

Risikovurdering vegtunneler

Kunnskapsstatus - inndata

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 1055



Tittel

Risikovurdering vegtunneler

Undertittel

Kunnskapsstatus - inndata

Forfatter

Henrik Bjelland, Audun Borg

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

24/243748

Rapportnummer

1055

Prosjektleder

Lene Jermstad

Godkjent av

Kristin Rygg Haugland

Emneord

Parameterstudie, selvredningsmodellen, branneffekt, brannutvikling, evakueringshastighet, FEDberegninger

Sammendrag

Multiconsult har gjennomført en litteraturstudie for å etablere en kunnskapsoversikt innen temaene: brannutvikling og -størrelser for ulike kjøretøy; parametere for brannutvikling; ganghastigheter ved evakuering, og; toleransegrenser for bruk i evakueringsanalyser i røyk. Kunnskapsoversikten er basert på «selvredningsmodellen», som legger til grunn at tilgjengelig rømningstid skal være større enn nødvendig rømningstid med tilfredsstillende sikkerhetsmargin. Modellen forutsetter at det gjennomføres analyser av brann- og røykspredning i tunnelene. Det forutsettes at analytikere tar eierskap til alle data som benyttes i egne analyser.

Title

Risk Assessment of Road Tunnels

Subtitle

Knowledge Status Input

Author

Henrik Bjelland, Audun Borg

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

24/243748

Report number

1055

Project manager

Lene Jermstad

Approved by

Kristin Rygg Haugland

Key words

Parameter study, self-rescue model, fire effect, fire development, evacuation speed, FED calculations

Summary

Multiconsult has conducted a literature study to establish a knowledge overview on the topics of: fire development and sizes for different vehicles; parameters for fire development; walking speeds during evacuation; and tolerance limits for use in evacuation analyses in smoke. The knowledge overview is based on the 'self-rescue model,' which assumes that the available evacuation time should be greater than the required evacuation time with a satisfactory safety margin. The model assumes that analyses of fire and smoke spread in tunnels are carried out. It is assumed that the analysts take ownership of all data used in their analyses.

Rapport

Risikovurdering vegtunneler - Kunnskapsstatus inndata

OPPDRAUGSGIVER

Statens Vegvesen Vegdirektoratet

EMNE

Parameterstudie brann og rømning

DATO / REVISJON: 08.04.2025 / 1

DOKUMENTKODE: 10262948-RIS-RAP-001



Multiconsult



Dette dokumentet har blitt utarbeidet av Multiconsult på vegne av Multiconsult Norge AS eller selskapets klient. Klientens rettigheter til dokumentet er gitt i den aktuelle oppdragsavtalen eller ved anmodning. Tredjeparter har ingen rettigheter til bruk av dokumentet (eller deler av det) uten skriftlig forhåndsgodkjenning fra Multiconsult med mindre annet følger av norsk lov. Multiconsult påtar seg intet ansvar for bruk av dokumentet (eller deler av det) til andre formål, på andre måter eller av andre personer eller enheter enn det som er godkjent skriftlig av Multiconsult. Deler av dokumentet kan være beskyttet av immaterielle rettigheter og/eller eiendomsrettigheter. Kopiering, distribusjon, endring, behandling eller annen bruk av dokumentet er ikke tillatt uten skriftlig forhåndssamtykke fra Multiconsult eller annen innehaver av slike rettigheter med mindre annet følger av norsk lov.



Rapport

OPPDRAAG	Risikovurdering vegtunneler - Kunnskapsstatus inndata	DOKUMENTKODE	10262948-RIS-RAP-001
EMNE	Parameterstudie brann og rømning	TILGJENGELIGHET	Åpen
OPPDRAAGSGIVER	Statens Vegvesen Vegdirektoratet	OPPDRAAGSLEDER	Henrik Bjelland
KONTAKTPERSON	Lisa Bakken Vikan	UTARBEIDET AV	Henrik Bjelland og Audun Borg
		ANSVARLIG ENHET	HMS- og Risikostyring

SAMMENDRAG

Multiconsult har på oppdrag fra Statens Vegvesen Vegdirektoratet, gjennomført en litteraturstudie for å etablere en kunnskapsoversikt knyttet til temaene: brannutvikling og -størrelser for ulike kjøretøy i vegtunneler; parametere for brannutvikling; ganghastigheter ved evakuering, og; toleransegrenser for bruk i evakueringsanalyser i røyk. Kunnskapsoversikten er bygget opp rundt «selvredningsmodellen», som legger til grunn at tilgjengelig rømningstid skal være større enn nødvendig rømningstid med tilfredsstillende sikkerhetsmargin. Selvredningsmodellen forutsetter at det gjennomføres analyser av brann- og røykspredning i tunnelene, som forutsetter datainnsamling for viktige variabler i modellene. Denne rapporten gir et bidrag til denne datainnsamlingen, men forutsetter samtidig at analytikere tar eierskap til alle data som benyttes i egne analyser.

1	08.04.25	Redigert figurer og tabeller	V. Stensrud	A. Borg	H. Bjelland
0	09.12.24		H. Bjelland, A. Borg	A. Borg, H. Bjelland	H. Bjelland
REV.	DATO	BESKRIVELSE	UTARBEIDET AV	KONTROLLERT AV	GODKJENT AV



INNHOLDSFORTEGNELSE

1	Innledning.....	5
1.1	Hensikt og omfang	5
1.2	Metode	6
2	Modellering av brann og rømning i vegtunneler	7
2.1	«Selvredningsmodellen»	7
2.2	Modellering av tilgjengelig rømningstid, t_{tilgj}	9
2.3	Modellering av nødvendig rømningstid, $t_{\text{nødv}}$	10
3	Resultater: kunnskapsoversikt og anbefalinger	11
3.1	Branneffekter og -utvikling i ulike kjøretøy	11
3.1.1	Introduksjon	11
3.1.2	Designbranner i regelverk	12
3.1.3	Designbrann	13
3.1.4	Anbefaling av metode for etablering av designbrann i brannteknisk risikoanalyse	17
3.2	Parametere for modellering av brannutvikling og røykproduksjon	18
3.2.1	Automatiske slokkesystemer: påvirkning på brannutvikling og røykproduksjon	21
3.3	Evakuering til fots i vegtunneler	22
3.3.1	Varslingsfasen	23
3.3.2	Reaksjonsfasen	23
3.3.3	Forflytningsfasen	26
3.4	Evakueringsanalyser: Metoder og grenseverdier for røykeksponering	33
3.4.1	Typiske grenseverdier for mennesker tåleevne	33
3.4.2	Fractional effective dose (FED)-beregninger	40
4	Forslag til videre arbeid.....	42
5	Referanser	43
6	Vedlegg: Effekt av ulike giftige gasser (PIARC, 1999)	47



1 Innledning

1.1 Hensikt og omfang

Veilederen Risikovurdering av vegtunneler (SVV, 2024a) legger opp til en analyseprosess der identifikasjon av troverdige verstefallshendelser (TVH), som blir å regne som dimensjonerende scenarioer, står sentralt. Utgangspunktet er at det må gjøres en analyse av alle TVH'er og vurdere resultatene opp mot sikkerhetsmålet, som (helt overordnet) er at sikkerheten til trafikantene skal være ivarettatt. Gjennom risikovurderingene, og tilhørende brann- og rømningsanalyser, skal det utvikles mer kunnskap om trafikanters sikkerhet når tunnelsystemet utsettes for en kritisk hendelse. Risikovurderingene skal brukes som beslutningsunderlag for valg av tiltak som påvirker trafikantenes sikkerhet.

Analyseprosessen i SVV (2024a) betyr at modellering av TVH'er blir et sentralt tema, og det er behov for veiledning knyttet til viktige valg som må gjøres i forbindelse med modellering. Metoden som beskrives i veilederen representerer en endret tilnærming til risikovurderinger, med mer vekt på datainnsamling, analyse og modellering av scenarioer. Metoden er kjent fra andre sektorer, gjerne som «deterministisk analyse» (i motsetning til «probabilistisk analyse»), men det er begrenset erfaring med bruk av metoden i norske tunnelprosjekter.

Fra tidligere studier vet vi at det generelt er stor usikkerhet knyttet til brannutvikling og evakuering i vegtunneler. Denne usikkerheten kan kartlegges og beskrives gjennom risikoanalyse og rømningsanalyser. Analyse og modellering av brann- og rømningsscenarioer inkluderer en rekke valg av verdier for usikre inndatavariabler. Denne studien har til hensikt å gi støtte til bestillere og utførende av risikovurderinger av vegtunneler. Studien tar for seg et utvalg viktige variabler og undersøker hva relevant forskningslitteratur sier om disse variablene. På bakgrunn av litteraturstudiet gjøres det, så langt det er mulig, anbefalinger av inndataverdier som kan brukes som utgangspunkt i risikovurderinger. Det er viktig å merke seg, til tross for anbefalingene, at den utførende må stå ansvarlig for valg av inndataverdier og for å utføre sensitivitetsanalyser i tråd med veileder for risikovurderinger.

Studien er avgrenset til følgende parametere/metoder:

- Dimensjonerende brannkurver for ulike brannstørrelser (typisk personbil, buss og lastebil), for vurdering av evakuering i røyk.
- Parametere for brannutvikling (gjennomsnittlig brennverdi, produksjon av giftige gasser). I dette ligger det også å definere typiske parametere som inngår i toksisitetsvurderinger.
- Typisk ganghastighet ved evakuering – må gi en variasjon avhengig av stigning og sikkerhetstiltak i tunnelen, samt påvirkning av redusert sikt i røyk.
- Metoder og grenseverdier for evakueringsanalyser i røyk. Det bør gjøres en vurdering av om FED-beregninger er beste tilnærming, eller om andre metoder bør benyttes. Studien skal vurdere muligheten for å fastsette anbefalte grenseverdier for røykeksponering for metodene som vurderes.



1.2 Metode

Studien bygger på litteraturgjennomgang knyttet til temaene beskrevet i kap. 1.1. Litteratursøk er generelt gjennomført på tvers av vitenskapelige tidsskrift med søkemotoren Scopus. I noen tilfeller, for eksempel for å finne spesifikk informasjon om Fractional Effective Dose (FED), ble det gjort søk i utvalgte vitenskapelige tidsskrift som behandler denne typen tematikk, i dette tilfellet Fire and Materials, Fire Safety Journal og Fire Technology.

Litteratursøk viser at det er utført en rekke studier av evakuering i ulike typer tunneler de senere årene. Ganghastigheter er en typisk variabel som diskuteres i disse studiene, hvorav noen studier er spesifikt innrettet mot å undersøke ganghastigheter under ulike betingelser ved evakuering i tunnel. Det ble samlet inn omtrent 100 artikler om evakuering i tunnel, som dannet grunnlaget for å svare ut punktet om ganghastigheter m.m. Gjennomgang av de nyeste studiene viste at funn fra tidligere studier ofte ble referert og inkludert for sammenligninger, som begrenset behovet for å gå gjennom hele datamaterialet.

Temaet dimensjonerende brannkurver og brannstørrelser gav begrenset treff i litteratursøk. Resultater fra en rekke tidligere studier er inkludert i håndbøker, for eksempel Tunnel Fire Dynamics (Ingason et al., 2015). Nyere studier setter gjerne søkelys på alternative energikilder, for eksempel batteribranner, og det ble søkt spesifikt etter relevante studier om dette.

For temaene *parametere for brannutvikling og grenseverdier for evakueringsanalyser i røyk* ble vurdert å være stor overføringsverdi fra generell brannndynamikk. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Hurley, 2016) gir generelt en omfattende litteraturgjennomgang og samler store mengder data på disse temaene. Artiklene knyttet til evakuering i tunneler inneholder også mye data som er relevant for dette temaet. Det ble hentet inn supplerende litteratur for å belyse spesifikke temaer.



2 Modellering av brann og rømning i vegtunneler

2.1 «Selvredningsmodellen»

Dette kapittelet gir en kort introduksjon til en grunnleggende modell for å vurdere rømningssikkerhet, som er lagt til grunn ved utarbeidelsen av denne rapporten. Modellen er mye brukt for å vurdere brannssikkerhet i bygninger, men er like relevant for vegtunneler.

Den grunnleggende forutsetningen er at tid er avgjørende ved rømning. Dersom det oppstår en brann, eller annen hendelse som har potensial for å utvikle seg, vil forholdene i tunnelen forverres med tiden. Dersom det er mulig å evakuere tunnelen før det oppstår farlige forhold, kan vi si at sikkerheten for trafikantene er ivaretatt. Dette er analogt med måten konstruksjoner har blitt dimensjonert for laster. Konstruktøren sjekker at konstruksjonens kapasitet til å motstå laster er større enn de lastene som kan inntreffe, med en tilfredsstillende sikkerhetsmargin. For å gjøre denne sjekken, benyttes det anerkjente standarder som beskriver både beregningsmodeller, data (materialeegenskaper og laster) og sikkerhetsfaktorer. I praksis er viktige størrelser i beregningene, som materialeegenskaper og laster, stokastiske variabler, dvs at de er ukjente og kan innta én av mange mulige verdier avhengig av situasjonen. Stokastiske variabler beskrives gjerne med en usikkerhetsfordeling, som også er en modell. I konstruksjonsteknikk finnes det gode modeller for å beregne lastrespons, samt god statistikk for å fastsette laster.

For rømningssikkerhet, kan vi formulere dette som at tilgjengelig rømningstid ($t_{\text{tilgj.}}$) skal være større enn nødvendig rømningstid ($t_{\text{nødv.}}$), med en tilfredsstillende sikkerhetsmargin (t_{sm}) (DiBK, 2017: kap. 11), som vi omtaler som «selvredningsmodellen» i denne rapporten:

$$t_{\text{tilgj.}} > t_{\text{nødv.}} + t_{\text{sm}}$$

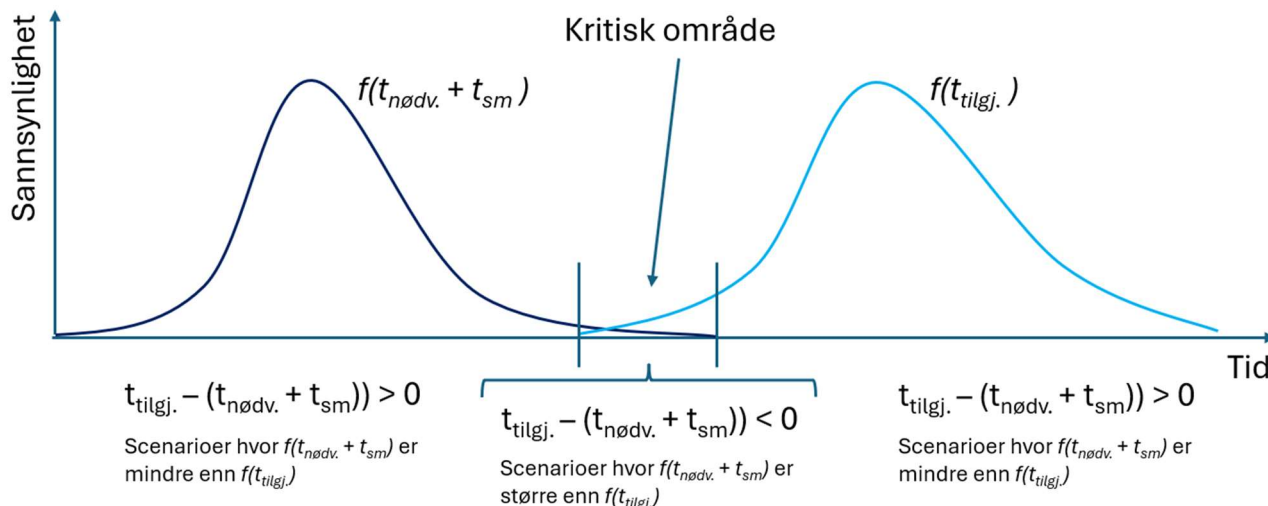
For å kontrollere om rømningssikkerhet er ivaretatt med selvredningsmodellen, er det i hovedsak to mulige fremgangsmåter: 1) probabilistisk analyse, eller 2) deterministisk analyse.

Probabilistisk analyse

En probabilistisk analyse legger til grunn at $t_{\text{tilgj.}}$, $t_{\text{nødv.}}$ og t_{sm} er stokastiske (usikre) variabler, som best kan beskrives gjennom usikkerhetsfordelinger (sannsynlighetsfordelinger). Det brukes også modeller, for eksempel modell for brannvekst, som omfatter parametere som kan variere avhengig av situasjonen. Ett eksempel er trafikantenes ganghastighet ved rømning i en tunnel. Hastigheten vil være avhengig av personens egenskaper (alder, kjønn, fysisk tilstand, etc) og situasjonen som oppstår (sikt lengde, stigning i tunnelen, avstand til utgang, m.m.), og denne usikkerheten kan beskrives med en eller flere usikkerhetsfordelinger. Når usikkerhetsfordelinger brukes inn i selvredningsmodellen, kan det gjøres beregninger som sier noe om sannsynligheten, P , for at rømningssikkerheten er ivaretatt i tunnelen, for eksempel:

$$P(t_{\text{tilgj.}} - (t_{\text{nødv.}} + t_{\text{sm}})) > 0$$

Formelen ovenfor er et uttrykk for sannsynligheten for at trafikantene har gode rømningsforhold, når alle mulige verdier av variablene tas hensyn til. For denne typen analyser er det vanlig å evaluere resultatene mot risikoakseptkriterier, for eksempel at $P(t_{\text{tilgj.}} - (t_{\text{nødv.}} + t_{\text{sm}})) > 0$ i 95 % av scenarioene.



Figur 1: Selvredningsmodellen i et probabilistisk perspektiv

Deterministisk analyse

En deterministisk analyse gjennomføres for et utvalgt sett av scenarioer og parameterverdier, dvs at det gjøres et utvalg av scenarioene som omfattes av den probabilistiske analysen. I veileder for risikovurdering av vegtunneler (SVV, 2024a) forutsettes det definisjon av troverdige verstefallshendelser (TVH). Definisjonen av TVH er å fastsette verdien på et utvalg variabler, og gjennom dette definere et sett med «dimensjonerende laster» som tunnelen skal dimensjoneres for. For hver TVH gjennomføres det en kontroll av om $t_{\text{tilgj.}} > t_{\text{nødv.}} + t_{\text{sm.}}$, og dersom dette er tilfellet kan det argumenteres for at rømningssikkerheten for trafikantene er ivaretatt.

Valg av analyseteknikk

Det finnes argumenter for og mot å velge både en probabilistisk og deterministisk analyseteknikk. Fordelen med probabilistiske analyser er gjerne at disse representerer fenomenene som modelleres på en mer realistisk måte. Vi vet at $t_{\text{tilgj.}}$, $t_{\text{nødv.}}$ og $t_{\text{sm.}}$ er stokastiske variabler, og vi behandler dem derfor som stokastiske variabler i analysene. Det gjøres også, i prinsippet, en analyse av alle tenkelige scenarioer som kan oppstå, som gir et fullstendig bilde av hvilke spenn de ulike variablene kan ha. En utfordring med probabilistiske analyser er gjerne at det mangler data for å etablere troverdige usikkerhetsfordelinger, men dette kan kompenseres for gjennom sensitivitetsanalyser. En annen utfordring er at konkrete scenarioer fort «drukner» i sannsynligheter og matematiske funksjoner. Vi ser for eksempel at kurvene overlapper på Figur 1, men det er ikke like åpenbart hvorfor de overlapper, eller hvilke konkrete scenarioer som gir utfordringer med rømningssikkerheten. Dette kan studeres nærmere ved å se nærmere på hvordan kurvene i Figur 1 oppstår, dvs. å gjøre en fortolkning av sannsynlighetsmodellene.

Fordelen med deterministiske analyser er muligheten for å ha en tverrfaglig diskusjon om hva som skal være dimensjonerende laster, uten å måtte forholde seg til et matematisk språk. Vi kan for eksempel si rømningssikkerheten i en tunnel skal dimensjoneres for en «brann i et vogntog med gjennomsnittlig trafikk». Der probabilistiske analyser gir svar i sannsynlighet for å mislykkes, gir deterministiske analyser svar i faktiske tidsmarginer for konkrete scenarioer, som vi enkelt kan se for oss. Utfordringen med deterministiske analyser er at valget av dimensjonerende scenarioer, eller TVHer, får en avgjørende betydning. Hvordan skal vi velge riktig nivå? Vil «dagens» TVH være hensiktsmessig for trafikktutviklingen vi forventer de neste 50 årene? Kvalitet på data er, som for probabilistiske analyser, en utfordring, som

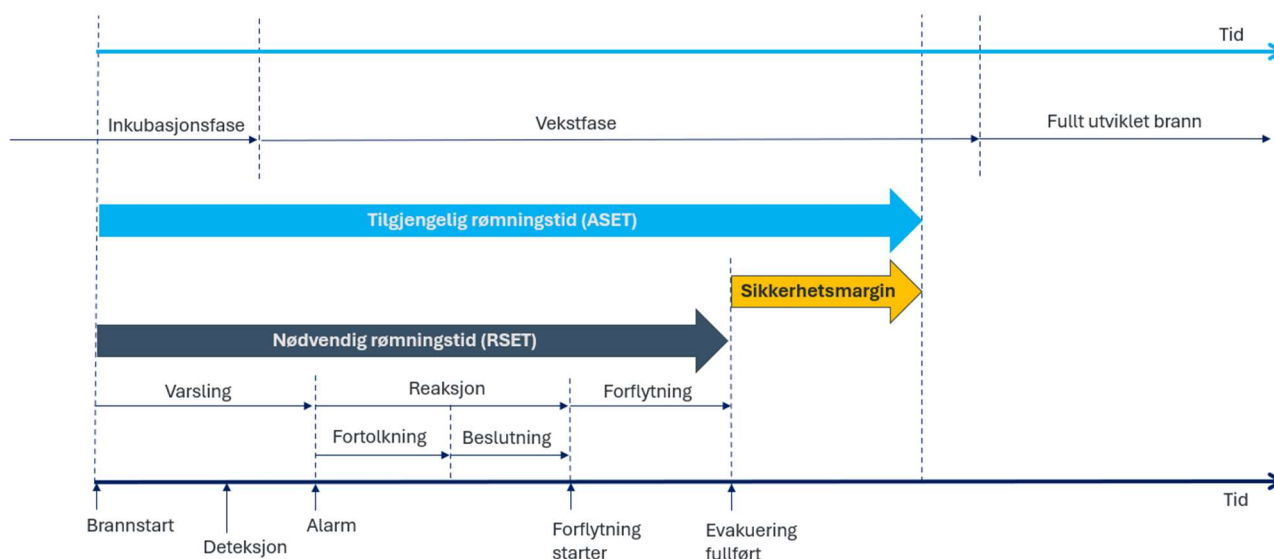


også her kan kompenseres ved å gjøre sensitivitetsanalyser for å oppnå robuste konklusjoner. Sensitivitetsanalysene i deterministiske studier vil gi utslag på de faktiske tidsmarginene, mens de i de probabilistiske studiene påvirker den samlede sannsynligheten for «systemsvikt». Førstnevnte kan være noe enklere, dvs. mindre abstrakt, å forholde seg til.

I denne studien nøyer vi oss med å gi en overordnet beskrivelse av de to analyseteknikkene, men har ikke til hensikt å anbefale den ene eller den andre. Teknikkene har samme selvredningsmodell i bunn, men bruker ulike språk i analysene og resultatene. Valg av analyseteknikk bør avhenge av hvilket språk interessentene forstår og hvordan resultatene skal evalueres. I prinsippet burde begge teknikkene gi samme svar med hensyn til valg av sikkerhets- og beredskapsløsninger for tunnelen, og det er også fullt mulig å kombinere begge teknikkene i samme studie. Felles for begge teknikkene er avhengighet og kvalitet på data som inngår i modeller. I denne studien ser vi nærmere på data for utvalgte deler av selvredningsmodellen.

2.2 Modellering av tilgjengelig rømningstid, t_{tilgj} .

Figur 2 gir oversikt over vanlig faseinndeling av hhv tilgjengelig og nødvendig rømningstid. I denne studien ser vi nærmere på rømning ved brann, som typisk modelleres gjennom en inkubasjonsfase, vekstfase, fase for fullt utviklet brann og avkjølingsfase. Dette kommer vi nærmere tilbake til i kap. 3.1. Omfanget av de ulike fasene er avhengig av mange forhold, eksempelvis tennekilde, brennbare materialer ved tennekilden, muligheter for brannspredning og maksimal effekt basert på brannenergi og tilgjengelig luftmengde. Ideelt sett er det ønskelig at et branntilløp detekteres i inkubasjonsfasen, som vist i Figur 2, og håndteres før brannen får utvikle seg inn i vekstfasen. Dette forutsetter at det finnes systemer som kan detektere varmgang i kjøretøy, røykutvikling i tunnelen e.l. I de fleste norske tunneler finnes det ikke slikt utstyr og brannen detekteres først av sjåfør, som varsler nødetater og/eller VTS gjennom nødtelefon/slokkeapparat, eller ved at automatisk hendelsesdeteksjon detekterer «stanset kjøretøy». I mange tilfeller vil brannforløpet være langt ut i inkubasjonsfasen, kanskje over i vekstfasen, før deteksjon skjer. På dette stadiet forverres ofte forholdene i tunnelen raskt. Det er en utfordring å identifisere branntilløp i inkubasjonsfasen, men Figur 2 illustrer at det ligger en mulighet for å skape større sikkerhetsmarginer for trygg evakuering ved enda tidligere deteksjon av en mulig hendelse.



Figur 2: Selvredningsmodellen med faseinndeling for tilgjengelig rømningstid



Ved brann i et lastet vogntog, med stor potensiell branneffekt, vil det gjerne oppstå kritiske (skadelige eller dødelige) forhold i tunnelen i løpet av brannens vekstfase, som illustrert i Figur 2. Ved brann i et mindre kjøretøy kan kritiske forhold først oppstå i fasen fullt utviklet brann, ev. at brannen ikke har potensial til å utvikle kritiske forhold i tunnelen. Spesifikke analyser av brannforløpet i tunnelen må se nærmere på temperaturutvikling, produksjon av giftige gasser, nivåer for varmestråling, etc. Resultatene må deretter sammenholdes med definerte kriterier for hva som regnes som kritisk, dvs. helsefarlig og/eller dødelig, for å bestemme tidspunktet, $t_{\text{tilgj.}}$.

2.3 Modellering av nødvendig rømningstid, $t_{\text{nødv.}}$

Nødvendig rømningstid deles, som illustrert i Figur 2, gjerne opp i hhv. varslings-, reaksjons- og forflytningstid. Reaksjonstiden deles gjerne videre opp i fortolknings- og beslutningstid.

Varslingstiden er tiden fra et brannforløp starter til det gis et varsel om pågående brannforløp til trafikanter i tunnelen. Det er utfordrende å definere når et brannforløp starter, og avhenger sterkt av tennkilden og videre brannutviklingsmuligheter. I analyser av rømningssikkerhet må det vurderes hva som er første muligheten for deteksjon, avhengig av hvilke deteksjonssystemer som finnes i tunnelen. Hvordan gis trafikantene informasjon om hendelsen? Hvor stor forsinkelse skal det være mellom deteksjonstid og varslingsstid? Hvilken informasjonsverdi finnes i varselet som gis?

Fortolkningstiden er tiden det tar fra trafikantene har fått et varsel om brann, til de anerkjenner at det må tas et valg som bryter med opprinnelig plan for å passere gjennom tunnelen, og forholde seg til branntrusselen. Beslutningstiden er tiden trafikantene bruker på å kartlegge beslutningsalternativer og ta et valg om å evakuere, for eksempel til fots via tverrforbindelser til annet tunnellop eller snu og kjøre ut. Reaksjonstiden er summen av fortolknings- og beslutningstid, og avhenger av hvorvidt de anerkjenner risikoen de står ovenfor. Dette er igjen avhengig av informasjonen som gis gjennom varslings-, avstand til hendelsen (synlig/ikke synlig), kunnskap om tunnelens sikkerhetsutstyr og fluktmuligheter og generell bakgrunnskunnskap om tunnelsikkerhet.

Forflytningstiden er tiden det tar fra trafikantene har valgt å starte evakuering til de er kommet til et sikkert sted. Sikkert sted kan være et røykfritt område i tunnelen (for eksempel oppstrøms brannstedet i en tunnel med brannventilasjon), tverrforbindelse, tverrslag, rømningstunnel, tilfluktsrom, eller ute i det fri. Forflytningstiden er avhengig av avstanden til det som defineres som sikkert sted i analysen, og hvorvidt trafikantene bruker kjøretøy eller går til fots. Muligheten for å snu, kjøre ut og/eller ta seg ut en nødutgang kan avhenge av situasjonen som oppstår, for eksempel om det er trengsel eller ikke.

I rømningsanalyser må det gjøres mange forutsetninger, som igjen bygger på tilgjengelige tiltak og/eller utforming av tunnelen, som analytikeren må identifisere og vurdere betydningen av, jf. veileder for risikovurderinger (SVV, 2024a). Denne studien er avgrenset til å se nærmere på forflytningstid, i form av ganghastigheter til fots, men diskuterer også forhold som har betydning for reaksjonstid.



3 Resultater: kunnskapsoversikt og anbefalinger

3.1 Branneffekter og -utvikling i ulike kjøretøy

3.1.1 Introduksjon

Brann i tunnel er en alvorlig hendelse som kan få store konsekvenser også med tanke på samfunnssikkerheten i Norge. Fra og med 2014 har «brann i tunnel» vært med i DSBs Analyse av krisescenarioer som kan ramme Norge. Scenariet ble videreført i risikobilde i 2019 hvor man regner det som sannsynlig at det vil skje en alvorlig tunnelbrann i Norge i løpet av noen tiår (DSB, 2019).

Valg av brannscenario er en sentral del for å gjennomføre risikovurdering av vegtunneler (SVV, 2024a). Scenariet som legges til grunn vil si noe om hvilke ulykkeslast som vegtunnelen er dimensjonert for å motstå. Som et ledd i en risikovurdering vil valg av dimensjonerende brannscenario være en parameter som påvirkes av den aktuelle tunnelens særtrekk, men også handlingsrommet for løsningsvalg og begrensninger for fremtidig bruk av tunnelen. For eksempel en tunnel som utelukkende prosjekteres med utgangspunkt i personbiler, kan ikke uten videre ta imot tungtrafikk om dette skulle være aktuelt i fremtiden. Valg av brannscenario og designbrann må derfor være en del av beslutningsprosessen når man gjennomfører en risikovurdering.

Dette kapitlet skiller mellom begrepene brannscenario og designbrann på følgende måte (Borg, Njå & Torero, 2015):

- **Brannscenario:** er en sekvensiell beskrivelse av en hendelse/scenario, i dette tilfelle knyttet til brann i en aktuell tunnel. Dette kan for eksempel være «brann i tre personbiler på nattestid ved tunnelportal ifm. Kolonnekjøring», eller «brann i lastebil lastet med bygningmaterialer midt i tunnelen». Brannscenariene etableres i risikovurdering knyttet til den aktuelle tunnelen og kan defineres som troverdige verstefallshendelser (TVH) for tunnelen. Viser til veileder for risikovurdering av brann i vegtunnel (SVV, 2024a) for detaljer om etablering av brannscenarier.
- **Designbrann:** Er en kvantitativ beskrivelse av branntekniske parametere for et brannscenario som man skal analysere videre. Når brannscenario er etablert må det detaljeres en designbrann for det aktuelle brannscenario, og det er det som omhandles i dette kapitlet. Designbrann i dette tilfellet betyr en kvantitativ beskrivelse av det faktiske brannforløpet og er særlig knyttet til parametere som maksimal branneffekt, brannvekstrate, røykproduksjon, produksjon av giftige gasser etc. Disse parameterne vil være avhengig av:
 - type kjøretøy: personbil, buss, tunge kjøretøy osv.
 - last: farlig vare eller annet
 - drivstoff: bensin, diesel eller batteri
 - særtrekk ved den aktuelle tunnelen: geometri, ventilasjon, temperatur, osv.

Særtrekk ved tunnelbranner:

Brann i vegtunnel skiller seg fra brann i det fri på flere måter. I det fri har varm røyk fra brannen mulighet til å stige fritt og innblanding av luft i røyken vil redusere temperaturen og fortynne røyken.

I en tunnel derimot, er situasjonen annerledes. Ventilasjonen er begrenset av selve tunnelen og varm røyk kan ikke forsvinne like lett til omgivelsene, som igjen fører til at varme akkumuleres i tunnelen. Den økte temperaturen fra brannen og røyken vil også øke temperaturen til annet brennbart materiale som igjen fører til økt brannvekst (raskere brannvekst) sammenlignet med en brann i det fri.

Dette fører til at ved en brann i tunnel vil omgivelsen til brannen i stor grad påvirke brannforløpet.



3.1.2 Designbranner i regelverk

Designbranner som benyttes i forbindelse med tunnelsikkerhet deles vanligvis mellom:

1. Designbranner basert på angivelse av maksimal branneffekt (MW) kombinert med beskrivelse av vekst- og avkjølingsfase.
2. Designbranner basert på tid-/temperaturkurver.

Type 2 designbranner benyttes typisk i forbindelse med beskyttelse av bærende konstruksjoner og brannteknisk dimensjonering av passiv brannbeskyttelse. Designbrannen er definert i standardiserte tid-/temperaturkurver som for eksempel ISO 837, hydrokarbon-kurve (HC-kurven) og RWS-kurven. Disse designbrannene omtales ikke videre i denne studien.

Type 1 designbranner benyttes i deterministiske analyser av brann i tunneler knyttet til for eksempel personsikkerhet, beredskapsplan og dimensjonering av ventilasjonssystemer. Disse designbrannene skal baseres på det relevante brannscenario i den aktuelle tunnelen ut ifra tunnelens særtrekk. Dette inkluderer informasjon om tunnelens utforming, trafikk, andel tunge kjøretøy, transport av farlig gods og eventuelle brannverntiltak som vil påvirke selve brannforløpet.

I henhold til PIARC (2017) beskrives gjerne brannscenarier preskriptivt i ulike lands regelverk. Dette innebærer at det er gitte brannstørrelser som skal benyttes i risikoanalyser. Det er stor variasjon mellom land og tunneltype, og maksimal HRR kan variere fra 20 til 300 MW.

I Norge er det i N500 Vegtunneler (SVV, 2024b) angitt preskriptive designbranner avhengig av tunnelklasse (ÅDT, lengde etc.) mellom 50 og 100 MW. Disse designbrannene benyttes hovedsakelig som dimensjonerende branneffekt for dimensjonering av brannventilasjon, mens eksponeringskurven (HC) benyttes for brannteknisk dimensjonering av bygningsdeler og konstruksjoner.

Tunnelklasse	Dimensjonerende branneffekt
A, B, C	50 MW
D	100 MW
E	50 MW
F	100 MW

Figur 3: Tabell som viser Dimensjonerende branneffekt i ulike tunnelklasser basert på eksponeringskurve HC (hydrokarbon-brann) og en varighet på 60 minutter (SVV, 2024b).

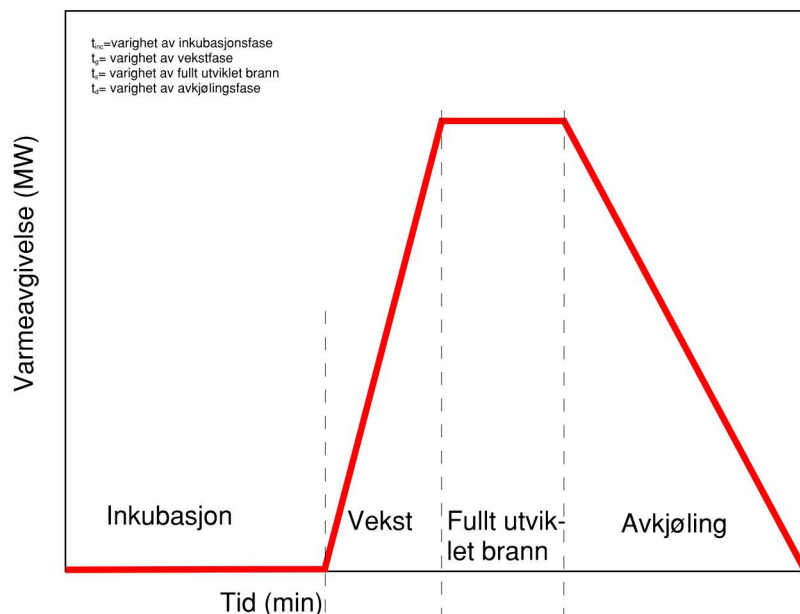
Det finnes en god del veiledning og metodebeskrivelser for fastsettelse av designbranner tilgjengelig i litteraturen. Disse er blant annet basert på fullskalaforsøk, beregninger og undersøkelser fra tidligere inntrufne branner.

Dette kapittelet tar utgangspunkt i boken *Tunnel Fire Dynamics* av Ingason et al. (2015) og rapporten *Design Fire Characteristics for Road Tunnels* (PIARC, 2017). Begge disse referansene er anerkjent internasjonalt og gir en grundig gjennomgang av fagfeltet frem til og med 2015. For å fange opp ny kunnskap etter 2015 og frem til i dag, er det også gjennomgått nyere litteratur på området gjennom litteratursøk i faglige databaser, se kapittel 1.2 for beskrivelse av metoden.



3.1.3 Designbrann

Som nevnt i kapittel 2.2 beskrives gjerne et brannforløp som vist i Figur 4.



Figur 4: Idealisert designbrannkurve. Basert på PIARC (2017).

Figur 4 viser en idealisert kurve over utviklingen av branneffekt over tid fra en typisk brann i tunnel.

- Inkubasjonstid: fra hendelse starter og frem til vekstfasen starter (for eksempel: ulmebrann, varmgang).
- Vekstfase: markeres ved overgangen fra inkubasjon til en etablert flammebrann. Vekstfasen til brannen sier noe om hvor fort brannen øker i effekt. Dette vil variere ut ifra det aktuelle scenariet. Vekstraten blir ofte representert med en eksponentiell kurve ($HRR = \alpha t^2$).
- Fullt utviklet brann (steady-state) oppnås når brannen har nådd sin maksimale effekt. Den maksimale effekten en brann oppnår vil være styrt av enten tilgangen til brennbart materiale (brenselskontrollert), eller tilgangen til oksygen (ventilasjonskontrollert):
 - Brenselskontrollert brann; innebærer at den maksimale branneffekten er kontrollert av tilgangen til brennbart materiale. Eksempel på et slik brannforløp vil være en fullt utviklet brann i et mindre kjøretøy. Det er med andre ord tilgangen til brennbart materiale som kontrollerer hvor høy branneffekten blir.
 - Ventilasjonskontrollert brann; innebærer at den maksimale branneffekten er kontrollert av hvor mye oksygen fra lufta som tilføres brannen. Dette gjelder for de største brannene hvor scenariet inkluderer flere biler eller tunge kjøretøy. Da dette brannregimet er avhengig av tilgangen til oksygen til selve brannen vil luftstrømningene i den aktuelle tunnelen påvirke brannforløpet i stor grad.
- Avkjølingsfase: Indikerer fasen hvor det brennbare materiale er brent opp og branneffekten avtar.



Valg av designbrann for en tunnel vil være avhengig hvilken trafikk som tillates i den aktuelle tunnelen. Figuren under viser typiske verdier for maksimal branneffekt basert på kjøretøytype. Tabellen under er hentet fra PIARC (2017) tabell 2.

Maksimal branneffekt for ulike type kjøretøy	
Type kjøretøy	Maksimal branneffekt (MW) i ett kjøretøy
Personbil	5 - 10
Liten lastebil	15
Buss	20
Lastebil, tungtransport inntil 25 tonn*	30 - 50
Tungtransport, typisk 25-50 tonn*	70 - 150
Tankbil med drivstoff (bensin, diesel)	200 - 300

*avhengig av mengde og type last

Figur 5: Maksimal branneffekt for ulike typer kjøretøy (PIARC, 2017).

Det er verdt å bemerke at verdiene som vises over gjelder for brann i bare ett kjøretøy. På bakgrunn av erfaring med inntrufne brannhendelser og fullskala branntester viser det seg at dette kan føre til for lave branneffekter (PIARC, 2017).

Maksimal branneffekt

Den beste måten å fastsette maksimal branneffekt (HRR – Heat Release Rate) for brann i et kjøretøy i tunnel er gjennom fullskalaforsøk. Basert på gjennomgangen til Ingason et al. (2015) kan følgende oppsummeres fra de største branntestene:

- HRR-maks fra personbil: 1,5 - 8 MW, med majoritet under 5 MW.
- HRR-maks to personbiler: 5,6 – 10 MW.
- HRR-maks tre personbiler: 7 – 19 MW.
- HRR-maks buss 25 – 30 MW – basert på få antall tester.
- HRR-maks for HGV (heavy goods vehicle) 13 – 202 MW. Stor variasjon basert på last.



Tabellen under viser en oppsummering av fullskalatester som er gjennomført, hentet fra PIARC (2017) tabell 5. Målingene i de ulike kolonene samsvarer med fasene vist i idealisert designbrannkurve over (Figur 4).

	T _{inc} (min)	T _c (min)	T _s (min)	T _d (min)	T _T (min)	Gjennomsnittlig branneffekt (MW)
Kjøretøy	5	7	36	15	63	1.5 - 8
Trekrybbe	4	9	62	2	77	9,5 - 27
Heptan [Eureka]	0	46	35	17	98	12 - 13
Varebil/buss [Eureka]	3	5	48	41	97	6,1 - 28
Varebil [Benelux]	5	4	12	9	30	16 - 26
Tungtransport [Eureka]	8	4	30	15	57	130 - 320
Tungtransport [Runehamar]	3	7	30	13	53	69 - 201

Figur 6: Oppsummering av fullskalatester. Fritt oversatt fra PIARC (2017).

Som det fremkommer av Figur 6, er det store variasjoner med tanke på maksimal branneffekt for de ulike kjøretøytypene.

Erfaring fra branner i Norge

Det har vært flere større tunnelbranner i Norge i senere tid, hvor man har utført undersøkelser og estimert maksimal branneffekt. En oppsummering basert på Statens Havarikommisjons rapporter, finnes i Bjelland et al. (2021):

- Oslofjord 1 (2011): 70 – 90 MW
- Gudvanga 1 (2013): 25- 45 MW
- Skatestraum (2015): 440 MW
- Gudvanga 2 (2015): 50 MW
- Fjærland (2017): 20 MW

Som man kan se, er det store variasjoner i den maksimale branneffekten. Brannen i Skatestraumtunnelen i 2015 skiller seg ut med særdeles høy estimert branneffekt fra brann i bensin fra en tankbil.

Det er verdt å merke seg at i DSBs Analyse av krisescenarioer (AKS) som kan ramme Norge, er «Brann i tunnel» definert som et ulykkesscenario med stort katastrofepotensial (DSB 2019). I scenariet har man tatt utgangspunkt i en branneffekt på 170 MW og varme på 1000 °C. DSB skriver at krisescenarioene «er hendelser som det norske samfunnet bør kjenne til for å vurdere risikoreduserende tiltak mot. Ikke fordi de nødvendigvis inntreffer akkurat slik de beskrives i AKS, men fordi de representerer påkjenninger som et robust samfunn må være forberedt på å håndtere» (DSB, 2019:19).



Elektriske kjøretøy

Alternative fremdriftsteknologier, inkludert batterielektriske kjøretøy (BEV), blir stadig mer utbredt. Selv om disse kjøretøyene fortsatt utgjør en liten del av bilparken, forventes en økning i antallet på grunn av myndighetspolitikk og teknologiske fremskritt innen alternative drivstoff. Alternative energikilder i kjøretøyene vil endre sikkerhetsrisikoen i tunneler, inkludert brannkarakteristikker og giftige utslipp med betydning både for brannscenarier og designbrann.

Tidligere bekymringer om brannsikkerheten til batterier og utfordrende slukkeforhold har ført til flere undersøkelser. De fleste tester har fokusert på battericeller eller -pakker, men tester med faktiske kjøretøy er fortsatt sjeldne.

I 2018 startet den Østerrikske regjeringen et forskningsprosjekt om BEV-ulykker i tunneler, som inkluderte branntester av personbiler og simuleringer for tunge kjøretøy (Sturm et al., 2022). Branntester har evaluert varmeutvikling og produksjon av giftige stoffer. Forskjellige energilagringsteknologier (f.eks. Li-ion-batterier og diesel) ble sammenlignet, og ulike slukketeknikker ble testet. Dette arbeidet fokuserer på fullskala branntester av personbiler i vegtunneler.

RISE har også utført branntester av elektriske kjøretøy og arbeidet til Hynynen et.al. (2023) presenter resultatene fra seks store branntester, inkludert tre elektriske kjøretøy, to med forbrenningsmotor og ett elektrisk kjøretøy uten batteripakke. Forsøkene her viser at brannscenario og kjøretøymodell påvirker varmeutviklingen, mer enn drivlinjetypen. Med hensyn på produksjon av giftige gasser var hydrogenfluorid mer fremtredende i elektriske kjøretøy enn kjøretøy med fossilt drivstoff. I tillegg til at metaller som mangan, nikkel, kobolt og litium ble funnet i høyere konsentrasjoner i batterielektriske biler (Hynynen et.al. 2023).

Undersøkelser utført av Sun et al. (2020) fokuserer på brannsikkerhetsproblemer knyttet til termisk runaway og brann i Li-ion-batterier. Termisk runaway kan oppstå ved ekstreme forhold, som feil operasjon eller trafikkulykker, og kan føre til giftige gassutslipp, brann og eksplosjon. Gjennomgang av fullskalatester viser at varmeutviklingen og farene ved en brann i elektriske kjøretøy er sammenlignbare med fossildrevne kjøretøybranner. Imidlertid viser forsøkene at det kan forventes økt giftighet fra brannrøyken fra en brann i batteriet, som medfører blant annet dannelsen av HF-gass som utvikles ved brann i Li-ion batterier.

Videre viser undersøkelsen til Sun et al. (2020) at branner er vanskelig å slokke pga. potensialet for re-antennelse av batterier og vanskeligheter med å kjøle selve batteripakken i bilene. Det er derfor behov for store mengder vann for å kjøle og eventuelt slokke en brann som involverer batteriet. Sturm et al. (2022) beskriver også at brann i elektriske batterier kan være utfordrende å slokke for brannvesenet, selv om det er gjort fremskritt med tanke på slukketeknikk og utstyr.

Brannvekst og varighet

Brannvekst sier noe om hvor rask brannens effekt øker opp til maksimal branneffekt. En vanlig måte å beskrive dette på er ved hjelp av en αt^2 -formel. Alfa er her en konstant og t^2 er tid opphøyd i annen, gitt i sekunder.

Typiske alfa-verdier, som vist i figuren under, kan være 0,01 kW/s² for personbiler og 0,1 kW/s² for buss. Som et eksempel kan man se på branneffekt etter 5 minutter (300 sekunder) med disse brannvekstene:

- Alfa: 0,01 kW/s² x (300 sekunder)² → 900 kW
- Alfa: 0,1 kW/s² x (300 sekunder)² → 9000 kW



Valg av brannvekst for det aktuelle brannscenariet er en viktig forutsetning for selve analysen. Ingason et al. (2015) anbefaler følgende dimensjonerende branneffekter med tilhørende vekstfase og avkjølingsfase.

Type kjøretøy	$Q_{\max}$ (MW)	$\alpha_{g,q}$ (kW/s ²)	$\alpha_{D,q}$ (s ⁻¹)
Bil	4	0,01	0,001
Buss	30	0,1	0,0007
Trailer ^a	15-130	-	-
Tog ^b	15	0,01	0,001
T-bane ^c	35	0,3	0,001

^a Brannbelastningen for en trailer kan variere veldig

^b Stålkonstruksjon

^c Aluminiumkonstruksjon

Figur 7: Anbefalte verdier for designbranner (Ingason et al., 2015).

Det er verdt å merke seg at den maksimale branneffekten er her lavere enn resultatet fra forskningsforsøk presentert tidligere i dette kapittelet, og lavere enn flere av de inntrufne brannene som er analysert også i Norge.

Tilsvarende for brannvarighet, er det stor variasjon mellom anbefalinger og erfaringer fra forsøk og inntrufne branner. Varigheten til en brann vil avhenge av tilgang på brennbart materiale, scenario og det lokale brannvesenet med tanke på å slokke brannen.

På grunn av den store variasjonen i branneffekt, varighet og brannvekst ønsker ikke PIARC i sin rapport å gi konkrete anbefalinger til designbrann, men heller fokusere på informasjon fra hendelser og forståelse av brannene (PIARC, 2017).

3.1.4 Anbefaling av metode for etablering av designbrann i brannteknisk risikoanalyse

Etablering av designbranner for å benytte i risikovurdering av brann i vegtunneler vil påvirke sikkerhetsnivået og fremtidig fleksibilitet for tunnelen i stor grad. Som det fremkommer av gjennomgangen i dette kapitelet, er det stor variasjon i designbranner som finnes i litteraturen for preskriptive designbranner, erfaring fra branner og forsøk. Dette skyldes i stor grad at brannforløpet påvirkes av brannscenariet som analyseres og særtrekkene til den aktuelle tunnelen. Det kan derfor ikke gis en konkret kvantitativ anbefaling som gjelder for designbrann for alle tunneler, da hovedhensikten med en designbrann til et spesifikt brannscenario nettopp er å fange opp disse forholdene. Etablering av designbranner bør baseres på et holistisk perspektiv for den aktuelle tunnelen, som inkluderer relevante særtrekk (Borg, Njå & Torero, 2015). Dette vil inkludere, men ikke begrenses til:

- Geometri – tverrsnitt, lengde, kurvatur og stigning
- Trafikk og andel tunge kjøretøy samt transport av farlig vare.



- Det lokale brannvesenets tilkomst og slagkraft, for eksempel med tanke på håndtering av brann i elektriske kjøretøy, farlig stoffer og HGV-branner.
- Naturlig trekk, ventilasjon og eventuelle meteorologiske forhold – langsgående røykventilasjon er vanligvis nødvendig med tanke på personsikkerhet, men vil påvirke brannintensiteten.
- Andre særtrekk som vil påvirke brannforløpet:
 - Oppstillingsplass for kolonnekjøring (brannspredning)
 - Sesongbasert trafikkvariasjon etc.

Anbefalingen er derfor at det kreves at det utføres en grundig analyse av hvordan særtrekk ved den aktuelle tunnelen påvirker brannforløpet. Det er også verdt å merke seg at det forskes mye på området batteriteknologi og alternative drivstoff, som vil kunne påvirke designbrann og brannscenario i en tunnel. Støtte til å vurdere dette kan finnes i publikasjoner fra for eksempel RISE, PIARC, og anerkjente forskningsinstitusjoner som er benyttet i denne rapporten.

3.2 Parametere for modellering av brannutvikling og røykproduksjon

Bruk av avanserte modeller, som for eksempel numeriske strømningsmodeller (CFD), er relativt hyppig brukt i forbindelse med dimensjonering og prosjektering av brannsikkerhet i tunneler. Dette kan være bruk av CFD-modeller for å dimensjonere røykventilasjonsanlegget og beregne tilgjengelig tid til rømning. Ved bruk av analysemodell vil valg av designbrann i selve modellen (se over) være den viktigste parameteren som bestemmes, men det er også flere andre parametere som er viktig for å oppnå troverdige resultater fra modellen. I denne rapporten vil vi ikke beskrive alle relevante analysemetoder og parametere, men vise til noen sentrale. I tillegg vil relevante parametere variere på bakgrunn av formålet med den aktuelle analysen. For eksempel, om analysen utelukkende utføres for å dimensjonere ventilasjonshastighet, vil man kanskje ikke bruke like mye ressurser på å undersøke dannelse av giftige gasser, som man ville gjort om analysen skulle analysere kritisk rømningsforhold.

Vår anbefaling er at det legges en anerkjent veileder til grunn for analysearbeidet og at det dokumenteres at den modellen som skal benyttes er egnet for bruken i det aktuelle tilfelle.

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) er et kraftig beregningsverktøy for å analysere fluidstrømninger. CFD brukes innen mange ingeniørdisipliner som f.eks. innen aerodynamikk, prosessanlegg, forbrenning, ventilasjon, brannsikkerhet og meteorologi. CFD er et deterministisk verktøy, jf. kap. 2.1, som innebærer at resultatene er helt avhengig av antakelser som legges til grunn. Slike antakelser er initielle betingelser og grensebetingelser, og andre forhold som påvirker strømning (ventilasjon, brannkilder etc.) i strømningsdomenet. CFD krever at brukeren har sterke ferdigheter innen fysikk, dataanalyse og numerisk matematikk.

CFD-beregninger kan inndeles i tre steg for brukeren: pre-prosessering, prosessering, og post-prosessering. I pre-prosesseringen settes problemstillingen opp. Dette innebærer bl.a. å definere et strømningsdomene, geometri i domenet, grid, materialeegenskaper, grensebetingelser, ventilasjon og brannkarakteristikker. Prosesseringen er selve beregningen. Avhengig av gridets oppløsning er beregningstiden typisk fra noen få timer til opptil flere dager. Post-prosesseringen er visualisering av resultatene fra beregningene. Resultatene kan fremstilles som grafer, tabeller, eller mer avanserte plot i 3-D som viser strømningsvariabler i form av farger, som indikerer en strømningsvariabels verdi, eller 3-D overflater der en gitt strømningsvariabel har en gitt verdi. I noen tilfeller må resultatene prosesseres videre med Excel, Matlab, Python eller tilsvarende.



Fire Dynamics Simulator (FDS)

Fire Dynamics Simulator (FDS) er en CFD-kode egnet for beregninger av strømninger induisert av en brann. National Institute of Standards and Technology (NIST) i USA, i samarbeid med VTT i Finland, forvalter den åpne kildekoden. FDS har blitt utviklet i mer enn tre tiår, men ble først i februar år 2000 offisielt utgitt. Koden er globalt anerkjent av fagmiljøet og er den mest brukte koden i industrien for modellering av branner i de fleste land. Programmets hovedhensikt er å studere strømninger som involverer røykspredning, røykventilasjon, deteksjon, og varmetransport som f.eks. varmestråling fra brannen eller røyklaget.

FDS er sannsynligvis den mest brukte CFD-modellen i verden og er benyttet i en lang rekke studier og forsøk, inkludert brann i tunnel. Mye av grunnen til at FDS er så populært er at dette er et gratis program. Dette innebærer at programmet blir mye brukt og det finnes en stor mengde dokumentasjon i vitenskapelige tidsskrifter som dokumenterer bruken av programmet.

Validering og verifikasjon av CFD-modeller

Under er en beskrivelse av validering og verifisering som typisk utføres for CFD-modeller. Utgangspunktet her er FDS, som beskrevet over, men tilsvarende dokumentasjon finnes også for andre CFD-program.

Det skilles ofte mellom verifisering og validering, ved at verifikasjon er en kontroll av de matematiske modellene i programmet. Validering er en kontroll av fysikken, som vil si at det kontrolleres at programmet løser matematikken på riktig måte og at svarene er tilstrekkelig nøyaktig målt ut ifra det fysiske fenomenet som modelleres. Selv om verifikasjon naturligvis er viktig for utvikling av modellen og vurdering av egnethet, er fokuset på validering i det videre, da dette dreier seg om gyldigheten til modellen.

FDS er validert av NIST og av andre forskningsinstitusjoner over hele verden. Dokumentasjon på validering er beskrevet i Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation (NIST, 2024). Siden FDS er fritt tilgjengelig for alle, er også alt av dokumentasjon tilgjengelig for alle.

FDS ble i utgangspunktet utarbeidet for å simulere branner i industrien i USA, samt skogbranner. Dvs. relativt små branner i store lokaler og branner utendørs, med andre ord branner som er brenselkontrollert. Over årene har FDS blitt utviklet til å simulere mer krevende brannfenomener som underventilerte branner og aktive branntekniske tiltak som sprinkler. Det er likevel knyttet en del usikkerhet til resultatene dersom analysen inneholder kompliserte fysiske fenomener.

Den aller viktigste inndataparameteren i brannmodeller er branneffekten. Som operatør av FDS kan branneffekten spesifiseres eller predikeres. Dersom branneffekten spesifiseres, anvendes data fra litteratur, eller et estimat basert på ligninger fra brannndynamikk. Predikeres branneffekten, spesifiseres brenselets egenskaper i stedet. Branneffekten blir da predikert vha. en avdampingsmodell (væskebranner) eller en pyrolysemodell (faststoffbranner). Modellene er basert på tilbakestråling fra flammen, hvor varmen på brannens overflate konserveres. For at en slik modell skal fungere tilfredsstillende er det helt avgjørende at brannkarakteristikkene er riktig modellert. En liten feilmargin i f.eks. flammehøyde eller -temperatur, kan gi store utslag på den predikerte branneffekten. Blir branneffekten feil predikert er resultatene ikke pålitelige. Utviklingen av modellene for predikering av branneffekt er per nå på forskningsstadiet og er i begrenset grad validert. Slike modeller må anvendes med stor varsomhet og stiller følgelig høye krav til kompetanse.



Parametere for brannutvikling og røykproduksjon

Valg av parametere for røykproduksjon er viktig dersom det er ønskelig å analysere røykspredning og eventuelt giftigheten til røyken. Modeller som er tilgjengelige, som CFD-modeller beskrevet tidligere, har mulighet til å modellere røykproduksjon og spredning av røykpartikler i tunnelen.

Imidlertid er disse analysene helt avhengig av pålitelige inndata for å kunne gi troverdige resultater. Parametere for røykproduksjon er materialavhengig, men også scenarioavhengig. Det betyr at det vil være ulik sammensetting av røyken om det er en brenselskontrollert brann eller ventilasjonskontrollert brann.

I mange situasjoner kan det være aktuelt å vurdere tilgjengelig tid til rømning i forbindelse med en brannteknisk analyse av tunnelbrann, og en aktuell kritisk faktor for å bestemme kritisk forhold er sikt. Det vil da si at man analyserer et brannforløp og beregner tiden til sikten gjennom røyken er på kritisk nivå. Dette utgjør den tilgjengelige tiden til rømning.

Følgelig er det viktig at røykproduksjonen fra brannen gir et realistisk bilde av situasjonen og en sentral parameter for dette er sotproduksjonsraten (soot yield). Dette er en faktor som typisk defineres av personen som utfører den branntekniske analysen. Under er eksempler for sotproduksjon, «soot yield» fra typiske stoffer (Hurley, 2015: table A.39). Det er verdt å merke seg at dette er data for godt ventilerte branner:

- Treverk: 0,001 g/g
- Propan: 0,024 g/g
- Hydrokarbon: 0,059 g/g
- Polystyrenskum (isopor, skumplast, etc): 0,18 – 0,21 g/g
- Polyuretanskum (madrasser, møbelstopp, klesfór, etc): 0,131 – 0,227 g/g

Som nevnt over er produksjonen av sot materialavhengig, men også avhengig av selve scenariet. Underventilerte branner (ventilasjonskontrollerte branner) innebærer at brannen begrenses av tilgang på oksygen i lufta. Dette fører til ufullstendig forbrenning og «svartere» røyk. BRANZ Study report 185 (Robbins & Wade, 2007) har sett på endring i sotproduksjon fra branner i boliger og har følgende forslag til sotfraksjon for hhv brenselskontrollerte (pre-flashover) og ventilasjonskontrollerte (post-flashover) branner:

Sotproduksjonen ($\text{kg}_{\text{sot}}/\text{kg}_{\text{brensel}}$) dobles når brannen er underventilert, dette er likt for ulike typer brensel.

- 100 % Polyuretan – 0,20 (godt ventilert) – 0,40 (underventilert)
- 50% Polyuretan og 50% tre – 0,11 (godt ventilert) – 0,22 (underventilert)
- 100% tre – 0,015 (godt ventilert) – 0,030 (underventilert)

Materialet som presenteres over er ikke nødvendigvis relevant for tunneler. Imidlertid viser det spennet i sotproduksjon, som man kan få bare ved endret brannregime. I dette tilfelle er det faktor 2 endring i sotproduksjon, som vil ha stor innvirkning på analyse av tilgjengelig tid til rømning. En fullt utviklet brann er et komplekst fenomen, og kan inneholde brann i ulike regimer (over-/underventilert) på samme tid.



Giftighet til røyk

I enkelte situasjoner kan det være ønskelig å analysere giftigheten til røyken, for eksempel i analyse av eksponering av giftige stoffer. Tilsvarende som for sot vil giftigheten til røyken som produserer fra en brann være avhengig av det brennbare materialet. Det er også noe forskjell på om det dreier seg om et tradisjonelt kjøretøy eller elektrisk kjøretøy.

Tradisjonelt har branntester av batterier vært begrenset til battericeller og mindre batteripakker. Derfor ble det i Østerrike igangsatt arbeid med fullskallatester av brann i elektriske kjøretøy i tunnel. Testene fokuserte på brannkarakteristikker som varmeavgivelse og giftighet i røyk, slökkemetoder for brannvesenet og konsekvensen av brannen til tunnelens infrastruktur (Sturm et al., 2022). I undersøkelsene til Sturm et al. (2022) ble røykproduksjon fra både elektriske kjøretøy og tradisjonelle kjøretøy undersøkt. Studien viser at enkelte stoffer vil være mer fremtredende enn andre basert på drivlinje, for eksempel HF-produksjon fra brann i batteri.

Tilsvarende funn ble gjort av Hynnen et.al. (2023), hvor det var produksjonen av HF som utgjorde den største forskjellen mellom brann i elektriske kjøretøy og tradisjonelle kjøretøy. I tillegg ble det funnet høyere konsentrasjoner av batterispesifikke metaller (nikkel, litium, etc.) fra elektriske kjøretøy og bly i kjøretøy med forbrenningsmotor.

3.2.1 Automatiske sløkkesystemer: påvirkning på brannutvikling og røykproduksjon

Slokkeanlegg (sprinkleranlegg) er generelt et effektivt tiltak for å redusere brannrisiko. Slike anlegg har lenge vært viktige for brann sikkerheten i bygninger, men med unntak av land som Japan og Australia, har slokkeanlegg vært lite benyttet i vegtunneler. De senere årene har imidlertid slokkeanlegg fått mer oppmerksomhet som et aktuelt tiltak, også i vegtunneler. Sverige har benyttet slokkeanlegg i flere av sine nye bytunneler (Lundström, 2023) og PIARC har de siste 30 årene utviklet en stadig mer positiv holdning til slokkeanlegg (Fixed Fire Fighting Systems, FFFS) (PIARC, 2016). I USA har slokkeanlegg blitt mer aktuelt, bl.a. som følge av brannen i Newhall Pass (California) i 2007, hvor en brann med tre involverte biler spredte seg til 30 kjøretøy. Tre personer omkom, ti personer ble skadet og tunnelen ble stengt ned for reparasjoner i seks uker. En lignende brann fant sted samme år i Burnley-tunnelen (Australia), hvor slokkeanlegg var installert. Her ble det ingen brannspredning og tunnelen kunne åpne etter fire dager (Harris, 2013).

Et slokkeanlegg aktiveres normalt tidlig i utviklingsfasen av et brannforløp og bidrar til å begrense videre brannvekst eller slukke brannen helt. Cheong m.fl. (2014) gjennomførte fullskallatester med deluge sprinkleranlegg i vegtunnel. Ved aktivering fire minutter etter deteksjon (definert som 60 °C målt under taket) fant de at varmeavgivelsesraten sank med 70 – 81 % sammenlignet med test uten sprinkler, og ingen av testene produserte en HRR over 50 MW (27 – 44 MW). Ved aktivering etter 8 minutter etter deteksjon var reduksjonen bare 31 %. Maksimal temperatur under tunneltaket 10 m nedstrøms brannen sank betraktelig, fra ca. 1000 °C uten slokkeanlegg til ca. 130 °C med slokkeanlegg. CO-produksjonen øker ved aktivering av slokkeanlegg, som følge av ufullstendig forbrenning (underventilert brannregime). I testene ble det funnet at CO-produksjonen var omtrent 20 ganger høyere med slokkeanlegg enn uten. Den faktiske økningen i tunnelen blir imidlertid lavere, fra 0,04 % vol til 0,19 % vol i testene til Cheong et al. (2014), som følge av at branneffekten begrenses og CO-produksjonen er avhengig av mengde materiale som forbrennes.

Li & Ingason (2021) gjennomførte nedskalerte branntester med en brann som representerte en potensiell (fullskala) effekt på ca. 100 MW. Testene viser, som Cheong m.fl. (2014), at tidlig aktivering er viktig for å oppnå god kontroll på brannen. Ved aktiveringstid på 1 min etter brannstart ble branneffekten begrenset til ca. 5 MW, og ved aktiveringstid på 4 min ble branneffekten begrenset til 11



MW. Under de verste testbetingelsene var fortsatt branneffekten begrenset til under 50 % av potensiell effekt. Lundström (2023) viser til tester i Runehamartunnelen, som viser at et godt designet delugesystem, også ved forsinket aktivering (aktivering ved 10 – 20 MW), klarer å slå ned en brann med stort effektpotensial (100 MW).

Branntester viser at slokkeanlegg er særlig effektivt for å begrense brannspredning til flere kjøretøy (Lemaire & Kenyon, 2006; Li & Ingason, 2021). Effekten kan forklares både ved nedkjøling av branngasser, men også gjennom å «forhåndsvæte» materialer, som gjør dem tyngre antenkelige. Temperaturen i ganghøyde, ca. 2 m over gulvet, begrenses også svært effektivt til verdier som ikke er skadelige for mennesker (Lemaire & Kenyon, 2006; Cheong m.fl., 2014), men CO-produksjonen øker som følge av mer ufullstendig forbrenning. Videre analysearbeid er nødvendig for å avklare slokkeanleggets effekt på brannutvikling, røykspredning og trafikanter i en evakueringssituasjon.

Utfordringer med slokkeanlegg

Frostsikring er en åpenbar utfordring med vannbaserte slokkeanlegg, ikke minst i norske fjelltunneler med svært lave utetemperaturer store deler av året. Dette gjelder både når anlegget står inaktivt med tørre rør i tunnelrommet, samt hvordan anlegget fungerer ved aktivering i en svært kald tunnel.

Det finnes begrenset erfaring med drift og vedlikehold av denne typen systemer i Norge. Tunnelmiljøet er utfordrende mht korrosjon, støv og snødriv, som kan påvirke systemets effekt over tid. Her må det hentes erfaringer fra andre land som har lengre erfaring med slokkeanlegg i tunneler.

Slokkeanlegg er ikke utelukkende positivt for brannrisiko i en tunnel hvor avstand til rømningsutgang er lang. Sikten i aktiveringsområdet begrenses, både som følge av produksjon av damp og omrøring av røyklaget. CO-produksjonen fra brannen øker, men denne effekten begrenses likevel noe av at varmeavgivelsesraten begrenses (Cheong m.fl., 2014). Effekten av høye temperaturer er også verre for mennesker i et vått miljø enn et tørt, jf. kapittel 3.4.1. CFD-analyser og en grundig gjennomgang av resultater fra tester vil bidra til å utrede konsekvensene av disse utfordringene.

Feilaktivering av slokkeanlegget kan gi utfordringer med sikt og eventuell isdannelse på kjørebanelen ved lave temperaturer. I lys av utfordringene er det viktig å finne enkle og robuste løsninger som sikrer enkelt vedlikehold og høy driftspålitelighet.

3.3 Evakuering til fots i vegtunneler

Evakueringsprosessen for en vegtunnel kan modelleres som «nødvendig rømningstid», der samlet rømningstid er summen av tid til deteksjon, tid til alarm/varsling, tid til fortolkning, tid til beslutning og tid til forflytning, jf. Figur 2. Alle disse størrelsene er i praksis usikre (stokastiske) variabler og avhengig av scenarioet, trafikantenes bakgrunnskunnskap/-erfaring m.m. I deterministiske analyser må det likevel gjøres valg av verdier for viktige variabler, som blir utgangspunktet for analysen. Sensitivitetsanalyser gir et bredere bilde.

I lange tunneler kan ganghastigheten være en vesentlig variabel for beregning av nødvendig rømningstid ved rømning til fots. I korte tunneler, eller tunneler med kort avstand til rømningsutganger, vil gjerne tiden mellom deteksjon og trafikantenes beslutning om å evakuere være dominerende. Variablene må også sees i sammenheng: dersom beslutningen om å evakuere tas for seint, vil trafikantene kanskje måtte evakuere i et røykfyllt miljø, hvor ganghastigheten reduseres sammenlignet med et miljø med god sikt.



I dette delkapittelet følger en kunnskapsoversikt knyttet til vesentlige variabler som inngår i rømningsanalyser. Det er, i tråd med studiens avgrensning, lagt mest vekt på forflytningsfasen og ganghastigheter i tunnel. Øvrige faser i rømningsprosessen diskuteres i den grad gjennomgått litteratur inneholder informasjon om disse.

3.3.1 Varslingsfasen

Trafikanter varsles og alarmeres om en brann på ulike måter: Gjennom direkte visuell kontakt med brannen, varslingsmedium i kjøretøy og/eller tunnel. I denne studien har vi ikke kartlagt tilgjengelig teknologi eller teknologi som kan forventes å være tilgjengelig i årene som kommer.

I varslingsfasen kan sikkerheten til trafikanter i tunneler forbedres gjennom tidligere deteksjon av hendelser, nøyaktig lokalisering av hendelsen, detektering og telling av kjøretøy og trafikanter, lokalisering av trafikanter relativt til hendelsen og tidlig og spesifikk varslingsmedium i kjøretøy og/eller tunnel. Systemer som understøtter disse funksjonene vil kunne redusere varslingstiden og påvirke reaksjonsfasen for både trafikanter, VTS-operatører og redningsmannskaper.

3.3.2 Reaksjonsfasen

Reaksjonsfasen omfatter tiden fra trafikanten er varslet om en hendelse til trafikanten har besluttet å forflytte seg mot en utgang, og deles gjerne videre inn i fortolknings- og beslutningstid. I tidligere branner ser vi at reaksjonstiden kan være svært lang, og i noen tilfeller uten avgrensning, dvs at trafikanten aldri iverksetter forflytning mot utgang. Brannene i Mt. Blanc-tunnelen (1999), Oslofjordtunnelen (2011), Gudvangatunnelen (2013) gir eksempler på dette. Flesteparten av de omkomne i Mt. Blanc-brannen ble funnet i eget kjøretøy (Duffé & Marek, 1999; Voeltzel & Dix, 2004).

Li et al. (2024) undersøker betydningen av stress i evakueringssituasjoner, både gjennom et litteraturstudium og eksperimenter. Studien beskriver bl.a. øyeblikkeopplevelser fra reelle branner. I Tauern-brannen (1999) rapporteres det om at trafikantene gikk ut av bilene, kikket seg rundt og en trafikanter tok bilder. Oppførselen relateres i studien til et «normalcy bias», der situasjonen ikke oppleves som risikofylt, men heller forsøkes å normaliseres. Lignende funn om normaliserings-bias beskrives i Kuligowski & Gwynne (2009), hvor manglende evakuering knyttes til en følelse av større trygghet ved å bli værende fremfor å iverksette evakuering. Mennesker kan undervurdere eller fornekte alvorligheten av en situasjon hvis informasjonen man får er tvetydig. I en stressende situasjon kan det være enklere å normalisere signalene som kommer, som gjør at vi utsetter evakuering. Manglende risikoforståelse kan også bidra til at selve ganghastigheten reduseres og det blir utfordrende å «ta den neste beslutningen». Et høyt stressnivå kan bidra til å forsterke fryktfølelser, hvor det også finnes eksempler på egosentrisk oppførsel, som bidrar til trengsel og at folk dyttes overende (Li et al., 2024). Fra de store norske tunnelbrannene ser vi også tydelige eksempler på det motsatte av egosentrisk oppførsel, der trafikantene hjelper hverandre i ulike situasjoner (SHT, 2013; Njå and Kuran, 2014; SHT, 2015; SHT, 2016). En tunnelbrann er en krevende situasjon for trafikanter. De færreste har relevant trening eller erfaring med hendelsen, og få har god kunnskap om tunnelenes sikkerhetssystemer. Det må forventes en stor variasjon av oppførsel dersom det ikke gis tydelig beslutningsstøtte og føringer for hensiktsmessige handlinger.

Byggforskserien er et viktig referansegrunnlag for byggeindustrien. Artikkelen 520.385 *Tilgjengelig rømningstid* (Sintef Byggforsk, 2016) bemerker at reaksjonstiden er «svært person- og situasjonsavhengig og kan bli meget lang dersom personene ikke oppfatter situasjonen som farlig».

Informasjonsinnholdet i varselet som gis til personene i en bygning får følgerig stor betydning, hvor kombinasjonen av lyd, lys og talemelding framheves som mest effektivt. Tabellen nedenfor gjengir Sintef Byggforsks (2016) anbefalinger til reaksjonstid for et utvalg virksomheter, og synliggjør verdien av målrettet informasjon til personer som står ovenfor en evakueringssituasjon. Nærmere studier kan gjennomføres for å vurdere overførbarheten til vegtunneler, og kartlegge effekten av ulike varslingsmedier og informasjonsinnhold.

Tabell 1: Forslag til reaksjonstider for utvalgte virksomheter (Sintef Byggforsk, 2016; Standard Norge, 2014)

Virksomhet	Reaksjonstid i minutter
Offentlig miljø, skole, kontor, varehus, butikk, der personer ser brannen	1
Varehus uten rømningsalarm (ser ikke brannen)	4
Varehus, alarmklokke (ser ikke brannen)	3,5
Varehus, enkel talevarsling (ser ikke brannen)	2
Varehus, informativ talevarsling (ser ikke brannen)	1

Zhang et al. (2024) har gjort en simuleringsstudie av evakuering fra metrovogn i tunnel, og presenterer en tabell som gir oversikt over hvilke forutsetninger som legges til grunn for tiden fra alarm gis til trafikantene i en metrovogn starter evakuering, $t_{pre} = t_{rec} + t_{res}$. Her er t_{pre} «pre-movement», t_{rec} er «recognition» og t_{res} er «response». Tiden er avhengig av type alarm og informasjonsinnholdet som gis, jf. Figur 8.

Passasjerenes forutsetninger	Type alarm		
	Talemelding, live	Talemelding, forhåndsinnspilt	Alarmklokker
Oppegående, kjent med omgivelsene, alarm-systemet og evakueringstiltakene.	<1 min	3 min	>4 min
Oppegående, ikke kjent med omgivelsene, alarm-systemet og evakueringstiltakene.	<2 min	3 min	>6 min
Ikke oppegående, men kjent med omgivelsene, alarmsystemet og evakueringstiltakene.	<2 min	4 min	>5 min
Et stort antall personer med behov for assistert evakuering.	<3 min	5 min	>6 min

Figur 8: Passasjerers "pre-movement time" ved ulike evakueringssituasjoner og alarmmetoder (basert på Zhang et al., 2024)

PIARC (2008) oppsummerer faktorer som hhv akselererer og forsinker evakueringsprosesser. Innholdet gjengis i tabellen nedenfor (oversatt fra engelsk til norsk), og gir relevant informasjon om hvordan ytelsen av evakueringsprosesser kan forbedres gjennom å styrke trafikantenes bakgrunnskunnskap om tunnelsikkerhet, hensiktsmessig design av sikkerhetssystemer i tunnelen, riktig og spesifikk varsling og betydningen av «ledere» for evakueringsprosessen i tunnelen.



Tabell 2: Viktige faktorer som kan akselerere eller forsinke evakueringsoppførsel (fritt oversatt fra PIARC 2008)

	Viktige faktorer som kan akselerere evakueringsoppførsel	Viktige faktorer som kan forsinke evakueringsoppførsel
Fase 0: Startfasen for hendelsen	Nærhet til farekilden. Forhåndskunnskap om tunnelen, utstyr og hensiktsmessig oppførsel i en krisesituasjon. Tidligere erfaring med krisesituasjon.	Avstand til farekilden. Personlige behov (eks.: sjåfør må rekke en avtale eller leveranse). Manglende kunnskap om tunnelen, utstyret og hensiktsmessig oppførsel i en krisesituasjon.
Fase 1: Mottak og oppfattelse av alarmsignaler	Nærhet til farekilden. Modalitet (flere signaler som underbygger samme budskap) og intensitet for alarmsignaler. Tydelige og eksplisitte meldinger om risikonivået og mulige utfall/konsekvenser. Kredibilitet av informasjon som gis og mottas. Kollektiv bevegelse mot rømningsutganger (flokkmentalitet).	Avstand til farekilden. Mangel på tydelige, informative og retningsgivende meldinger. Hører ikke på radio. Kollektiv oppførsel i retning av å avvente situasjonen (flokkmentalitet).
Fase 2: Beslutninger om farer og forberedelse til evakuering	Tydelige og eksplisitte meldinger om risikonivået og mulige utfall/konsekvenser. Informasjon om riktig retning til utganger og hensiktsmessig oppførsel. Kredibilitet av informasjon som gis og mottas. Tilstedeværelse av en leder som organiserer og styrer evakueringen. Kollektiv bevegelse mot rømningsutganger (flokkmentalitet). God synlighet av utganger, sikkerhetsutstyr, skilt og tavler.	Mangel på tydelige, informative og retningsgivende meldinger. Hører ikke på radio. Kollektiv oppførsel i retning av å avvente situasjonen (flokkmentalitet). Dårlig synlighet eller lesbarhet av utganger, sikkerhetsutstyr, skilt og tavler.
Fase 3: Bevegelse mot et sikkert sted	God kontroll på røyk. Lys. God synlighet av utganger, sikkerhetsutstyr, skilt og tavler. Informasjon om riktig retning til utganger og hensiktsmessig oppførsel.	Tilstedeværelse av røyk og giftig gass. Kork i kjørefelt og gangbaner. Ansamlinger og trengsel (høy persontetthet). Dårlig synlighet eller lesbarhet av utganger, sikkerhetsutstyr, skilt og tavler.



3.3.3 Forflytningsfasen

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Hurley, 2016) samler mye data knyttet til brann- og rømningsanalyser, og er generelt en vesentlig kilde til informasjon ved gjennomføring av risikoanalyser for brannsikkerhet, også i tunneler. Gwynne & Boyces (2016) kapittel «Engineering data», samler for eksempel relevant data knyttet til selvredningsmodellen og fasene i denne. Et vanlig utgangspunkt for rømningsanalyser i bygninger, er å legge til grunn en normal ganghastighet i spennet 0,8 - 1,5 m/s for bevegelse mot rømningsutgang («exit move»). Spennet er noe høyere, 1,2 – 1,8 m/s, for fri bevegelse («free move»).

For å utvikle verktøy for simulering av evakuering, er det samlet data om hvordan ganghastigheten synker ved økende persontetthet. NS-INSTA/TS 950:2014 (Standard Norge, 2014) anbefaler generelt en ganghastighet på 1,2 m/s på horisontale flater når persontettheten er mindre enn 0,5 personer pr m². I rom med høy persontetthet antas det at ganghastigheten reduseres. Persontettheten er generelt lav i vegtunneler, men dersom det for eksempel skal tas høyde for evakuering fra en buss, kan persontetthet være en faktor som bør vurderes. NS-INSTA/TS 950:2014 bruker følgende formel for en lineær reduksjon av ganghastighet, S (m/s), som funksjon av persontetthet, D (personer/m²):

$$S = k - a k D$$

Hvor;

- a og k er konstanter, hvor a = 0,266 og k = 1,4 for horisontale flater

I tunneler med nødutganger kan kø ved dører ha større påvirkning på evakueringstiden enn ganghastigheten. Køsituasjoner kan med fordel analyseres ved hjelp av personflytverktøy, som både tar høyde for trafikantenes gjensidige påvirkning på hverandre og døråpningenes effektive bredde. NS-INSTA/TS 950:2014 bruker følgende formel for å bestemme personflyten, F_c (personer/s), gjennom korridorer og døråpninger:

$$F_c = (1 - a D) k D W_e$$

Hvor;

- a og k er konstanter, hvor a = 0,266 og k = 1,4 for horisontale flater
- D er persontetthet (personer pr m²)
- W_e er effektiv dørbredde, som er bredden på døråpningen fratrasket 90 mm på hver side.

Ganghastighet ved rømning i tunnel ved «normale forhold»

Det er de senere årene gjennomført flere studier som ser spesifikt på evakuering og ganghastigheter i tunneler. Li et al. (2024b) tar utgangspunkt i eldre studier, og legger til grunn at «normal ganghastighet» ligger i spennet 1,3 – 1,5 m/s. Fridolf et al. (2013) rapporterer funn fra eksperimenter i Benelux-tunnelen, og finner at ganghastigheten i snitt var 1,37 m/s (standardavvik på 0,55 m/s) med noe røyk i tunnelmiljøet. Seike et al. (2023) gjennomførte eksperimenter i tunnel med og uten røyk, og ulike former for alarm. I situasjon uten røyk med melding til trafikantene om å «gå normalt» ble gjennomsnittlig ganghastighet målt til 1,27 m/s. I samme situasjon, uten røyk, men med melding om at «brann og eksplosjonsfare» ble snitthastigheten målt til 1,90 m/s. An et al. (2022) beskriver eksperimenter hvor hensikten er å studere effekten av ledesystemer. Uten lys- og lydledesystem fant de en snitthastighet på 1,41 m/s, og de viser at ganghastigheten øker med bruk av ledesystemer.

Går vi litt lengre tilbake i tid, ser vi at PIARC gjorde en litteraturgjennomgang på temaet i 1999 (PIARC, 1999). Her legges det til grunn at ganghastigheten, med data fra bygninger og undergrunnsstasjoner, er



i størrelsesorden 1,0 – 2,0 m/s på horisontalt underlag uten røyk. Det anslås videre at ganghastighet blir noe lavere i vegtunneler, dvs. i spennet 0,5 – 1,5 m/s, avhengig av sikt gjennom røyk, synlighet på skilt og design av skilt. Høj et al. (2014) henviser til PIARC-studien fra 1999, samt nyere resultater fra UPTUN-prosjektet, hvor det rapporteres funn fra studier med ganghastighet i spennet 0,8 m/s – 1,7 m/s. På bakgrunn av dette anbefaler Høj et al. (2014) at det legges til grunn en normal ganghastighet i vegtunneler, for personer uten funksjonsnedsettelse, på 1,5 m/s.

På bakgrunn av gjennomgått litteratur anbefales det å legge til grunn at normal ganghastighet ved rømning i en vegtunnel er i spennet 1,0 – 1,3 m/s. Dette kan være et utgangspunkt for rømningsanalysene, hvor det forutsettes funksjonsfriske trafikanter i et normalt belyst tunnelmiljø. Det er ikke forutsatt at det finnes ledesystemer i form av lys og/eller lyd. Det er heller ikke forutsatt at tunnelen har betydelig stigning, eller at det er siktreduksjon pga røyk, etc.

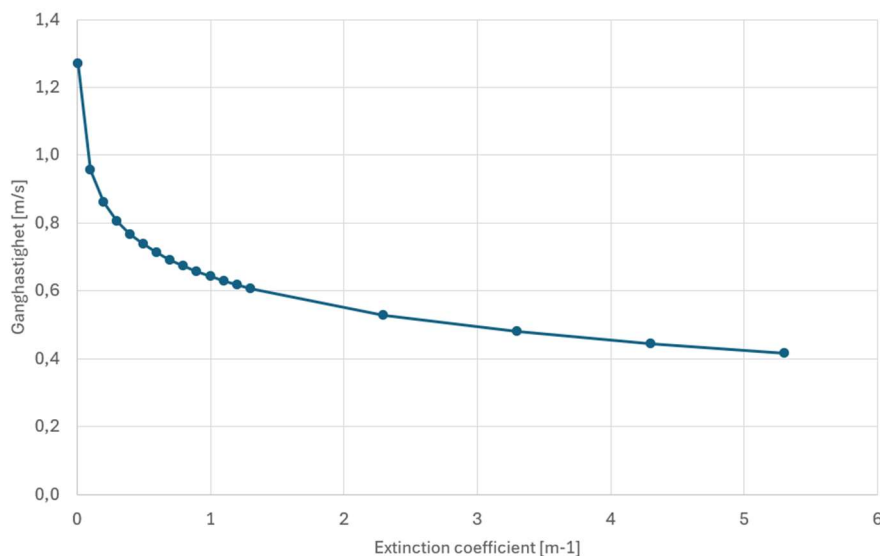
Røyk og påvirkning på ganghastigheter i vegtunnel

Erfaringer fra branner og eksperimenter som skal simulere rømning i dårlig/ingen sikt, indikerer at ganghastigheten reduseres til ned mot 0,3 – 0,4 m/s ved mye røyk (Fridolf et al, 2015; Jin, 1997), men spennet i rapporterte tall er stort. Under brannen i Gudvangatunnelen i 2013 (SHT, 2015) startet fem trafikanter umiddelbart evakuering til fots og gikk en avstand på 8 km over en periode på 95 minutter i «svært røykfylte omgivelser». Dette tilsvarer en ganghastighet på ca. 1,4 m/s. Disse trafikantene pustet inn store mengder røyk og hadde alvorlige skader ved sykehusinnleggelse, som følge av høye HbCO-verdier i blodet. SHT (2015) beskriver også at andre personer famlet seg fram langs tunnelveggene, som indikerer en langt lavere ganghastighet.

Jin (1997) viser hvordan ganghastighet synker som funksjon av røyktetthet, hvor han sammenligner effekten av irriterende og ikke-irriterende røyk i eksperimenter. Jins studier viser tydelig at ganghastigheten synker vesentlig raskere og mer markant med irriterende røyk enn med ikke-irriterende røyk. Årsaken til forskjellen skyldes at personene i eksperiment med irriterende røyk ikke klarer å holde øynene åpne, tårene renner, personene går i sikksakk, eller føler seg fram med én fot foran den andre langs veggen. Rapporter fra reelle hendelser (SHT 2015; SHT, 2013) beskriver situasjoner med irriterende og kveldende røyk. Rømningseksperimenter hvor det benyttes ikke-irriterende røyk gir derfor ikke nødvendigvis et godt bilde på de reelle utfordringene trafikantene står ovenfor ved en brannhendelse.

Purser & McAllister (2016) oppsummerer en rekke tidligere studier og kommer til at gjennomsnittlig ganghastighet i ikke-irriterende røyk er 0,74 m/s for gjennomsnittlig extinction coefficient på $0,73 \text{ m}^{-1}$. I irriterende røyk er det gjort færre målinger og spredningen i hastigheter er større enn for ikke-irriterende røyk. Følgende uttrykk, jf. også Figur 9, foreslås for å for å bestemme ganghastigheten i «moderat irriterende» røyk, W_{smoke} (m/s):

$$W_{\text{smoke}} = -0,1364 \times \ln \alpha_k + 0,6423, \text{ hvor } \alpha_k \text{ er extinction coefficient (m}^{-1}\text{)}.$$



Figur 9: Ganghastighet som funksjon av økende konsentrasjon av moderat irriterende røyk (Purser & McAllister, 2016).

Fridolf et al. (2013) rapporterer eksperimenter fra en røykfyllt jernbanetunnel, og finner at gjennomsnittlig ganghastighet blir omtrent 0,9 m/s ved extinction coefficient på $2,2 \text{ m}^{-1}$, som tilsvarer en siktlengde på ca. 1,4 m mot lysreflekterende skilt og ca. 3,4 m mot lysavgivende skilt. Røyken som ble brukt i eksperimentene var tilsatt stoff for å gi en viss irriterende effekt, men langt under det som kan forventes i en reell brann. Ronchi et al. (2018) rapporterer om gjennomsnittlig ganghastighet på 1,2 m/s, med et spenn fra 0,6 – 2,4 m/s (extinction coefficient varierte mellom 0,4 og $1,1 \text{ m}^{-1}$).

Seike et al. (2023) er en studie av ganghastighet vha rømningseksperimenter i en 488 m lang røykfyllt tunnel (ikke giftig og ikke irriterende røyk). Eksperimentet omfattet plassering av hindringer langs gangbanen og redusert sikt i form av hvit røyk og ikke lys. Tabell 3 viser hvordan ganghastigheten synker som funksjon av redusert sikt (extinction coefficient $0,24 - 0,59 \text{ m}^{-1}$). Det er verdt å merke seg forskjellene i ganghastighet som følge av alarmmeldingen som gis til deltakerne i eksperimentet. I det ene scenarioet gis deltakerne meldingen «gå normalt, ingen grunn til hastverk» og det måles en gjennomsnittlig ganghastighet (uten røyk) på 1,27 m/s. I det andre scenarioet gis deltakerne meldingen «brann i tunnelen, situasjonen er alvorlig og en eksplosjon kan forekomme, evakuer tunnelen umiddelbart» og det måles en gjennomsnittlig ganghastighet (uten røyk) på 1,9 m/s.

Tabell 3: Ganghastighet i normal- og evakueringssituasjon som funksjon av redusert sikt (extinction coefficient, C_s) fra ingen reduksjon til ca. 1,2 m siktlengde ($C_s = 1,73 \text{ m}^{-1}$). Data fra Seike et al. (2023).

Alarmmelding: «gå normalt, ingen grunn til hastverk»		Alarmmelding: «brann i tunnelen, situasjonen er alvorlig og en eksplosjon kan forekomme, evakuer tunnelen umiddelbart»	
Uten røyk	1,27 m/s	Uten røyk	1,90 m/s
$C_s = 0,26 \text{ m}^{-1}$	1,19 m/s	$C_s = 0,24 \text{ m}^{-1}$	1,73 m/s
$C_s = 0,39 \text{ m}^{-1}$	1,10 m/s	$C_s = 0,40 \text{ m}^{-1}$	1,57 m/s
$C_s = 0,59 \text{ m}^{-1}$	1,04 m/s	$C_s = 0,58 \text{ m}^{-1}$	1,31 m/s
Ganghastigheten synker betraktelig ved $C_s = 1,73 \text{ m}^{-1}$			



Li-Yu et al. (2022) rapporterer funn fra samme eksperimenter som Seike et al. (2023). Hensikten er å utlede usikkerhetsfordelinger over ganghastighet som funksjon av redusert sikt. I artikkelen rapporteres det noe lavere maksimale ganghastigheter (ca. 2 m/s) enn Fridolf et al. (2015) (ca. 2,4 m/s), mens minimumshastigheten var lik (ca. 0,6 m/s) resultater i Fridolf et al. (2015). Forskjellen tilskrives mørkere tunnel og ingen ledesystemer i dette eksperimentet. Fridolf et al. (2015) testet ledelys og utgangsmarkeringslys, som bidro til raskere ganghastighet.

Li et al. (2024b) ser på ganghastighet som funksjon av følelsesmessig påvirkning (psykologiske faktorer) i røykfylte omgivelser. Studien omfatter eksperimenter i noe som må betegnes som en svært en kort tunnel, dvs. 10 m lang. Fra tidligere studier/erfaring legger de til grunn at «normal ganghastighet» uten røyk er 1,3 – 1,5 m/s. I sine egne eksperimenter måles ganghastigheten uten røyk til 1,16 m/s ved gange langs vegg og 1,03 m/s ved diagonal gange (uten støtte langs veggen) over området i tunnelen. I røykfylte omgivelser (1 m sikt, $C_s = 2,05 \text{ m}^{-1}$) sank ganghastigheten ved gange langs vegg til 0,85 m/s og til 0,79 m/s ved diagonal gange over tunnelen. Figur 10 er hentet fra Li et al. (2024), og oppsummerer resultater fra flere tidligere studier.

Tidligere studier			Nåværende studier		Fortid/Nåtid differanse
Forfatter	Middelhastighet (min/max) [m/s]	Middel C_s (C_s rekkevidde) [m^{-1}]	Middelhastighet (min/max) [m/s]	Middel C_s (C_s rekkevidde) [m^{-1}]	Middel (min/max) [m/s]
Jin and Yamada (1985)	0,71 (0,37-1,09)	0,42 ($0 < C_s < 0,5$, irriterende røyk)	1,06 (0,37-2,23)	0,40 ($0 < C_s < 0,5$)	0,35 (0, 1.14)
	0,73 (0,51-0,98)	0,74 ($0,5 < C_s < 1,0$, ikke-irriterende røyk)	0,96 (0,31-1,94)	0,75 ($0,5 < C_s < 1,0$)	0,23 (-0.20, 0.96)
Fridolf et.al (2013)	0.93 (0.58-1.14)	1.69 ($1.0 < C_s < 2.0$)	0.88 (0.12-2.23)	1.46 ($1.0 < C_s < 2.0$)	-0.05 -0.46, 1.09)
	0.85 (0.36-1.39)	2.46 ($2.0 < C_s < 3.0$)	0.82 (0.19-1.69)	2.15 ($2.0 < C_s < 3.0$)	-0.03 (-0.17, 0.30)
Fridolf et.al (2015)	1.62 (1.17-2.12)	0	1.09 (0.26-2.39)	0	-0.53 (-0.91, 0.27)
	1.18 (0.61-2.37)	0.72($0.5 < C_s < 1.0$)	0.96 (0.31-1.94)	0.75 ($0.5 < C_s < 1.0$)	-0.22 (-0.30, -0.43)
Seike et.al (2017)	1.85 (1.32-2.77)	0.31 ($0 < C_s < 0.5$)	1.06 (0.37-2.23)	0.40 ($0 < C_s < 0.5$)	-0.79 (-0.95, -0.54)
	1.56 (0.68-2.39)	0.76($0.5 < C_s < 1.0$)	0.96 (0.31-1.94)	0.75 ($0.5 < C_s < 1.0$)	-0.60 (-0.37, -0.45)
Seike et.al (2021b)	2.03 (0.57-4.17)	0	1.09 (0.26-2.39)	0	-0.94 (-0.31, -1.78)
	1.74 (0.58-3.13)	0.34($0 < C_s < 0.5$)	1.06 (0.37-2.23)	0.40 ($0 < C_s < 0.5$)	-0.68 (-0.21, -0.90)
	1.37 (0.52-2.44)	0.71 ($0.5 < C_s < 1.0$)	0.96 (0.31-1.94)	0.75 ($0.5 < C_s < 1.0$)	-0.41 (-0.21, -0.50)
	1.28 (0.49-2.28)	1.28($1.0 < C_s < 1.5$)	0.92 (0.18-2.23)	1.21 ($1.0 < C_s < 1.5$)	-0.36 (-0.31, -0.05)

Figur 10: Oppsummering av ganghastigheter fra tidligere studier (hentet fra Li et al., 2024).

I en studie utført av samme team (Li et al., 2024a) ble det benyttet en lengre tunnel enn i forrige studie, dvs. 120 m. Tunnelen hadde et fall på 2,85 %, dvs at deltakerne gikk nedover. Studien omfattet 138 mannlige deltakere, alder mellom 20 og 78 år, hvor de fleste (92 %) arbeidet i selskaper involvert i tunnelindustri. Røyken som ble benyttet i eksperimentet var ikke giftig eller irriterende. Følgende ganghastigheter ble målt i røykfylte omgivelser:

- Sikt lengde ca. 5 m ($C_s = 0,38 \text{ m}^{-1}$): 0,65 m/s (min. 0,32 m/s og maks 1,03 m/s).



- Sikt lengde ca. 3 m ($C_s = 0,74 \text{ m}^{-1}$): 0,52 m/s (min. 0,19 m/s og maks 1,01 m/s).
- Sikt lengde ca. 1,5 m ($C_s = 1,25 \text{ m}^{-1}$): 0,38 m/s (min. 0,17 m/s og maks 0,65 m/s).

Det overordnede budskapet fra studien er at de måler lavere ganghastigheter enn i tidligere studier. Dette forklares med at deltakerne var ukjent med tunnelen og det fantes ikke ledelys i tunnelen. Deltakerne fikk utlevert en i-pad med oppfordring om å bruke lommelykten på denne.

Zeng et al. (2024) ser på gruppeoppførsel under evakuering i røykfylte omgivelser i tunnel. Studien omfatter eksperimenter i en 45 m lang og 6,34 m bred tunnel på universitetscampus. Bord ble satt ut for å simulere hindringer. Studien omfattet 40 deltakere, hhv. 25 kvinner og 15 menn, i aldersspennet 18-23 år fra universitetet. Alle hadde på seg maske som sørget for at de ikke hadde sikt. Studien viser at gjennomsnittshastigheten i grupper er generelt noe høyere enn i individuelle eksperimenter. For individer er det funnet at snitthastigheten ble 0,48 m/s (min. 0,14 m/s og maks 1,09 m/s). Sammenlignet med individene økte snitthastigheten i grupper med ca. 44 %. Årsaken relateres til at deltakerne hjelper hverandre, holder hender og snakker om valg underveis i evakueringen. I individuelle tester ble snitthastigheten for kvinner målt til 0,44 m/s og 0,55 m/s for menn. I gruppeeksperimentene var snitthastigheten omtrent lik, ca. 0,7 m/s. Hindringene (bord i dette tilfellet) virker ledende på evakueringen, som betyr at ganghastigheten øker noe i kontakt med hindringene. Artikkelen har en betydelig litteraturgjennomgang, hvor vi tar med noen funn:

- Tidligere studie finner at gjennomsnittlig ganghastighet ved null sikt er 0,49 m/s og at ganghastigheten kan modelleres med log-normal- og gamma-fordelinger.
- Tidligere studie med rømningseksperimenter ved null sikt finner at det er signifikant forskjell på ganghastigheten til menn og kvinner (i aldersgruppen 18-24 år), hvor gjennomsnittshastigheten til den mannlige og kvinnelige gruppen var hhv. 0,55 m/s og 0,42 m/s.
- Flere tidligere studier viser at evakuering langs vegg er en effektiv måte å holde seg trygg ved dårlig sikt. Studiene viser også at ganghastigheten øker når deltakerne i eksperimentene finner vegg.
- Studier viser at «typisk evakueringsoppførsel», som å følge etter, hjelpe andre og finne sammen i grupper også inntreffer i studier ved dårlig sikt.
- Hensiktsmessig design av evakueringssystemer i tunneler, basert på lys og lyd, vil bidra til at flere trafikanter kan evakuere på en effektiv måte ved dårlig sikt gjennom bedre oppfattelse og valg av utgangsmuligheter.
- Evakueringseksperimenter viser at deltakerne foretrekker å evakuere gjennom den samme utgangen som de kom inn i tunnelen.

Skjerme et al. (2024) bygger på en Virtual Reality (VR)-studie om evakuering i røykfylte omgivelser i vegtunnel. Studien er først og fremst opptatt av å undersøke hvordan ledesystemer og utgangsdesign påvirker muligheten til å finne utgangen. Ganghastigheter måles også, og i seks ulike scenarioer måles den til mellom ca. 1,0 m/s til 1,3 m/s. Sikt lengden i røyken i scenarioene med lavest ganghastighet var omtrent 0,5 m, mens sikt lengden i scenarioene med høyest ganghastighet var omtrent 1,0 m.

Det er stort spenn i målte ganghastigheter fra eksperimenter som vurderer effekten av røykpåvirkning. Mange av studiene inkluderer egentlig ikke effekten av røyk, da det brukes hvit røyk som både er kald, ugiftig og ikke-irriterende. Redusert lys eller maske foran øynene kan også være benyttet for å simulere dårlig sikt. Basert på tilgjengelige studier, anbefales det å legge til grunn at ganghastigheten i røyk ligger i spennet 0,3 m/s – 1,0 m/s, avhengig av hvor tett og irriterende røyken er og hvilke ledesystemer som finnes i tunnelen.



Stigning og påvirkning på ganghastighet

Det er ikke funnet mange studier som undersøker tunnelstigningens effekt på ganghastighet. Høj et al. (2014) henviser til arbeidet med revisjon av *NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*, hvor en stigning på opp mot 5-6 % ble vurdert å ha ubetydelig effekt på ganghastighet. Samme studie peker imidlertid på at ved lengre gange i stigning opp mot 7 % kan ganghastigheten synke med 20 % over tid. Tilsvarende kan ganghastigheten øke med 10 % ved 7 % fall og 20 % ved 3 % fall.

Storm & Celanders (2022) ser på betydningen av stigning på evakueringshastighet i lange tunneler, dvs om fysisk utmattelse påvirker ganghastighet. Eksperimentet ble gjennomført i en 3500 m lang gruvetunnel med 14 % stigning. Deltakerne gikk en distanse på 907 m i tunnelen, fra -330 moh til -220 moh. Det ble ikke brukt røyk i eksperimentet og tunnelen var utstyrt med lyspunkter for ca. hver 20 m. Studien omfatter søk etter lignende studier og det opplyses at det finnes lite forskning på ganghastighet i lange stigninger. Forfatterne henviser til to tidligere studier av stigningens betydning for ganghastighet, hhv. Ronchi et al. (2015) og Zhang et al. (2019).

Deltakerne i Storm og Celanders studie var en gruppe skoleelever, samt noen lærere. 69 % var i aldersgruppen 18-19 år, og resterende 31 % av deltakerne var 41-61 år. Snittalder i gruppen var 27,8 år. Deltakerne målte referansehastighet på tredemølle før eksperimentet for å finne sin ideelle ganghastighet på flatt terreng. Snittet ble beregnet til 0,84 m/s med et spenn fra 0,36 m/s til 1,11 m/s. Det var ingen betydelig forskjell mellom kjønnene. Referansehastighetene fra tredemølla ble ikke brukt som sammenligning etter eksperimentet i tunnelen da de ble vurdert som urealistisk lave.

Studien viser at ganghastigheten synker over tid, når den fysiske belastningen øker. For deltakeren med størst reduksjon sank hastigheten til 74 % av maksimal hastighet. Deltakerne som bevisst valgte en strategi hvor de forsøkte å finne en ganghastighet som kunne holdes konstant over lengre tid gikk generelt raskest i eksperimentet. De som gikk hardt ut fikk også størst reduksjon. Ganghastigheten økte i det siste segmentet av tunnelen, som antas å henge sammen med at deltakerne oppfattet at de nærmet seg målstreken og la inn i en sluttspurt. Menn gikk raskere enn kvinner (statistisk signifikant forskjell) i eksperimentet, og den eldre aldersgruppen gikk raskere enn den yngre aldersgruppen (ikke statistisk signifikant forskjell).

Ganghastigheten målt på mølle var betydelig lavere enn eksperimentet. Medianhastigheten for gruppen var relativt stabilt, ca. 1,4 m/s. Den raskeste deltakeren startet med en ganghastighet på ca. 2 m/s, mens den mest langsomme startet med 1,3 m/s. Den laveste ganghastigheten til hhv den raskeste og mest langsomme deltakeren ble målt til 1,71 m/s (-15 %) og 0,98 m/s (-25 %). Forfatterne antyder at målte ganghastigheter ikke bør brukes som designverdier pga. lav alder på deltakerne.

Stigning i tunnel medfører i praksis at de som evakuerer må utføre mer arbeid for å komme seg framover. I den forbindelse kan det være interessant å se på Yan et al. (2022), som ser på betydningen av høyde (lavere oksygeninnhold i lufta) på ganghastighet og anstrengelse under evakuering i vegtunneler. Eksperimenter ble utført i tunneler plassert hhv 500 moh (97 kPa) og 3850 moh (64 kPa) og viser generelt at ganghastigheten synker ved økende høyde (lavere trykk).

Forfatterne foreslår en formel for å regne ut ganghastighet som funksjon av kjønn, alder, tunnel/ute, høyde over havet og basishastighet, dvs.: $V = \mu_g \mu_{ag} \mu_t \mu_{al} V_0$ (1), hvor, V er ganghastighet (m/s); μ_g er kjønnskoeffisient; μ_{ag} er en alderskoeffisient; μ_t er en reduksjonskoeffisient for tunnel (versus utendørs); μ_{al} er en reduksjonskoeffisient for høyde over havet; og V_0 er utgangshastigheten.

- Eksempel 1: Mann, 20-30 år, tunnel, 3850 moh: $V = 1,00 \times 1,00 \times 0,72 \times 0,75 \times 1,65 \text{ m/s} = 0,891 \text{ m/s}$.



- Eksempel 2: Kvinne, 30-40 år, tunnel, 1950 moh: $V = 0,90 \times 0,93 \times 0,72 \times 0,89 \times 1,65 = 0,885 \text{ m/s}$.

Basert på de få studiene vi har funnet, framstår stigning som en faktor som skiller mest med evakuering over tid, dvs når arbeidet som legges ned i evakueringen blir stort. Fysisk form blir dermed vesentlig. Studien til Storm & Celanders (2022) viser en median ganghastighet på 1,4 m/s i 14 % stigning. Dette er sammenlignbart med «normal» ganghastighet på horisontale flater. Studien viser samtidig at hastigheten synker over tid, noe som også er sannsynlig ved lang evakuering i en flat tunnel. Studien hadde til hensikt å sammenligne gange på flatt underlag (tredemølle) med stigning i tunnel, men resultatene fra tredemølla ble vurdert som uegnet og urealistisk lave. Studien mistet dermed muligheten til å kontrollere endring i ganghastighet som følge av stigning.

Med unntak av Storm og Celanders (2022) studie, rapporterer studiene gjerne gjennomsnittlig ganghastighet uten informasjon om hastighetssvingninger under eksperimentet. Mange av studiene bruker også svært korte tunneler i eksperimentene, hvor arbeidet knyttet til evakuering ikke blir særlig stort. Vi mener derfor det er stor usikkerhet knyttet til temaet rømning og utmattelse, og problemstillingen blir særlig tydelig i lange ettløpstunneler. For personer med nedsatt funksjonsevne blir økende stigning en større utfordring. For personer i rullestol blir rømningsretning i tunnel med stigning eller fall vesentlig. Stor stigning kan bli svært utfordrende, og bidrar til vesentlig høyere arbeidsbelastning enn ved flatt underlag, mens evakuering i fallretningen medfører lite eller ikke noe arbeid.

Ledesystemer og påvirkning på ganghastigheter

An et al. (2022) ser på effekten av ulike ledesystemer, basert på lys og lyd, på ganghastighet og utgangvalg. Studien omfatter eksperiment i tunnel med 180 deltakere, 95 menn og 85 kvinner med snittalder ca. 40 år. Tunnelen var 150 m lang, 14,55 m bred og 7,1 m høy og hadde tre rømningsveier med innbyrdes avstand på 45 m. Eksperimentet ble gjennomført med kald røyk, men røyken hadde, ifølge forfatterne, liten betydning for reduksjon i sikt. Lyd-ledesystemet omfattet en høyttaler i tunnelen som spilte av forhåndsinnspilt melding: «Please evacuate immediately, please find the emergency exits inside the tunnel and evacuate as soon as possible». Ledelyssystemet omfattet a) grønn, dynamisk ledlys-rekke med 10 m avstand mellom lyskildene montert langs tunnelvegg, b) grønn utgangsmarkering rundt rømningsutgang og c) bakgrunnsbelyst «løpende mann»-skilt over rømningsutgang.

Studien finner at ganghastigheten øker med bruk av ledesystemer. Uten lys- og lydledesystem fant de en snitthastighet på 1,41 m/s. Med lydledesystem økte ganghastigheten til 1,56 m/s. Med sidemontert dynamisk ledelysstripe (retningsgivende lysstripe) på siden med rømningsutgang og lydledesystem, økte ganghastigheten til 2,14 m/s. Ensidig ledelys, på siden med utganger, gav bedre effekt enn ledelys på begge sider av tunnelen.

Markeringslys rundt utganger gjorde det enklere å oppfatte hvor rømningsutgangene var plassert. I scenario uten utgangsmarkering, valgte 80 % av deltakerne den nærmeste utgangen. I scenario hvor utgangsmarkeringslys ble brukt, valgte 50 % å bruke utgang nr. 2, selv om det var 48 m lengre avstand å gå. Flokkmentalitet ble også registrert i eksperimentet, og diskuteres også i artikkelens litteraturgjennomgang. Når én person ledes til å ta riktig valg følger gjerne resten av gruppen etter.

Studien viser at ledelys og talevarsling har en positiv effekt på ganghastigheten i situasjoner med god sikt. Det er ikke mulig å si noe om effekten på ganghastighet i røykfylte omgivelser basert på denne studien.



Skjermo et al. (2024) bruker VR-simulator for å studere hvordan visuelle og akustiske ledesystemer påvirker muligheten til å evakuere i røykfylte omgivelser i en vegtunnel. Ganghastigheten til deltakerne måles i de ulike scenarioene, hvor sikt lengde vurderes å ha størst betydning for forskjeller. I scenarioene med lavest sikt (ca. 0,5 m), var ganghastigheten lavere (1,0 - 1,1 m/s) enn ved noe bedre sikt (ca. 1,0 m) (1,2 - 1,3 m/s). Studien indikerer at kontinuerlig ledelysstripe, plassert 1 m opp på tunnelveggen på den siden rømningsutgangene befinner seg, bidrar til noe raskere ganghastighet, i størrelsesorden 10-20 s raskere. I praksis betyr 10-20 s raskere enn økning fra 1,2 m/s til ca. 1,3 m/s over en avstand på 250 m. Der det benyttes kontinuerlig ledelysstripe 1 m opp på veggen på riktig side (side med utgang) velger 96 % av deltakerne riktig side når de starter evakueringen. Deretter følger deltakerne linjen til nærmeste utgang, uten å krysse vegbanen eller passere utgangen. Avstand til rømningsutgang vurderes å ha vesentlig betydning for hvor enkelt det er å finne rømningsutgangen, hvor en dobling i avstand, fra 250 m til 500 m, medførte fire ganger lengre rømningstid.

Datagrunnlaget for denne studien gir begrenset underlag for å vurdere effekten av ledesystemers påvirkning på ganghastighet. Dette er både fordi studier av ganghastighet ofte fokuserer på effekten av røyk, samt at studier av ledesystemer gjerne fokuserer mer på muligheten til å finne en utgang (for eksempel Ronchi et al., 2016; Skjermo et al., 2024), enn effekten på ganghastighet. De senere årene er det utviklet visuelle og akustiske ledesystemer, men det finnes få effektstudier i vitenskapelige tidsskrift. I noen studier er kanskje ikke søkelyset direkte på ledesystemet, men når studien sammenlignes med andre studier kan det indikeres en effekt. Li-Yu et al. (2022) sammenligner for eksempel egne resultater med Fridolf et al. (2015), hvor høyere ganghastighet i sistnevnte tilskrives bedre visuelle ledesystemer i eksperimentet. Seike et al. (2023) studerer i utgangspunktet stress under evakuering. Studien viser at en spesifikk talemelding, som beskriver alvorligheten i hendelsen, bidrar til raskere ganghastighet enn en melding som ikke legger vekt på at hendelsen er alvorlig.

3.4 Evakueringsanalyser: Metoder og grenseverdier for røykeeksponering

3.4.1 Typiske grenseverdier for mennesker tåleevne

I forbindelse med arbeid med masteroppgave i 2009 (Bjelland, 2009), ble det utført et omfattende litteratursøk omkring grenseverdier for røykeeksponering. Innholdet i følgende delkapitler bygger på dette materialet, supplert med tunnelspesifikke kilder og nyere litteratur.

Brannrøyk påvirker mennesker hovedsakelig ved å ha en kvelende effekt, som etter hvert fører til tap av bevissthet (incapacitation) og død, samt en irriterende effekt. Et panel, bestående av eksperter på brann og røyk, samlet seg til en workshop hos Royal Society i London i 2008 for å diskutere temaet (Gann et al., 2011). Det rapporteres om at forståelsen av hvordan karbonmonoksid (CO) og hydrogencyanid (HCN) påvirker kroppen er relativt god, mens for andre gasser er det større usikkerhet.

Usikkerhet er knyttet til overføringsverdi for resultater fra tester på rotter, overføringsverdi fra småskalatester til fullskala, menneskers ulike tåleevne avhengig av fysiologiske egenskaper, kombinert usikkerhet knyttet til modellert produksjon av giftige gasser. Sistnevnte kan for eksempel omfatte utfordringer med å modellere underventilerte branner, eller at branner i praksis omfatter forbrenning i ulike faser samtidig (både godt ventilert og underventilert).



Sikt

Redusert sikt er ikke skadelig i seg selv, men kan være en indikator på omfanget av giftige gasser i miljøet. Sikt har derfor vært mye benyttet i rømningsanalyser, både fordi ganghastighet og beslutningsprosesser påvirkes av redusert sikt, samt som et forenklet kriterium for å vurdere giftighet mht kvelende gasser. I tunneler er det sannsynlig at røyk blandes med luft, både som følge av mekanisk ventilasjon og pga avkjøling. Dette betyr at den sjiktingen som gjerne oppstår i et brannrom, mellom et varmt røyklag og et røykfritt lag under, kun er aktuelt tett opptil brannstedet i en tunnel. Ellers vil hele tunneltverrsnittet nedstrøms et brannsted være fylt med en røyk-/luft-blanding. Dersom det forutsettes at trafikanter skal rømme gjennom denne røyk-/luftblandingen, blir tilgjengelig sikt viktig for å bestemme effektiviteten av evakueringen.

For at mennesker skal kunne ha mulighet til å rømme effektivt fra et rom, må sikten være i størrelsesorden 4-10 m, avhengig av hvor kjent personene er i bygningen (Opstad & Stensaas 1998: kapittel 4.3.2). I rømningsanalyser er det vanlig å bruke sikt lengde på minst 10 m i rømningsveier og store brannrom, og minst 3 m i mindre brannrom (Standard Norge, 1998; 2014). Det anbefales at sikt måles 2 m over gulvnivå (NKB 1994:26). Når sikten reduseres til under ca. 3 m ($OD/m = 0,33$ eller extinction coefficient = 0,76), viser studier at en betydelig andel mennesker snur eller unngår å evakuere gjennom røyk (Purser & McAllister, 2016 s. 2412-2413).

Tiltak som hjelper trafikanter i riktig retning, og stadig bekrefter riktige handlingsvalg, vil for øvrig kunne øke sannsynligheten for at evakueringen bort fra brannstedet fortsetter selv om sikten er lav. Vi ser også fra tidligere branner, for eksempel i Gudvangatunnelen i 2013 (SHT, 2015), at trafikantene fortsetter evakuering til tross for svært liten sikt.

Purser & McAllister (2016) foreslår at 10 m sikt lengde ($OD/m = 0,08$, eller $C_s = 0,18 \text{ m}^{-1}$) bør legges til grunn som et forenklet toleransekriterium i store rom (aktuelt for tunneler), jf. Figur 11.

Ved denne røykkonsentrasjonen er det lite sannsynlig at omfanget av kvelende gasser er stor nok til å forårsake tap av bevissthet ved eksponering i 30-60 minutter, og det er sannsynlig at de som rømmer ikke vil føle seg fanget i røyken og vurderer å snu, stanse, etc.

Omfanget av irriterende gasser kan påvirke evnen til å evakuere, som gjerne kommer til uttrykk gjennom redusert ganghastighet. Vurderinger av produksjon og effekt av irriterende gasser bør supplere toleransevurderinger basert på sikt, særlig når det må forventes at mennesker evakuerer i røyk, og over lengre tid. Purser & McAllister (2016) foreslår følgende uttrykk for ganghastighet som funksjon av moderat irriterende røyk:

$$W_{smoke} = -0,1364 \times \ln(C_s) + 0,6423$$

Hvor;

- W_{smoke} er ganghastighet (m/s) i moderat irriterende røyk
- C_s er lysreduksjonskoeffisienten (extinction coefficient) (m^{-1})



Røyktetthet og irriterende OD/m (ekstinksjonskoeffisient)		Synlighet (diffus belysning)	Rapportert effekt
Ingen		Upåvirket	Ganghastighet 1.2 m/s
0.5 (1.15)	Ikke-irriterende	2 m	Ganghastighet 0.3 m/s
0.2 (0.5)	Irriterende	Redusert	Ganghastighet 0.3 m/s
0.33 (0.76)	Blandingsrøyk	Ca. 3 m	30% vil snu istedenfor å gå inn
Foreslåtte grenser for bygninger med:			
Små rom og fluktveier		OD/m 0.2 (sikt 5 m)	
Store rom og fluktveier		OD/m 0.08 (sikt 10 m)	

Figur 11: Rapportert effekt av røyk på sikt og oppførsel (fritt oversatt etter Purser & McAllister, 2016)

Temperatur

Personer eksponeres for temperatur fra flammer og røyk enten gjennom varmestråling eller konveksjon. I tilfeller der personer evakuerer under et varmt røyklag brukes gjerne kriteriene røykfri høyde på minst 2,5 m og en maksimaltemperatur i røyklaget på 200 °C (Purser & McAllister, 2016). I tunneler vil, som nevnt tidligere, sjikting i to soner være begrenset til området ved brannstedet. Som følge av omrøring pga. ventilasjon og avkjøling mot tunnelkonstruksjonen, vil røyen legge seg ned mot kjørebane og tunneltverrsnittet fylles med røyk. Folk som evakuerer i en tunnel, vil følgelig innhyles i røyken i større grad enn å bevege seg under den. Figur 12 gir en oversikt over menneskelig respons på høye temperaturer.

Temperatur [°C]	Respons
50	3 – 5 timers toleransetid
70	60 minutters toleransetid
100	Brannskader meget hurtig i tørr luft
105	25 minutters toleransetid
115	20 minutters toleransetid
120	15 minutters toleransetid
125	Vanskelig å puste gjennom nesen
140	5 minutters toleransetid
150	Temperaturgrense for å kunne evakuere. Vanskelig å puste gjennom munnen.
160	Rask, ulidelig smerte ved tørr hud
180	Irreversibel skade på tørr hud innen 30 sekunder
205	Toleransetid mindre enn 4 minutter ved våt hud. Terskel for åndedrettsfunksjon.

Figur 12: Menneskelig tåleevne ved eksponering for høye temperaturer (Bjelland, 2009)



Purser & McAllister (2016) fremstiller menneskers toleranse for høye temperaturer. Kritisk temperatur er funnet å være 121 °C. Når temperaturen er over 121 °C er det fare for smerte i hud, og ved temperaturer opp mot 121 °C er det fare for hypertermi (kroppen blir for varm). Fuktig luft gir fare for hypertermi ved lavere temperatur enn tørr luft. Tilsvarende data er også gjengitt i PIARCs rapport *Fire and smoke control in road tunnels* fra 1999 (PIARC, 1999).

PIARC (1999) inkluderer følgende uttrykk for å beregne tid til kritiske forhold (incapacitation) basert på temperatur i et fuktig miljø:

$$T_{in} = e^{5,1849-0,0273T}$$

Hvor;

- T_{in} er tid til kritiske forhold (min)
- T er temperatur (°C)

I praksis utsettes ikke trafikanter for en konstant temperatur. Temperaturen kan øke med tiden i nærheten av brannstedet, og etter hvert synke ved større avstand ved forflytning bort fra brannstedet. Det kan derfor være hensiktsmessig å vurdere den samlede dosen konvektiv varme en trafikant blir utsatt for. Uttrykket nedenfor viser hvor stor andel (fraksjon) av kritisk dose, F_{Ih} , som er mottatt ved et tidsintervall som korresponderer med temperaturen, T (°C):

$$F_{Ih} = \frac{1}{e^{5,1849-0,0273T}}$$

F_{Ih} beregnes for små tidssteg, hvor det kan antas konstant temperatur, og bidraget fra hvert tidssteg summeres for å beregne den kumulative effekten. Når summen > 1 er toleransekravet for kritiske forhold oppnådd.

Karbonmonoksid (CO)

Karbonmonoksid binder seg til hemoglobin i blodet og danner karboksyhemoglobin (COHb). Dette fører etter hvert til kvelning fordi det forhindrer oksygentransport i kroppen. Figur 13 er hentet fra Purser & McAllister (2016) og er et estimat på dose x tid (ppm x min) som gir fare for hhv bevisstløshet og død hos mennesker og andre arter.

Bevisstløshet			Død	
	CO ved hvile [ppm min]	CO v/ lett aktivitet [ppm min]	CO ved hvile [ppm min]	CO v/ lett aktivitet [ppm min]
Menneske 70 kg	80,000-100,000	30,000-35,000	~110,000-240,000	~60,000-190,000
Bavian ~20 kg		34,000		
Primater 3-4 kg	38,000-40,000	27,000		
Rotte ~ 300 g	30,000-40,000	22,000-36,000	162,000	

Figur 13: CO-konsentrasjoner som fører til hhv bevisstløshet og død ved hvile og lett aktivitet (fritt oversatt etter Purser & McAllister, 2016).

I rømningsanalyser er det vanlig å sette en grenseverdi for CO på 2000 ppm (0,2 %Vol) i lufta (Chen et al. 2024; Wang et al. 2023; Standard Norge, 2014).



Karbondioksid (CO₂)

Karbondioksid er ikke en spesielt giftig gass i den konsentrasjonen den forekommer i branngasser. Gassen CO₂ vil for øvrig ved moderate konsentrasjoner stimulere pustefrekvensen, slik at opptaket av andre, og mer giftige branngasser øker. En CO₂-konsentrasjon på 2 % vil øke pustefrekvensen med om lag 60 %, og den vil fordobles ved en konsentrasjon på 3 %. Ved en CO₂-konsentrasjon på 5 %, vil enkelte oppleve pustevanskeligheter, mens konsentrasjonen må overskride 10 % for å kunne utgjøre en trussel i forhold til å forhindre rømning ved egen hjelp (Opstad & Stensaas 1998: kapittel 4.1.3.). I branntekniske rømningsanalyser anbefales det å bruke en grenseverdi på 5 % (NKB 1994, Standard Norge, 1998; Standard Norge, 2014).

Hydrogencyanid (blåsyre, HCN)

Hydrogencyanid (HCN), også omtalt som blåsyre, er en av de giftigste gassene som forekommer i branngasser, og regnes som 20-30 ganger så giftig som CO. HCN er for øvrig sjelden alene den primære årsaken til dødsfall ved branner. HCN utvikles hovedsakelig ved forbrenning av enkelte plastprodukter som er sammensatt av hydrokarboner, Nitrogen og Oksygen (Kristoffersen & Stenstad 2001:9). Dette er tilfellet for blant annet Polyuretan, som er et vanlig forekommende materiale i møbler og interiør, som for eksempel skummateriale i seter, sofaer og madrasser. Tester med branner i Polyuretanmadrasser viser at HCN kan forekomme i kritiske konsentrasjoner før kritisk grenseverdi for andre, og mer typiske branngasser oppnås (Standard Norge, 1998:29; Opstad & Stensaas 1998: kapittel 4.1.4.).

HCN-konsentrasjoner < 80 ppm vil gi begrensede skader ved eksponering opp til én time. Ved konsentrasjoner fra 80-180 ppm vil tiden til tap av bevissthet være et sted mellom 2 og 30 minutter, og er konsentrasjonen over 180 ppm kan det forventes tap av bevissthet innen 2 minutter (Purser & McAllister, 2016).

Hydrogencyanid (ppm)	Arter og effekter
100	Bevisstløshet etter 23-30 minutter for primater og mennesker
200	Bevisstløshet etter ca. 2 minutter
300+	Døden inntreffer raskt
444	En mann overlevde en utilsiktet eksponering
530	En mann overlevde 1,5 minutter eksponering. Hans hund, eksponert for 1,5 minutter døde
539	Antatt 10 minutter LC ₅₀ for mennesker
1000	Ett innpust kan gi bevisstløshet

Figur 14: Effekt av innånding av hydrogencyanid (fritt oversatt fra Purser & McAllister, 2016)

Varmestråling

Varmestråling fra et varmt røyklag eller flammer, er avhengig av temperaturen i røyklaget/flammer i 4.potens. I rømningsanalyser anbefales det at personer ikke skal utsettes for vedvarende varmemestrålingsintensitet på mer enn 2,5 kW/m². Maksimal varmemestrålingsintensitet bør ikke overstige 10 kW/m². Den samlede akkumulerte strålingsenergien bør ikke overstige 60 kJ/m² (60 kW/m²) (Standard Norge, 2014). Purser & McAllister (2016) og PIARC (1999) viser tid til alvorlig smerte i hud som følge av varmemestråling fra 0 kW/m² til 45 kW/m², som illustrerer at 2,5 kW/m² (0,25 W/cm²) er en hensiktsmessig grenseverdi.



Tålegrenser benyttet i simuleringsstudier

Bjelland (2009) er en studie av brannrisiko i boligblokker, og Figur 15 viser hvilke toleransekriterier som ble definert for å fastsette lengden på tilgjengelig rømningstid i ulike deler av bygningen.

Variabel	Kritisk i rømningsvei (2 m over gulv)	Kritisk i leilighet (1,4 m over gulv)	Dødelig i leilighet (1,4 m over gulv)
CO-konsentrasjon	>1 500 ppm	>3 000 ppm	>4 600 ppm
Akkumulert CO-dose	>43 000 ppm min	>43 000 ppm min	>90 000 ppm min
CO ₂ -konsentrasjon	>10 %	>10 %	>10 %
O ₂ -konsentrasjon	<10 %	<10 %	<10 %
Temperatur	>60 °C	>90 °C	>150 °C
Sikt	<4 m	Ikke målt	Ikke målt
Varmestråling *	Snitt>3 kW/m ²	Ikke målt	Ikke målt

Figur 15: Toleransekriterier for simuleringer ifm brannrisiko i boligblokker (Bjelland, 2009)

Chen et al. (2024) er en simuleringsstudie av evakuering i tunnel, og benytter toleransekriteriene i Figur 16. Tilsvarende kriterier benyttes av Wang et al. (2023) for studier av evakuering i en lang undersjøisk tunnel i Kina.

Temperatur	Sikt	CO i prosent av volum
<60 °C	>10 m	<0,2%

Figur 16: Toleransekriterier for evakueringsstudie (fritt oversatt fra Chen et al., 2024).

Lemaire & Kenyon (2006) er en studie av fullskala brannforsøk i Beneluxtunnelen og effekten av slokkeanlegg, hvor det foreslås følgende toleransekriterier for å vurdere effekten av slokkeanlegg:

- Varmestråling:
 - o Skadelig: 2 kW/m² → 50 % får førstegradsforbrenninger etter ca. 100 s.
 - o Dødelig: 6 kW/m² → 50 % dødelighet etter ca. 100 s eksponering.
- Konveksjonsvarme i tørt miljø:
 - o Skadelig: 70 °C → ukomfortabelt, men ikke dødelig.
 - o Dødelig: 150 °C → brannskader innen 5 min.
- Konveksjonsvarme i vått miljø:
 - o Dødelig: 50 °C → Betraktelig lavere enn for tørt miljø pga. mer effektiv varmeoverføring mellom luft og hud i vått miljø, samt mulighet for lungeødem (vann i lungene).

NS-INSTA/TS 950:2014 er en viktig referanse for rømningsanalyser for bygninger. Figur 17 gir en oversikt over hvilke toleransekriterier som benyttes for å fastsette tilgjengelig rømningstid i forbindelse med brann- og røykmodellering. Kritiske konsentrasjoner for en rekke stoffer er gjengitt, basert på PIARC (1999), i vedlegg 1.



Parameter	Kriterium	
Sikt	Sikt ikke mindre enn 3 m i startbranncellen med areal inntil 100 m ² .	
	Sikt ikke mindre enn 10 m ved 2 m høyde i rømningsvei og brannceller med areal inntil 100 m ² .	
	Et alternativ for å angi sikt er røykfri høyde på 1,6 m + 0,1 x H.	
Termisk ^a	Sammenhengende strålingsintensitet på maks 2.5 kW/m ² og, en kortvarig strålingsintensitet på maks 10 kW/m ² hvis maks strålingsdose er lavere enn 60 KJ/m ² .	
Temperatur	Gasstemperatur ikke høyere enn 80 ° C	
Giftighet ^b	CO	<2 000 ppm
	CO ₂	<5 %
	O ₂	>15 %
^a I tillegg til energien fra bakgrunnsstrålingen		
^b Når sikten er lavere enn 5 m er det ikke nødvendig å måle giftigheten		

Figur 17: Toleransekriterier for fastsettelse av tilgjengelig rømningstid (fritt oversatt fra Standard Norge, 2014).



3.4.2 Fractional effective dose (FED)-beregninger

Konseptet fractional effective dose (FED) brukes til å evaluere effekten, i form av tid til bevisstløshet og/eller død, av å bli eksponert for giftige gasser. Personer som befinner seg i røykfylte omgivelser eksponeres for flere giftige gasser samtidig, og det kan følgelig være utfordrende å forholde seg til konsentrasjoner og grenseverdier for hver enkelt gass. FED-konseptet løser dette ved å summere bidraget fra hver enkelt gass i form av fraksjoner, her eksemplifisert for CO (Purser & McAllister, 2016):

$$F_{Ico} = \frac{\text{gasskonsentrasjon} \times \text{tid}}{\text{konsentrasjon} \times \text{tid for bevisstløshet}} = \frac{1000 \text{ ppmCO} \times 20 \text{ min}}{35000 \text{ ppm} \cdot \text{min}} = 0,57$$

I eksempelet ovenfor er gasskonsentrasjonen forutsatt å være konstant (1000 ppm) over hele perioden på 20 minutter. Den akkumulerte dosen (1000 ppm x 20 min) deles på dosen som gir enten bevisstløshet eller død, i dette tilfellet bevisstløshet (incapacitation). For å ta høyde for flere gasser, og at gassene ikke har en konstant konsentrasjon over hele tidsforløpet, blir samlet FED et integral, hvor målet er å finne tidspunktet hvor summen av alle bidragene blir 1, eller en annen bestemt toleranseverdi mellom 0 og 1 (Purser & McAllister, 2016):

$$FED = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(Ct)_i} \Delta t$$

Hvor;

- C_i er gjennomsnittlig gasskonsentrasjon for stoff i over tidsintervallet
- Δt er det valgte tidsintervallet [min]
- $(Ct)_i$ er en spesifikk dose, uttrykt som [konsentrasjon x minutter] som vil resultere i en effektiv dose som tilsvarer et gitt utfall, eksempelvis bevisstløshet eller død.

FED er lik 1 på det tidspunktet den kumulative effekten av eksponering er lik den kritiske dosen for hhv bevisstløshet eller død.

Purser (1989) gir et eksempel på hvordan bidraget fra hver gass summeres og påvirkes av hverandre, som illustrerer kompleksiteten i å beregne akkumulert dose av giftige gasser:

$$\text{Total } F_{IN} = (F_{Ico} + F_{Icn}) \cdot VCO_2 + F_{Io} \text{ eller } F_{Ico2}$$

Hvor;

- F_{IN} er samlet FED for «incapacitation» for definerte stoff
- F_{Ico} er bidrag fra CO
- F_{Icn} er bidrag fra HCN
- VCO_2 er bidrag fra CO₂ som følge av økt respirasjon
- F_{Io} er bidrag fra redusert oksygen
- F_{Ico2} er kveldende effekten av CO₂

Formelen sier at CO og HCN kan sees på som uavhengige, men opptaket vil påvirkes av mengden CO₂ som finnes i luften. Summen av CO og HCN-fraksjonene multipliseres med en CO₂-avhengig faktor, VCO₂. I tillegg summeres enten fraksjonen som følger av den bedøvende effekten av redusert oksygen eller høyt CO₂-nivå.



I tillegg til FED, som er knyttet til effekten av kvelende gasser, kan det også være hensiktsmessig å se nærmere på bidraget fra irriterende gasser, *Fractional Effective Concentration* (ISO, 2012). Som beskrevet i kapittelet om ganghastighet i røyk, påvirker irriterende gasser evnen til å utføre aktivitet under påvirkning av røyk. Høy konsentrasjon av irriterende gasser kan dermed redusere ganghastigheten, som bidrar til lengre eksponeringstid og høyere FED-verdier.

Usikkerhet og bruksområde

ISO 13571:2012 (ISO, 2012:6-7) anslår usikkerheten knyttet til resultatene av FED- og FEC-beregninger til å være i størrelsesorden +/- 35-50 %. Hostikka et al. (2021) sammenligner metoden i ISO 13571 med Pursers modell (Purser & McAllister, 2016), som begge bygger på det grunnleggende konseptet for FED og FEC. Forskjellen er at ISO 13571 begrenser seg til CO og HCN, mens Purser også inkluderer NO_x. Resultatet er at beregninger med Pursers modell gir betraktelig høyere verdier for FED og FEC. I Pursers modell forutsettes alle nitrogenoksider (NO_x) å ha lik effekt på giftighet, mens Hostikka et al. (2021) argumenterer for at NO₂ er langt giftigere enn NO. Når de tar hensyn til dette, synker også verdiene beregnet med Pursers modell, men er fortsatt høyere enn verdiene beregnet med ISO 13571. Konklusjonen fra Hostikka et al. (2020) er at NO₂ og NO må håndteres hver for seg (egne fraksjoner), som både synliggjør viktigheten av å kombinere effekten av ulike gasser og samtidig synliggjør en svakhet med forutsetningene i ISO 13571.

Det er omfattende usikkerhet knyttet til beregninger av både røykgasskonsentrasjoner og effekten på mennesker, som betyr at beregningsresultater må benyttes med forsiktighet (Østrem & Njå, 2020). Sensitivitetsanalyser bør brukes til å teste om konklusjonene er tilstrekkelig robuste for variasjoner i usikre størrelser. Det er grunn til å være særlig forsiktig med å trekke bastante konklusjoner basert på denne typen beregninger når eksponeringstiden for røyk er lang, som kan være tilfelle i tunneler uten nødutganger. Mer kunnskap er nødvendig for å gi generelle anbefalinger om bruk i lange tunneler med lang eksponeringstid. I tunneler med nødutganger vil rømningstiden være begrenset til noen minutter. Her finnes det et større erfaringsgrunnlag fra bygninger, som tilsier at denne typen beregninger gir et godt grunnlag for å ta beslutninger om rømningssikkerhet. Analysen til Hostikka et al. (2021) viser samtidig at forutsetningene som gjøres kan få betydelige konsekvenser for resultatene, som krever at analytikeren har god oversikt over variablene som inngår i beregningen.



4 Forslag til videre arbeid

Gjennom arbeidet med denne studien er det identifisert relevante temaer som kan være aktuelle å følge opp i videre studier:

- Effekten av deteksjonssystemer. Oversikt over tilgjengelige systemer og forventet effekt ved ulike brannscenarier og/eller andre utslippsscenarier (gass).
- Effekten av varslingsystemer på reaksjonstid: enkeltvis og i kombinasjon.
- Effekten av ledesystemer på reaksjonstid, ganghastighet og evne til å finne rømningsutgang.
- Betydningen av svært lang avstand til utgang og om dette kan føre til utmattelse hos de som evakuerer. Utgangspunktet er at de fleste rømningsstudier ser på rømning med kort avstand til utgang, hvor eksponeringen for et røykfyllt miljø er relativt kort.
- Muligheten for å bruke eget kjøretøy til rømning: informasjonsbehov, plassbehov for å snu, trafiksikkerhet, korte versus lange kjøretøy, etc.
- Effekten av slokkeanlegg på brannutvikling og påvirkning på evakueringsmuligheter (sikt, temperatur, giftighet i røyk).
- Gjennomførbarhet av automatisk slokkeanlegg mht. frostsikring, aktivering i kaldt klima (kald tunnel), aktiveringsstrategi, inspeksjonsmuligheter/-frekvenser, vedlikehold, m.m.
- Brannventilasjon i lange tunneler: muligheten for styring. Sette ventilasjonsretning, for deretter å snu. Hvilken tidsforsinkelse må forventes og hvordan påvirkes giftighet i gass som returneres ved vending av ventilasjonsretning? Er det mulig å gi bedre veiledning til tunnelforvaltere?
- Brannrisiko og evalueringskriterier knyttet til farlig gods-transport i vegtunneler.
- Brannforløpets inkubasjonstid og deteksjon av tilløp før flammebrann. Kan for eksempel tunneler brukes som «skannere»: Tilstanden på kjøretøy, for eksempel varmesignatur, kan i teorien måles i ulike tunneler på en strekning, og det kan identifiseres kritiske endringer. På denne måten kan én tunnel tidlig på strekningen være en skanner for de neste tunnelene på strekningen, som gir mulighet til å stanse kjøretøy før branntilløp oppstår.



5 Referanser

- An, W., Hu, M., Gao, J., Xie, Y. & Yu, S. (2022). Experiment on Evacuation Behavior in Full-Scale Tunnel with Different Guiding Pattern. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research* (2022) 20:793–804.
- Bjelland, H., Njå, O., Heskestad, A.W. & Braut, G.S. (2021). Emergency preparedness for tunnel fires – A systems-oriented approach. *Safety Science*, 143, 105408.
- Bjelland, H. (2009). Brannsikkerhetskoner for boligblokker – Tiltak med betydning for risiko. Masteroppgave, Universitetet i Stavanger, 2009.
- Borg, A., Njå, N. & Torero, J.L. (2015). A Framework for Selecting Design Fires in Performance Based Fire Safety Engineering. *Fire Technology*, 51, 995-1017, 2015.
- Chen, J., Hu, Z., & Yang, S. (2024). Simulation of Fire Evacuation in a Naturally Ventilated Bifurcated Tunnel. *Fire* 2024, 7, 202.
- Cheong, M.K., Cheong, W.O., Leong, K.W., Lemaire, A.D. & Noordijk, L.M. (2014). Heat Release Rate of Heavy Goods Vehicle Fire in Tunnels with Fixed Water Based Fire-Fighting System. *Fire Technology*, 50, 249-246, 2014.
- DiBK (2017). Byggeteknisk forskrift (TEK17) med veiledning. Direktoratet for Byggkvalitet (DiBK).
- DSB (2019). Analyser av krisescenarioer 2019. Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap, Tønsberg.
- Duffé, P. & Marec, M. (1999). Report of the Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel (in French). French minister of the Interior and Ministry of Equipment, Transportation and Housing.
- Fridolf, K., E. Ronchi, D. Nilsson, and H. Frantzich. 2015. The Relationship between Obstructed and Unobstructed Walking Speed: Results from Evacuation Experiment in a Smoke Filled Tunnel. In *Proceedings of International symposium on Human Behaviour in Fire*, Cambridge, 537–548. September 2015 Gosport: Interscience Communications.
- Fridolf, K., Ronchi, E., Nilsson, D. & Frantzich, H. (2013). Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety Journal* 59 (2013) 8-21.
- Gann, R.G., Babrauskas, V., Grayson, S.J., & Marsh, N.D. (2011). Hazards of combustion products: Toxicity, opacity, corrosivity, and heat release: The experts' views on capability and issues. *Fire Mater.* 2011; 35:115–127.
- Gwynne, S.M.V. & Boyce, K.E. (2016). Engineering Data. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, fifth edition. London: Springer.
- Harris, K. (2013). Fixed Fire Fighting Systems for Road Tunnels. *SFPE Magazine*. <https://www.sfpe.org/publications/fpemagazine/fpeextra/etarchives3/fpeetissue78>.
- Hostikka, S., Veikkanen, E., Hakkarainen, T. & Kajolinna, T. (2021). Experimental investigation of human tenability and sprinkler protection in hospital room fires. *Fire and Materials*. 2021;45:823–832.
- Hurley, M. J. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, fifth edition. London: Springer.
- Hynynen, J., Willstrand, O., Blomqvist, P. & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal* 139 (2023).
- Høy, N.P., Brandt, R., Appel, K. & Martens, M. (2014). Evakuering i vegtunneler. Nord-FoU.



- Ingason, H., Li, Y. Z. & Lönnemark, A. (2015). Tunnel fire dynamics. London: Springer.
- ISO (2012). ISO 13571:2012(E) Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires. ISO 2012.
- Jin, T. (1997). Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke. Proceedings of the Fifth International Symposium on Fire Safety Science, pp 3-21.
- Kristoffersen, B. og Stenstad, V. (2001). Bruk av brennbar isolasjon. SINTEF NBL, rapport STF22 A00851, 12.01.2001.
- Kuligowski, E.D., Gwynne, S.M. (2009). The need for behavioral theory in evacuation modeling. In Pedestrian and evacuation dynamics 2008, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 721-732.
- Lemaire, T. & Kenyon, Y. (2006). Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel. Fire Technology, 42, 329-350, 2006.
- Li, Y.Z. & Ingason, H. (2021). Parametric study of design fires for tunnels with water-based fire suppression systems. Fire Safety Journal, 120 (2021).
- Li, W., Seike, M., Fujiwara, A. & Chikaraishi, M. (2024a). Tunnelling and Underground Space Technology 153 (2024) 106010
- Li, W., Seike, M., Fujiwara, A. & Chikaraishi, M. (2024b). Structural equation modeling of negative emotion and walking behavior by smoke-filled model-scale tunnel experiments. Safety Science 171 (2024).
- Li-Yu, C., Seike, M., Kawabata, N., Hasegawa, M., Chien, S-W. & Shen, T-S. (2022). Walking speed probability distribution in smoke-filled tunnel experiments. Journal of the Chinese Institute of Engineers 2022, VOL. 45, NO. 8, 661–668.
- Lundström, U. (2023). Development of the Swedish road tunnel safety concept. International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS), Stavanger 2023.
- NIST (2024). Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, US.
- Njå, O. & Kuran, C. (2014). Experiences from the rescue work and self-rescue during the fire in the Oslofjord tunnel on 23 June 2011 (in Norwegian). Stavanger, Norway: International Research Institute of Stavanger (IRIS).
- NKB (1994). Performance Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation. Nordic Committee on Building Regulations, NKB Fire Safety Committee. NKB Committee and Work Reports 1994:07 E.
- Opstad, K. & Stensaas, J.P. (1998). Håndbok i Branntekniske Analyser og –Beregninger. SINTEF Bygg og Miljøteknikk – Norges Branntekniske Laboratorium, Trondheim 1998.
- PIARC (2017). Design Fire Characteristics for Road Tunnels. PIARC Technical Committee 3.3 Road Tunnels Operations of the World Road Association.
- PIARC (2016). Fixed fire fighting systems in road tunnels: Current practices and recommendations. Technical Committee C.3.3 Road Tunnels Operations of the World Road Association.
- PIARC (2008). Human factors and road tunnel safety regarding users. PIARC Technical Committee C.3.3 Road Tunnels Operations of the World Road Association.
- PIARC (1999). Fire and Smoke Control in Road Tunnels. PIARC Committee on Road Tunnels (C5).



- Purser, D.A. & McAllister, J.L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, fifth edition. London: Springer.
- Purser, D.A. (1989). Modelling Toxic And Physical Hazard In Fire. Proceedings to the 2. IAFSS Tokyo, Japan from June 13 to 17, 1988.
- Robbins, A.P. & Wade, C.A. (2007). Soot Yield Values for Modelling Purposes – Residential Occupancies. BRANZ Study report 185 (2007).
- Ronchi, E., Fridolf, K., Frantzich, H., Nilsson, D., Walter, A.L., & Modig, H. (2018). A tunnel evacuation experiment on movement speed and exit choice in smoke. Fire Safety Journal 97 (2018) 126-136.
- Ronchi, E., Nilsson, D., Kojic, S., Eriksson, J., Lovreglio, R., Modig, H. & Walter, A.L. (2016). A Virtual Reality Experiment on Flashing Lights at Emergency Exit Portals for Road Tunnel Evacuation. Fire Technology, 52, 623-647, 2016.
- Ronchi, E., Norén, J., Delin, M., Kuklane, K., Halder, A., Arias, S. & Fridolf, K. (2015). Ascending Evacuation in Long Stairways: Physical Exertion, Walking Speed and Behaviour, Lund University, Lund, 2015.
- Seike, M., Kawabata, N. & Hasegawa, M. (2023). Walking speed under emergency situation in smoke-filled tunnel with obstacles. Tunnelling and Underground Space Technology 133 (2023) 104939.
- SHT (2016). Report on a fire in a tank trailer in the Skatestraum tunnel in Sogn og Fjordane 15th of juli 2015 (in Norwegian). Norwegian Safety Investigation Authority (NSIA).
- SHT (2015). Report on a fire in an HGV on the E16 in the Gudvanga tunnel in Aurland 5th of august 2013 (in Norwegian). Norwegian Safety Investigation Authority (NSIA).
- SHT (2013). Report on a fire in an HGV on the rv 23, Oslofjord tunnel 23. juni 2011 (in Norwegian). Norwegian Safety Investigation Authority (NSIA).
- Sintef Byggforsk (2016). 520.385 Tilgjengelig rømningstid. Byggforskserien, 2016.
- Skjermo, J., Moscoso, C. Nilsson, D., Frantzich, H., Hoem, Å.S., Arnesen, P. & Jenssen, G.D. (2024). Analysis of visual and acoustic measures for self-evacuations in road tunnels using virtual reality. Fire Safety Journal 148 (2024) 104224.
- Standard Norge (2014). NS/INSTA 950:2014 Analytisk brannteknisk prosjektering - Komparativ metode for verifikasjon av brannsikkerhet i byggverk. Standard Norge, 2014.
- Standard Norge (1998). Veiledning til NS 3901 Risikoanalyse av brann i byggverk, 01.10.1998.
- Storm, A. & Celerander, E-S. (2022). Field evacuation experiment in a long inclined tunnel. Fire Safety Journal 132 (2022) 103640.
- Sturm, P., Föbleitner, P. Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S.F., Krausbar, S. & Heger, O. (2022). Fire test with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. Fire Safety Journal 134 (2022) 103695.
- Sun, P., Bisschop, R., Niu, H. & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fire in Electric Vehicles. Fire Technology 56 (2020).
- SVV (2024a). Risikovurderinger av vegtunneler: Veileder til tunnelsikkerhetsforskriften. Statens Vegvesen rapport nr. 989, 2024.
- SVV (2024b). N500:2024 Vegtunneler. Statens Vegvesen.



Voeltzel, A. & Dix, A. (2004). A comparative analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard tunnel fires. Routes and roads : Special issue on Tunnels (no. 324), 2004.

Wang, K., Hu, J., Chen, R. & Wang, J. (2023). A Study on the Evacuation of an Extra-Long Highway Tunnel Fire—A Case Study of Chengkai Tunnel. Sustainability 2023, 15, 4865.

Yan, G., Wang, M., Yan, T. & Qin, P. (2022). Evacuation speed of human beings in road tunnels at different altitudes. Tunnelling and Underground Space Technology 128 (2022) 104651

Zeng, G., Li, Z., Ye, R., & Cao, S. (2024). Evacuation performance of individuals and social groups in a tunnel under no visibility. Tunneling and Underground Space Technology 146.

Zhang, Z., Yao, X., Xing, Z. & Zhou, X. (2024). Simulation on passenger evacuation of metro train fire in the tunnel. Chaos, Solitons & Fractals 187 (2024).

Zhang, Y. Yan, Z., Zhu, H., Shen, Y., Guo, Q. & Guo, Q (2019). Experimental investigation of pedestrian evacuation using an extra-long steep-slope evacuation path in a high altitude tunnel fire, Sustain. Cities Soc. 46 (2019).

Østrem, L. & Njå, O. (2020). Uncertainties related to fire smoke toxicity in tunnels. Paper to be presented at the ISTSS conference (Munich – cancelled due to Covid-19).



6 Vedlegg: Effekt av ulike giftige gasser (PIARC, 1999)

Type gass		Antatt LC ₅₀ (for mennesker)		Referanse	Referansedata (art, minutter) h=menneske, r=rotte, m=mus, p=primater, gpg=marsvin, ham=hamster, rbt=kanin
		5 min (ppm)	30 min (ppm)		
CO ₂	Karbondioksid	>150.000	>150.000	Levin et al. (1987b)	r
NH ₃	Ammoniakk	20.000	9.000	Sakurai (1988) Nishimaru (1985)	EC(m,5)=20.000; EC(m,30)=4400 EC(r,5)=10.000; EC(r,30)=4000
HCl	Hydrogenklorid	16.000	3.700	Hartzell et al. (1985) Higgins et al. (1972)	r, p LC(r,5)=40.989
CO	Karbonmonoksid		3.000	Levin et al. (1987b) Kimmerle (1974)	LC(r,30)=4600 LC(h,30)=3000
NO	Nitrogenoksid	10.000	2.500	ACGIH (1980)	1/5 så giftig som NO ₂ . LC(h,1)=15,000
H ₂ S	Hydrogensulfid		2.000	Sax (1984) Kimmerle (1974)	LC(m,60)=673; LC ₀ (h,30)=600; LC ₀ (ham),5=800 LC(h,30)=2000
HF	Hydrogenfluorid	10.000	2.000	Sax (1984) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(gpg,15)=4327; LC(p,60)=1774; LC ₀ (h,30)=50 LC(m,60)=456; LC(r,60)=1276 LC(r,5)=18 200 LC(gpg,2)=300; LC(m,5)=6247; LC(r,5)=18 200
NO ₂	Nitrogendioksid	5.000	500	Sakurai (1988) Nishimaru (1985) Higgins et al. (1972)	EC(m,5)=2 500; EC(m,30)=700 EC(r,5)=5 000; EC(r,30)=300 LC(m,5)=83 331; LC(r,5)=1 880
SO ₂	Svoveldioksid	500		Sax (1984) Kimmerle (1974)	(Rodents poor?), LC(m,300)=6 000 LC(var.,5)=600 til 800
HCN	Hydrogencyanic (Blåsyre)	280	135	Levin et al. (1987b) Higgins et al. (1972) Kimmerle (1974)	LC(r,5)=570; LC(r,30)=110 LC(r,5)=503; LC(m,5)=323 LC(h,30)=135; LC(h,5)=280



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag