of Finland, «Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+EVAC - Technical Reference and User's Guide,» VTT, 2017.
- [61] VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., «FDS+Evac Miscellaneous Examples,» [Internett]. Available: [http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/examples\\_fds6.html](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj6/fdsevac/examples_fds6.html). [Funnet 20 11 2017].
- [62] National Institute of Standards and Technology, «Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation,» NIST, Maryland, 2017.
- [63] Thunderhead Engineering, «Pathfinder User Manual,» Thunderhead Engineering, Manhattan, 2018.
- [64] MSS Professional A/S, «Trainer 201 User Manual,» MSS Professional A/S, Risskov, Denmark, 2010.
- [65] Hagner, «Universal Photometer/radiometer - Model S4,» [Internett]. Available: <http://www.hagner.se/combination-instruments-1/model-s4/>. [Funnet 3 mai 2018].
- [66] E. D. Kuligowski, R. D. Peacock og B. L. Hoskins, «A Review of Building Evacuation Models, 2nd Edition,» National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [67] T. Jin og T. Yamada, «Irritating effects of fire smoke on visibility,» *Fire Science and Technology*, vol. 5, 1985.
- [68] Boverket (Sveige), «BBRAD 3,» Boverket, 2013.
- [69] NIST - National Institute of Standards and Technology - sixth edition, «Fire Dynamics Simulator - User's Guide,» U.S Department of Commerce, Maryland, USA, 2016.
- [70] R. A. Kady, S. Gwynne og J. Davis, «A review of the sources of occupant performance data used in building evacuation models,» i *4th International symposium on human behaviour in fire*, Cambridge, UK, 2009.

- [71] G. G. Løvås , Statistikk for universiteter og høyskoler, vol. 3, Universitetsforlaget, 2013.
- [72] Lyskultur, «Lysforurensing - Faktaark 06,» Lyskultur, Oslo, 2016.
- [73] G. Proulx, D. Tiller, B. Kyle og J. Creak, «Assessment of Photoluminescent Material During Office Occupant Evacuation,» National Research Council of Canada, Ottawa, 1999.
- [74] P. Thompson, D. Nilsson, K. Boyce og D. McGrath, «Evacuation models are running out of time,» *Fire Safety Journal*, nr. 78, pp. 251-261, 2015.
- [75] Brann- og redningsetaten i Oslo, «Dagbladet,» 10 November 2015. [Internett]. Available: <https://www.dagbladet.no/kultur/brannvesenet-ber-folk-dele-dette-innlegget-for-a-redde-liv/60166328>. [Funnet 23 mai 2018].
- [76] G. Yeoh og K. Yuen, *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*, Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [77] F. Nystedt og H. Fratzich, «Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar,» Departure of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, 2011.
- [78] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Research (RES) and Electrical Power Research institute (EPRI), «Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS),» Rockville, 2007.
- [79] M. M. Khan, A. Tewarson og M. Chaos, «Combustion Characteristics of Materials and Generation of Fire Products,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. H. e. al., Red., New York, Springer, 2016, pp. 1143-1232.
- [80] Konsepta AS, «Brannkonsept - Voss gymnas - Revisjon 05,» 24.2.2017.