



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND



MULTICONSULT

Rømning ved brann i ettløps veitunneler med toveistrafikk



Bacheloroppgaven utført ved
Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for IngeniørFag

Sikkerhet, Brannteknikk

Av: Jeroen Wiebes

Kandidatnummer 11

Haugesund

Vår 2012

HOVEDPROSJEKT

Studentens navn: Jeroen Wiebes

Linje & studieretning Sikkerhet, Brannteknikk.

Oppgavens tittel: *Rømning ved brann i ettløps veituneller med toveistrafikk*

Oppgavetekst:

Norge er et land med mange tunneler, enten gjennom fjell eller under sjøen. Mange av disse tunnelene har bare et løp med toveiskjøring. Dette fører til flere utfordringer i å ivareta rømningssikkerheten til brukere av disse tunnelene. Noen av problemene er lange avstander til sikkert sted, fare for møteulykker som igjen kan føre til brann og at forbikjøring ikke er mulig lengre og ventilasjonsretning som fører til at halve tunnelen blir fylt med røyk. Denne løsningen med toveiskjøring i et løp fører også til at lagdelingen mellom røyk og luft, som vanligvis oppstår ved en brann i en tidlig fase, vil bli ødelagt og hele tverrsnittet blir fort blandet med røyk. Ved flere anledninger har det vist seg at folk ikke klarer å komme seg ut av tunnelen på grunn av for dårlig sikt oppstrøms (for eksempel Seljestadtunnelen 2000 og Oslofjordtunnelen 2011). Derfor er det viktig at det blir sett på denne problemstillingen om rømning fra veituneller.

Denne oppgaven går først ut på å finne ut hvordan en brann oppfører seg i en tunnel og hvor annerledes den er i forhold til det fri og i vanlige bygg og hvilke utfordringer dette gir. Videre vil det bli sett på hvordan det norske lovverket prøver å ivareta rømningssikkerheten og hvordan mennesker oppfører seg når de må rømme fra en brann i en tunnel. Til slutt vil en brann bli simulert i Seljestadtunnelen som case for å se om lovverket har ivaretatt sikkerheten til alle brukere både opp- og nedstrøms for ventilasjonsretningen. Som konklusjon vil det bli sett på resultatene av simuleringen og se om det er noe som kan bli gjort for å ivareta rømningssikkerheten bedre.

Endelig oppgave gitt: *(senest 04.03 – da fjernes dette og reell dato settes i stedet!)*

Innleveringsfrist: Fredag 4.mai 2012 kl. 12.00

Intern veileder Bjarne Paulsen Husted

Ekstern veileder Henrik Bjelland, Multiconsult AS

**Godkjent av
studieansvarlig:
Dato:**

Forord

Som en avslutning på en treårig studie som branningeniører ved Høgskolen Stord/Haugesund, skal det skrives et hovedprosjekt. Dette prosjektet er obligatorisk for alle som skal fullføre en bachelorgrad og gir 15 studiepoeng. Arbeidet med denne oppgaven har vært interessant og lærerik, men også tidskrevende. Det har i denne oppgaven blitt arbeidet mye med dataprogrammet FDS, i tillegg til mye lesing av artikler og lovverket som handler om brannsikkerhet i tunneler. Den opparbeidede kunnskapen sees på som meget nyttig i videre karrieren, da det blir mer aktuelt å bruke dataprogrammer for å dokumentere brannsikkerhet ved prosjektering.

Takk til:

Bjarne Paulsen Husted: Intern veileder ved HSH, for god hjelp med simuleringene og tilbakemeldingene.

Henrik Bjelland: Ekstern veileder ved Multiconsult, for gode og raske tilbakemeldinger til rapportskrivningen.

Christine Finnvik Kjos, kona mi, for all støtte jeg har fått gjennom hele studiet.

Haugesund, 4. mai 2012

Jeroen Wiebes



Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	iii
1 Innledning	1
2 Generell teori.....	3
3 Regelverk	11
4 Designbrann til en tunnel	20
5 Menneskelig oppførsel ved rømning fra veitunnel	24
6 Casebeskrivelse og inndata	32
7 Resultater.....	43
8 Diskusjon.....	58
9 Konklusjon	65
Referanser.....	I
Vedlegg.....	III

Sammendrag

Denne oppgaven går ut på å se om det norske regelverket ivaretar rømningssikkerheten god nok i tunneler ved brann i ettløps veitunneler med toveis trafikk.

Det norske regelverket er et detaljstyrt regelverk gjennom håndbøker med standardløsninger som tar lite hensyn til menneskelig oppførelse ved rømning. Nye metoder som vil hjelpe rømning, som et annet ventilasjonssystem eller tydeligere skilter som viser hva å gjøre ved brann, vil ikke kunne brukes med dette regelverket. Ventilasjonsanlegget er også et eksempel, her kan det bare brukes langsgående ventilasjon. Tversgående ventilasjon vil derimot gi mye bedre rømningsforhold for bilistene på begge sidene av brannen. En annen konsekvens ved dette systemet er at brannvesenet vil kunne nærme seg brannen fra begge sidene og ikke bare motstrøms i forhold til ventilasjonsretningen. Selv om forsøk har vist seg at røyken ikke vil nå farlige konsentrasjoner ved bruk av langsgående ventilasjon, er disse forsøk bare gjort med relativ små branner i tunneler med stort tverrsnitt. Det tiltaket som kan gjøre en forskjell, ventilasjonsanlegget, blir dimensjoner etter en dimensjonerende branneeffekt som er for lavt i forhold til branneeffekter målt ved flere forsøk og etter erfaring fra flere branner, dimensjonering av konstruksjonen også. Bruken av dette kan føre til farlige situasjoner som for eksempel at hele tunneler blir fylt med røyk slik at alle bilistene som befinner seg i tunnelen blir eksponert for de farlige gassene og den høyere temperaturen i røyken og at brannvesenet ikke klarer å nærme seg brannen noen av sidene.

Når det finnes flere sikkerhetsnivåer til tunneler med hver sine sikkerhetstiltak, er det viktig at bilistene blir kjent med sikkerhetstiltakene til tunnelen de kjører inn i. Når en hendelse derimot har oppstått er det viktig med tydelige skilter i tunnelen, ikke bare ved inngangen, som viser at en hendelse har oppstått og hva som skal gjøres for å unngå at hendelser hvor mennesker sitter fast i tunnelen på grunn av dårlig sikt. I slike situasjoner hvor sikten er såpass dårlig og informasjon er lite, er det mulig at bilistene tar et dårlig valg som kan føre til at de blir en fare for seg selv og andre. Mennesker søker informasjon om hva de skal gjøre når en farlig situasjon oppstår. Ved toveis trafikk i ett løp vil alltid én side havne i røyken. Et selvforklarende lydsystem som henger over rømningsveien vil gi en betydelig større sjans for å finne rømningsveien og slik også en betydelig større overlevelsesmulighet.

Siden forsøk i tunneler er dyrt og vanskelig er datasimulering en god måte å finne konsekvensene i forhold til rømningssikkerhet ved de forskjellige scenarier. Siden brannen er så avhengig av utformingen til tunnelen og hva og hvor mye som brenner er det veldig vanskelig å si generelt hvordan en brann i en tunnel vil bli. Derfor bør en analyse av rømningssikkerhet inngå i prosjekteringsfase til en ny tunnel, en brannsimulering av tunnelen er da en god måte å vurdere dette på. For å kunne gjøre dette bør forskjellige parametre og en måte å utforme en brannkurve velges som skal brukes for å simulere dette. Dette da på grunn av den store mengden av forskjellige branneeffekter og brannkurver som finnes og kan velges.

Det er også ønskelig med en måte å detektere en brann på uten at det er avhengig av menneskelig handling før tunnelen stenges og nødetatene varsles.



1 Innledning

1.1 Tema

Denne oppgaven fokuserer på rømningsikkerhet ved en tunnelbrann og om det norske regelverket ivaretar dette i tunneler med ett løp og toveis trafikk. For å vurdere det norske regelverket blir det gjennomgått hvilke tiltak som kreves i en tunnel i dag og hvordan de påvirker rømningsikkerheten. Et viktig tiltak som bedrer forholdene i en tunnel er mekanisk ventilasjon. Den bruker da vifter som driver røykgassene ut en åpning. I tillegg til dette blir frisk luft blandet inn i røyken og de farlige gassene fortynnet til lavere konsentrasjoner. Menneskelig oppførelse ved rømning vil også være annerledes enn i vanlige, trygge situasjoner. Derfor er det også en ting som må bli tatt med i betraktningen. Det er derimot viktig å forstå hvor annerledes en brann i en tunnel er for å kunne dømme hvilke tiltak som kan gi best resultat. En brann i en tunnel er veldig spesielt ved at veggene rundt og taket skaper en omhylling rundt brannen, mens veien gjennom tunnelen skaper en åpning i lengderetning. De to tingene gjør at en tunnelbrann er noe annerledes enn en brann i et rom og en brann i det fri. Derfor er det viktig å ha kunnskap om brannutvikling og røykspredning i en tunnel som da igjen kan brukes for å bedømme rømningsikkerheten.

1.2 Bakgrunn

Tunneler er en viktig del av infrastrukturen i Norge, enten fører de gjennom fjell eller fjorder for eksempel for å sørge for at naturen blir minst mulig påvirket eller ved dårlig fjell. På grunn av at tunneler ofte går gjennom fjell eller fjorder er de enkelt sagt et rør med bare en utgang i hver ende av tunnelen. Dette fører til at både varmen, røyken er fanget i tunnelen sammen med bilistene som bruker den.

I en avisartikkel (Glesnes & Johansen, 2009) ble en undersøkelse presentert som handlet om spørsmålet: ” Synes du selv at du vet nok om hvordan du skal forholde deg hvis det begynner å brenne i en tunnel?”. Resultatet var at to av tre kvinner og en av tre menn, svarte nei. Til sammen svarte halvparten at de ikke vet nok. Denne uvitenhet i hvordan å komme seg i sikkerhet ved en brann i en tunnel er farlig og kan gi store konsekvenser. Siden mange av tunnelene i Norge har ett løp med toveis trafikk, vil alltid noen komme på siden av tunnelen hvor røyken blåser til. En kombinasjon av å være på denne siden med ingen sikt og uvitenheten i ikke å vite hvordan å komme seg i sikkerhet kan føre til handlingslammelse som både kan være positiv eller negativ. Ved flere anledninger har det vist seg at personer ble fanget oppstrøms av brannen i en tunnel siden sikten hadde blitt for dårlig og de visste ikke hvordan å komme seg i sikkerhet. Brannene i Seljestadtunnelen i 2000 hvor fire personer ble fanget i røyken etter at en lastebil og 5 personbiler begynte å brenne er et eksempel. Brannen i Oslofjordtunnelen i 2011 er et annet eksempel hvor flere personer også ble fanget i tunnelen på grunn av for dårlig sikt.

Det er viktig at rømningsikkerheten blir ivaretatt i alle bygg. Hvordan er det mulig at de personene ble fanget i tunnelen, er det en risiko som er akseptert? Etter disse hendelsene kom tanken om å se hvordan det norske regelverket prøver å ivareta rømningsikkerheten. Det var derimot vanskelig å finne branner hvor personer har omkommet i Norge. I 2009 var derimot et dårlig år hvor det omkom 5 personer i en brann i Eiksundtunnelen, men ellers har det ikke mange dødsbranner.



1.3 Problemstilling

Hvordan er rømningen i norske veitunneler med ett løp og toveiskjøring ivaretatt av det norske regelverk? Hvordan kan dette forbedres?

1.4 Metode

For å danne et godt grunnlag i teorien rundt brannodynamikk i en tunnelbrann og menneskelig oppførelse ved rømning, blir det først gjort en litteraturstudie for å få en god forståelse på det. Så blir relevante regelverk gjennomgått for å finne tiltakene som skal ivareta rømningssikkerheten i en tunnel.

Normal prosjektering av tunneler gjøres ut i fra tabeller. I denne oppgaven er en riktig brann brukt i simuleringene for å kunne forutsi forholdene i en tunnel. Simuleringene er gjort i Fire Dynamics Simulator (FDS). FDS er et program som gjør det mulig å simulere et brannforløp og få vite forholdene gjennom tunnelen under brannen. Det er et anerkjent program som ofte blir brukt i forbindelse med brannprosjektering av byggverk. For at simuleringene skal bli så realistiske som mulig, kreves kunnskap om forhold som påvirker brannutvikling. Programmet krever en tekstfil som beskriver alt fra tunnelens geometri, brannen og målepunktene for å bedømme rømningssikkerheten.

1.5 Avgrensninger

Oppgaven skal finne ut om dagens regelverk ivaretar rømningssikkerheten for tunneler, men bare for tunneler med toveis trafikk og ett løp. Dette blir gjort ved å se på brannen som skjedde den 14. juli 2000 i Seljestadtunnelen. Brannens størrelse den dagen ble antatt å være rundt 32 MW av Grimstvedt (2004). Etter å ha gått gjennom flere artikler kunne brannens størrelse derimot bli antatt å være rundt 45 MW (tom lastebil), ved en full lastet lastebil kunne brannens størrelse til og med komme opp mot 114 MW. Det viser at designbrannen brukt i simuleringen er avhengig av antakelser. Oppgaven skal se om bruk av et annet simuleringsprogram fører til andre resultater enn de fått av Grimstvedt (2004) sin simulering til brannen i Seljestadtunnelen.

Det er i forbindelse med denne oppgaven ikke gjennomført noen praktiske forsøk, da dette er meget kostbart og komplisert. Det er ikke gjennomført et tilfredsstillende antall simuleringer til å kunne si noe om at resultatene vil være representative og pålitelige siden dette trenger flere simuleringer som gir samme resultater. Resultatene gir en indikasjon på hvordan forholdene er nedstrøms fra brannen.

2 Generell teori

I dette kapittelet vil det bli gjennomgått teorien som danner grunnlaget for oppgaven. Det begynnes med en generell beskrivelse av brannodynamikk og blir da supplert med brannodynamikk som gjelder spesifikk i en tunnel. Dette er da for å danne en forståelse av hvordan en brann fungerer og hva som er annerledes ved en brann i en tunnel. Så blir det sagt noe om hvordan ventilasjonsanlegget påvirker brannen, statistikk på brannårsaker i en tunnel og blir de forskjellige fasene i en brann gjennomgått. Til slutt blir det sagt noe om brannsimulering og håndberegninger. Mye av den generelle brannodynamikken er hentet fra Drysdale (1998), mens det som omhandler brannodynamikk i en tunnel er hentet fra Beard og Carvel (2005).

2.1 Generell brannodynamikk

En brann er en ukontrollert forbrenningsreaksjon hvor brennbare stoffer reagerer med oksygen i en eksoterm oksidasjonsprosess. En ukontrollert eksoterm prosess vil si at reaksjonen produserer mer energi enn det trenger for å opprettholde reaksjonen. Forbrenningen avhenger av blant annet brenseltype, blandingsforholdet mellom brensel og oksygen, temperatur, areal av brenseloverflate/vekt forholdet, osv. Hvilke produkter som dannes av en forbrenning bestemmes av brenseltype og forholdet mellom oksygen og brensel. De vanligste er karbonmonoksid (CO), karbondioksid (CO₂) og vanddamp (H₂O). Energien som blir frigitt i en brann blir gitt ved:

$$\dot{Q}_c = \chi \cdot \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c \quad [\text{kW}] \quad (2.1)$$

hvor:

\dot{Q}_c	= energiproduksjon	[kW]
χ	= forbrenningseffektivitet ($0 < \chi < 1$)	[-]
\dot{m}''	= massefluks	[kgm ⁻² s ⁻¹]
A_f	= areal til brenselet	[m ²]
ΔH_c	= brenselets forbrenningsvarme	[kJkg ⁻¹]

I en vanlig brann snakker vi ofte om en diffusjonsflamme. Det vil si en flamme hvor forbrenningsgassene og luften diffunderer inn mot forbrenningssonen, i motsetning til en forblandet flamme hvor brenselet og luften er blandet før det når forbrenningssonen. Diffusjon er da prosessen hvor et stoff blander seg i et annet stoff, fra høy til lav konsentrasjon. Ved en diffusjonsflamme, for en forbrenning av en væske eller et fast stoff, kan massefluksen bli gitt som:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' + \dot{Q}_E'' - \dot{Q}_L''}{L_v} \quad [\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (2.2)$$

hvor:

\dot{m}''	= massefluks	[kgm ⁻² s ⁻¹]
\dot{Q}_F''	= energifluks fra flammene til brenseloverflaten	[kWm ⁻²]
\dot{Q}_E''	= energifluks fra ekstern kilde til brenseloverflaten	[kWm ⁻²]
\dot{Q}_L''	= energifluks tapt fra overflaten	[kWm ⁻²]
L_v	= fordampningsvarme	[kJkg ⁻¹]



Ved forbrenning i et rom vil det dannes et røyklag. Dette røyklaget vil ha en viss temperatur som da fører til at det vil stråle energi tilbake mot brenseloverflaten. Dette er et av eksemplene som vil falle under \dot{Q}_E'' . Ved forbrenning i det fri vil den være tilnærmet lik null siden det ikke dannes et røyklag.

Energien fra en brann kan fordeles i strålingsenergi og konvektiv energi. Enten stråles energi til omgivelsene eller tas det med som varmen i den konvektive strømmen i røyklaget på grunn av oppdrift som skyldes temperaturforskjeller mellom røyksøylen og omgivelsen. Fordelingen av energien blir ofte antatt å være 30 % strålingsenergi og 70 % konvektiv energi.

I en brann er det ofte vanskelig å finne ut hvilken forbrenningseffektivitet brannen hadde. Massefluksen er ofte også vanskelig å finne. Da er det en annen mulighet som går ut på antakelsen av at de fleste materialene har lik energiproduksjon for hvert gram oksygen som er brukt i forbrenningen og blir beskrevet av Beard og Carvel (2005, side 185). Den størrelsen som da må finnes er den volumetriske luftstrømmen inn mot brannen (for eksempel mengde luft ventilasjonen blåser inn i tunnelen). Energiproduksjonen kan da tilnærmes ved:

$$\dot{Q}_{\max} = \dot{V}_{\text{luft}} \cdot \rho_{\text{luft}} \cdot 0,21 \cdot \Delta H_{c,ox} \quad [\text{kW}] \quad (2.3)$$

hvor:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\max} &= \text{maksimalt energiproduksjon} && [\text{kW}] \\ \dot{V}_{\text{luft}} &= \text{volumetrisk luftstrøm} && [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \\ \rho_{\text{luft}} &= \text{tetthet til luft som blir suget inn mot brannen} && [\text{kgm}^{-3}] \\ \Delta H_{c,ox} &= \text{forbrenningsvarme ved forbrenning i oksygen} && [\text{kJkg}^{-1}] \end{aligned}$$

Formelen gjelder derimot bare kun ved en overtent brann. Her blir det da gjort den antakelsen at 21 % av luftinnholdet er oksygen. Forbrenningsvarmen ved forbrenning i oksygen for de fleste materialene kan antas å være 13000 kJkg^{-1} . Tettheten til luften som blir suget inn mot brannen kan antas å være $1,2 \text{ kgm}^{-3}$.

2.2 Sammenligning av brann i en tunnel og en brann i det fri

Beard og Carvel (2005, side 231 og 232) viser til to viktige forskjeller mellom en tunnelbrann og en brann i det fri. For det første er det et ledd som står i formel 2.2. Leddet \dot{Q}_E'' representerer den eksterne energien som stråler på overflaten. For en brann i det fri er dette leddet tilnærmet lik null, men for en brann i et rom/tunnel vil dette leddet ha en betydning. Brannen vil varme opp veggene rundt brannen og danne et røyklag. De varme veggene rundt og det varme røyklaget vil stråle tilbake til brenselet og varme opp overflaten ytterligere slik at brannen foregår mer intens. Det ble lagt fram av Carvel, Beard og Jowitt (2001) at energiproduksjonen for en brann i en tunnel vil være 4 ganger større enn den samme brannen i det fri. Oksygentilgang i en tunnel er ikke det samme som i det fri heller. Brannen kan enten utvikles til å bli brenselkontrollert som betyr at det er et overskudd av oksygen ift. mengde brensel som er tilgjengelig eller ventilasjonskontrollert som betyr at det ikke er nok oksygen tilgjengelig for å forbrenne alle tilgjengelige brennbare gasser. Ved en ventilasjonskontrollert brann vil store mengder med giftige gasser og produkter av ufullstendig forbrenning bli produsert.



For det andre vil røyken bli påvirket av ventilasjonsanlegget. Feil dimensjonering av ventilasjonsanlegget kan føre til at en strøm av varme gasser og røyk klarer å bevege seg mot ventilasjonsretningen ("backlayering"). Slike effekter gir farlige situasjoner for redningsetatene og fører til at giftige damper og gasser blir sendt langt i tunnelen.

2.3 Sammenligning av brann i en tunnel og en brann i et rom

Beard og Carvel (2005, side 232 og 233) viser også til tre viktige forskjeller mellom en tunnelbrann og en brann i et rom. For det første er den maksimale energiproduksjonen til en brann i et rom avhengig av ventilasjonsfaktoren $A_0\sqrt{h_0}$ hvor A_0 representerer arealet til åpningen og h_0 representerer høyden til åpningen. I tunneler er den naturlige ventilasjonen avhengig av mange faktorer: brannstørrelse, helningen til tunnelen, tunneltverrsnittet og areal, lengde, type tunnel og metrologiske forhold ved tunnel åpningen. En tunnel har ofte både naturlig trekk og mekanisk ventilasjon slik at oksygen overskuddet er mye større i en tunnel enn i et rom. Hvordan ventilasjonen og trekket påvirker forbrenningseffektiviteten og energiproduksjonen er derfor en viktig forskjell.

For det andre kan en overtenning lett skje i en brann i et rom. Det kan derimot nesten ikke skje i en tunnel på grunn av det store varmetapet til veggene og mangel av oppsamling av røykgasser under taket. På grunn av ventilasjonsforholdene er en branngasseksplasjon også veldig usannsynlig. Hvis den mekaniske ventilasjonen blir aktivert ved en underventilert brann, vil det kunne gi dramatiske konsekvenser.

For det tredje er dannelsen av et røyklag annerledes. I begynnelsen av en rombrann blir det dannet et varmt røyklag øverst i rommet og et kaldt lag med luft nederst. Det samme vil også skje i en tunnel hvor ventilasjonen ikke er på ennå. Røyklaget vil derimot synke ned mot gulvet når det beveger lengre fra brannen. Hvis tunnelen er langt nok, vil det nå helt til underlaget. Hvor langt fra brannen dette vil skje er avhengig av brannstørrelse, tunneltype, tverrsnittet, bredde og høyde. Når ventilasjonen skrur på, vil røyklaget bli blandet med luften i tunnelen slik at det ikke er et klart røyklag og luftlag lengre.

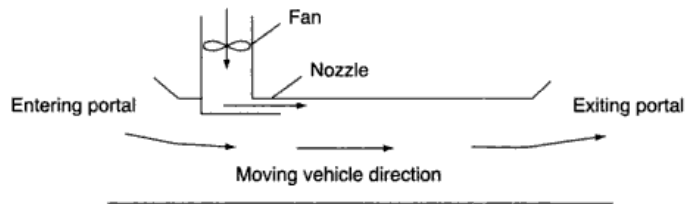
2.4 Ventilasjon i en tunnel

Ventilasjonssystemet er en viktig faktor i en tunnelbrann, derfor er det viktig å ta dette med som et eget kapittel om hvordan det påvirker brannen. Mye av informasjonen som handler om ventilasjon og hvordan det påvirker en brann i en tunnel er hentet fra Lönnermark (2005, side 41-67). Siden ventilasjon er så pass viktig i å bestemme forholdene til en brann i en tunnel vil det først kort bli gjennomgått de forskjellige ventilasjonstypene. Ellers blir det gjennomgått de to forskjellige fenomener som blir observert ved tunnelbranner: effekten av ventilasjon på energiproduksjonen og "backlayering". Til slutt vil det kort bli gjennomgått ventilasjonens påvirkning på forholdene i tunnelen.

Ventilasjonssystemer

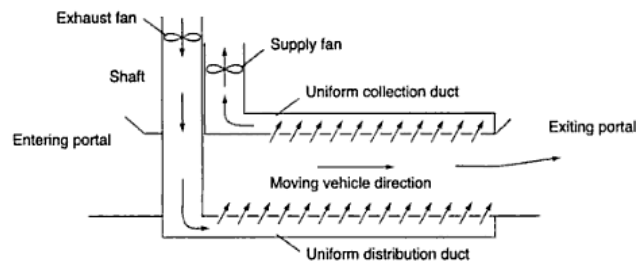
I vanlig bruk må toksiske gasser fra trafikken bli ventilert ut av tunnelen. I korte tunneler eller tunneler med lav trafikk vil dette bli gjort av naturlig ventilasjon. Det kan bli skapt av enten bevegelse av biler i tunnelen, høyde forskjell mellom tunnelåpninger, temperaturforskjeller eller metrologiske forhold. Strømmen kan da gå fra åpning til åpning, åpning til en sjakt eller fra sjakt til sjakt. For mekanisk ventilasjon finnes det to hovedsystemer: langsgående eller tversgående ventilasjon.

Langsgående ventilasjon er en luftstrøm som går fra den ene enden til den andre enden av tunnelen ved at det monteres vifter som skaper denne luftstrømmen.



Figur 1: Langsgående ventilasjon (Beard & Carvel, 2005)

Tversgående ventilasjon kan ha flere forskjellige systemer, men generelt er det flere inn- og/eller uttak for luft fordelt over tunnelen. Forskjellen med langsgående ventilasjon er at luftstrømmen ikke strømmer fra inngangsportalen til utgangsportalen.



Figur 2: Eksempel på tversgående ventilasjon. (Beard & Carvel, 2005)

I flere forsøk har det blitt vist at det å suge ut luft lokalt der brannen befinner seg er en god måte å skape bedre forhold for både de som rømmer og redningsmannskapene. Tversgående ventilasjonsanlegg blir derimot lite brukt på grunn av de store kostnadene forbundet til det.

Ventilasjonens påvirkning av energiproduksjonen

Ventilasjonen påvirker både energiproduksjonen og hvor fort brannen vokser. Carvel (2004) brukte følgende formelen i sin doktorgradavhandling for å vise sammenhengen mellom energiproduksjonen i det fri og i en tunnel:

$$\dot{Q}_{tunnel} = k \cdot \dot{Q}_{unrestricted} \quad [\text{kW}] \quad (2.4)$$

Beard og Carvel (2005, side 184-198) har brukt denne formelen og vist ved en ventilasjonshastighet på 2 ms^{-1} at energiproduksjonen økes med 1,5 ganger og brannveksten blir 3-4 ganger fortere. Ved en lufthastighet på 6 ms^{-1} vil energiproduksjonen øke med 3 ganger og brannveksten økes med 6 ganger. Videre forsøk beskrevet i Lönnermark (2005, side 42) har vist for en tunnel med et felt at med en lastebilbrann og en lufthastighet på 2 m/s brannveksten vil øke 7 ganger, mens energiproduksjonen blir 4 ganger høyere enn ved naturlig ventilasjon. Ved en lufthastighet på 10 m/s vil brannveksten øke 22 ganger og energiproduksjonen 8 til 9 ganger. Ved forsøk i den 2. Beneluxtunnelen og Runehamartunnelen, med 2 felt, viste det seg at med en lastebilbrann og en lufthastighet på 2 m/s , brannveksten vil øke med 3 til 4 ganger og energiproduksjonen med 1,5 ganger ift. naturlig ventilasjon. Ved 10 m/s var disse verdiene



forholdsvis 6 og 3. For bilbranner ble det konkludert at brannveksten og energiproduksjonen ikke vil bli påvirket med en lufthastighet over 1,5 m/s. Grunnen til at ventilasjon vil øke brannveksten og energiproduksjonen kan hovedsakelig bli funnet i at forbrenningseffektiviteten blir høyere når mer luft blir tilført. Brannen går til en godt ventilert brann hvor energiproduksjonen bare er avhengig av tilgjengelig energi som blir produsert ved at de brennbare stoffer i tunnelen begynner å dampe ut brennbare gasser.

Backlayering

”Backlayering” er når røyken beveger seg mot ventilasjonsretningen, som da blir skapt av langsgående ventilasjon. Dette fenomenet kan skje ved spesifikke omstendigheter ved lufthastighet og energiproduksjon. Dette skaper da en farlig situasjon for de som rømmer motstrøms av ventilasjonsretningen.

Thomas (1968) var én av de første som klarte å vise sammenhengen for den kritiske lufthastigheten for å unngå at røyk beveger seg mot luftstrømmen i en tunnel. Ut i fra forsøkene kom det fram en formel som kan brukes til beregning av den kritiske lufthastigheten:

$$u_{\sigma} = k \left(\frac{g \dot{Q} H_t}{c_p T \rho_0 A} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.5)$$

hvor:

u_{σ}	= den kritiske lufthastigheten mot ”backlayering”	[m/s]
A	= tverrsnittareal til tunnelen	[m ²]
H_t	= høyde av tunnelen	[m]
T	= temperaturen til det varme røyklaget	[K]
k	= en konstant som ikke ble bestemt av Thomas, ble antatt å være rundt 1	
g	= gravitasjonskonstanten	[ms ⁻²]
ρ_0	= lufttetthet	[kgm ⁻³]
c_p	= varmekapasiteten til luft	[kJkg ⁻¹ K ⁻¹]

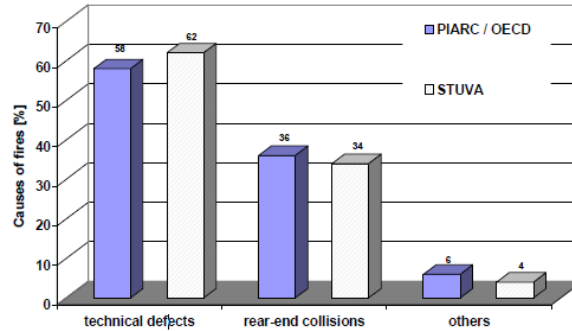
Lönnermark (2005, side 48) beskriver resultatet etter forskning på denne formelen for å bestemme den konstanten, k. Det forskere (Saito, Yamada, Sekizawa, Yania, Watanabe og Miyazaki, 1995) kom fram til var at konstanten k skal være lik 1,26.

Ventilasjonens påvirkning på forholdene i tunnelen

Ventilasjonen er en viktig faktor som vil påvirke, og forhåpentlig forbedre, forholdene i en tunnel. Langsgående ventilasjon kan forbedre forholdene motstrøms av ventilasjonsretning som gjør det mulig for de som er på denne siden av brannen å rømme og brannvesenet i å nå brannen på en trygg måte. I en del tunneler er det i Norge bestemt på forhånd en ventilasjonsretning ved brann. For det første for å gjøre det forutsigbar for brannvesenet om de klarer å nå brannen, for det andre er det vist med forsøk i Byfjordtunnelen (1998) og Bømlafjordtunnelen (2000) at konsentrasjonen av CO og NO_x ikke er farlig på grunn av den store mengde frisk luft som blir blandet inn i røyken og gjør konsentrasjoner til farlige gasser mindre.

2.5 Statistikk på brannårsaker i en tunnel

Marlair, Lemair og Öhlin (2002) beskriver at brannårsaken i en tunnel oftest er tekniske problemer, som vist i bildet under. Tekniske problemer kan da være for eksempel overoppheting av bremsene som ofte skjer i lastebiler som ikke er utstyrt med motorbrems. På andre plass kommer ulykker.

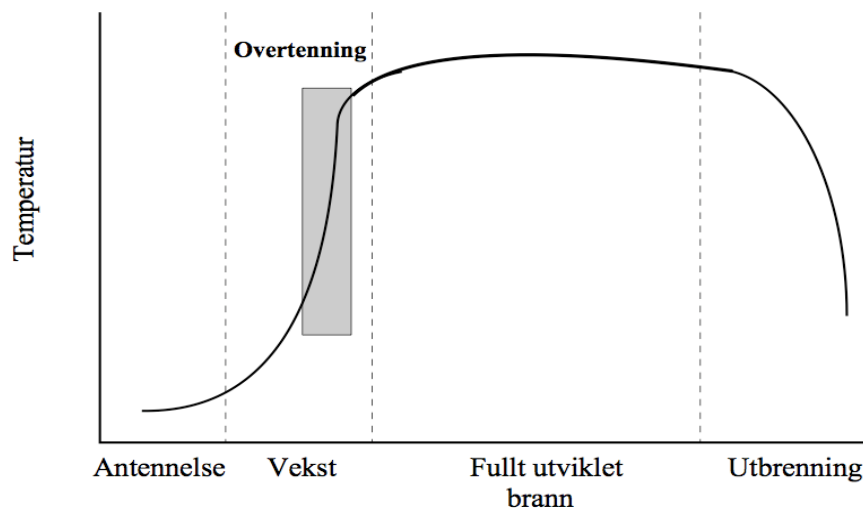


Figur 3: Årsaker til brann i en tunnel (Marlair, Lemair & Öhlin, 2002)

2.6 Utvikling av en brann i en tunnel

Utviklingen av en brann i en tunnel er ganske likt en brann i et rom. En brann i en tunnel er derimot bare brenselkontrollert på grunn av stor tilgang på oksygen på grunn av naturlig trekk og mekanisk ventilasjon.

Brannutviklingen kan deles inn i følgende fasene: antennelse, vekst, overtenning, fullt utviklet brann og utbrenning. Bildet under viser en tid-temperatur kurven som viser de forskjellige fasene i en brann.



Figur 4: Temperatur gjennom fasene i en brann

Etter antennelsen går brannen over til vekstfasen hvor brannutviklingen er avhengig av faktorer relatert til brenselet og selve tunnelen. For brenselet kan det være type brensel, overflateareal, mengde og plassering ift. vegger/tak, mens faktorer til tunnelen kan være geometrien, tverrsnittareal, ventilasjon og eventuelt materialer på overflatene i tunnelen (Grimstvedt, 2004, side 12). Overtening er ofte overgangen mellom vekstfasen og en fullt utviklet brann. Den defineres som at alle brennbare materialer deltar i brannen. I en tunnel er det derimot vanskelig å få en overtenning som nevnt før. Men det er fullt mulig å få en



lokal overtenning på innsiden av en bil eller lastebil. Når brannen er fullt utviklet vil en brann vanligvis være ventilasjonskontrollert, men på grunn av blant annet mekanisk ventilasjon vil det ikke skje i en tunnel. Når brenselet minskes etter hvert vil brannen gå over til en utbrenningsfase.

2.7 Brannsimulering

En brann kan simuleres på forskjellige måter, enten ved håndberegninger, sonemodeller eller CFD modeller (computational fluid dynamics eller også kalt feltmodeller).

Håndberegningsmodeller bruker kjente resultater og empiriske metoder til å beregne faktorer som høyde til røyklaget, temperatur, flammelengde, fordampningsrate, osv. Et eksempel på en håndberegningsmodell for tunneler er den laget av det svenske räddningsverket (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot & Ingason, 2001).

Sonemodeller kan igjen deles opp i en én eller to sonemodell. Én sonemodeller blir brukt etter overtenning hvor forholdene i hele rommet blir antatt å være likt og temperaturen i rommet representeres med én temperatur. To sonemodeller deler rommet i to lag med en øvre og en nedre sone. Den øvre sonen representerer det varme røyklaget, mens den nedre sonen representerer det kalde luftlaget (eksempler på én sonemodeller: COMPF2, OZone og SFIRE-4 og eksempler på 2 sonemodeller: CFAST, CCFM, VENTS og Argos).

Den teoretiske bakgrunnen for modellen kan finnes ved å se på bevaringsligninger for bevaring av energi og masse. Forholdene innen hver sone antas å være likt og varierer bare med tid. Bevaring av moment gjelder derimot ikke for denne modellen slik at hastigheter bare kan finnes ved empiriske sammenhenger.

CFD modeller er de mest avanserte og nøyaktige av modellene. Objektet plasseres i et volum som danner arbeidsområdet for simuleringen. Dette området blir da delt opp i mange små undervolumer. Så blir bevaringsligningene beregnet for alle disse små undervolumene for hvert tidsskritt. Nøyaktigheten øker når antall undervolumer øker. Siden dette er et veldig stort arbeid, og ofte også umulig å gjøre fra hånd, blir dette gjort ved hjelp av en datamaskin. Eksempler på CFD modeller er FDS eller Kameleon FireEx.

I denne oppgaven er det blitt brukt FDS, versjon 6.0.0, for å simulere brannene. Programmet løser numerisk en form av Navier-Stokes ligningen som passer for lav hastighets (ift. lydhastigheten) og termisk drevne strømninger med vekt på røyk- og varmetransport fra brannen.

2.8 Håndberegningsmodell

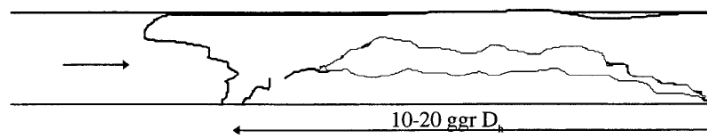
Det finnes få håndberegningsmodeller til en tunnelbrann. Et godt eksempel er den beskrevet av Bergqvist, Frantzich, Hasselrot og Ingason (2001) og vil bli gått gjennom kort her. Grimstvedt (2004) har brukt denne modellen for å gjøre håndberegninger, da på sin simulering #1 som skulle ligne mest på brannen som skjedde den 14. Juni 2000.

Håndberegningsmodellen beregner branngastemperaturer, gasskonsentrasjoner og røyk tetthet ved ulike tidspunkter i visse avstander fra brannen. Antakelsen som er gjort i denne modellen er at det er fullstendig innblanding av røykgasser i luft nedstrøms slik at det bare er én sone som i figur 5.



Figur 5: Antatt fullstendig innblanding av røyk etter brannen

Det som vanligvis skjer er at det dannes et røyklag først som beveger seg langs taket fra brannen. Røyklaget vil etter hvert ved innblanding av luft gå ned mot veien. Dette tar modellen ikke hensyn til. Avstanden hvor røyklaget er ned mot veien er sirka 10-20 ganger den hydrauliske diameteren (D_h) til tunnelen når ventilasjonen ligger på 1 m/s.



Figur 6: Beregning av når røyken når underlaget

Den hydrauliske diameter beregnes slik:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad [\text{m}] \quad (2.6)$$

hvor:

A	= arealet til tverrsnittet til tunnelen	[m ²]
P	= perimeter til tunnelen (indre omkrets)	[m]

Ut i fra flere formler kan temperaturen beregnes til brannen og flere punkter ned i tunnelen, i tillegg til konsentrasjonen i tunnelen av O₂, CO₂ og CO. Håndberegningsmodellen har derimot noen svakheter. Først og fremst er det antakelsen som er nevnt før, det at modellen antar full innblanding av luft i røyken ved brannen, som da fører til at røyken ikke beveger langs taket først. Et annet problem er at modellen antar like forhold gjennom hele tverrsnittet, det vil si at konsentrasjonen på for eksempel CO₂ eller CO er likt over hele tverrsnittet. Den tar ikke hensyn til lagdeling til røyken, fordelingen av å holde seg lavt er ikke tatt hensyn til. Som tredje problem er bevegelsene av røykgassene bare styrt av naturlig og/eller mekanisk ventilasjon. Det fører til at skorsteineffekten som styrer røykgassene ikke er tatt hensyn til heller. Videre antar modellen at konsentrasjoner på CO₂, O₂ og CO beveger seg gjennom tunnelen med en tidforsinkelsen slik at modellen ikke tar hensyn til at mer luft blir blandet inn i røyken etter hvert og konsentrasjonene synker. Siden tåleevne til farlige forhold er veldig avhengig av alder, helsen og tåleevner brukt i modellen er basert på gjennomsnittsverdier, vil mange som ikke faller under kategorien 'gjennomsnittlig' få problemer (som f.eks. eldre og barn). På grunn av disse begrensninger er det valgt å ikke bruke håndberegningsmodellen i oppgaven.

3 Regelverk

I dette kapittelet vil det bli gjennomgått de forskjellige regelverk som er relevant for brann- og rømningssikkerheten i en tunnel i Norge. Først vil det bli dannet en oversikt over de aktuelle regelverk som gjelder for en tunnel i Norge, så vil delene av regelverkene som er relevant for oppgaven bli gjennomgått. Til slutt blir det gått gjennom anbefalinger og regelverk fra andre land og organisasjoner som sammenligning.

3.1 En oversikt over aktuelle lover og forskrifter til tunneler i Norge

Først en liten omsummering av de aktuelle lovene og forskriftene som gjelder til tunneler i Norge:

- Forskrift om minimum sikkerhetskrav for visse vegtunneler, FOR-2007-05-15 nr. 517 (tunnelsikkerhetsforskrift).
- Plan- og bygningsloven
- Forurensningsloven
- Lov om vassdrag og grunnvann
- Kulturminneloven
- Naturmangfoldloven
- Brann- og eksplosjonsvernloven
- Videre gjelder flere lover som omhandler elektrisk anlegg og andre særlover.

3.2 Håndbok 021

Vegvesenet har utgitt håndbøker på to nivåer. Nivå 1 er de viktigste i håndbokhierarki og består av normaler, forskrifter og retningslinjer. Nivå 2 understøtter nivå 1 og består av veiledninger. Håndbøkene er delt opp etter temaer relevant for vegvesenet og alle relevante lover, forskrifter og krav blir oppsummert i dem. Den som er relevant i denne oppgaven er håndbok 021 (Statens vegvesen, 2010). I håndbok 021 står det beskrevet alle forhold ved gjennomføring av et vegtunnelprosjekt, fra tidlig planlegging til ferdig produkt, samt drift og vedlikehold. Den første utgaven kom i 1992. Etter en omfattende revisjon i 2002 og en oppdatering etter EUs branndirektiv i 2006, ble den sist revidert i 2010. Håndboken er avstemt med tunnelsikkerhetsforskriften. Her vises en oppsummering av de relevante kapitlene i forhold til denne oppgaven.

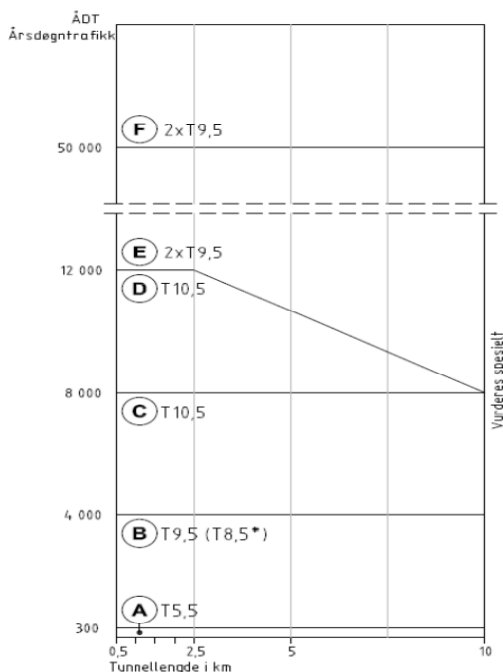
Håndbok 021 Kapittel 4 Geometrisk utforming

Tunnelklassen

Sikkerhetskravene til tunnelen øker med økende trafikkmengde og tunnellengde.

Tunnelene er derfor delt inn i tunnelklasser som bestemmer geometri og utrustning.

Trafikkmengden bestemmes ut i fra årssdøgntrafikk (ÅDT). ÅDT er totalt trafikkmengde pr. år dividert med 365 og angis som sum trafikk i begge retninger. Tunnelklassene går fra A til F, hvor det stilles høyest krav i tunnelklasse F. Ut i fra figur 7 velges tunnelklassen.



Figur 7: Inndeling av tunnelklasser

Tunnelklassene er utgangspunktet for å bestemme tunnelprofil, antall tunnellop, behov for havarinisjer, snunisjer, gangbare tverrforbindelser, nødutganger samt sikkerhetsutrustning. Tunnelprofilen bestemmes rett fra grafen, men det er noen unntak hvor andre profiler kan brukes. Tunnelprofilen sier noe om total bredden i tunnelen, et eksempel er profilen T4 som brukes på rømningstunneler og da har 4 meter fri bredde. Nå ligger ÅDT til Seljestadtunnelen rundt 2000 og en lengde på 1273 meter. Dette fører til at Seljestadtunnelen vil havne i tunnelklasse B som da fører til at tunnelprofilen skal tilfredsstillende T9,5.

Havari-/snunisjer

Havarinisjer skal muliggjøre parkering utenfor kjørebanelen ved nødstop. Avstand mellom nisjene er avhengig av tunnelklassen. I tunnelklasse B, C og D skal det anlegges snunisjer for større kjøretøy. Disse kan da brukes av kjøretøy for å snu. Ved brann er det da menning at de som kjører mot brannen kan snu. Tunnelklasse E og F har bare enveiskjøring (to løp) slik at det er trygt for de i ventilasjonsretning (som da er i kjøreretning) å kjøre videre ut av tunnelen på grunn av den farten bilen har. De før brannen vil være i et røykfritt område slik at de trygt kan rømme uten røyk.

Nødutganger

Nødutganger fra en tunnel bygges enten som tverrforbindelser mellom tunnellop, eller direkte utganger fra tunnel til det fri. I tunneler med to parallelle løp skal det være gangbare tverrforbindelser med avstand maksimum 250 meter. I tunnelklasse C som er lengre enn 10 kilometer og klasse D hvor antall kjøretøy pr kjørefelt er over 4000, skal det anlegges nødutganger eller en rømningstunnel. Avstand mellom tverrforbindelsene skal ikke overstige 500 meter.

Håndbok 021 Kapittel 5; Trafikk- og brannsikkerhet

Sikkerhetstiltak

Som sagt er det tunnelklassene som bestemmer kravene til sikkerhetstiltak og sikkerhetsutrustning i tunneler med lengde over 500 meter. Prinsippet for evakuering baserer seg på selvredningsprinsippet, det vil si at trafikantene skal ta seg ut enten til fots eller ved hjelp av eget kjøretøy. Tabell 1 viser de tiltakene som skal sikre et minimum av sikkerhet i tunnelen.

Tabell 1: Sikkerhetstiltak til de forskjellige tunnelklassene

<ul style="list-style-type: none"> ● Krav ○ Vurderes 	TUNNELKLASSER						MERKNADER
	A	B	C	D	E	F	
SIKKERHETSTILTAK							
Havarisjer		●	●	●	●	●	Se kapittel 4 Geometrisk utforming
Snunisjer		●	●	●			Se kapittel 4 Geometrisk utforming
Gangbare tverrforbindelser					●	●	Hver 250. m (se pkt. 4.7)
Nødutganger				●			Krav om enten nødutganger til det fri eller egen rømnings tunnel med tverrforbindelser for tunnelklasse D (antall kjøretøy pr kjørefelt > 4000), og for tunneler lengre enn 10 km i tunnelklasse C (jf. 5.1). Avstand hver 500 m (se pkt. 4.7)
SIKKERHETSUTRUSTNING							
Strømforsyning, belysning og ventilasjon	Se kapittel 10 Tekniske anlegg						
Nødstrømsanlegg	●	●	●	●	●	●	Belysning ved strømutfall. Se pkt. 5.2.2.1 og 10.3.6
Ledelys for tunnel	●	●	●	●	●	●	Ca. 62,5 m avstand. Se pkt. 5.2.2.2
Nødutgangsskilt, og skilt som viser retning og avstand til nødutgang			●	●	●	●	Krav for tunneler med nødutganger og tverrforbindelser. Se pkt. 6.2
Avstandsmarkering i tunnel	●	●	●	●	●	●	Krav for tunneler lengre enn 3 km. Skiltet plasseres for hver 1000 m. Se pkt. 6.2
Nødstasjon	●	●	●	●	●	●	Inneholder nødtelefon og to brannsløkkere. Se fig. 5.1 – 5.5. Hver 125 m. I spesielle tilfeller min. hver 250 m ved oppgradering (jf. 5.2.4). Nødstasjon installeres i tillegg utenfor hver tunnelåpning.
Slokkevann	●	●	●	●	●	●	Aktuelle løsninger i pkt. 5.2.2.4
Rødt stoppblinksignal	○	●	●	●	●	●	Se pkt. 6.3. Tunnelklasse A: krav for tunneler > 1km
Fjernstyrte bomber for stengning		○	○	●	●	●	Se pkt. 5.2.2.5
Variable skilt		○	○	○	○	○	Se pkt. 6.3 og 5.3
Kjørefeltsignaler					○	○	Se pkt. 6.3
ITV-overvåking			○	○	○	○	Se pkt. 5.2.2.6 og 5.3. Krav i tunneler > 3 km og > 2 000 kjøretøyer per kjørefelt
Radio- og kringkastingsanlegg	●	●	●	●	●	●	Se pkt. 5.2.3
Mobiltelefon *	○	○	○	○	○	○	Se pkt. 5.2.3.4
Høydehinder (avviser)	●	●	●	●	●	●	Se pkt. 5.2.2.7

* Ikke sikkerhetsutstyr

Ledelys brukes for å lede trafikantene mot utgangene. Lysene tennes automatisk, ved fjerning av brannsløkker eller ved iverksetting av nødsituasjoner fra VTS eller fra nødstyreskap utenfor tunnelen.

Fjernstyrte bomber skal brukes for enten stenging av tunnelen eller til ledning av trafikken. Dette er et ekstra tiltak i tillegg til rødt stoppblinksignal.

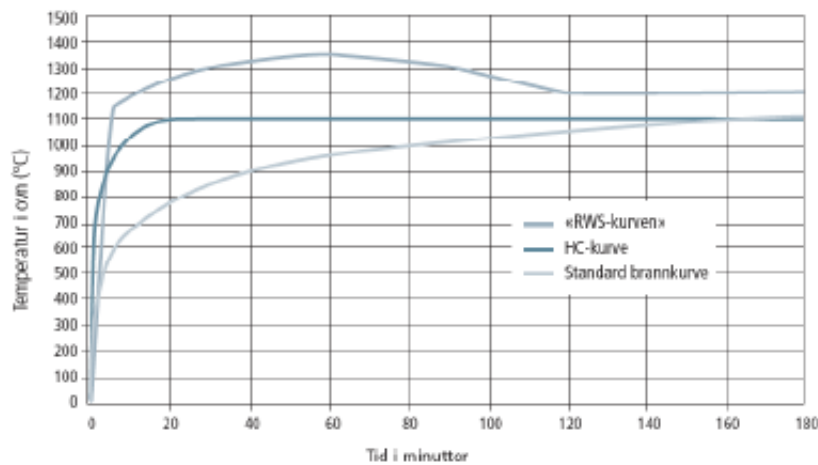
Videovervåking med automatisk registrering av hendelser skal monteres i tunneler med lengde over 3 kilometer i tunnelklasse C, D, E og F. Dette kan også gi vegtrafikksentralene informasjon om hendelser i vegtunnelen slik at utrykningsetatene får nyttig informasjon.

Branndimensjonering av konstruksjoner

Dimensjonerende brann og krav til konstruksjoners brannmotstand er vist i tabell 2 og figur 8.

Tabell 2: Dimensjoneringsparametre til konstruksjonen

Tunnelklasse	Dimensjonerende branneffekt	Eksponeeringskurve	Tid (minutter)
A	20 MW	ISO 834	60
B	20 MW	ISO 834	60
C	50 MW	HC	60
D	100 MW	HC	60
E	50 MW	HC	60
F	100 MW	HC	60



Figur 8: Eksponeeringskurver til dimensjonering av konstruksjonen

Tabell 2 sier at for eksempel en konstruksjon i tunnelklasse A skal dimensjoneres for en brannbelastning på minimum 20 MW i minst 60 minutter. Branntesting av bærende elementer i disse konstruksjonene skal baseres på ISO 834 brannkurven.

For senketunneler, rørbruer og andre konstruksjoner der konsekvensene av en brann kan være vanninnbrudd, eller tap av konstruksjonen, skal konstruksjonen dimensjoneres for en brannbelastning på minimum 200 MW i 2 timer. Bærende elementer skal testes etter brannkurven som er definert av Rijkswaterstaat (RWS-kurven). Det er derimot vanskelig å utføre tester basert på RWS-kurven på grunn av de høye temperatuere.

Transport av farlige gods i tunnelen

I Norge vil de fleste tunnelene ikke ha noen restriksjoner for transport av farlige gods. Dette er på grunn av at det eller må transporteres over fjell og rundt fjorder som både tar mye lengre tid. Dette vil føre til at både eksplosive og veldig brennbare stoffer kan transporteres gjennom tunnelen. Dersom det transporteres særlig farlige gods i tunnelen vil en risikoanalyse kunne belyse behovet for å innføre andre restriksjonsklasser.



Håndbok 021 Kapittel 10; Tekniske anlegg

Brannventilasjon

Tunnelen skal ha flere målere som utløser ventilasjonssystemet ved for høye konsentrasjoner av NO_x, NO₂, NO, CO og for dårlig sikt på grunn av svevestøv. I tunneler med stigning over 2 % skal nødvendig lufthastighet for brannventilasjon beregnes. For de med en helning under 2 % brukes tabell 3:

Tabell 3: Designparametre til ventilasjon

Tunnelklasse	Tunnellengde	Dimensjonerende branneffekt	Eksponeringskurve *	Tid (minutter)	Minimum lufthastighet
A	> 1,0 km	20 MW	ISO 834	60	3,5 m/s
B	> 1,0 km	20 MW	ISO 834	60	3,5 m/s
C	0,5 – 1,0 km	20 MW	HC	60	3,5 m/s
	> 1,0 km	50 MW	HC	60	3,5 m/s
D	0,5 – 1,0 km	50 MW	HC	60	3,5 m/s
	> 1,0 km	100 MW	HC	60	4,5 m/s
E	0,5 – 1,0 km	20 MW	HC	60	3,5 m/s
	> 1,0 km	50 MW	HC	60	3,5 m/s
F	0,5 – 1,0 km	20 MW	HC	60	3,5 m/s
	1,0 – 2,0 km	50 MW	HC	60	3,5 m/s
	> 2 km	100 MW	HC	60	4,5 m/s

3.3 Hvordan norske regelverk ivaretar rømningssikkerheten

Kravet til tunnelklasser er hovedsakelig basert på ÅDT-tallet. Siden Norge er et lite land med få mennesker og liten trafikk, vil ÅDT-tallet ofte være lavt. Dette gjelder spesielt utenfor byene. I kombinasjon med at Norge har mange fjorder og fjell utenfor byen, er det behov for å etablere tunneler. Disse tunnelene vil da få en lav tunnelklasse pga lav ÅDT. Konsekvensen av dette er at det etableres ettløpstunneler med toveistrafikk.

Ved en brann i en tunnel, er det flere måter brannen kan bli registrert. I nødstasjonene er det plassert en nødtelefon og to brannslukkere som alarmerer når de brukes. Disse blir montert i alle tunnelene. I tunnelklassene C til og med F er det en mulighet med videoovervåking slik at en brann også kan registreres slik. Når brannen er registrert vil lyssignaler og i tunnelklasse D, E og F vil også fjernstyrte bomber stenge tunnelen for å hindre at flere vil kunne kjøre inn i tunnelen. I tunneler finnes det ledelys og avstandsmareringer som skal vise veien ut av tunnelen. Tunneler med rømningsveier skal også ha skilt som viser plasseringen og veien til nærmeste nødutgang.

Ved tunneler med bare enveis trafikk kan rømningssikkerheten vurderes å være ivaretatt. Slike tunneler har da flere løp med gangbare tverrforbindelser mellom løpene som rømningsvei, i tillegg vil ventilasjonsanlegget blåse røyken i kjøreretningen slik at de som kjører mot brannen vil være i et røykfritt område med lave temperaturer og de som har kjørt forbi brannen vil kunne kjøre fortere enn røyken klarer å bevege seg gjennom tunnelen.

Fra og med tunnelklasse D og lavere vil tunnelen bare bestå av ett løp med toveis trafikk. I slike tunneler vil ventilasjonsanlegget blåse i en ofte forhåndsbestemte retning (avtalt med brannvesenet). Dette fører til at i tiden mellom brannen har oppstått og brannen blir registrert, vil flere biler kjøre inn i tunnelen mot brannen. I tunnelen er det ikke noe krav om skilt som kan varsle disse biler om å snu og forlate tunnelen. Bilene som nærmer seg brannen oppstrøms vil møte røyken etter hvert. Om de klarer å snu er da avhengig av hastigheten og om de ser røyken tidlig nok. Hvis de klarer å snu tidlig nok, vil de klare å komme seg ut av tunnelen fort nok siden feltet ved siden av vil være tomt (antatt at ingen kjører forbi brannen). De som ikke klarer å se brannen tidlig nok vil havne i røyken.



Tunnelklasse D (og tunnelklasse C tunneler som er lengre enn 10 kilometer) har en rømningsvei uavhengig av tunnellopet som bilene kjører gjennom, enten i form av en rømningstunnel eller rømningsutganger opp mot overflaten. I disse tunnelene må bilistene finne veien til rømningsveien ved å se på skiltene. Når de derimot har havnet i røyken vil disse skiltene ikke være synlig lengre og det å finne veien til nødutgangen blir veldig vanskelig.

I tunnelklasse A til og med C (i tunnelklasse C bare for tunneler kortere enn 10 kilometer) finnes det ikke en rømningsutgang og den eneste rømningsveien er til én av inngangsportalene. Når bilister har havnet i røyken vil det å komme seg ut i sikkerheten bli enda vanskeligere. Det som hadde vært mest uheldig i slike tunneler er hvis en brann hadde oppstått rett inn i inngangsportalen hvor ventilasjonen hadde blåst luft fra videre inn i tunnelen. I en slik situasjon vil hele tunnelen bli fylt med røyk.

3.4 Gjennomgang av andre regelverk/anbefalinger

Norsk regelverk beskriver en dimensjonerende brann for konstruksjonen og ventilasjonssystemet delt inn etter tunnelklasse (og tunnelens lengde) ved å bruke tid-temperatur kurver. Det finnes mange ulike anbefalinger internasjonalt for hva som skal være en dimensjonerende brann for tunneler. Ingason, Bergqvist, Lönnermark, Frantzych og Hasselrot (2005, side 29) viser i tabell 4 en oppsummering av anbefalinger fra PIARC, NFPA og det franske regelverket.

Tabell 4: Designparametre fra de forskjellige organisasjoner og regelverk (Ingason, Bergqvist, Lönnermark, Frantzych & Hasselrot, 2005)

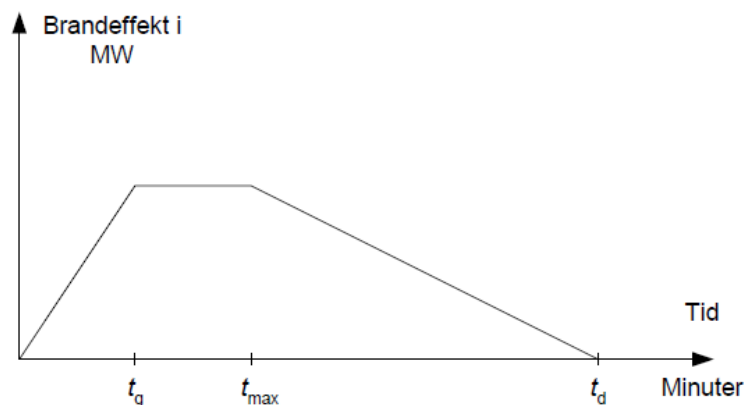
Typ av fordon	PIARC [23]	Franska regler [24]	NFPA [25]
1 liten personbil	2,5	2,5	-
1 stor personbil	5	5	5
2-3 personbilar	8	8	-
Skåpbil (van)	15	15	-
Buss	20	20	20
Långtradare	20-30	30	20-30
Tankbil	100	200	100

Det franske regelverket har ikke tunnelklasser som vi har i Norge, men skiller mellom takhøyde og om farlige gods kan bruke tunnelen. Et eksempel er for dimensjonering av luftventilasjonen som vist i tabell 5 (Ingason, Bergqvist, Lönnermark, Frantzich & Hasselrot (2005), side 29).

Tabell 5: Dimensjonering av ventilasjon ifølge det franske regelverk (Ingason, Bergqvist, Lönnermark, Frantzich & Hasselrot, 2005)

Tunnel och trafiksituation	Typ av fordon	Dimen- sionerande brand (MW)	Dimensio- nerande ventilations- flöde (m ³ /s)	Dimen- sionerande kritisk lufthastighet (m/s)
takhöjd \leq 2,7 m	2-3 personbilar	8	30	2
2,7 m < takhöjd \leq 3,5 m	1 skåpbil	15	50	2,5
takhöjd > 3,5 m - inget farligt gods	1 långtradare	30	80	3
takhöjd > 3,5 m - farligt gods	1 tankbil	200	300	4

Det franske regelverket tar også hensyn til CFD simuleringer ved at den spesifiserer hvordan brannkurven skal se ut. De bruker en kurve med lineær vekst som vises i figur 9.



Figur 9: Energiproduksjon til CFD simulering ifølge det franske regelverk (Ingason, Bergqvist, Lönnermark, Frantzich & Hasselrot, 2005)

De forskjellige tidene for de forskjellige scenarier som det skiller mellom i det franske regelverket er vist i tabell 6.

Tabell 6: De forskjellige tidene ved situasjonen (Ingason, Bergqvist, Lönnermark, Frantzich & Hasselrot, 2005)

Tunnel och trafiksituation	t_g (min)	t_{max} (min)	t_d (min)	frigjord energi (GJ)
takhöjd \leq 2,7 m	5	20	20	15
2,7 m < takhöjd \leq 3,5 m	5	30	20	40
takhöjd > 3,5 m - inget farligt gods	10	60	30	150
takhöjd > 3,5 m - farligt gods	10	60	30	1000

Problemet med å utforme en designbrann som kan brukes for en tunnel er at det er så mange forskjellige resultater fra forsøk som prøver å bestemme energiproduksjonen til kjøretøy. Resultater til flere forsøk er oppsummert i tabell 7.

Tabell 7: Forskjellige forslag til energiproduksjon (Marlair, Lemaire & Öhlin, 2002)

Fire category	Heat Release Rates [MW]								
	Recommendations by institutions ¹⁾				Fire tests			Estimates from large accidents ⁶⁾	
	PIARC		RABT (D) 1994 ⁷⁾	CETU (F) Proposals ³⁾ 1996/1997	NFPA 502 (USA) 1998	EUREKA research: real fires ³⁾ report Ingarson ⁶⁾			Memorial: adopted fire sizes
1987	1999								
Passenger car	5		---	2,5	5	1,5-2 ⁴⁾		---	3-10
Passenger car (large)	---		---	5	---	---		---	
passenger van (plastic)	---	2,5-8	---	---	---	5-6 ⁵⁾	2,5-9	---	
1 - 2 passenger cars	---		5 - 10	---	---	---		---	
2 - 3 passenger cars	---		---	8	---	---		---	
1 van	---	15	---	15	---	---		---	---
1 public bus	---	20	---	---	---	29-34 ⁵⁾	29-34	---	36
1 bus or 1 lorry (freight of lorry not hazardous)	20	---	20 - 30	20	20	---	---	20	---
heavy goods vehicle	---	---	---	30	---	100-130 ⁵⁾	128	---	150-600
petrol/gasoline tanker with a leak	100	100	50 - 100	200	100	---	20-100	---	120-300
flammable spill of 400 liters	---	---	---	---	---	---	---	50	---
flammable spillof 800 liters or hazardous material	---	---	---	---	---	---	---	100	---
mixed load, 2844 kg, (wood, rubber tyres, plastic material)	---	---	---	---	---	15-17 ⁵⁾	---	---	---
carriage	---	---	---	---	---	---	12-47	---	3-100

Biler har endret seg gjennom årene i bruk av materialer (større bruk av blant annet plastikk og komposittmaterialer) i tillegg til at det er forskjell i bruk av materialer mellom de forskjellige bilmerkene. Et annet problem er at noen forsøk er gjort med en simulert last til en lastebil i stedet for å bruke en virkelig lastebil med en realistisk last. Tunnelgeometrien, ventilasjonen, plassering av brannen ift. vegger og tak og mange andre faktorer bidrar til en brann i en tunnel slik at det nesten er umulig å utforme en designbrann som kan gjelde for alle tunnelene.

3.5 Delkonklusjon

Det norske regelverk er detaljstyrt gjennom håndbøker med standardløsninger (Vegnormaler), men det er ikke umulig å avvike fra disse. Det kreves i så fall at det gjennomføres risikoanalyser som dokumenterer tilsvarende sikkerhetsnivå som standardløsningen.

Det settes krav til tunnelklasse hovedsakelig basert på ÅDT-tallet. Siden Norge er et lite land med få mennesker og liten trafikk, vil ÅDT-tallet ofte være lavt. Dette gjelder spesielt utenfor byene. I kombinasjon med at Norge har mange fjorder og fjell utenfor byen, er det behov for å etablere tunneler. Disse tunnelene vil da få en lav tunnelklasse pga lav ÅDT. Konsekvensen av dette er at det etableres ettløpstunneler med toveistrafikk.

Håndbok 021 beskriver bare én type ventilasjon, og det er langsgående ventilasjon. Langsgående ventilasjon er derimot en uheldig løsning i tunneler med toveis trafikk ved at det alltid er en del biler som vil havne i røyken. Det finnes andre ventilasjonssystemer som for eksempel tversgående ventilasjon, men dette systemet blir ofte ikke brukt blant annet på grunn av de høye kostnader forbundet med systemet.

Konstruksjonen og ventilasjonen skal dimensjoneres for en forhåndsbestemte brannbelastning og tid. Denne brannbelastning er derimot lavt i forhold til det som er mulig. Det er ikke kjent hvordan dette tallet er valgt, men det ser ut som at en inndeling



etter bruk av tunnel og mulige brannscenarier ville vært en bedre tilnærming. Det siden for eksempel farlige gods ville ført til en brannbelastning cirka 10 ganger større enn konstruksjonen er dimensjonert for.

Informasjon som blir gitt om sikkerhetsnivået til tunnelen til bilistene som bruker tunnelen er minimalt. En viktig forutsetning for at de reagerer riktig ved rømning er at de vet hvordan å reagere og hvilke muligheter de har. Dette kan føre til farlige situasjoner når bilister bruker erfaringer fra andre tunneler i den de må rømme. Et eksempel på det er når en er vant til å kjøre gjennom en tunnel med rømningsutganger, og så må rømme i en tunnel som ikke har det. Siden det finnes mange forskjellige tunnelklasser med sine sikkerhetstiltak, er det vanskelig å vite på forhånd hvilke tiltak som finnes i en tunnel.

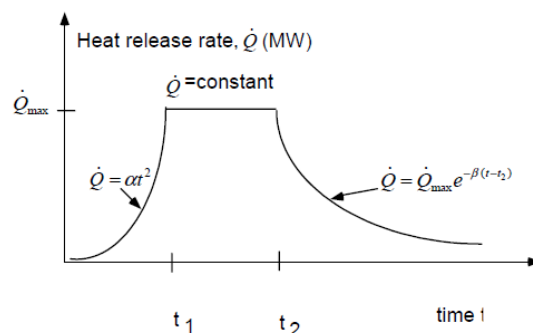
I tillegg bør det være et bedre brannalarmsystem enn én som er avhengig av menneskelig handling før den alarmerer brannvesenet og stenger tunnelen.

4 Designbrann til en tunnel

Dette kapittelet går gjennom forskjellige måter å utforme en designbrann. Designbrannen er da en forenklet tilnærming av en brann som kan brukes i designspørsmål. Til slutt blir det sagt noe om hvordan regelverket forholder seg til designbranner.

4.1 Utforming av en designbrann i en tunnel

En viktig faktor i brannsimulering er utforming av en designbrann som viser hvordan energiproduksjonen utvikler seg utover tiden. Siden en virkelig brann er vanskelig å tallfeste, brukes en designbrann som forenkling på virkeligheten for å gjøre designspørsmål mer håndterlige. Dette kan da brukes til for eksempel dimensjonering av konstruksjoner, ventilasjonen eller til å vurdere rømningssikkerheten. En vanlig måte å beskrive dette er ved å beskrive brannen som en αt^2 -brann som blir beskrevet av Nilsen (2011) i figur 10.



Figur 10: Energiproduksjon til en designbrann

Vekstfasen blir beskrevet ved formelen:

$$\dot{Q}(t) = \alpha \cdot t^2; t_0 \leq t \leq t_1 \quad [\text{kW}] \quad (4.1)$$

hvor:

α	= vekstfaktor	$[\text{kWs}^{-2}]$
t	= tiden	$[\text{s}]$
t_0	= tiden fra antennelse til brannen har etablert seg	$[\text{s}]$
t_1	= tiden til maks energiproduksjonen er nådd	$[\text{s}]$

Utbrenningsfasen blir beskrevet ved formelen:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{maks} \cdot e^{-\beta(t-t_2)}; t_2 \leq t \quad [\text{kW}] \quad (4.2)$$

hvor:

$\dot{Q}(t)$	= energiproduksjonen ved tidspunktet t	$[\text{kW}]$
\dot{Q}_{maks}	= maksimal energiproduksjon	$[\text{kW}]$
t_2	= tidspunktet når brannen begynner å avta	$[\text{s}]$
β	= utbrenningskoeffisient	$[\text{s}^{-1}]$

Etter vekstfasen og før utbrenningsfasen vil brannen nå en konstant fase med maksimalt energiproduksjon. Maksimalt energiproduksjon er beskrevet som enten \dot{Q}_{maks} eller

$$\dot{Q}(t) = \alpha \cdot t_1^2 ; t_1 \leq t \leq t_2 . \quad [\text{kW}] \quad (4.3)$$

Grimstvedt (2004, side 16 og 17) beskriver en måte å bruke denne metode ved tabulerte verdier og formler for å regne ut energiproduksjonen:

Tabell 8: Designparametre for å lage en designbrann (Grimstvedt, 2004)

Kjøretøy	\dot{Q}_{maks} [MW]	α [kW s ⁻²]	β [s ⁻¹]
Bil	4	0,01	0,001
Buss	30	0,1	0,0007
Lastebil ¹	15-130	-	-

¹Brannbelastning for lastebiler varierer og gjør det vanskelig å etablere designparametre

Når disse parametre brukes, er de eneste ukjente faktorene tid til overtenning og tid til utbrenningsfase. Tid til overtenning kan beregnes slik:

$$t_1 = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{maks}}{\alpha}} \quad [\text{s}] \quad (4.4)$$

Tid til utbrenningsfasen er avhengig av at den totale teoretiske energimengden tilgjengelig (E_{tot}) er kjent og kan beregnes slik:

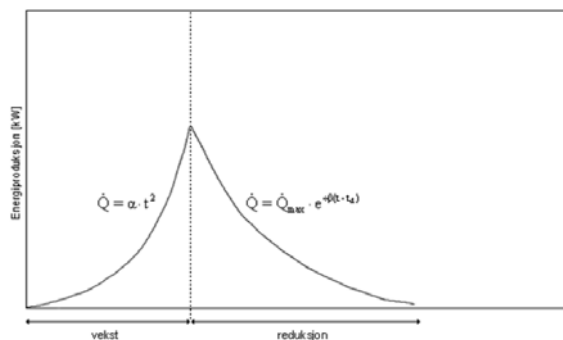
$$t_2 = \frac{\chi \cdot E_{tot}}{\dot{Q}_{maks}} + \frac{2}{3} t_1 - \frac{1}{\beta} \quad [\text{s}] \quad (4.5)$$

hvor:

$$E_{tot} = \text{total teoretisk varmegivende verdi ved fullstendig forbrenning [kJ]}$$

$$\chi = \text{forbrenningseffektivitet} \quad [-]$$

Dersom $t_1 > t_2$ vil brannen ikke komme i en fase hvor den er fullt utviklet og energiproduksjonen er konstant. Brannen består da bare av en vekst- og utbrenningsfase og vil da bare nå en kortvarig topp hvor energiproduksjonen da med en gang går ned igjen som vist i figur 11.



Figur 11: Designbrann når $t_1 > t_2$

Når $t_1 > t_2$ kan maksimal energiproduksjon, \dot{Q}_{maks} , beregnes ved:

$$\dot{Q}_{maks} = \chi \cdot \beta \cdot E_{tot} \cdot \left(1 - \frac{\beta^{3/2}}{6} \cdot \sqrt{\frac{\chi \cdot E_{tot}}{\alpha}} \right)^2 \quad [\text{kW}] \quad (4.6)$$

Ny tid til reduksjon kan da finnes ved å kombinere formel (4.4) og (4.6):

$$t_2 = \sqrt{\frac{\chi \cdot \beta \cdot E_{tot} \cdot \left(1 - \frac{\beta^{3/2}}{6} \cdot \sqrt{\frac{\chi \cdot E_{tot}}{\alpha}} \right)^2}{\alpha}} \quad [\text{s}] \quad (4.7)$$

Ingason, Bergqvist, Lönnermark, Frantzych og Hasselrot (2005, side 33) beskriver en kontinuerlig kurve for energiproduksjonen. Denne kurven skal følge en mer naturlig brannutvikling. Ulempen med denne formelen er at energitviklingen ikke vil nå en fase hvor den har en konstant verdi.

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{maks} \cdot n \cdot r \cdot e^{-\gamma \cdot k \cdot t} \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot k \cdot t})^{n-1} \quad [\text{kW}] \quad (4.8)$$

hvor n representerer en 'retard index' som må bli vurdert. Den påvirker kurven mest i vekstfasen. En stor verdi gir en langsom vekst og en liten verdi vil gi en fort vekst.

r er amplitude koeffisienten:

$$r = \left(1 - \frac{1}{n} \right)^{1-n} \quad [-] \quad (4.9)$$

k kalles for 'time width coefficient':

$$k = \frac{\dot{Q}_{maks}}{E_{tot}} \cdot r \quad [-] \quad (4.10)$$

γ er justeringen for påvirkningen av ventilasjonen:

$$\gamma = 1 + 0,7 \cdot u \quad [-] \quad (4.11)$$

u representerer da lufthastigheten på grunn av naturlig og/eller mekanisk ventilasjon. Parametrene som da er bestemmende er E_{tot} , \dot{Q}_{maks} og u . Påvirkning av ventilasjon blir derimot sløffet av Ingason (2009, side 261), slik at formel (4.8) blir:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{maks} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t} \cdot (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1} \quad [\text{kW}] \quad (4.12)$$

Tiden til maksimal energiproduksjonen kan da finnes ved:

$$t_{maks} = \frac{\ln(n)}{k} \quad [\text{s}] \quad (4.13)$$



Brannens lengde kan beregnes ved:

$$t_d = \frac{1}{k} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \beta_d^n} \right) \quad [\text{s}] \quad (4.14)$$

β_d representerer forholdet mellom den integrerte energien i tidspunktet t_d , E_{tot,t_d} og den totale tilgjengelige energimengden E_{tot} , ligger mellom 0,97 og 0,99.

Ingason (2009, side 263) har også beskrevet en måte å tilnærme n på, ellers kunne den også antas å være lik 2. Det må da derimot være kjent hva som skal være E_{tot} , \dot{Q}_{maks} og t_{maks} for å kunne finne n .

$$n \approx 0,74294 \cdot e^{\left(2,9 \frac{\dot{Q}_{maks} \cdot t_{maks}}{E_{tot}} \right)} \quad [-] \quad (4.15)$$

4.2 Hvordan regelverket forholder seg til designbrann

Regelverket i Norge bruker forhåndsbestemte designbranner for å dimensjonere både konstruksjonen og ventilasjonsanlegget. Det er valgt flere tid-temperatur kurver i tillegg til en dimensjonerende branneffekt som skal brukes for å dimensjonere ventilasjonen og konstruksjonen. Kurven og branneffekten velges etter tunnelklassen, hvor både branneffekten og intensiteten til eksponeringskurven øker etter tunnelklassen. Det er ikke definert noe brannkurven og branneffekt for å vurdere rømmingssikkerheten.

5 Menneskelig oppførelse ved rømning fra veitunnel

Rømningssikkerheten i veitunneler bygger på selvredningsprinsippet, det vil si at trafikantene skal ta seg ut enten til fots eller ved hjelp av eget kjøretøy. Derfor er det viktig at det blir sett på om personer i en tunnel klarer å komme seg til sikkert sted som blir antatt. Dette kapittelet er mye mer rettet mot psykologi enn ingeniørfagfeltet, men for å vite hvilke tiltak som faktisk virker og hvilke tiltak som kan gi et bedre resultat er det viktig å vite hvordan mennesker tenker når de må rømme fra en situasjon. Kapittelet er en presentasjon av en litteraturstudie som bygger mye på Papaioannou og Georgiou (2003, side 8-29). Dette vil bli tilføyet med det skrevet i Grimstvedt (2004, side 18-33) der det er angitt. Til slutt blir det gått gjennom et forslag som kan bidra til å bedre rømningssikkerheten.

Fra eksisterende forskning er det kjent at menneskelig oppførelse blir styrt av flere faktorer. En person sin oppførelse blir endret når den blir konfrontert med ekstreme situasjoner. De som tar feil valg kan selv bli en risikofaktor. Forskjellige disipliner innen psykologi prøver å forstå og forklare menneskelig oppførelse i forskjellige situasjoner. Noen legger vekt på biologiske faktorer andre på kognitive, emosjonelle eller sosiale faktorer. De faktorene blir beskrevet her under.

5.1 Mennesket fra det biologiske perspektivet

Biologiske faktorer er både kroppslige og fysiologiske reaksjoner som styres av det autonome nervesystemet. Denne delen av nervesystemet har stor betydning for hvordan mennesker reagerer i krise- og katastrofesituasjoner. Kroppen vil reagere på flere måter når personen blir utsatt for en farlig situasjon. Noen av reaksjonene er at hjertet vil slå fortere, en begynner å svette, mister matlyst og endret fysisk styrke, mens det i kroppen produsert mer glukose i leveren og en økt utskillelse av nevrontransmittere i hjernen. Dette er nødvendig for å kunne reagere fortere i en farlig situasjon. Denne evnen til kroppen har vært med oss i alle tider. Det er oppførelse for at arten skal overleve (jf. Darwins teori om ”*survival of the fittest*”).

I en tunnel er både varme og røyk noen av de farlige forhold som kan forekomme i en brann.

Varme relaterte forhold

Som beskrevet av Grimstvedt (2004, side 18-20) forårsakes temperaturøkning i kroppen som følge av varme/temperaturen som produseres under brann og fra stråling fra brannkilden eller røyklaget. Varmen beveger seg fra varm til kaldt. Dermed vil kroppen ikke kunne kvitte seg med overskuddsvarmen når temperaturen i tunnelen øker over kroppstemperaturen. Hvor mye klær en har på seg og luftfuktigheten vil også kunne endre hvor mye en person tåler. Mer klær vil nemlig isolere mer og økt luftfuktighet gjør det vanskeligere å kvitte seg med overskuddsvarme. Tabell 9 viser en forventet effekt av ulike luft/røyk temperaturer. Tåleevne forskjeller derimot mye siden den er avhengig av personens alder, helse, osv.

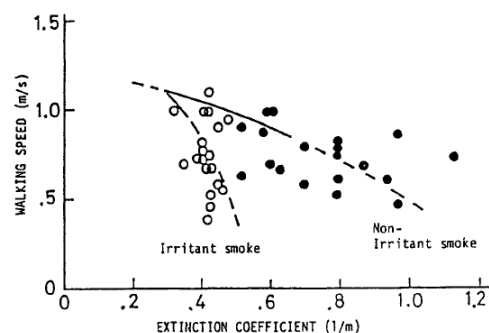
Tabell 9: Forventet effekt av ulike luft/røyk temperaturer (Mostue, Stensaas og Wighus, 2003)

Temperatur [°C]	Effekt
50	Mulig ubehag
60	Mulig heteslag
70	Andre grads forbrenning etter ett minutt
80	Tåleevne i underkant av en time
100	Veldig hurtig brannskade i fuktig luft
115	Tåleevne rundt 20 minutt
125	Pustevansker gjennom nese
150	Pustevansker gjennom munn
160	Rask, ulidelig smerte mot tørr hud
180	Irreversibel skade etter 30 sekunder
205	Toleransetid på under 4 minutt ved våt hud

Røykrelaterte forhold

De fleste som omkommer i en brann, omkommer som følge av å puste inn røyk. NFPA anslår at cirka 50-80 % dør som følge av røyk snarere enn temperaturen og stråling. Den økte bruk av plastmaterialer og andre polymerer fører til at røyken blir enda giftigere enn før. De viktigste gassene som blir produsert i en brann er karbonmonoksid (CO), blåsyre (HCN) og karbondioksid (CO₂). Hvor mye en tåler, er igjen avhengig av alder og helse i tillegg til konsentrasjon og eksponeringstid. Oksygenmangel kan også bli et problem.

Mens den toksiske og kvelende effekten av røyken er hovedproblemet, er den irriterende effekten av røyken et sekundært problem. Etter bare kort eksponering til røyk, begynner øynene å tåre såpass voldsomt at det blir for vondt å holde øynene åpnet og det blir umulig å se. Som kan ses i figur 10 vil røyk, som da fører til dårlig sikt, føre til at rømningshastigheten blir lavere ved at det blir vanskeligere å se hvor en går. Røyk som virker irriterende fører fortere til at rømningshastigheten går ned.



Figur 12: Ganghastighet vs. sikt (Bergqvist, Frantzych, Hasselrot & Ingason, 2001)



5.2 Mennesket fra det kognitive perspektivet

Kognitiv psykologi ser på mennesket som et tenkende vesen som til enhver tid bearbejder informasjon fra omgivelsene. Dette perspektivet prøver å forstå hvordan mennesker bearbejder informasjon. Den viktigste antakelsen er at våre tanker er veldig viktig for hvordan vi forholder oss til omgivelser.

Som ved de biologiske faktorene vil hjernen vår tilpasse seg situasjonen ved en krise. På samme måte som at kroppen vår mobiliserer de biologiske ressurser, blir vår måte å se på en situasjon endret. Dette fører til en følelse av at alt er uvirkelig, en endret oppfatning av tid (alt går i ”slow-motion”), en bedre hukommelse og skjerpet/innsnevret sansing og fokusert oppmerksomhet (eller også kalt for ”tunnelsyn”).

Mennesker har ”kognitive skjemaer” for hva som er normalt, for eksempel ”biler kjører på veien” eller ”fly flyr i luften”. I tillegg har de også ”kognitive manus” for hva som blir oppfattet som normale mønstre i forskjellige situasjoner. I situasjoner hvor disse skjemaer og manus blir avvirket viser mennesker stor motstand i å anerkjenne at de er i en situasjon som ikke passer til det som er forventet. Både forskning og rapporter fra ulykker har vist at mennesker har en viss motstand i å anerkjenne at de er i en krisesituasjon.

5.3 Mennesker fra det emosjonelle perspektivet

Menneskers emosjonelle og sensitive tilstand eller reaksjoner er mer enn de kognitive, kontrollert av underbevisstheten. Generelt kan man si at underbevisstheten foretrekker positive følelser og prøver å unngå negative. Følelser, akkurat som tanker, påvirker hvordan en person forholder seg til en situasjon. I en krisesituasjon vil en person oppleve et stort spekter av følelser som mer eller mindre kommer samtidig. De mest vanligste er frykt, angst redsel, sjokk og panikk på den ene side, og apati, lammelser, hjelpeløshet og håpløshet på den andre siden.

Emosjonelle reaksjoner er mindre kontrollerbar enn kognitive reaksjoner. Ordet ”panikk” er ofte brukt i etterforskning av ulykker og i media for å forklare menneskers oppførelse. Mennesker som plutselig befinner seg i en krise situasjon har ofte brukt ordet ”panikk” i en forklaring for blind, ulogisk og irrasjonell oppførelse som en automatisk emosjonell reaksjon på situasjonen. Nyere teorier kommer med at mennesker ofte klarer å tenke klart og rasjonelt selv under de mest stressende situasjoner. Det å rømme er ikke en normal måte å komme seg ut av bygget. Derfor kan det se uorganisert ut for en utenforstående, men det kan likevel være en rasjonell tankeprosess bak det. Et ekstremt eksempel er de menneskene som valgte å hoppe ned fra WTC-tårnene. Var det panikk som gjorde at de hoppet ned, eller tok de et bevisst valg mellom å dø av brannen eller av fallet? Nyere teorier mener da at de menneskene bevisst tok et valg å hoppe til døden heller enn å dø av brannen.

Eldre teorier sa at mennesker ikke skal bli informert om farene som er relatert til en kritisk situasjon for å unngå en panikk reaksjon. Nyere forskning viser derimot at en alarm ofte ikke gjør at folk reagerer før de får ytterligere informasjon som da gjør at de forstår alvoret i situasjonen. Rømning fra en faresone på en rolig og organisert måte er bare mulig dersom alle vet at de har nok tid til å komme seg i sikkerhet. Slik oppførelse kan ikke bli forventet i en situasjon hvor folk opplever det er fare for liv og helse.



Det er en kritisk forskjell mellom de valgene en person opplever å ha og de som virkelig er mulig. Det er personens subjektive oppfatning som er avgjørende i disse situasjoner. Hvis en tolker situasjonen som at vedkommende må komme seg ut umiddelbart, da har de ikke tid til å gå gjennom alle valgene og det mest åpenbare valget blir tatt. En sterk angst kan resultere i ”tunnelsyn” som da kan gjøre at noen rømningsveier blir oversett. Hvis en person i tillegg er ukjent på stedet vil ofte bare en kjent rute bli valgt.

5.4 Mennesker fra det sosiale perspektivet

Mennesker blir påvirket av en risikokultur. Vi lærer gjennom erfaringer fra ulykker og oppmerksomhet fra media. Sosial psykologi ser på hvordan mennesker oppfører seg i forhold til andre rundt seg. En krise går alltid ut over flere personer. En sosiologisk definisjon på krise handler da også om hendelser hvor et større antall personer er under stor trykk. En krise setter trykk på de sosiale forhold mellom mennesker. For individer i en krisesituasjon er det viktig å holde kontakt med familie og venner. Personer med tette forhold vil handle etter gruppens beste og ikke tillate enkelte å skille seg fra gruppen.

Under en krise hvor personer har et stort behov for informasjon, kan andres oppførelse være en informasjonskilde på seg selv. Personer lærer og oppfører seg etter det den ser i andres oppførelse. På grunn av tidspresst og stresset vil dette være en avgjørende faktor for å bestemme hvordan en skal oppføre seg. Farlig eller risikofullt oppførelse kan også bli kopiert når situasjonen faller under en krise.

Videre bruker sosial psykologi uttrykket ”samsvar” som betyr at personer ikke vil skille seg ut fra resten av gruppen.

Papaioannou og Georgiou (2003) kommer med tre ting som de vil legge sterk trykk på som viktig for menneskelig oppførelse i en krisesituasjon:

1. Det er viktig at folk forstår alvoret i situasjonen fort.
2. Det er viktig å få folk til å forlate sine faste handlingsmønstre og tilpasse seg til den nye situasjonen.
3. Klare instruksjoner gjør at folk fort forstår alvoret i situasjonen

5.5 Inndeling i handlingsmønstre

Grimstvedt (2004, side 30 og 31) beskriver en inndeling av handlingsmønstre som blir oppsummert her. Selv om det er som nevnt vanskelig å forutsi, er det mulig å lage en grov inndeling i følgende tre handlingsmønstre: *bekjempe faren*, *flykte fra faren* og *handlingslammelse/apati*. Det handlingsmønsteret som er gunstigst vil avhenge av situasjonen, individets kunnskap, erfaringer og grad av psykologisk forsvar i situasjonen.

Bekjempe faren

Det er handlingsutfallets sannsynlighet som bestemmer om det er rasjonelt å prøve å bekjempe faren. Hvis det er en reell mulighet for å lykkes, da vil det være rasjonelt å ta opp kampen. Det er for eksempel hvis en bilfører prøver å slukke en brann i startfasen. Det vil være en rasjonell handling, siden personen har en stor sannsynlighet for å lykkes uten å sette seg selv i fare. Hvis brannen derimot har utviklet seg til å være for stor, vil det være irrasjonelt å prøve å slukke den. Individet som bekjemper en fare som det ikke er mulig å overvinne med egne ressurser, handler med høy grad av irrasjonalitet og risiko.



Flykte fra trussel

Dersom det ikke er mulig å bekjempe faren med de tilgjengelige ressurser, vil det eneste rasjonelle være å flykte fra faren. I noen tilfeller vil det derimot være hensiktsmessig å ”flykte mot faren” som for eksempel når en befinner seg nedstrøms ift. brannen. Da er valget mellom å rømme gjennom røyken med dårlig sikt og giftige gasser eller å komme seg forbi brannen i mindre farlige omgivelser. Denne løsningen vil framstå som ulogisk for mange, og det er klart at dette vil kreve stor grad av erfaring og kunnskap for å ta et slikt valg.

Handlingslammelse

Personer som rammes av handlingslammelse eller apati vil sitte tilsynelatende formålsløse uten å bevege seg. Denne typen atferd er irrasjonell dersom individet har mulighet til å redde seg. I enkelte situasjoner kan apati representere rasjonell adferd. Et eksempel kan være i en tunnelbrann hvor en person medstrøms ikke har mulighet til å komme forbi brannen og å flykte fra stedet (dårlig sikt). Apati vil være hensiktsmessig hvis mulighetene er minimale og det er mest hensiktsmessig å holde seg rolige og vente på hjelp eller at faren opphører.

5.6 Menneskelig oppførelse når de rømmer

Boer (2002) viser at informasjon om bruk av nødutganger er viktig for de valgene som tas. I tillegg vet folk ikke nok om hvilke sikkerhetstiltak som er tilgjengelig i tunneler og hvilken form for hjelp de kan forvente av nødetatene.

Det ble i tillegg funnet at 25 % evakuerte tunnelen via kjørebanelen, mens resten brukte nødutgangene som tunnelen er utstyrt med. Når personene fikk beskjed om å evakuere via nødutgangene, brukte kun 5 % kjørebanelen. Dette viser hvor viktig informasjon er for valgene personer tar. Enkelte forsøk viste også at det tok lang tid før evakuering kom i gang, men når noen få startet fulgte flertallet etter. Dette bekrefter også teorien om sosial læring. Nødutgangene ble også utstyrt med lydsignaler for å teste signalets effekt. Den første gruppen fikk bare beskjed om at lydene er til orientering, mens den andre gruppen fikk beskjed om at det var montert lydsignaler over nødutgangene. Effekten på den første gruppen var ingenting, mens effekten på den andre gruppen var veldig store. Dette bekrefter også at konkrete informasjon er meget effektivt.

I startfasen av en brann kan oppførelsen bli karakterisert av usikkerhet, feil tolkning og ubeslutsomhet mens de søker etter informasjon som kan bekrefte at en situasjon pågår. Folk klarer ikke å behandle store mengder med informasjon. Et annet problem er når noen sliter med valget om å forlate bilen sin. Det er avhengig av verdien til bilen og verdisakene som er i bilen.

Studiet viser at de fleste vil fortsette i samme retning som de kom i tunnelen og ikke stopper før de er nær brannen eller ulykken. Om de velger å snu ved å bruke snunisjer eller veien er avhengig av tilgjengelig informasjon om hvor de befinner seg. I tillegg vil personens nivå av stress og angst bestemme sin reaksjon, eller i verste tilfelle handlingslammelse. Autoritær veiledning er en veldig viktig faktor i denne fasen av rømningen. Ofte får folk ikke med seg flere meldinger eller store seler av meldingen.

Det er viktig at flere meldinger blir sendt, også i flere språk. Visuelle meldinger bør være autoritær, kort og lett å forstå.

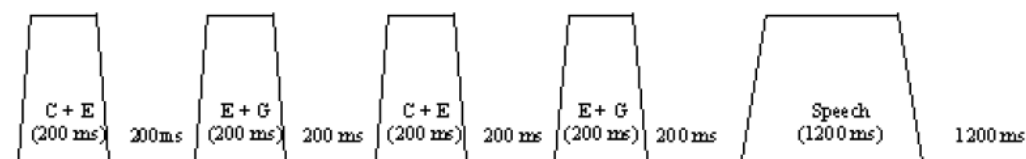
5.7 Tiltak til bedring av rømningssikkerhet i tunnelen

I flere studier er det lagt fram at personer trenger informasjon før de handler, i tillegg er vi sosiale vesener som blir påvirket av andre når noen begynner rømningen. Én person må begynne rømningen før resten følger etter. Nilsson, Johansson og Frantzich (2009) kom med disse konklusjonene. I tillegg har de studert hvordan forskjellige tiltak kan hjelpe rømningen. De kom fram til at en melding som blir spredt over høytalere blir for vanskelig å høre, men et lydsignal som alarmerer bilistene er foretrukket slik at de begynner å lete etter informasjon. Informasjonsskilt i tunnelen er en god måte å få fram en kort og tydelig melding om at noe har skjedd. Grønne blinkende lys kan også hjelpe, men resultatene viser at bilistene ikke alltid fikk det bevisst med seg å ha sett lysene. Det har også blitt forsket på flere andre tiltak som lyssignaler, men de er ikke tatt med her på grunn av at røyk og dårlig sikt blir sett på som det største problemet ved siden av stråling/temperatur (nær brannen) og lyssignaler blir da vanskelig å se. Problemet med lyssignaler høyt på veggen er at røyk som samler seg langs taket for blokkerer sikten til lyssignalene. Lyssignaler i overgangen mellom vegg og vei kan få problemer med at støv og skitt samler seg på dem slik at det ikke er mulig å se de lengre hvis de ikke gjøres rent regelmessig.

Lydsignaler

Et annet tiltak som kan hjelpe under rømningen er lydsignaler. I van Waterschoot, et al. (2002) er det skrevet et kapittel om selvforklarende lydsignaler som kan brukes under rømning. Her forklares det at grunnen til utvikling av disse lydsignalboksene er at røyk tar sikten, men ikke hørselen. Disse lydsignalboksene ble utviklet som en reaksjon på behovet for en bedre orientering i røyk. Disse boksene sender ut en lyd som er lett å lokalisere. Studier til disse lydsignalene har vist at med informasjon og en liten demo om disse lydsignalene er effektiviteten på 90 %. Når personene bare visste om disse lydsignalene gikk effektiviteten ned til 70 %. Uten informasjon og demo var effektiviteten på 20 %. Disse lydsignalene for å lokalisere nødutganger blir allerede brukt i flere bygg i Europa og den internasjonale maritime organisasjonen IMO vurderer å bruke disse lydsignalene på passasjerbåter. Når bruken av disse øker, vil også kunnskapen øke og dermed effektiviteten igjen slik at en liten innføring blir unødvendig for effektiviteten. Til da er det derimot et ønske om selvforklarende lydsignaler (SE-systemet). Det som da blir skrevet om i kapitlet er et forslag som trenger mer forskning, men er testet et par ganger allerede både i et skip og en tunnel. Selvforklarende lydsignaler som roper "exit here" skal også passe inn i forventningene når en person prøver å finne veien til nødutgangen når rommet er fylt med røyk. Andre systemer som bygger på spesifikke lyder kan føre til at disse lydene blir ignorert som at de ikke er viktig eller til og med farlige på grunn av at de ikke passer i forventninger ved rømning.

SE-systemet består av en høytaler over nødutgangene eller i gangen mot en nødutgang som sender ut lyd med spesifikke frekvenser og bølgelengder.

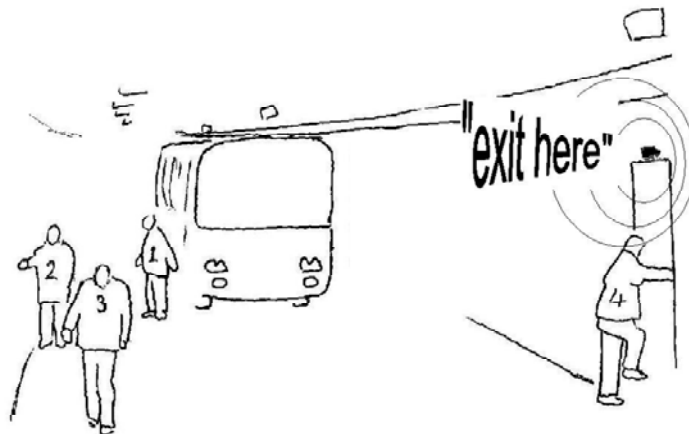


Figur 13: Oppbygning av repeterende sekvens til SE-systemet (van Waterschoot et al., 2002)

Lyden som blir sendt ut består av en repeterende sekvens av 4 spesifikke lyder som skal forberede personer på en melding, som vist i figur 13. Så kommer meldingen ”exit here” (først lokalt språk, så engelsk i neste omgang) som blir snakket av en person med en klar og en bestemt tone og som gjør det tydelig at det haster men uten at panikk kommer fram. Så kommer en liten pause før alt blir repetert. Denne korte pause er viktig for å hindre at meldingens ekko forstyrrer når meldingen blir repetert.

I forsøket på skipet viste SE-systemet å være veldig mye bedre enn det å bruke bare spesifikke lyder (RW-systemet som kalt i rapporten) for å finne veien. Det selvforklarende systemet førte til at 90 % av personene fant veien ut. RW-systemet hadde bare en effektivitet på 50–60 % effektiv, nesten like stor som å gjette veien. Slik at RW-systemet ble dømt til å ikke være noe hjelp i forsøket i et skip.

I tunnelforsøket ble bare SE-systemet brukt. Her ble personer sluppet ut én om gangen i en røykfylt tunnelen (uskaradelig falsk røyk) med meldingen om å komme seg til sikkert sted, uten å si noe om rømningsdører eller SE-systemet.



Figur 14: Tunnelforsøket (van Waterschoot et al., 2002)

I denne testen ble det klart at 99 % valgte den retningen som bussen kjørte i når de kom ut av bussen, om dette var på grunn av at det var i den retningen den nærmeste nødutgang var står ikke noe om i rapporten. Systemet var også veldig effektiv i tunnelforsøket siden 85 % valgte den nødutgangen som var nærmest. Siden systemet bygger på at mennesker kan høre hvor den nærmeste nødutgangen befinner seg, kan for mye bråk føre til store problemer. I forsøket var det derimot ikke noe annen lyd enn lyden fra motoren fra bussen og ventilasjonen som var på veldig lavt (0,3 m/s) slik at systemet ikke ble testet ved realistiske forhold (ved full ventilasjonshastighet, mange biler med motoren på ennå og alle andre lyder fra brannen og menneskene i tunnelen).



5.8 Hvordan regelverket forholder seg til menneskelig oppførelse

I regelverket blir det tatt lite hensyn til menneskelig oppførelse. Som vist i vedlegg C viser bare et skilt noe om sikkerhetstiltak som brukes i en nødsituasjon. Personer i en krisesituasjon må enten vite på forhånd hva å gjøre eller må de bli informert om det hvis det skjer noe. Ved brann blir tunnelen stengt ved at røde lys blinker i begge endene og i noen tunneler stenges tunnelen også med bomber slik at ingen flere kan kjøre inn. De som allerede er på vei inn i tunnelen blir derimot ikke gjort oppmerksom på det som har skjedd og hva de må gjøre. Dette bør endres og forslag til tiltak blir gått gjennom senere.

Det at bilistene ikke blir gjort oppmerksom på sikkerhetstiltakene fører til at personene ikke helt vet hva å gjøre når noe skjer. Tunnelklassene bestemmer om det skal lages en rømningstunnel og alle andre sikkerhetstiltakene. Dette fører til at tunnelene ikke er uniforme og at bilistene ikke vet på forhånd hva som kan forventes. Derfor bør de bli gjort oppmerksomme på de sikkerhetstiltakene som finnes i tunnelen når de kjører inn i den. Ved å informere de på forhånd om tiltakene som er tilstede i tunnelen vet de både hvordan å reagere ved brann i tillegg til at de blir gjort oppmerksomme på at det er en mulighet at det begynner å brenne i en tunnel. En slik forberedelse fører til at hendelsen brann blir ført inn i "kognitiv skjemaet" som hører til å kjøre gjennom en tunnel.

En informasjonskampanje kan også hjelpe til med å skape riktig oppførelse ved brann i en tunnel. Når personer blir lært å bruke et slokkeapparat ved små branner og at de da med en gang lærer at de alarmerer brannvesenet gjør at det bare trenger å gjøre én handling for å få hjelp. Siden det er mye forskjell mellom tunnelene og sikkerhetstiltakene vil informasjonen om tunneler være begrenset, men riktig oppførelse kan bli lært.

6 Casebeskrivelse og inndata

I dette kapittelet blir brannen som skjedde i Seljestadtunnelen og selve objektet gjennomgått som skal brukes som case videre i denne oppgaven. Så blir simuleringene bedre forklart og alle inndata og antakelser til simuleringene blir vist. Til blir valg av grid som skal brukes til sammenligning med Grimstvedt (2004) sin simulering begrunnet og sett på konsekvensene for designbrannen hvis andre parametre hadde blitt valgt.

6.1 Hendelsen

Den 14. juli 2000 inntraff en ulykke 370 m inn i fra Oddasiden etter at to lastebiler møtte hverandre i tunnelen. Siden vegbanen var smal måtte begge lastebilene stoppe opp for å passere hverandre i lav hastighet. Bak lastebilen som var på vei mot Odda, måtte 5 personbiler stoppe. Bak disse bilene kom det en til lastebil som ikke klarte å stoppe, slik at den kjørte inn i bakerste personbilen og trykket de fem personbilene sammen. Lastebilen begynte å brenne med en gang og brannen spredte seg videre til de andre personbilene. Begge lastebilene som stoppet i utgangspunktet kom seg ut av tunnelen. Stopplysene utenfor tunnelen ble ikke aktivert på grunn av at alle kommunikasjonskablene ble avbrent. Dermed ble heller ikke Røldal brannvesen varslet. Bak den forulykkede lastebilen kom det en motorsykkel og en personbil som ankom ulykkestedet etter at brannen startet. Motorsykkelen kom seg ut. Personbilen med to voksne og to barn prøvde å snu og kjøre ut av tunnelen igjen. Røyken tokk de igjen slik at de ble sittende fast 230 meter nedstrøms på grunn av for dårlig sikt. Etter 70 minutter ble de funnet i livet av røykdykkere. Ingen personer omkom under hendelsen. Videre har tunnelen heller ikke branndeteksjon. Hendelsesforløp for brannen oppsummeres i tabell 10.

Tabell 10: Hendelsesforløpet

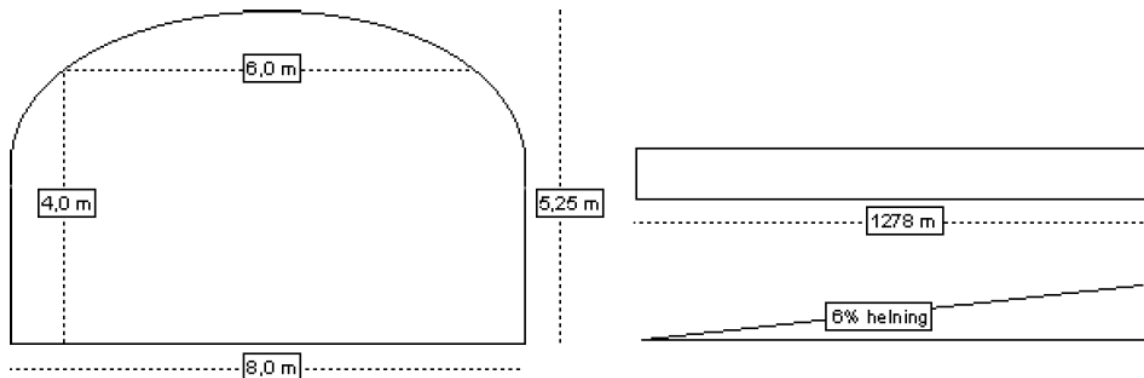
Tidspunkt	Hendelse
20:53	Vegtrafikksentralen (VTS) i Bergen registrerer at et skap til håndsløkkeapparater ble åpnet.
20:53	110-sentral i Bergen ble varslet av en person med mobiltelefon om trafikkulykken med brann i bil i Seljestadtunnelen. Dette ble med en gang varslet videre til brannvesenet, ambulanse og politiet.
20:54	VTS registrerer en sikringsfeil i tunnelen.
20:56	En person meldte med telefon til VTS om ulykken.
21:05	Brannvesenet rykker ut med seks mann i to kjøretøy.
21:20	Første ambulanse ankommer.
21:35	Brannvesenet ankommer.
21:38	Politiet ankommer
22:07	Fire personer blir funnet levende av røykdykkere inne i tunnelen etter at først brannen var slokkt og alle bilene var gjennomført.

All informasjon om hendelsen er hentet fra Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern (2000).

6.2 Objektbeskrivelse

Siden det ikke var mulig å få tak i mer nøyaktigere tegninger av tunnelen, blir beskrivelsen av Grimstvedt (2004, side 34, 96 og 97) brukt i beskrivelsen av brannobjektet.

Tunnelen har ett løp med en kjørebane i hver retning, og er 1273 meter lang. Hver kjørebane har en bredde på 3,35 meter, altså en totalbredde på 6,7 meter. Tunnelen har en fri bredde på 6 meter og fri høyde på 4 meter. Tunnelverrsnittet er på omtrent 35 m² og tunnelen har en helning på 6 % mot vest. Ventilasjonen i tunnelen styres av 4 vifter, montert gjennom tunnelen, som vist på oversiktskartet (vedlegg A), som ventilerer i en forhåndsbestemte retning (vest til øst). Daglig trafikk (ÅDT) i tunnelen ble i 1995 antatt å være 1050 biler i gjennomsnitt, hvorav 15 % var tyngre kjøretøy. På grunn av lengde og daglig trafikk blir tunnelen i klasse A. Figur 15 oppsummerer geometrien til tunnelen.



Figur 15: Utforming av tunnelen (Grimstvedt, 2004)

6.3 Scenarioer

Siden det ikke finnes noe rapport på energiproduksjonen til denne brannen og en forklaring av hvordan brannen spredde seg, vil de samme forutsetningene som brukes av Grimstvedt (2004, side 36-38) bli brukt. Disse forutsetninger for brannspredning er brukt i alle simuleringene for å ha et felles utgangspunkt slik at sammenligning ville vært mulig.

Lastebilen og bil 1 antennes ved tidspunktet $t=0$. Vitneobservasjoner beskriver en rask eller eksplosjonsartet brannutvikling slik at de neste personbilene blir antent med 60 sekunders mellomrom.

I oppgaven er det gjort 2 simuleringer. De scenarioer er satt opp slik:

Simulering:

- #1a Simulering gjort i masteroppgaven til Grimstvedt (2004) ved bruk av FDS i stedet for Kameleon, grovt grid.
- #1b Samme oppsett som i simulering #1a, bare et finere grid.

Simuleringene var ment for å se om et annet simuleringsprogram ville gi forskjellige resultater. I tillegg ble det ved en sensitivitetsanalyse valgt hvilket grid som skulle brukes til sammenligning. Det er da interessant å nevne antall undervolumer som er brukt i simuleringene: Grimstvedt sin simulering hadde 52 360 celler, mens det i denne simulering ble bruk 477 972 celler med det grove grid og 1 090 584 celler med det fine grid. I disse simuleringene er det ikke benyttet av ventilasjonen siden det ikke var klart om og hvor mye ventilasjonen var på som beskrevet i Grimstvedt (2004).

6.4 Utforming av designbrann

Simuleringene bruker samme oppsettet til designbrannen brukt av Grimstvedt (2004) og blir her forklart nærmere.

Selv om de seks kjøretøyene sto samlet på brannstedet, ble energiproduksjonen estimert ved å ta utgangspunkt i at hvert kjøretøy er en egen brann og så blir de til slutt summert. Det ble gjort for å kunne ta hensyn til de forskjellige variablene som innvirket på energiproduksjonen.

Utgangspunktet var en αt^2 -brann for hvert kjøretøy. Tabell 11 oppsummerer inndata som ble brukt for beregning av energiproduksjonen.

Tabell 11: Inndata til designbrannen

Parameter	Symbol	Verdi
Vekstfaktor	α	Personbil 1-5: $0,05 \text{ kW s}^{-1}$ ¹ Lastebil: $0,05 \text{ kW s}^{-1}$
Avkjølingsfaktor	β	Personbil 1-5: $0,001 \text{ s}^{-1}$ Lastebil: $0,001 \text{ s}^{-1}$
Forbrenningseffektivitet	χ	Personbil 1-5: 0,95 Lastebil: 0,95
Kaloriverdi	E_{tot}	Personbil 1-5: 7000 MJ Lastebil: 45000 MJ
Maksimal energiproduksjon	\dot{Q}_{max}	Personbil 1-5: 4 kW Lastebil: 12 kW
Tid til antennelse fra $t=0$	t_0	Personbil 1: 0 s Personbil 2: 60 s Personbil 3: 120 s Personbil 4: 180 s Personbil 5: 240 s Lastebil: 0 s

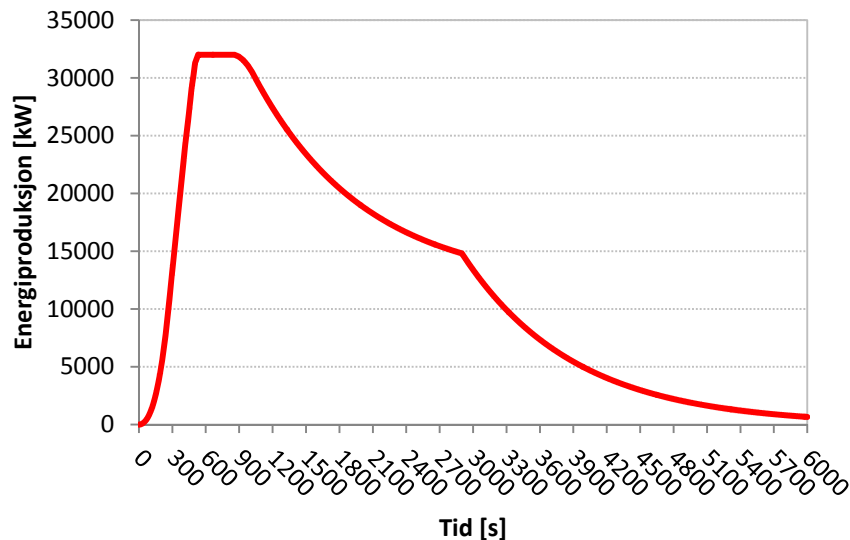
Først må det bekreftes at t_1 ikke er større enn t_2 slik at formel 4.1 til og med 4.5 kan brukes. Resultatene av beregninger er vist i tabell 12.

Tabell 12: Beregningsresultater til t_0 , t_1 og t_2

Kjøretøy	Tid til antennelse (t_0)	Tid til overtenning (t_1)	Tid til avkjøling (t_2)
Lastebil	0 s	490 s	2889 s
Personbil 1	0 s	283 s	851 s
Personbil 2	60 s	343 s	891 s
Personbil 3	120 s	403 s	931 s
Personbil 4	180 s	463 s	971 s
Personbil 5	240 s	523 s	1011 s

¹ En vekstfaktor på $0,05 \text{ kW s}^{-1}$ ble valgt på grunn av den raske brannutviklingen

Som kan ses i tabell 12 er $t_2 > t_1$ slik at energiproduksjonen over tid kan beregnes ved formel 4.1 til og med 4.5. Ut i fra disse tallene ble en energiproduksjon laget ved å summere brann i de forskjellige kjøretøyene. Vekstfasen er da fra t_0 til t_1 , brannen nådde en konstant fase mellom t_1 og t_2 og avkjølingsfase var fra t_2 og utover. Figur 16 viser at brannen nådde en konstant fase etter 533 sekunder og det varte til og med 857 sekunder (fra cirka 5 minutter til og med litt over 14 minutter). Maksimalt energiproduksjon var på 32 MW.



Figur 16: Energiproduksjon til simulering #1a og #1b

Figur 16 er grunnlaget for begge simuleringene.

6.5 Oppsett og inndata til simuleringene

Simuleringene ble da gjort av programmet FDS som er mer beskrevet i kapittel 2.7. Volumet det skal simuleres i må deles inn i undervolumer. Størrelser på disse undervolumer er avhengig av forholdet $D^*/\delta x$. For å velge riktig størrelse på undervolumene skal forholdet ligge mellom 4 og 16. D^* kan beregnes slikt:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_0 \cdot c_p \cdot T_a \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad [\text{m}] \quad (6.1)$$

hvor:

$$\begin{aligned} T_a &= \text{omgivelsestemperatur} && [^\circ\text{C}] \\ g &= \text{gravitasjonskonstant} && [\text{m/s}^2] \end{aligned}$$

Tunnelen er 1278 meter langt, 8 meter bred og 5,25 meter høy. For å kunne ta med veggene i simuleringen, ble 0,25 meter langt til på sidene og i toppen. Tunnelen er delt opp i 4 grid. Oppdelingen hjelper å kunne gi grid rundt brannen et finere grid enn lengre ned i tunnelen slik at måleresultatene i dette området blir bedre.



Oppsettet av simuleringene er vist i tabell 13.

Tabell 13: Oppsettet av grid i simuleringene

Simulering #1a	Grid 1	Grid 2	Grid 3	Grid 4
Cellestørrelse	0,5x0,5x0,5	0,5x0,5x0,5	0,5x0,5x0,5	0,5x0,5x0,5
Antall celler i x, y og z retning	720x17x11	120x17x11	860x17x11	856x17x11
x	0 m-360 m	360 m-420 m	420 m-850 m	850 m-1278 m
y	-0,25 m-8,25 m	-0,25 m-8,25 m	-0,25 m-8,25 m	-0,25 m-8,25 m
z	0 m-5,5 m	0 m-5,5 m	0 m-5,5 m	0 m-5,5 m
Antall celler	134 640	22 440	160 820	160 072
Totalt	477 972			

Simulering #1b	Grid 1	Grid 2	Grid 3	Grid 4
Cellestørrelse	0,5x0,5x0,25	0,25x0,25x0,25	0,5x0,5x0,25	0,5x0,5x0,25
Antall celler i x, y og z retning	720x17x22	340x34x22	860x17x22	856x17x22
x	0 m-360 m	360 m-420 m	420 m-850 m	850 m-1278 m
y	-0,25 m-8,25 m	-0,25 m-8,25 m	-0,25 m-8,25 m	-0,25 m-8,25 m
z	0 m-5,5 m	0 m-5,5 m	0 m-5,5 m	0 m-5,5 m
Antall celler	269 280	179 520	321 640	320 144
Totalt	1 090 584			

Energiproduksjonen til brannen skal angis i inputfilen som kWm^{-2} , siden brannarealet ble satt til $8,5 \text{ m}^2$ vil den havne på 3765 kWm^{-2} .

De valgte størrelsene til undervolumene i simuleringene og dermed forholdet mellom $D^*/\delta x$ er vist i tabell 14.

Tabell 14: Beregning av D^*/dx

	Scenario #1a	Scenario #1b
\dot{Q}_{maks}	32 MW	32 MW
Cellestørrelse i branngrid (x, y og z retning)	0,5 m, 0,5 m, 0,5 m	0,25 m, 0,25 m, 0,25 m
D^*	3,85 m	3,85 m
$D^*/\delta x$	7,7	15,4

Siden tunnelen har en helning, måtte det legges inn i simuleringen. Dette kan da gjøres ved å lage en flat tunnel og så endre gravitasjonen, enten for hele tunnelen eller så kan gravitasjonen endre gjennom tunnelen (ved en tunnel uten konstant helning). Dette kan gjøres ved å bruke GVEC-funksjonen som angir gravitasjonen i x-, y- og z-retningen. I Grimstvedt (2004, side 98 og 99) ble det gjort to antakelser i beregningen av gravitasjonen som ikke stemmer. Det er det gjort en antakelse at det er et lineært forhold mellom helning og vinkelen til stigningen (α) som ikke stemmer. Det ble forklart at en helning på 100 % vil tilsvare en vinkel på 90° slik at en helning på 6 % vil tilsvare en vinkel på $5,4^\circ$. Den første feilen er at helningen beregnes som antall meter stigning pr. 100 m slik at 100 % helning vil tilsvare en vinkel på 45° ($\tan^{-1}(1) = 45^\circ$), ikke 90° . Den andre feilen er at det

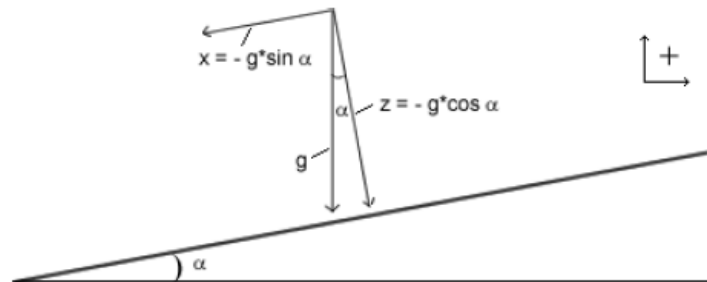
ikke er et lineært forhold mellom vinkel og helning, vinkelen må beregnes ved å bruke invers tangens. Beregningen burde ha vært slik:

En 6 % helning tilsvarer 6 meter stigning pr 100 m bort. Vinkelen beregnes da slik:

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{lengde oppover}}{\text{lengde bortover}} = \frac{6}{100}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{6}{100}\right) = 3,435^\circ$$

Gravitasjonen kan da beregnes slik:



Figur 17: Utregning av komponentene til gravitasjon (Grimstvedt, 2004)

Gravitasjonen blir da delt opp i to komponenter: Én i x-retning og én i z-retning. Komponentene beregnes slik:

$$g_z = -g \cdot \cos(\alpha) = -9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \cos(3,434^\circ) = -9,792 \frac{m}{s^2}$$

$$g_x = -g \cdot \sin(\alpha) = -9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \sin(3,434^\circ) = -0,587 \frac{m}{s^2}$$

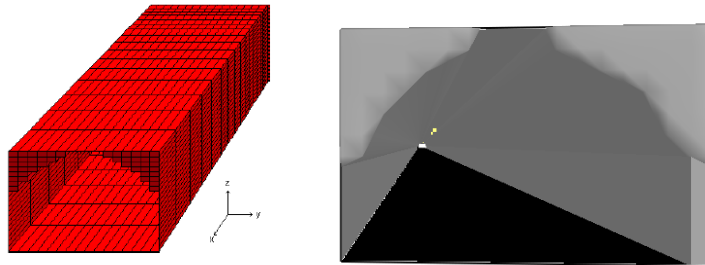
Gravitasjonen i y-retningen er lik 0. Resultatene fra beregningene blir sammenlignet i tabell 15.

Tabell 15: Beregnede gravitasjonskomponenter

Simulering	G_x	G_y	G_z
Grimstvedt	-0,923 ms ⁻²	0 ms ⁻²	-9,766ms ⁻²
Wiebes	-0,587 ms ⁻²	0 ms ⁻²	-9,792 ms ⁻²

Selv om resultatene i beregning av gravitasjon gjort av Grimstvedt var feil, ble de likevel brukt for å ha et felles utgangspunkt for sammenligning.

Siden tunnelen er avrundet i taket skapte dette litt problemer når Kameleon programmet skal brukes. Derfor har Grimstvedt laget en trappevis avrundning i taket. Dette ble også brukt i simuleringene for å ha en riktig sammenligning. FDS har derimot en funksjon som kan avrunde objekter for å unngå nettopp å ha noe trappevis når det burde vært avrundet (SAWTOOTH-funksjonen). Forskjellen kan ses i figur 18.



Figur 18: Konsekvensene av bruk av SAWTOOTH-funksjonen

Effektiviteten til FDS ligger nettopp i den enkle rektangulære utformingen av volumer. Med avrundede former kan SAWTOOTH-funksjonen derimot brukes. Denne funksjonen gir ikke en veldig mye finere utforming av taket som kan ses i figur 18, men funksjonen er mer viktig for strømninger langs overflaten. Problemer kan oppstå på overflater med en trappevis avrundning ift. strømninger langs overflatene. Strømninger blir da påvirket av overflater som om det virkelig er en trappevis avrundning. Når SAWTOOTH-funksjonen brukes vil påvirkningen av denne trappevise avrundningen på strømmingen langs taket bli mindre.

I masteroppgaven til Grimstvedt ble brannen simulert som en væskebrann av bensin for å gjøre energiproduksjonen enklest å forutsi. I FDS er det enklest å forutsi en energiproduksjon ved å simulere en brann som en forbrenning av en gass med egenskaper til heptan. Heptan ble valgt i stedet for bensin på grunn av usikkerheten til egenskapene i bensin siden det blir laget forskjellig i mange land og av mange produsenter. I tillegg gjenkjenner FDS heptan slik at den uten å måtte legge til mange egenskaper kan simulere en brann med heptan siden alle egenskapene er kjent allerede. Da er det bare å angi størrelsen til brannen, areal. Det ble funnet 2 forskjellige størrelser på brannens areal brukt i simuleringen til Grimstvedt. På side 41 av masteroppgaven ble $8,5 \text{ m}^2$ nevnt, mens det på side 99 ble brukt 10 m^2 i en beregning. Det er da valgt å bruke $8,5 \text{ m}^2$ for å være på den sikre siden.

For å kunne sammenligne resultater ble både 'slice file' (SLCF) brukt for visuell sammenligning og 'device' (DEVC) for å sammenligne resultater i figurer. Det ble både målt temperatur, høyde til røyklaget og konsentrasjoner til O_2 , CO_2 og CO gjennom tunnelen.

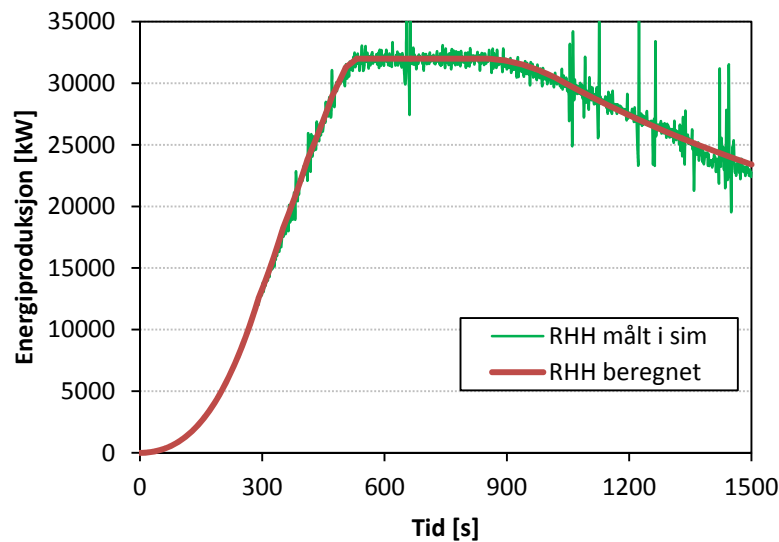
6.6 Valg av grid til sammenligning

Når en brann simuleres bør en sensitivitetsanalyse av grid utføres. Hensikten med dette er å finne hvilken utforming av grid som gir best mulig resultater. I denne oppgaven ble dette gjort ved å se på et grovt grid med en D^*/dx verdi på 7,7 og et finere grid med en D^*/dx verdi på 15,4 (simulering #1a og #1b).

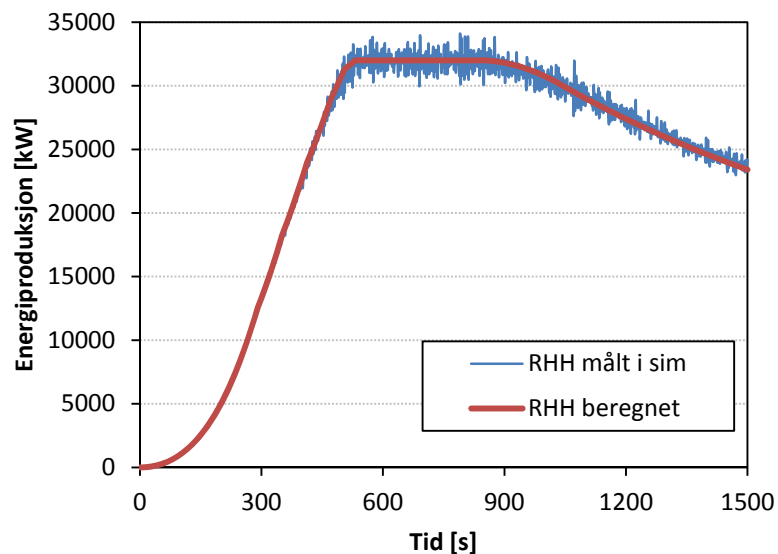
Turbulence resolution brukes til at måle hvor stor andel av den turbulente kinetiske energien som løses av sub grid modellen (som oftest smagorinsky). Den svinger mellom 1 og 0, hvor 0 indikerer perfekt oppløsning og 1 en dårlig oppløsning. For at en simulering vil gi tilfredsstillende resultater (innen eksperimentelle grenser) skal den ligge under 0,2. I begge simuleringene er det målt at den vil ligge innenfor grensene.

Siden resultatene til Grimstvedt (2004) ofte ble målt i forskjellige høyde, er det viktig at disse målepunktene ligger i en egen celle slik at resultatene ikke blir like. De to laveste målepunktene var i en høyde på 0,1 meter og 0,4 meter. Problemet med det grove grid er at disse punktene vil havne i samme celle siden størrelse på cellene er 0,5 meter.

Energiproduksjonen ble lagt inn i inputfilen akkurat likt i hver simulering. Likevel kan de ses i figur 19 og figur 20 at energiproduksjonen til simulering 1b var mye bedre og nærmere det som var lagt inn i inputfilen.

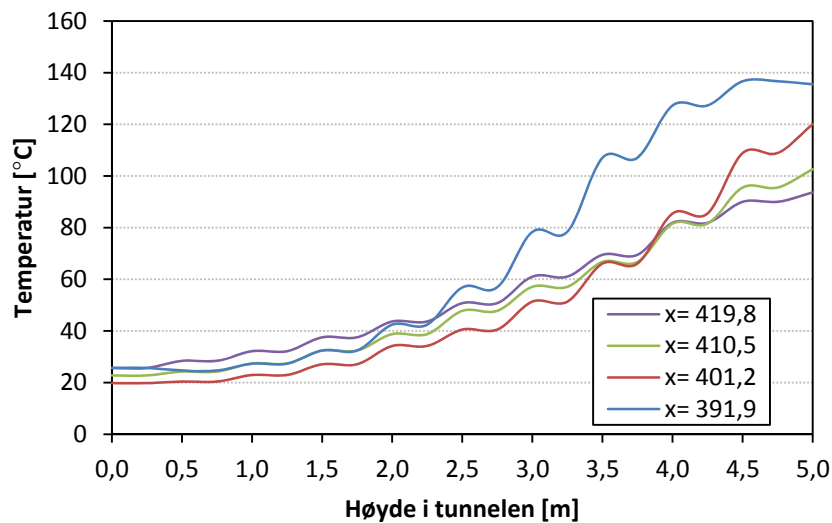


Figur 19: Energiproduksjonen i simulering 1a

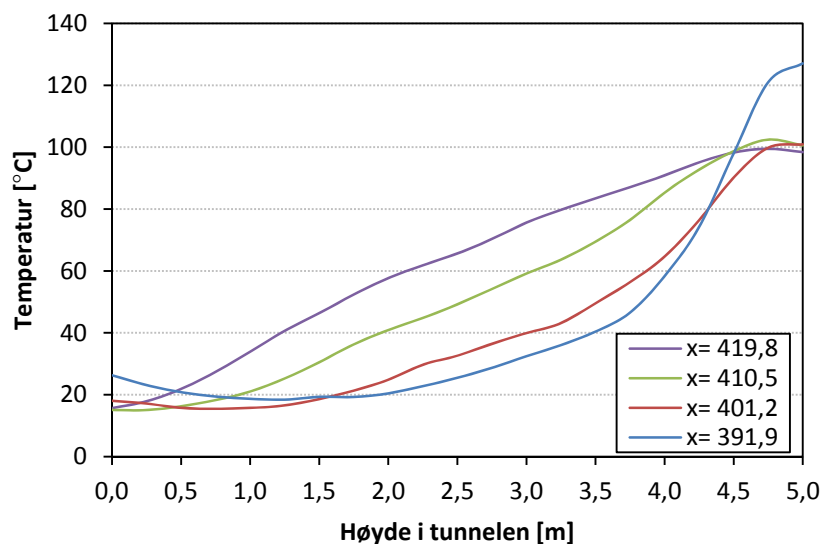


Figur 20: Energiproduksjonen i simulering 1b

Et annet eksempel som viser forskjellen mellom det grove og fine grid kan ses i figur 21 og figur 22. Det finere grid gir et mer jevnt og mer tydelig resultat.



Figur 21: Temperatur i 4 punkter i tunnelen med det grove grid



Figur 22: Temperaturen i 4 punkter med det fine grid

Ut i fra disse resultatene er det valgt å bruke simulering #1b for å sammenligne med Grimstvedt (2004) sine resultater.

6.7 Konsekvenser av valget å utforme designbrannen

Designbrannen kan utformes på flere måter. I dette delkapittelet vil det bli gått gjennom konsekvensene av hvis det hadde blitt valgt den kontinuerlige funksjonen (formel 4.12) som kurven for energiproduksjonen. Siden flere har uttrykt at det er vanskelig å sette ett tall som representativ for maksimalt energiproduksjon for en lastebil er det også tatt med bruk av en annen verdi av maksimalt energiproduksjon og konsekvensene hvis lastebilen hadde vært full lastet.

Disse nye scenarioer kalles nå simulering #2 og #3 som vist i tabell 16.

Tabell 16: Forslag til nye simuleringer

Simulering	
#2	Tom lastebil, med kontinuerlig funksjon og andre tall brukt enn i simulering #1a og #1b
#3	Full lastet lastebil

Disse to scenarioer er ikke simulert, men er et forslag for to nye simuleringer.

Simulering #2 og #3

Utgangspunktet for disse simuleringene var da som sagt formel 4.12 som også blir nevnt av Ingason (2006) som en eksponentiell funksjon for brenselkontrollerte branner. Dette passer veldig godt for branner i en tunnel på grunn av antakelsen at både det naturlige trekket og den mekaniske ventilasjonen vil føre til et overskudd av oksygen i tunnelen tilgjengelig for brannen. Tabell 17 oppsummerer inndata som ble brukt for beregning av energiproduksjonen.

Tabell 17: Inndata til beregning av energiproduksjon til simulering #2 og #3

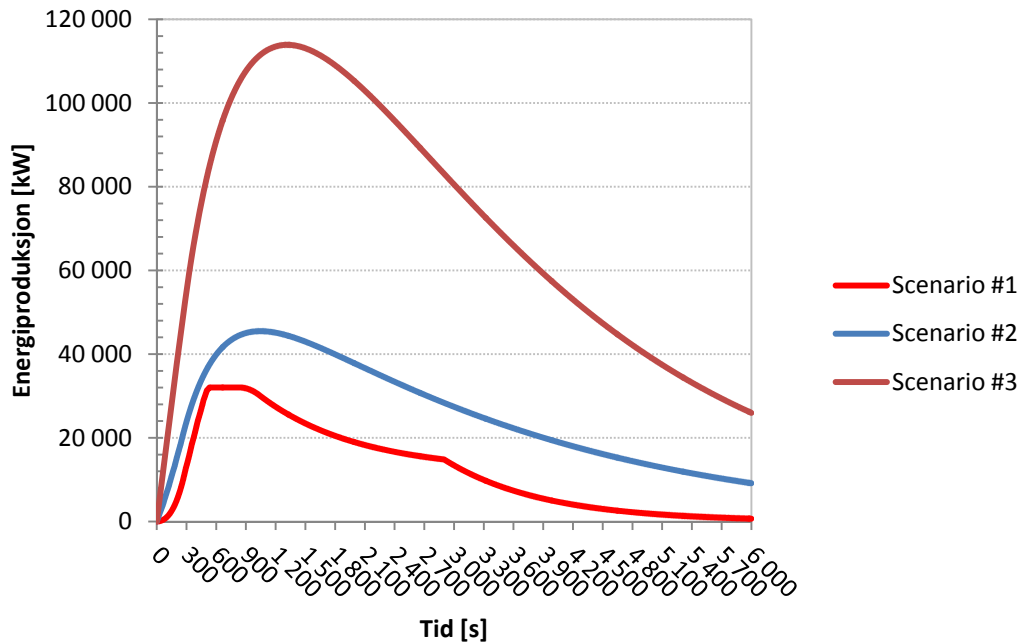
Parameter	Symbol	Verdi
Maksimal energiproduksjon	\dot{Q}_{maks}	Personbil 1-5: 4 MW Lastebil #2: 30 MW Lastebil #3: 100 MW
Kaloriverdi	E_{tot}	Personbil 1-5: 7000 MJ Lastebil #2: 144000 MJ Lastebil #3: 450000 MJ
Retard index	n	Personbil 1-5: 2 Lastebil: 2
Forholdet E_{tot,t_d} og E_{tot}	β_d	Personbil 1-5: 0,99 Lastebil: 0,99

Ut i fra disse tallene kan r, k, t_d og t_{maks} beregnes ved hjelp av formel 4.9, 4.10, 4.13 og 4.14. Resultater blir oppsummert i tabell 18.

Tabell 18: Resultater på beregning av r, k, t_d og t_{maks}

	r		k [s ⁻¹]		t_d [s]		t_{maks} [s]	
	#2	#3	#2	#3	#2	#3	#2	#3
Kjøretøy								
Trekkvogn	2		0,00042	0,00044	12710	11916	1664	1560
Personbil 1	2		0,00114		4634		607	
Personbil 2	2		0,00114		4634		607	
Personbil 3	2		0,00114		4634		607	
Personbil 4	2		0,00114		4634		607	
Personbil 5	2		0,00114		4634		607	

Hvor t_d da er brannens lengde og t_{maks} er den tiden til brannen når sitt høyeste energiproduksjon. Her blir det også antatt at alle kjøretøyene er en egen brann og for å komme til brannens totale energiproduksjon, blir energiproduksjonen til de enkelte kjøretøyene samlet. Som kan ses i figur 23, blir energiproduksjonen mye høyere i scenario #2 og #3 ift. #1. I #2 ble maksimal energiproduksjon 45,5 MW og i #3 114 MW. Det er ikke noe fase med konstant energiproduksjon.



Figur 23: Konsekvenser av andre antakelser i utformingen av brannkurven

Siden retard index, n , er antatt på forhånd å være lik 2 er det være godt å kontrollere etterpå om denne antakelsen er tilstrekkelig. Det kan gjøres ved å bruke formel 4.15. Siden t_{maks} ikke er kjent før n er antatt, var det ikke mulig å beregne konstanten før.

Tabell 19: kontroll av antatt verdi til n

	Scenario #1	Scenario #2	Scenario #3
n	$0,74294 \cdot e^{\left(2,9 \cdot \frac{\dot{Q}_{maks} \cdot t_{maks}}{E_{tot}}\right)} = 2,03$	$0,74294 \cdot e^{\left(2,9 \cdot \frac{\dot{Q}_{maks} \cdot t_{maks}}{E_{tot}}\right)} = 2,03$	$0,74294 \cdot e^{\left(2,9 \cdot \frac{\dot{Q}_{maks} \cdot t_{maks}}{E_{tot}}\right)} = 2,03$

Som kan ses i tabell 19, vil antakelsen av at $n=2$ være tilfredsstillende.

7 Resultater

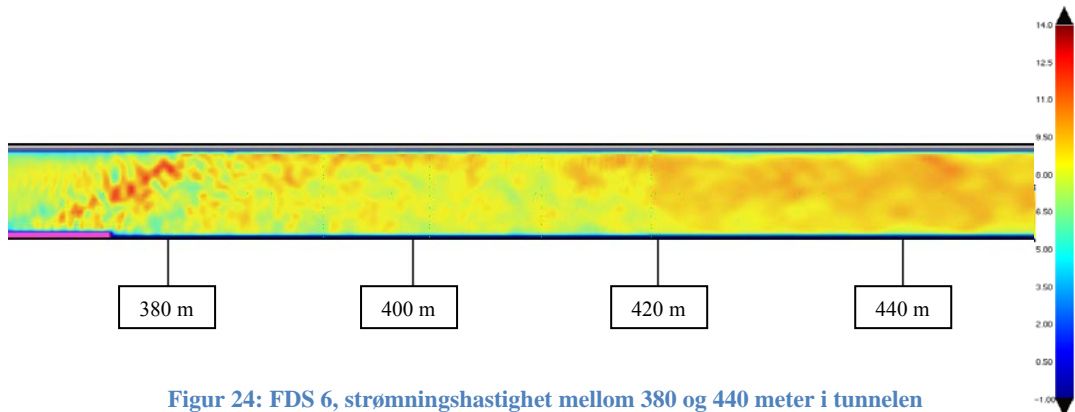
I dette kapittelet blir resultatene til simuleringene gjort i denne oppgaven sammenlignet med resultatene til Grimstvedt (2004). Som sagt i kapittel 6.6 skal simulering #1b, det fine grid, brukes til sammenligning.

7.1 Sammenligning

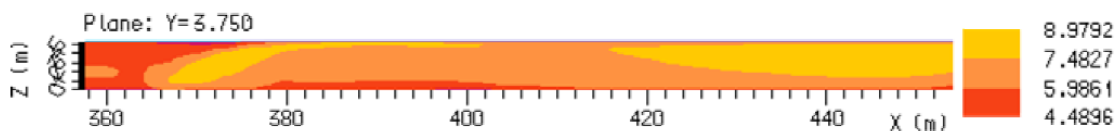
Hensikten med denne simuleringen var å se om resultatene ble annerledes når et annet simuleringsprogram blir brukt enn det brukt av Grimstvedt (2004, simulering #1). Denne simuleringen var den som skulle ligne mest på brannen som skjedde i Seljestadtunnelen den 14. juli 2000, men siden ventilasjonshastigheten ikke var kjent ble den ikke aktivert.

Strømningshastighet

I denne simuleringen ble mekanisk ventilasjonen ikke brukt, slik at all strømming er skapt av termisk oppdrift fra brannen. Strømningshastigheten kom opp i 14 ms^{-1} lokalt når FDS 6 ble brukt, ved bruk av Kameleon FireEx kom strømningshastigheten ikke over 9 ms^{-1} . Det kan at begge programmene fikk med seg at det i et område 20 til 50 meter fra brannen er et område hvor strømningshastigheten er betydelig lavere. Det er dette som blir ment som det området som er 10-20 ganger den hydrauliske diameter i kapittel 2.8 under håndberegningsmodellen. Etter 50 meter ser det ut som det er en jevn strøm gjennom hele tverrsnittet med bare et lite område langs gulvet hvor strømmingen er lavere.

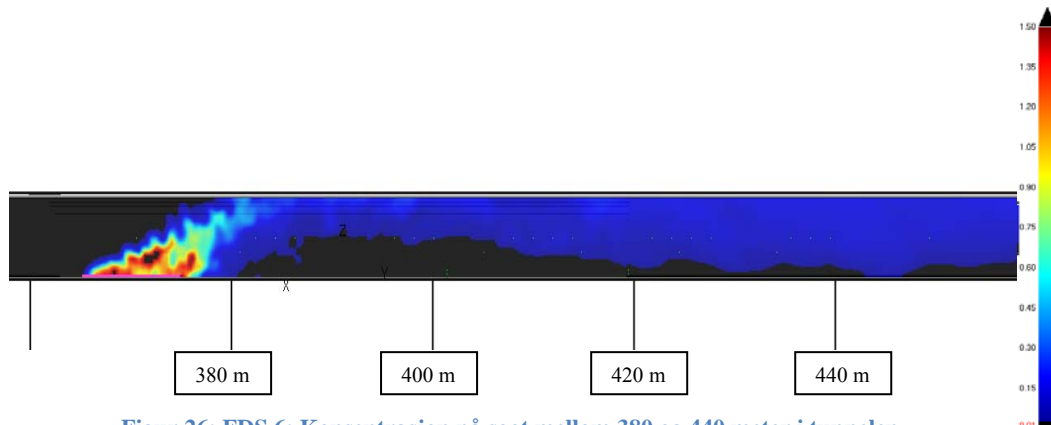


Figur 24: FDS 6, strømningshastighet mellom 380 og 440 meter i tunnelen

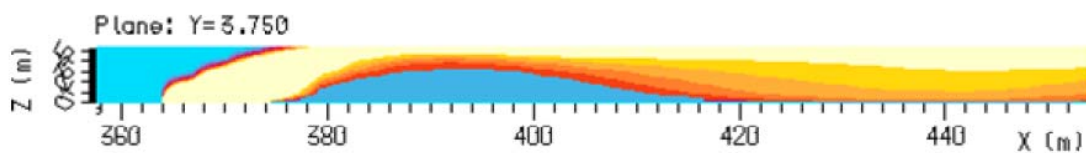


Figur 25: Kameleon FireEx, strømningshastighet mellom 380 og 440 meter i tunnelen

Området mellom 20 til 50 meter nedstrøms kan også ses i figur 26 og figur 27 å ha bedre forhold enn lengre ned i tunnelen. Røyken beveger med strømmingen først langs taket, hvor det da etter cirka 420 meter faller ned mot underlaget. Det er bare et lite område langs underlaget hvor konsentrasjonen er lavere, dette viser da hvor røyklaget slutter. Det kan ses at røyklaget har dekket nesten hele tverrsnittet. Begge simuleringsprogrammene viser nesten samme resultat. Den eneste forskjellen er at det er litt tydeligere med FDS at røyklaget ikke går helt ned mot underlaget.



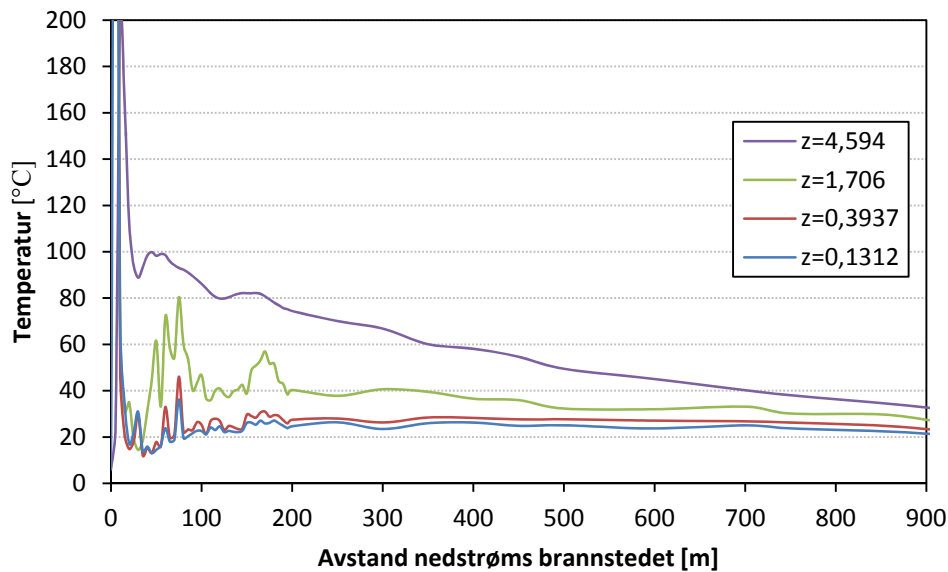
Figur 26: FDS 6: Konsentrasjon på soot mellom 380 og 440 meter i tunnelen



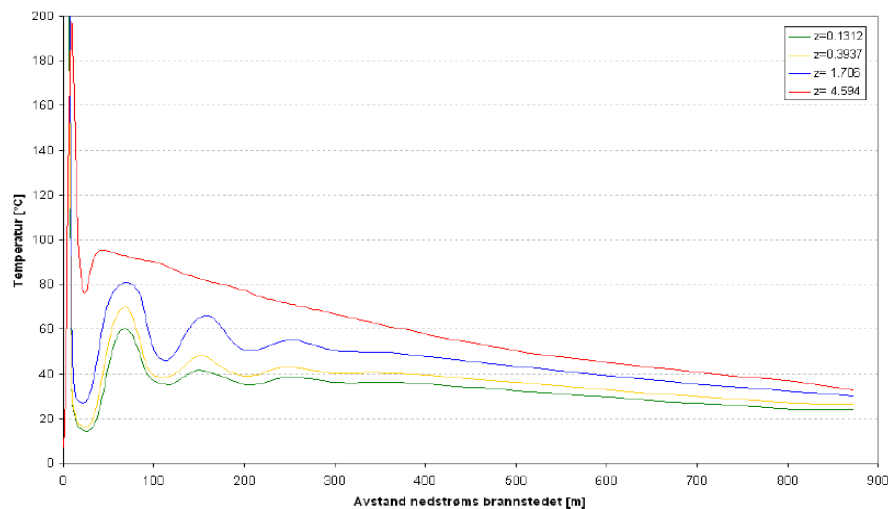
Figur 27: Kameleon FireEx: Konsentrasjon på soot mellom 380 og 440 meter i tunnelen

Termisk påkjenning

Figur 28 og figur 29 viser temperaturen nedstrøms brannstedet ved forskjellige høyder etter 25 minutter. Begge figurene viser et område rett etter brannen hvor temperaturen er betydelig lavere enn lengre ned i tunnelen. Dette området stemmer godt overens med det som er observert tidligere med røyklaget og strømningshastigheten, cirka 20-50 meter nedstrøms brannstedet (390-420 meter i tunnelen). Figurene viser også hvor stor forskjellen er mellom temperaturene i de forskjellige høydene. Et lite forskjell kan ses mellom programmene at temperaturen langs gulvet er lavere ved bruk av FDS enn Kameleon FireEx. Mens det i en høyde på 0,4 meter ikke blir varmere enn 30 °C ved bruk av FDS, holder temperaturen seg først lenge rundt 40 °C ved bruk av Kameleon FireEx. Figurene viser hvor viktig det er å holde seg lavt ift. eksponering til varme.

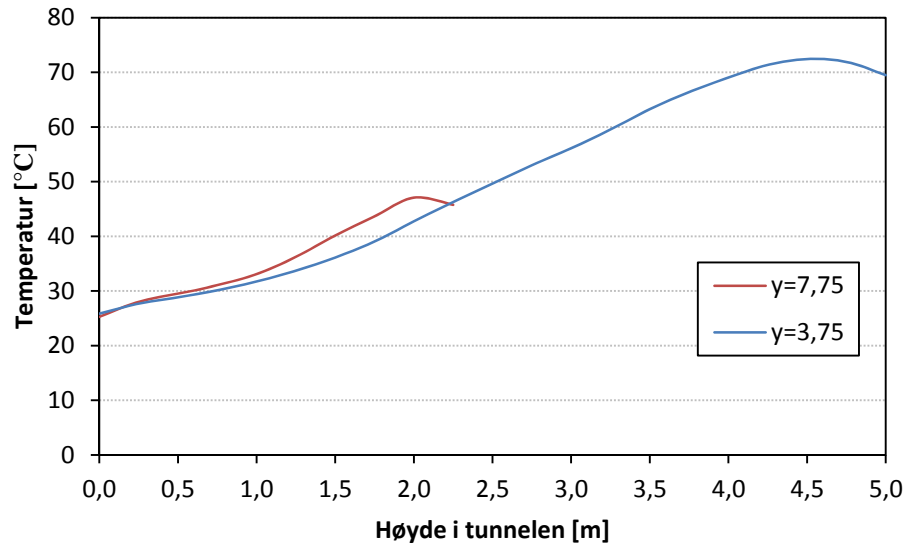


Figur 28: FDS 6: Temperatur nedstrøms i forskjellige høyder etter 25 minutter

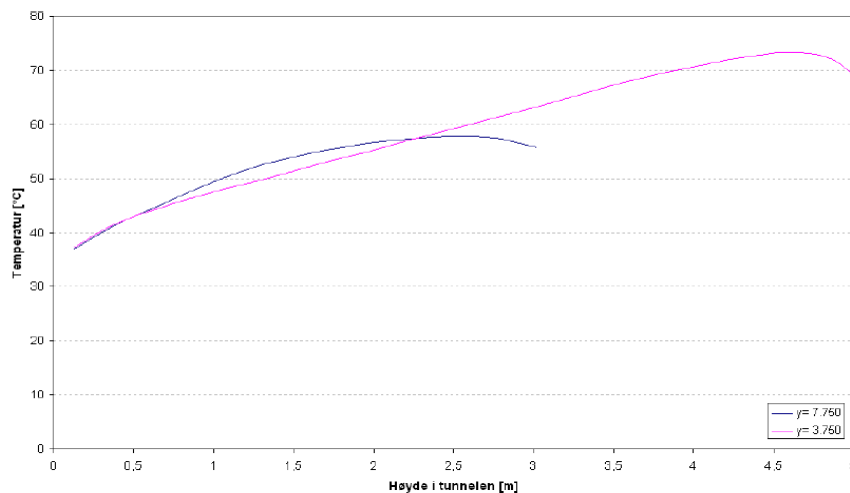


Figur 29: Kameleon FireEx: Temperatur nedstrøms i forskjellige høyder etter 25 minutter

Figur 30 og figur 31 viser hvordan temperaturen endrer seg på siden av tunnelen ift. midten 230 meter i tunnelen etter 25 minutter. Den ene linjen for $y=7,75$ (i siden) stopper tidligere siden taket er lavere her på grunn av et avrundet tak. Mens temperaturen ned mot gulvet er nesten 3,5 ganger lavere i midten av tunnelen enn ved taket ved bruk av FDS, er det forholdet bare rundt 2 ved bruk av Kameleon FireEx. Figurene er ellers ganske likt. Figurene viser hvor viktig det var for de personene som satt fast i tunnelen å legge seg ned på veien i stedet for å stå.

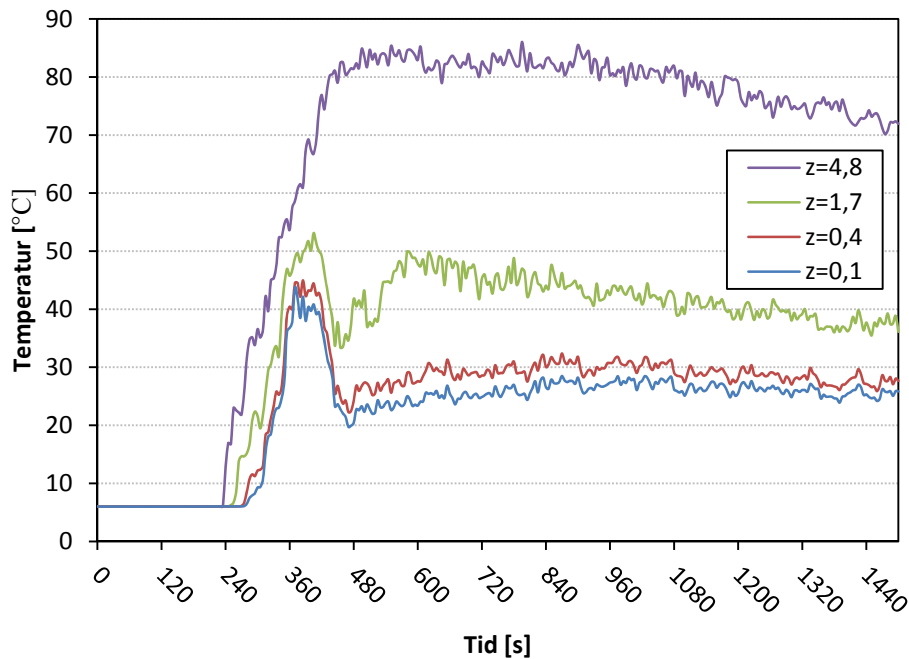


Figur 30: FDS 6: Temperatur i midten og langs siden av tunnelen 600 meter i tunnelen etter 25 minutter

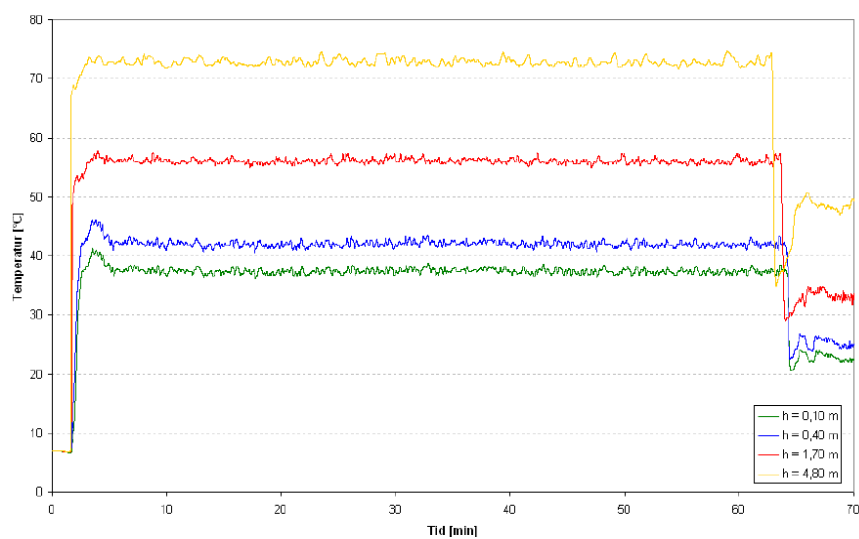


Figur 31: Kameleon FireEx: Temperatur i midten og langs siden av tunnelen 600 meter i tunnelen etter 25 minutter

Figur 32 og figur 33 viser hvordan temperaturen endret seg i simuleringen over tid 230 meter nedstrøms i de forskjellige høydene. Personene lå på veien slik at det vil tilsvare en høyde på cirka 0,4 m. Det var ganske tydelig at temperaturen var betydelig lavere enn lengre opp mot taket. Hvis personene hadde stått i 70 minutter, så hadde det gitt en betydelig større eksponering for varme. I disse figurene ses det en forskjell mellom programmene i at FDS gir en høyere temperatur langs taket og en lavere temperatur lengre ned i forhold til Kameleon FireEx.

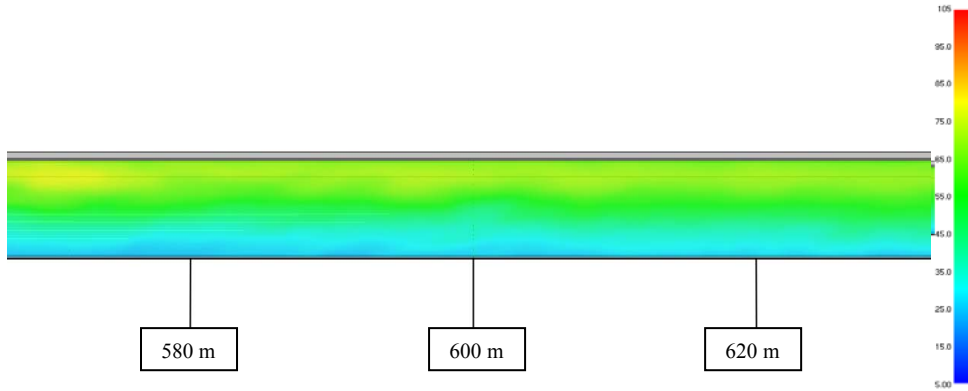


Figur 32: FDS 6: Temperatur i forskjellige høyder 600 meter i tunnelen gjennom brannen

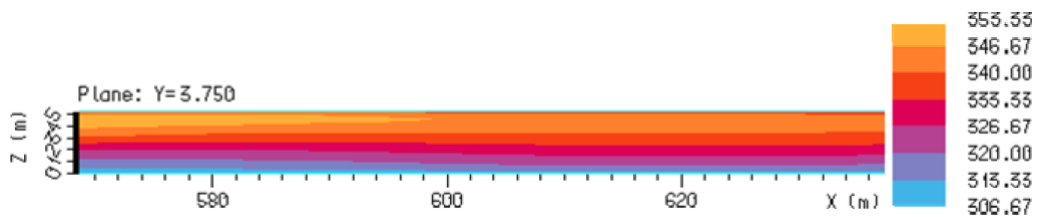


Figur 33: Kameleon FireEx: Temperatur i forskjellige høyder 600 meter i tunnelen gjennom brannen

Figur 34 og figur 35 viser lagdelingen av temperaturene grafisk i intervallet 570 til 630 meter i tunnelen, personene befant seg 600 meter i tunnelen. Figuren viser at eksponeringen er ganske likt uansett hvor de hadde befunnet seg i dette intervallet. I disse figurene er det vanskelig å dømme om det er noe forskjell mellom programmene, men det som er likt er at eksponeringen er likt uansett hvor de hadde befunnet seg i dette intervallet.



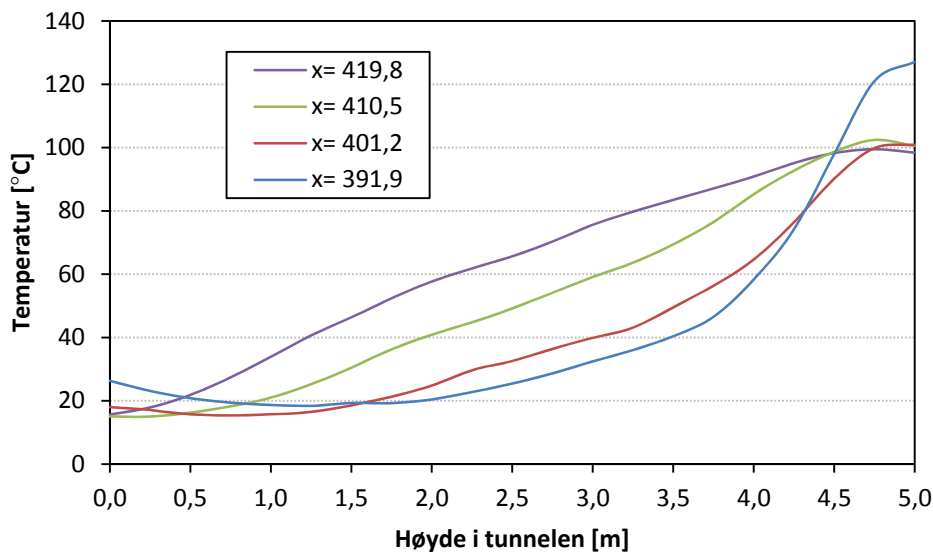
Figur 34: FDS 6: Temperatur varierende i tunnelhøyde etter 25 minutter mellom 570 og 630 meter i tunnelen



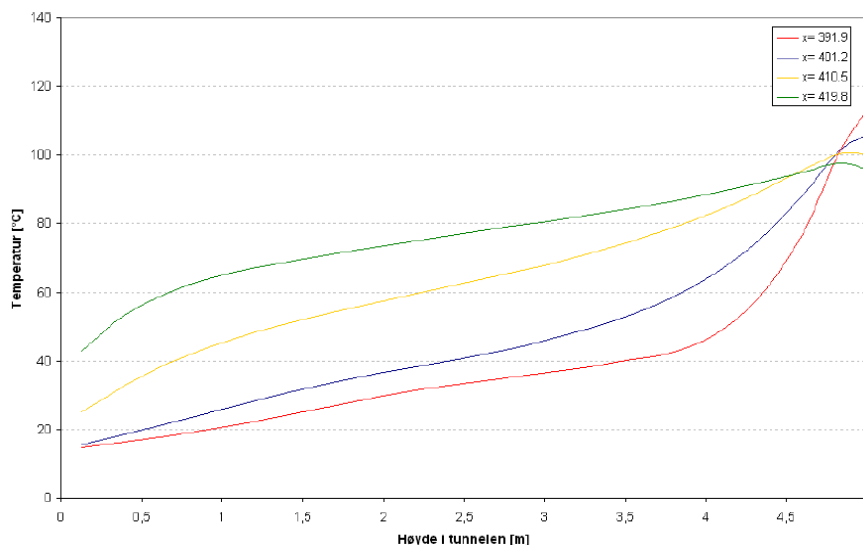
Figur 6-6: Temperatur [K] i varierende tunnelhøyde (z-retning) etter 25 minutter fra 570-640 meter inne i tunnelen.

Figur 35: Kameleon FireEx: Temperatur varierende i tunnelhøyde etter 25 minutter mellom 570 og 630 meter i tunnelen

Som ble vist med figur 28 og figur 29 var det et område cirka 20 til 50 meter nedstrøms som viste betydelig lavere temperaturer enn lengre ned i tunnelen. Temperaturene på fire punkter i dette intervallet blir vist i figur 36 og figur 37, hvordan temperaturen endret seg i høyde etter 25 minutter. Figurene viser kanskje litt forskjell i temperaturer, men hovedtrekkene var like ved bruk av begge programmene. Ved $x=391,9$ øker temperaturen veldig fort når det nærmer seg taket, dette er da det varme røyklaget som beveger seg høyt langs taket. Ved $x=401,2$ og $x=410,5$ skjer dette i mindre grad siden det varme røyklaget begynner å synke. Ved $x=419,8$ kan det ses at røyklaget har kommet seg lengre nedover og at temperaturene er høyere når det beveges lengre under taket enn ved de andre punktene. I dette punktet kan det ses en jevn temperatur økning som viser at røyklaget har kommet mye lavere enn ved $x=391,9$. Dette bekrefter at eksponeringen for høyere temperaturer var lavt opptil cirka 410 meter. Det som også kan ses i fra figurene er hvor fort temperaturen synker når det beveges lengre inn i tunnelen.



Figur 36: FDS 6: Temperatur mellom 390 og 420 meter i tunnelen etter 25 minutter

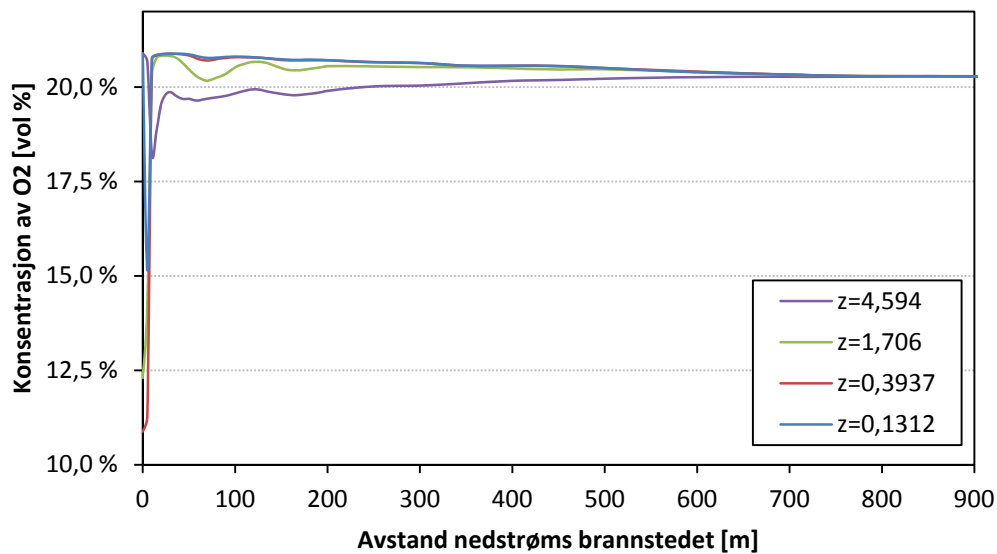


Figur 37: Kameleon FireEx: Temperatur mellom 390 og 420 meter i tunnelen etter 25 minutter

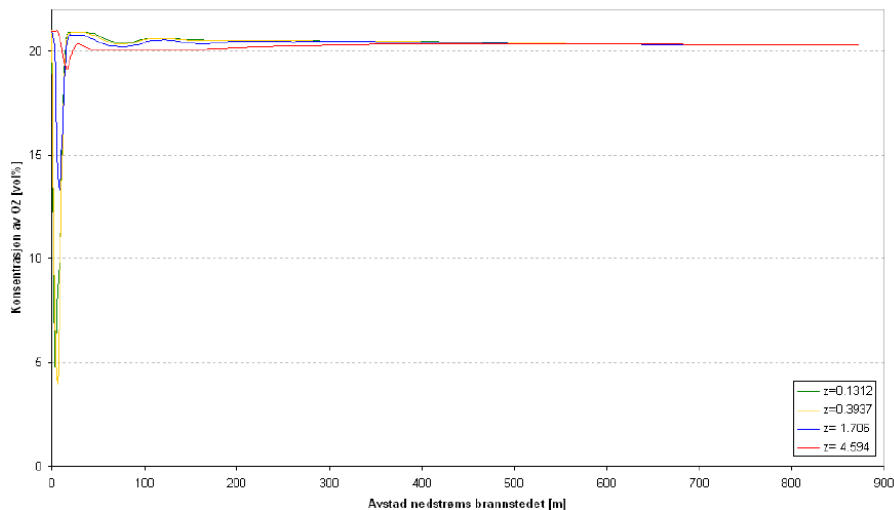
Toksisk påkjenning

Simuleringene viste ubetydelige mengde med CO, med opp mot 200 ppm et par meter unna brannen i FDS simuleringen.

Figur 38 og figur 39 viser konsentrasjon av O₂ nedstrøms brannen etter 25 minutter. I begge simuleringene ligger konsentrasjonene rundt 20 % i hele høyden etter cirka 50 meter. Rett ved brannen går konsentrasjonen ned mot 11 % ved bruk av FDS, mens det i Kameleon FireEx går ned mot 5 %. Figurene viser ellers lite forskjell. Konsentrasjonen endret seg lite med høyden, bare opp mot taket var konsentrasjonen litt lavere.

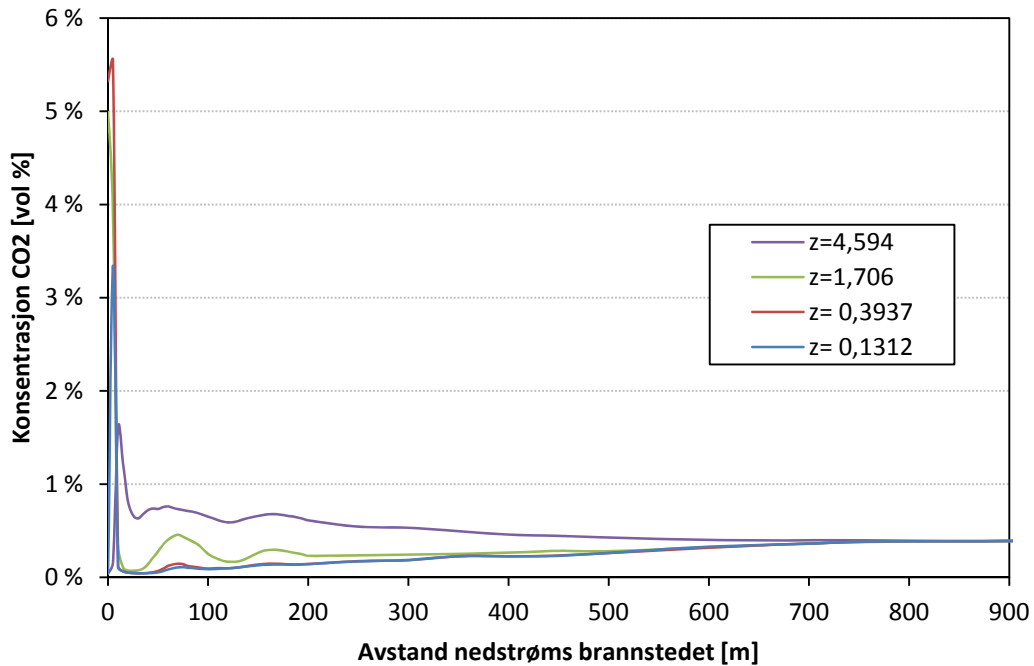


Figur 38: FDS 6: O₂ konsentrasjon i forskjellige høyder nedstrøms etter 25 minutter

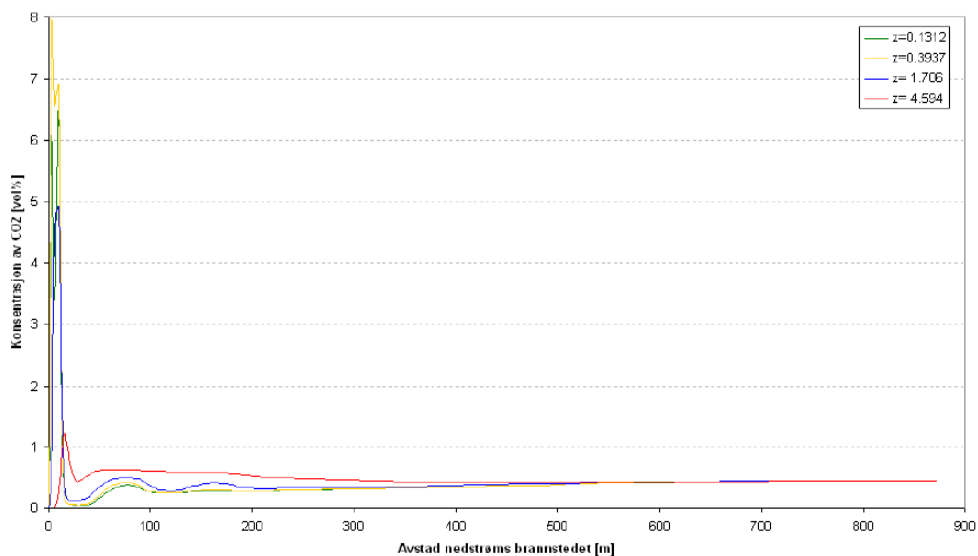


Figur 39: O₂ konsentrasjon i forskjellige høyder nedstrøms etter 25 minutter

Figur 40 og figur 41 viser konsentrasjonen til CO₂ nedstrøms brannstedet etter 25 minutter. Figurene er ganske likt i at konsentrasjonen ikke overstiger 1 % etter brannen og at det i et område mellom 20 til 50 meter er lavere konsentrasjoner enn lengre ned i tunnelen. I brannen viset Kameleon FireEx derimot høyere konsentrasjoner enn FDS. Figurene viser også at konsentrasjonen endrer med høyde, hvor opp mot taket konsentrasjonen var høyest. Konsentrasjonen når ikke et farlig nivå, unntatt rett ved brannen.

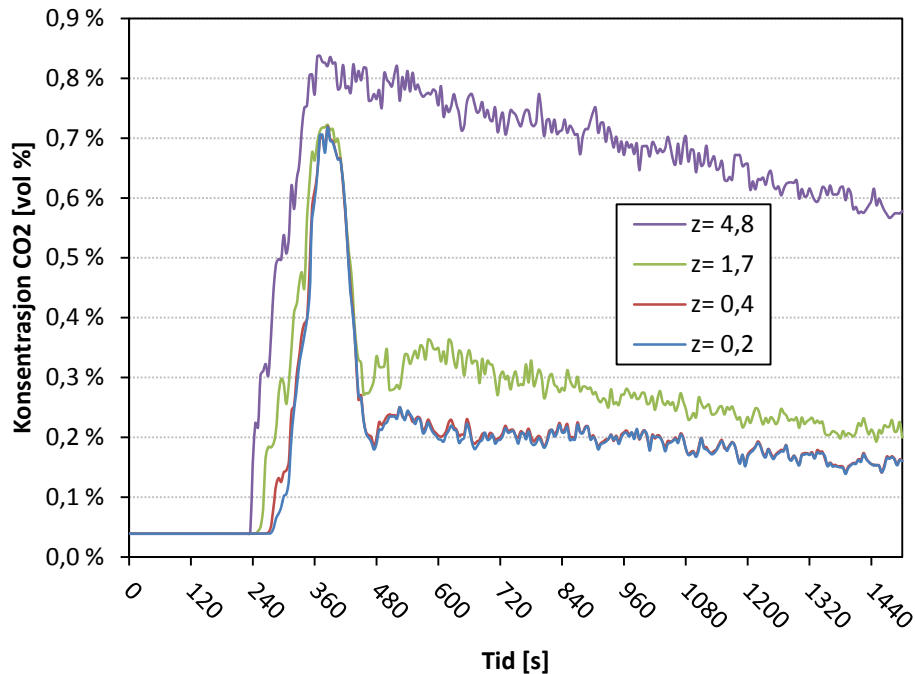


Figur 40: FDS 6: CO₂ konsentrasjonen i forskjellige høyder nedstrøms etter 25 minutter

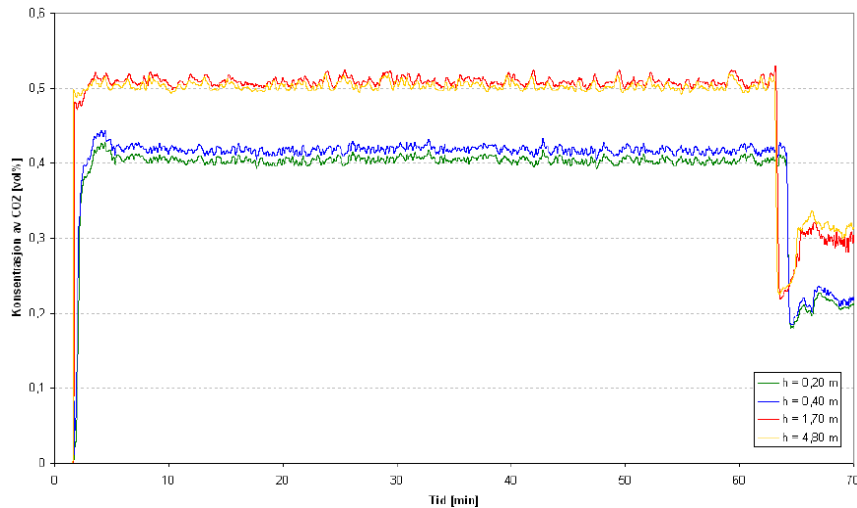


Figur 41: Kameleon FireEx: CO₂ konsentrasjon i forskjellige høyder nedstrøms etter 25 minutter

Figur 42 og figur 43 viser hvordan konsentrasjonen til CO₂ endret seg over tid der hvor personene befant seg. Disse figurene viser store forskjeller mellom FDS og Kameleon FireEx. Mens konsentrasjonen langs taket var mye større ved bruk av FDS, var konsentrasjonen lengre ned i høyden lavere igjen enn Kameleon FireEx. Det som var felles er at konsentrasjonen stiger med høyden i tunnelen.

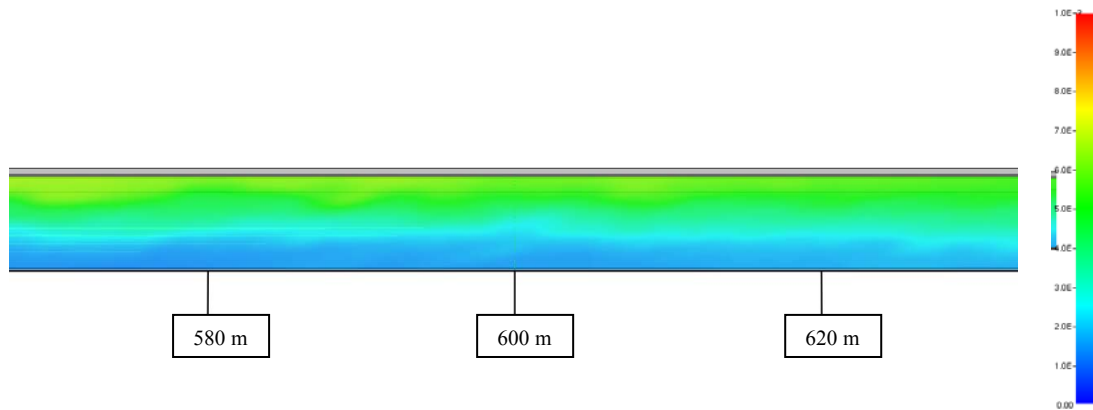


Figur 42: FDS 6: CO₂ konsentrasjon 600 meter i tunnelen fra 0 til 25 minutter

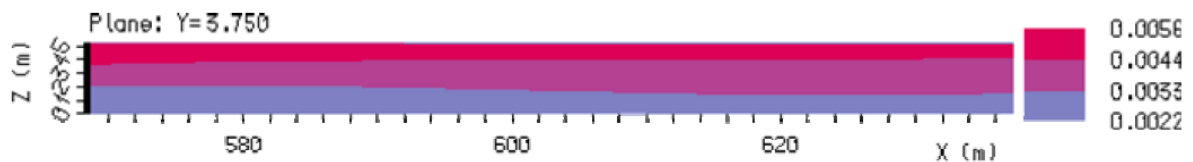


Figur 43: Kameleon FireEx: CO₂ konsentrasjon 600 meter i tunnelen fra 0 til 70 minutter

Figur 44 og figur 45 viser grafisk (i et intervall fra 570 til 630 i tunnelen) at konsentrasjonen til CO₂ varierer sterk med høyden. I laginndelingen til konsentrasjonen er det tydelig at den beste plassen å oppholde seg var så lavt som mulig. Eksponeringen på underlaget vil være likt uansett hvor personene befant seg innen intervallet, i begge simuleringene. Det at konsentrasjonene langs taket er høyere enn lengre ned er likt i begge simuleringene, men ved bruk av FDS kan det ses at konsentrasjonen langs taket er høyere og langs underlaget er lavere enn ved å bruke Kameleon FireEx.

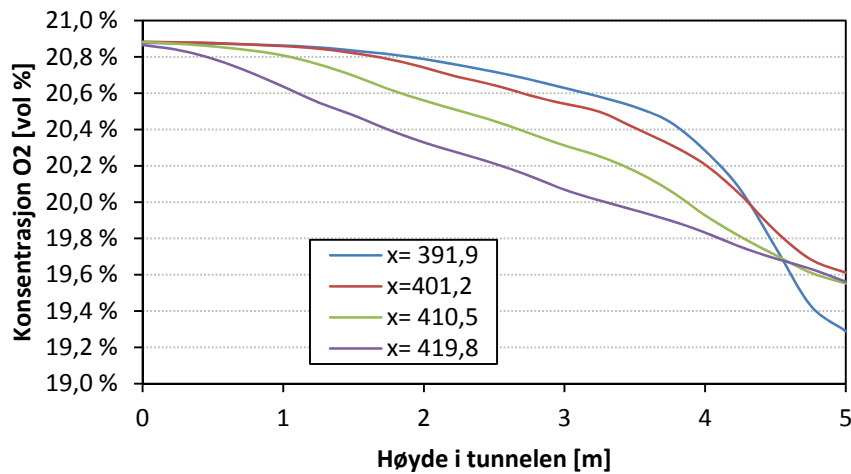


Figur 44: FDS 6: CO₂ konsentrasjon varierende i tunnelhøyde etter 25 minutter mellom 570 og 630 meter i tunnelen

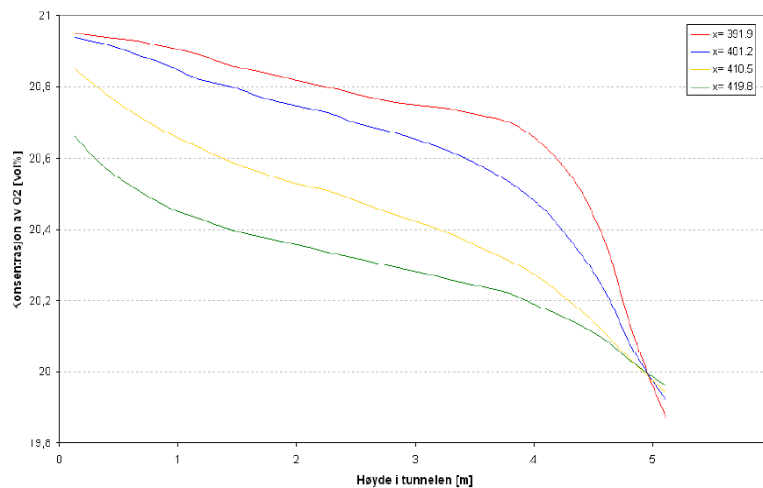


Figur 45: Kameleon FireEx: CO₂ konsentrasjon varierende i tunnelhøyde etter 25 minutter mellom 570 og 630 meter i tunnelen

I det området som ble funnet tidligere (mellom 20 ti 50 meter nedstrøms) var tilgang på oksygen god. Figur 46 og figur 47 viser hvordan konsentrasjonen på O₂ endrer seg med høyden i fire punkter innen dette intervallet etter 25 minutter. Nærmest brannen er det skillet mellom det varme røyklaget og det kalde luftlaget tydeligst ved at konsentrasjonen synker fortest når det stiges i høyden. Lengre ned i tunnelen synker røyklaget, og konsentrasjonen synker tidligere med høyden. Begge simuleringene gir ganske like resultater i disse figurene.

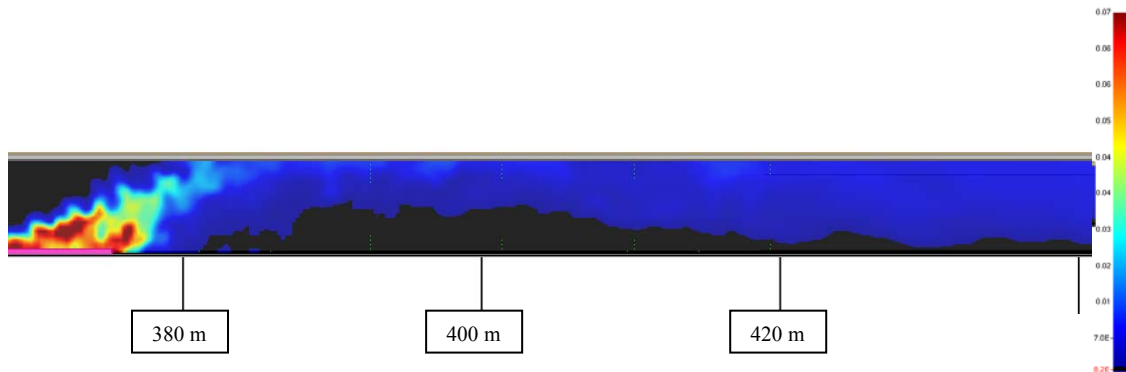


Figur 46: FDS 6: Konsentrasjon O₂ mellom 390 og 420 meter i tunnelen etter 25 minutter

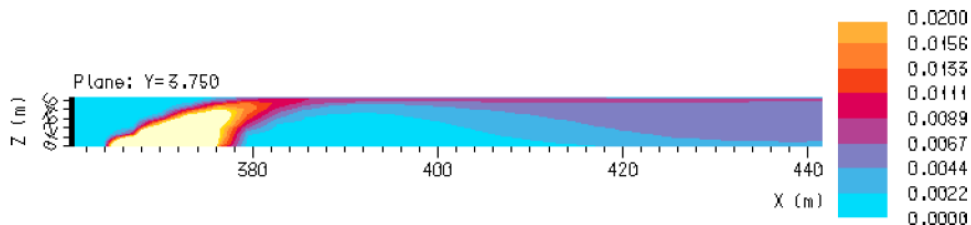


Figur 47: Kameleon FireEx: Konsentrasjon O₂ mellom 390 og 420 meter i tunnelen etter 25 minutter

Konsentrasjonen på CO₂ var lavt i dette området (20 til 50 meter nedstrøms) som skyldes at røyklaget beveget seg langs taket ennå. Dette vises grafisk i figur 48 og figur 49. Figurene viser konsentrasjonen til karbondioksid etter 25 minutter. De viser også at konsentrasjonen er avhengig av høyden. Det er vanskelig å se på forskjeller, men begge simuleringene kom med det samme området hvor røyken og varmet ennå beveger langs taket.

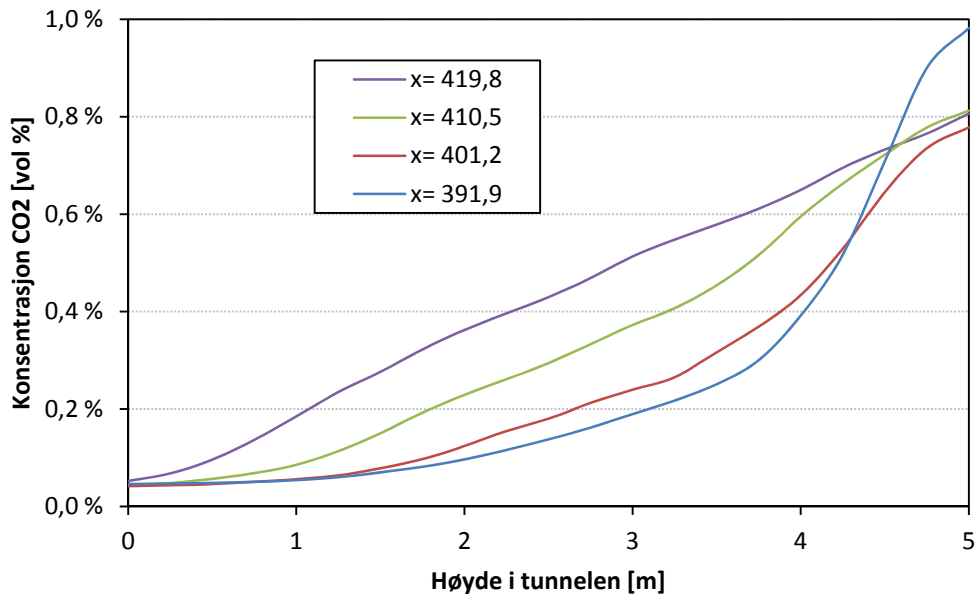


Figur 48: FDS 6: CO₂ konsentrasjon mellom 370 og 430 meter i tunnelen etter 25 minutter

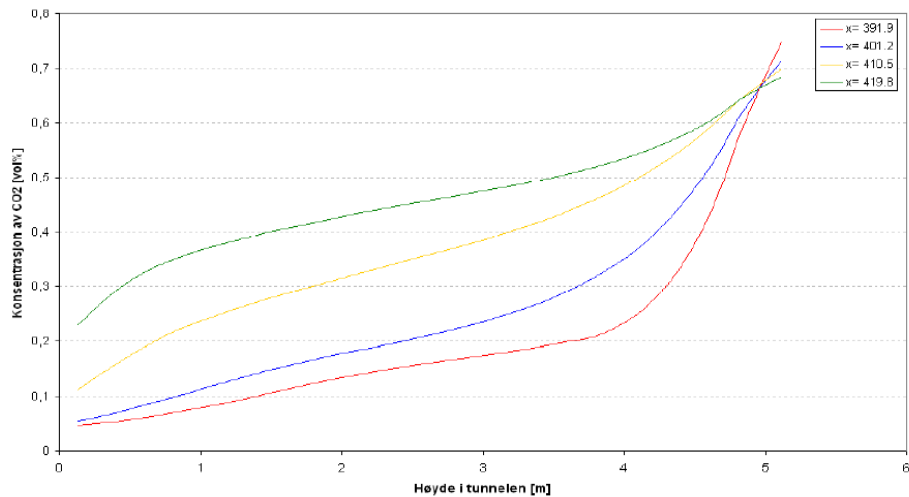


Figur 49: Kameleon FireEx: CO₂ konsentrasjon mellom 370 og 430 meter i tunnelen etter 25 minutter

Figur 50 og figur 51 viser hvordan konsentrasjonen til CO₂ endret seg i høyden i dette intervallet etter 25 minutter. I disse figurene vises forskjellen tydeligere enn grafisk. Figurene er ganske like, men det kan ses en forskjell i at konsentrasjonen er høyere langs gulvet ved X=419,8 og X=410,5 når Kameleon FireEx brukes



Figur 50: FDS 6: CO2 konsentrasjon mellom 390 og 420 meter i tunnelen etter 25 minutter



Figur 51: Kameleon FireEx: CO2 konsentrasjon mellom 390 og 420 meter i tunnelen etter 25 minutter



7.2 Delkonklusjon

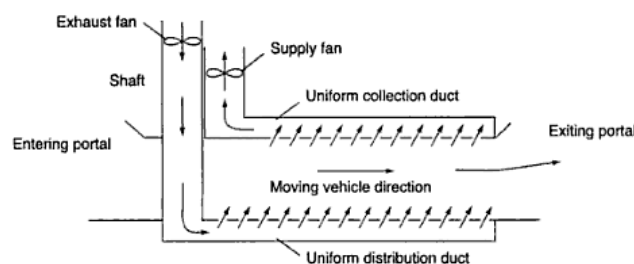
Hensikten med disse simuleringene var å simulere brannen i Seljestadtunnelen. Selv om to forskjellige simuleringprogrammer ble brukt, var resultatene ganske like. Det område med lavere konsentrasjoner og temperaturer enn lengre ned i tunnelen ble også funnet å være mellom cirka 20 til 40 meter etter brannen. Det ser ut som røyklaget falt litt tidligere mot underlaget ved bruk av Kameleon FireEx. Det kan ses i figur 36 og figur 37 hvor temperaturen ikke var så høyt lengre ned i tunnelen ved bruk av FDS enn Kameleon FireEx. Strømningshastigheten var litt høyere ved bruk av FDS, men bare i små lokale områder og kan skyldes det finere grid brukt. Der hvor simuleringene var mest ulikt var utviklingen av temperaturen og CO₂ konsentrasjonen gjennom simuleringen på stedet hvor personene befant seg. Temperaturen langs taket var opp mot 85 °C ved bruk av FDS, mens Kameleon FireEx ikke kom på en temperatur over 75 °C. Temperaturene lengre ned i høyde var derimot 10 °C lavere ved bruk av FDS. Dette kan da skyldes at det var et tydeligere røyklag slik at mest parten av varmen og røyken ennå beveget seg langs taket. Det vil ikke si at det ikke var røyk langs gulvet, men bare at størst parten av røyken holdt seg langs taket slik at temperaturen og konsentrasjonene er høyere. Innblandingen av luft var litt mindre.

8 Diskusjon

8.1 Ventilasjonssystem

Som sagt tidligere er det flere variabler som påvirker brannutviklingen (brannveksten og energiproduksjonen) og ventilasjon er kanskje én av de viktigste av dem. Ventilasjon virker både positivt og negativt på forholdene i tunnelen. Når ventilasjonen er på vil brannen få en høyere energiproduksjon og en fortere brannvekst. Dette fører til en høyere temperatur og stråling nær brannen, mens konsentrasjonene på farlige gasser vil være lavere lengre ned i tunnelen på grunn av innblandingen av luft. Forsøk i Byfjordtunnelen (1998) og Bømlafjordtunnelen (2000) har vist at konsentrasjoner på CO og NO_x ved en tunnelbrann ikke vil nå farlige konsentrasjoner på grunn av den store mengde frisk luft som blir blandet inn i røyken. Det er derimot flere punkter som må nevnes til disse forsøk for å kunne bruke denne antakelsen til alle tunneler generelt. Byfjordtunnelen og Bømlafjordtunnelen (forsøkene beskrevet av Nilsen, 2011, 79-84) er tunneler med tverrsnittprofil T-11 som er en av de større profilene som brukes i Norge. I forsøkene ble 2 biler antent og energiproduksjonen antatt å være rund 5-10 MW. Brannen var liten og tverrsnittet til tunnelen var stort. Dette i tillegg til et ventilasjonssystem som var på full hastighet fører til at mye luft blir blandet inn i røyken og synker konsentrasjonene på de farlige gassene. En tunnel med et mindre tverrsnitt vil derimot ikke ha mye luft i tunnelen som kan blandes med røyken, i tillegg er veggene nærmere brannen slik at brannen vil være større og ha en fortere vekst, i henhold til formel 2.1 og 2.2. Et mindre tverrsnitt kan derfor føre til høyere konsentrasjoner av farlige gasser og høyere temperaturer og stråling.

Det forsøk og erfaringer fra forskjellige branner også har vist er at langsgående ventilasjon skaper problemer i tunneler med toveistrafikk i samme løp. Det kan diskuteres om når det vil være lønnsomt å ha to løp i stedet for ett, men kanskje bør diskusjonen være om langsgående ventilasjon bør brukes i slike tunneler. Regelverket beskriver bare bruk av impulsventilatorer. Selv om det ikke eksplisitt står nevnt at bare langsgående ventilasjon skal brukes, blir bare denne måte beskrevet. Et tiltak som kan bedre forholdene i tunnelen er derimot tversgående ventilasjon. Det finnes mange eksempler på tversgående ventilasjon, men et eksempel på hvordan forholdene kan bedres er vist i figur 52. Frisk luft blir blåst inn i tunnelen lavt, mens luften blir suget ut høyt. Ved brann blir da røyken suget ut, mens frisk luft blir blåst inn i tunnelen. Slik vil det oppstå en bedre lagdeling med et varmt røyklag høyt langs taket og et kaldt luftlag langs gulvet. Problemer med sikt og farlige gasser vil ikke være tilstede lengre slik, forutsatt at det er mulig å suge ut så mye luft som er nødvendig for å beholde et luftlag på sirka 2,5 meter høyt (eller det som er nødvendig for å rømme trygt). Brannvesenet vil også kunne nå brannen fra begge sidene av brannen i stedet for bare motstrøms i forhold til ventilasjonsretningen. Problemet med dette systemet er da at kostnader blir veldig høyt blant annet på grunn av det større tverrsnittet som trengs til tunnelen for å kunne gi plass til systemet.



Figur 52: Eksempel på tversgående ventilasjon. (Beard & Carvel, 2005, side 133)



Det er derimot et annet problem ved bruk av langsgående ventilasjon som kanskje er farligere enn selve brannen som blir nevnt av Nilsen (2011, side 81), det er at røyken fyller hele tunneltverrsnittet med røyk 20 meter etter brannen allerede. Tunnelene har ikke et varslingsystem inn i tunnelen som varsler biler å stoppe og snu. Dette i tillegg til svinger som svekket sikten, vil føre til at en bil med en hastighet på 80 km t^{-1} ikke klarer å se røyken tidlig nok og ikke klart å bremse før den er 100-200 meter inn i røyken. På det tidspunktet har sikten gått ned til 1-2 meter og det vil være umulig å kjøre videre. Dette kan føre til flere problemer. Når en bil kjører inn i røyken kan den kjøre på andre biler som prøver å snu og rømme fra brannen (som muligens kan føre til en brann til), i tillegg til at bilen kan kjøre på personer som prøver å flykte til fots. Derfor er det viktig med et system som varsler ved brann fort og i tillegg stenger tunnelen og varsler de i tunnelen om å kjøre fra brannen.

8.2 Regelverk

Som nevnt er ventilasjonssystemet et punkt som bør ses på, et annet punkt er hvordan konstruksjonen og ventilasjonssystemet blir dimensjonert. Konstruksjonen og ventilasjonssystemet blir dimensjonert ved hjelp av en designbrann. I regelverket i dag er kravene avhengig av tunnelklassen som igjen er avhengig av lengde og trafikkmengde. Det som derimot ikke blir tatt hensyn til er trafikken som får bruke dem. Som nevnt i kapittel 3.4 bruker det franske regelverk scenarioer etter takhøyden og om farlige gods kan transporteres gjennom tunnelen. Farlige gods fører til en brannbelastning som kan være 10 ganger større enn ved en vanlig lastebil, i tillegg til at røyken vil inneholde mange farlige gasser. Et veldig ekstremt eksempel er da brannen i Salangtunnelen i Kabul, Afghanistan hvor mer enn 200 mennesker døde i 1982 (Bergmeister & Francesconi, 2004). Det blir antatt at brannårsaken var en eksplosjon av en mine når en militærkolonne kjørte gjennom tunnelen, det befant seg også en tankbil i kolonne. Dette scenarioet er ikke sannsynlig i de fleste tunneler, men et scenario som er mer sannsynlig, er en lastebil som begynner å brenne. En vanlig årsak er da for eksempel når utenlandske lastebiler som ikke har motorbrems må bremse så mye på vei ned i tunnelen for å unngå å kjøre for fort, at bremsene overopphetes og begynner å brenne. En lastebil vil gi en mye større brannbelastning enn 5-10 MW som testet i Byfjordtunnelen og Bømlafjordtunnelen.

Det fører til det andre problemet som er de størrelsene som brukes for å dimensjonere både konstruksjonen og ventilasjonen. Brannen i Seljestadtunnelen var i en klasse A tunnel, slik at den dimensjonerende branneeffekten skal være 20 MW (iht. tabell 2 og 3). Designbrannen brukt i Grimstvedt sine scenarioer kom på 32 MW, som da var basert på relativt forsiktige tall når det ses på tabell 7. Som kan ses i denne tabellen vil en full lastet lastebil kunne komme opp i 100-130 MW. Det samme gjelder da dimensjonering av konstruksjonen, hvor også 20 MW hadde blitt brukt ved tunnelklasse A. Det er derimot vanskelig å finne gode tall for en dimensjonerende branneeffekt. Problemet er at det er stor usikkerhet forbundet med hvilke hendelser som vil kunne oppstå i tunnelen, samt usikkerhet forbundet med hvordan disse hendelsene kan modelleres. Dette fører til ulike modeller og teorier. Slike modeller og teorier handler om å prøve å beskrive virkeligheten, mens designbranner i større grad handler om å ivareta reguleringskrav. Dette fører til en stor mengde av modeller og teorier som kan velges imellom. Det første problemet er å velge en designbrann for tunnelen. Det finnes flere kurver for å beskrive energiproduksjonen og tall som gir maksimalt energiproduksjon for de forskjellige kjøretøy. I denne oppgaven er det vist både α^2 -brannen og den kontinuerlige eksponentielle kurven for brenselkontrollerte branner. Kurven beskriver veksten til brannen, som er viktig for rømningsikkerheten, og videre utvikling. Hvilken som er bedre



eller mer relevant for tunneler er lite kjent. Det at den kontinuerlige kurven er rettet mot brenselkontrollerte branner gir allerede en bedre tilnærming enn den mye brukte α^2 -brannen som brukes for alle typer branner både i industrien, til design av bygg og mange flere hensikter. Kurven har derimot ikke en fase hvor brannen er fullt utviklet og er i en konstant fase, hvor alle brennbare materialer er involvert i brannen slik at vekst ikke er mulig lengre. Et eksempel som viser problemet med valg av maksimalt energiproduksjon er valg av maksimalt energiproduksjon til en lastebil. Det finnes mange forslag som vist i tabell 7, fra 13 til 200 MW, alt er derimot avhengig av last. Farlige gods vil kunne føre til en enda høyere energiproduksjon, opp mot 300 MW eller mer avhengig av last. Siden de fleste tunnelene ikke har restriksjoner på farlig last vil dette kunne gi store konsekvenser hvis det skjer noe med disse bilene.

Tunnelprofilen til seljestadtunnelen var også blitt for lite. Ut i fra statistikker fått fra vegvesenet viser det seg at ÅDT i de siste 4 år har vært rundt 2000, slik at tunnelprofilen til Seljestadtunnelen ikke er tilfredsstillende lengre i henhold til figur 7. Det var derimot ikke mulig å få vite om det er gjort noe med tunnelprofilen. I tegningen fra Grimstvedt (2004) som er vist i vedlegg B, kommer det frem at tunnelen ennå har en profil som ligner T8,5, men bare med en bredde på 8 meter. Kravet var derimot T9,5 som hadde gitt et større tverrsnitt og kanskje var det da også mulig at lastebilene kunne passere hverandre uten problemer og ulykken ikke hadde skjedd. På det tidspunktet var trafikkmengde derimot 1050 kjøretøy gjennomsnittlig hver dag, som med dagens regelverk ennå hadde satt krav på T 9,5. Men det er ikke kjent hva som var kravet på tverrsnittet i 2000.

Bruken av snunisjer er et godt tiltak slik at bilene kan snu og komme seg til sikkerheten mye fortere enn bilistene kunne ha gjort det til fots. Vanlige personbiler klarer å snu på en vei med to felt, lastebiler trenger derimot snunisjer som ikke blir krevet før tunnelklasse B. Men dette fungerer bare hvis det gjøres på et tidlig tidspunkt før bilen kjører inn i røyken og at alle reagerer på en god måte. Alle i tunnelen må forstå alvoret i situasjonen og hvordan å komme seg i sikkerheten med en gang. Problemet er ofte at personer ikke vet hvordan å reagere og vil få bekreftet at det virkelig har skjedd noe før de velger å rømme. Det fører til at mange først vil fortsette å kjøre og komme for nær brannen. Ved toveis tunneler vil det være et felt som er tom og kan brukes av personbiler til å snu og komme seg ut av tunnelen. Når tunnelen bare har enveis kjøring, er ventilasjonen i kjøreretning slik vil det ikke oppstå farlige situasjoner siden de nedstrøms brannen vil kunne fortsette å kjøre fortere enn røyken og de oppstrøms vil ha forhold som er trygg å oppholde seg i lenge på grunn av ingen røyk og lave temperaturer. Som nevnt tidligere er kanskje den største faren ved toveistrafikk for de som ikke klarer å snu før de har kjørt inn i røyken. Dette viser hvor viktig det er at tunnelen blir stengt så fort som mulig ved brann slik at ikke flere kjører inn i tunnelen og at de i tunnelen blir advart og fortalt hvordan å reagere. De personene som befant seg i tunnelen i 70 minutter er et perfekt eksempel på hvorfor tunnelen må bli stengt fort og de i tunnelen som kjører mot brannen må bli advart å stoppe og snu.



8.3 Menneskelig oppførelse

Når det ses på menneskelig oppførelse så er det veldig viktig å huske at feil oppførelse kan føre til farlige situasjoner. Feiltolkning av forholdene eller sikkerhetstiltak i tunnelen kan være noen av feilene som kan føre til at for eksempel en person forventer at det finnes en rømningstunnel og begynner å lete etter den. En person som ofte kjører i en tunnel som har det, vil forvente det. Når én person har begynt å handle, kan flere følge etter denne personen siden vi er sosiale vesener. Det er derfor det norske regelverk bør se mer på menneskelig oppførelse og hvor viktig det er å informere bilistene slik at de vet hva som kan forventes av sikkerhetstiltak i en tunnel for å unngå antakelser som kanskje er sett i en annen tunnel eller handlingslammelse når én ikke vet hvordan å handle. Menneskelig oppførelse ved rømning vil være annerledes enn i vanlige, trygge situasjoner. Derfor er det viktig at det blir tatt med i betraktningen av rømningssikkerheten.

Personene som befant seg i Seljestadtunnelen i 70 minutter overlevde på grunn av at de handlet riktig i forhold til situasjonen og la seg ned, hvis de hadde begynt å lete etter en nødutgang hadde de blitt utsatt for mye høyere temperaturer, en høyere pustefrekvens og dermed høyere konsentrasjoner på farlige gasser som kan ses ved at temperaturer og konsentrasjoner øker med høyde i tunnelen i simuleringene. Det er da flere punkter som er bestemmende for hvordan en person skal reagere i en rømningssituasjon. For det første har vi et fast manus for hva som er normalt og hvordan alt skal gå når vi gjør ting. Når vi kjører gjennom en tunnel tenker vi bare på å kjøre gjennom den og komme seg ut, en brann eller en ulykke er ikke en normal del av å kjøre gjennom en tunnel. Her er det viktig at vi blir informert om farene for å legge for eksempel situasjonen brann inn i manuset som en mulighet. Hvis det da begynner å brenne vil det ikke oppstå en forsinkelse når manuset om å kjøre gjennom en tunnel blir avvirket siden brann allerede var en del av det. Denne informasjonen vil skape en bevisstgjøring om muligheten av at det kan oppstå en brann i en tunnel. Det hjelper også med det andre punktet, at vi trenger tilstrekkelig med informasjon om hva som har skjedd og hva å gjøre. Informasjon før en hendelse om hva å gjøre ved brann vil sørge for at personer vet hvordan de skal reagere ved brann og hva de kan forvente av sikkerhetsutstyr i tunnelen. Like viktig er da også informasjon om at det har oppstått en farlig situasjon slik at alvoret blir forstått. Som sagt både av Papaioannou og Georgiou (2008) og Boer (2002) er det veldig viktig for bilistene å forstå at noe har skjedd som fører til at de enten må forlate bilene sine og rømme ved å bruke rømningsveiene eller at de må snu.

Et annet tiltak er da å angi informasjon om hvordan å rømme på skilt før en kjører i tunnelen. Dagens skilt som viser alt informasjon om sikkerhet er vist i figur 55 som egentlig viser lite informasjon, mens alle skilt ved inngangen til tunnelen vises i vedlegg C.



Figur 55: Skilt som informerer om nødstasjoner

Skiltet må tolkes riktig for å kunne forstås og viser ikke om tunnelen har en rømningsvei. Dagens nivå av skilting om sikkerhetstiltak bør gjennomgås på nytt slik at bilistene vet på forhånd hvordan å reagere ved brann. Bedre skilter som viser nødutgangene kan også hjelpe. Bilde på forside viser et skilt over en nødutgang som lett kan overses. Figur 56 viser derimot en annen måte å vise hvor nødutgangen er.



Figur 56: En tydeligere måte å skilte nødutganger på

En slik måte å vise veien gjør det ikke bare lettere å vite hvor nødutgangen er, men gjør også at bilistene blir mer bevisst på nødutgangen når tunnelen brukes oftere. Som det blir fortalt i kapittel 5, vil andres måte å handle ved rømning også påvirke andre. Når flere vet hvor nødutgangen er og at de finnes, vil de med en gang reagere og dra med seg flere slik at det å bedre skilte en nødutgang vil gi flere positive konsekvenser. Når en brann har oppstått derimot har det vist seg at et selvforklarende lydanlegg over nødutgangene også vil være et meget positivt tiltak som hjelper de som må rømme gjennom røyk i å nå rømningsveien.



8.4 Simuleringene

Siden ventilasjon og tunnelutformingen er to viktige parametre som påvirker brannen er det viktig å ha disse så nøyaktig som mulig for å få resultater som er så nøyaktig som mulig. Et lavere tak fører til at brannen blir større og røyken vil fylle opp tverrsnittet fortere. Ventilasjon vil også gjøre brannen større og vokse fortere.

Hvis tunnelen har flere felt, vil det ikke være representativ å simulere med en bil i midten av tunnelen. Når bilen står nærmere veggen, vil veggen påvirke brannen slik at det også bør ses på.

En viktig faktor i brannsimulering er utforming av en designbrann som viser hvordan energiproduksjonen utvikler seg utover tiden. Siden en virkelig brann er vanskelig å tallfeste, brukes en designbrann som forenkling på virkeligheten for å gjøre designspørsmål mer håndterlige. Problemet med utforming av en god designbrann til en tunnel er som sagt at det er stor usikkerhet forbundet med hvilke hendelser som vil kunne oppstå i tunnelen, samt usikkerhet forbundet med hvordan disse hendelsene kan modelleres. Dette fører til ulike modeller og teorier. Slike modeller og teorier handler om å prøve å beskrive virkeligheten, mens designbranner i større grad handler om å ivareta reguleringskrav. Flere forsøk har også brukt en simulerte last av en lastebil i stedet for å bruke en virkelig lastebil med en normal last for å finne ut hvordan energiproduksjonen er i en tunnelbrann. Som vist i tabell 7 kan det ses at energiproduksjon er veldig forskjellig. Utvikling av nye materialer gjør det enda vanskeligere å finne en god designbrann for tunneler. Bruk av nye materialer har ført til at røyken er mer giftig og energiproduksjonen blir større de siste årene. Dette gjør at det er veldig vanskelig å anta på forhånd hva som kan være en representativ brann for en tunnelbrann.

9 Konklusjon

Erfaringer fra tidligere branner har vist at menneskelig oppførelse er minst like viktig som tunnelens utforming og sikkerhetstiltak. Siden Norge har mange tunneler med forskjellig sikkerhetsnivå er det viktig at menneskelig oppførelse blir påvirket mest mulig positiv. Det er derimot også veldig viktig å påvirke forholdene i tunnelen positiv for å sikre rømningssikkerheten for alle brukere både ung og gammel. Denne oppgaven har kommet på flere punkter som bør ses på for å kunne sikre rømningen på en bedre måte og for å unngå at hendelser hvor mennesker blir fanget i røyken blir unngått.

9.1 Ventilasjon

For å vurdere det norske regelverket ble det gjennomgått hvilke tiltak som kreves i en tunnel i dag og hvordan de påvirker rømningssikkerheten. Et viktig tiltak som bedrer forholdene i en tunnel er mekanisk ventilasjon. I Norge blir det derimot bare brukt langsgående ventilasjon. Problemet med dette systemet er at en del av tunnelen blir fylt med røyk som da skaper farlige situasjoner for de som havner i denne røyken. Et tiltak kan være tversgående ventilasjon, men problemet med dette systemet er igjen at kostnadene forbundet med dette systemet er veldig høye. Det er vist ved forsøk at konsentrasjonene på de farlige gassene i røyken ikke kommer opp til farlige høyder oppstrøms for brannen ved bruk av langsgående ventilasjon. Men de forsøk er da gjort i relativ store tunneler og med relativ små branner. Slik at denne påstanden bare holder hvis de forsøk også gir samme resultat i mindre tunneler og med større branner. Langsgående ventilasjon er veldig godt ved enveis trafikk siden bilistene på begge sidene av brannen kommer seg i sikkerhet. Ved toveis trafikk oppstår det problemer for de personene som må rømme oppstrøms for brannen. Derfor er det viktig at det blir sett på andre metoder enn langsgående ventilasjon.

9.2 Dimensjonering av konstruksjonen og ventilasjonen

Et annet problem som må bli sett på er måten konstruksjonen og ventilasjonsanlegget blir dimensjonert. Hvordan tallene til den dimensjonerende branneeffekten er valgt, står ikke nevnt i håndbok 021. Det er mulig at de er kommet frem ut i fra en risikoanalyse hvor forventet antall og type kjøretøy som er involvert i en brann blir beregnet, og slik kommer frem til den dimensjonerende branneeffekten. Det som da er problemet er at rømningssikkerheten bør være ivaretatt ved alle hendelser som kan oppstå i en tunnel. Brannen i Seljestadtunnelen blir antatt å være rundt 32 MW, men den dimensjonerende branneeffekten for konstruksjonen og ventilasjonen var på 20 MW. En større brann enn det ventilasjonen og konstruksjonen er dimensjonert for kan ha store konsekvenser. Backlayering er når røyken klarer å bevege seg mot ventilasjonsretningen. Dette fører til at ikke bare de oppstrøms befinner seg i røyken, men også de motstrøms. Slik vil brannvesenet ikke heller kunne nå brannen og redde de som trenger det. Forventet branneeffekt av et kjøretøy som branner er veldig avhengig av materialene brukt i kjøretøyet. Når det brukes nye materialer i kjøretøyene, vil da branneeffekten også endres. Derfor er det viktig at disse tallene oppdateres jevnlig.



9.3 Analyse av rømningssikkerhet for nye tunneler i prosjekteringsfase

Hvordan rømningssikkerheten blir ivaretatt i regelverket er vanskelig å finne ut av for ettløps-tunneler. Nødutganger blir ikke krevet før tunnelklasse D, Byfjordtunnelen som er en ganske ofte brukt tunnel (også av lastebiler og farlige gods transport) i rute mellom Stavanger og Bergen er bare tunnelklasse B. Siden brannutviklingen er så avhengig av tunnelutformingen og ventilasjonsanlegget, vil rømningssikkerheten være veldig forskjellig mellom tunnelene. En tunnel med lavere tak eller et mindre tverrsnitt vil ha en lavere rømningssikkerhet på grunn av at brannen utvikler fortere og røyken vil synke mot underlaget fortere. Derfor bør det ses på om en analyse av rømningssikkerheten ikke skal bli en del av prosjekteringsprosessen når nye tunneler blir prosjekteres. Slik vil alle faktorene som påvirker brannen og rømningssikkerheten bli vurdert og sett på om det gir et tilfredsstillende sikkerhetsnivå. Det som kreves da er et regelverk som er lagt opp slik som for eksempel det franske regelverket. Da blir forskjellige scenarioer simulert i en ny tunnel for å se om tunnelen er tilfredsstillende. I et slikt regelverk kreves det da standardiserte designbranner og faste designparametre som utformingen av brannkurven og dimensjonerende branneffekt. I tillegg bør da tunneler bli klassifisert etter bruken, slik at sikkerhetsnivået til tunneler som brukes ofte av lastebiler og transport av farlige gods har et høyere sikkerhetsnivå enn tunneler som bare brukes av personbiler. Selv om sannsynligheten er liten vil en brann i en lastebil med brannfarlige gods gi store konsekvenser for en tunnel siden en slik brann kan komme opp mot 300 MW.

9.4 Informering av tunnelbrukere om sikkerhetsnivå i tunnelen

Det som er viktigst for mennesker i en rømningssituasjon er informasjon, enten gitt på forhånd eller gitt når det trengs. Det at folket er for dårlig informert i hva å gjøre ved brann i en tunnel, må gjøres noe med. Bedre skilt som viser hva å gjøre ved brann og alle sikkerhetstiltak hjelper mennesker i en situasjon hvor de må rømme, at de vet hva de kan velge og hvordan å reagere. Et selvforklarende lydsystem over nødutgangene hadde også vært veldig hjelpsomme for de som er fanget i røyken, og da må finne veien til nødutgangene uten sikt.

9.5 Simulering av tunnelbrann

Simuleringene gjort i denne oppgaven bekrefter at simuleringen gjort av Grimstvedt (2004) er uavhengig simulering program. Det er noen små forskjeller mellom programmene som for eksempel at FDS ga høyere temperaturer og konsentrasjoner langs taket enn Kameleon FireEx, men ellers var de ganske like. Det som derimot trengs å bli sett på mer er hva som hadde skjedd hvis en større brann hadde skjedd i Seljestadtunnelen, eller andre tunneler. Energiproduksjonen brukt i simuleringen gjort av Grimstvedt var relativt forsiktige selv om lastebilen var tomt. Det som også hadde vært interessant å se på er hva hadde skjedd hvis lastebilen var full lastet?

Simuleringer bør også bekreftes ved forsøk for å kunne stole på resultatene fullt. Siden forsøk i en tunnel er vanskelig å få til er simuleringer en god måte å forutsi konsekvensene for rømningssikkerhet ved de forskjellige scenarioer men bør brukes forsiktige. Det bør da i tillegg gjøres forsøk som kan bekrefte eller avkreft om forholdene blir verre med en større brann enn bare en tom lastebil. Andre ting som det bør ses på er hvilke energiproduksjonskurver som passer best til en tunnelbrann slik at den mest relevante kurven kan brukes i simuleringene.



9.6 Momenter til vurdering for nye tunneler

Til slutt vil alle punktene som bør vurderes for nye tunneler bli oppsummert.

- Det bør bli sett på andre ventilasjonsmuligheter som ivaretar rømningssikkerheten bedre enn langsgående ventilasjon.
- Oppdatering av dimensjonerende branneeffekt for dimensjonering av konstruksjon og ventilasjon.
- Analyse av rømningssikkerheten som en del av prosjektering av en ny tunnel.
- Bedre informasjon til trafikantene om hvordan å oppføre seg ved brann i en tunnel og hvilke sikkerhetstiltak som kan forventes i en tunnel.
- Et selvforklarende lydsystem over rømningsutgangene vil hjelpe de som rømmer gjennom røyken.
- Simulering/forsøk av større branner for å finne konsekvensene når større branner inntreffer slik at konsekvensene blir tydeligere. Det bør også bli sett på hva som skjer ved svik av ett eller flere av viftene til ventilasjonsanlegget for å få barrierer.
- Forsøk på hvilken brannkurve som passer best til en tunnelbrann.

Referanser

- Beard, A.N. & Carvel, R.O. (2005) *The handbook for tunnel fire safety*. London (England): Thomas Telford Publishing.
- Bergmeister, K. & Francesconi, S. (2004). *Causes and frequency of incidents in tunnels* (UPTUN Work Package 1, Task 1-2). Trento (Italia): Autostrada del Brennero SpA.
- Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. & Ingason, H. (2001). *Räddningsinsatser vid tunnelbränder: Probleminventering och miljöbeskriving vid brandi spårtunnel*. Karlstad, Sverige, Räddningsverket. (side 83-97)
- Boer, L.C. (2002). *Gedrag van automobilisten bij evacuatie van een tunnel* (TM-02-C034). Soesterberg (Nederland): TNO Technische Menskunde. Hentet fra http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Gedrag%20van%20automobilisten%20bij%200evacuatie%20van%20een%20tunnel_tcm174-275829.pdf (side 22-28)
- Carvel, R.O. (2004). *Fire size in tunnels* (doktorgrad avhandling, Heriot-Watt University, UK, formel 4.2, side 77)
- Carvel, R.O., Beard, A.N. & Jowitt, P.W. (2001). How much do tunnels enhance the heat release rate of fire? *Proceedings of the 4th international conference on safety in road and rail tunnels, Madrid* (s. 457-466)
- Drysdale, D. (1998). *An introduction to fire dynamics, Second edition*. West Sussex (England): John Wiley & Sons Ltd.
- Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern (2000). *Brann i kjøretøyer i Seljestadtunnelen på E-134 i Odde kommune*.
- Glesnes, G. & Johansen, M. (2009, 11. juli). Norske bilister skremmende uvitende om tunnelbranner. VG nett. Hentet fra <http://www.vg.no>.
- Grimstvedt, K. (2004). *Menneskets overlevningsmuligheter ved tunnelbrann basert på brannen i Seljestadtunnelen 14. juli 2000* (Masteroppgaven, Høgskolen i Stavanger).
- Ingason, H. (2006). Design fires in tunnels. Safe & reliable tunnels. Innovative european achievements, Lausanne, Frankrike, 2006. (s. 6)
- Ingason, H. (2009). Design fire curves for tunnels. *Safety Journal* 44 (2009), 259-265. doi:10.1016/j.firesaf.2008.06.009.
- Ingason, H., Bergqvist, A., Lönnemark, A., Frantzich, H. & Hasselrot, K. (2005). *Räddningsinsatser i vägtunnlar*. Hentet fra <http://www.bbmf.se/artiklar/Vagtunnlar.pdf>

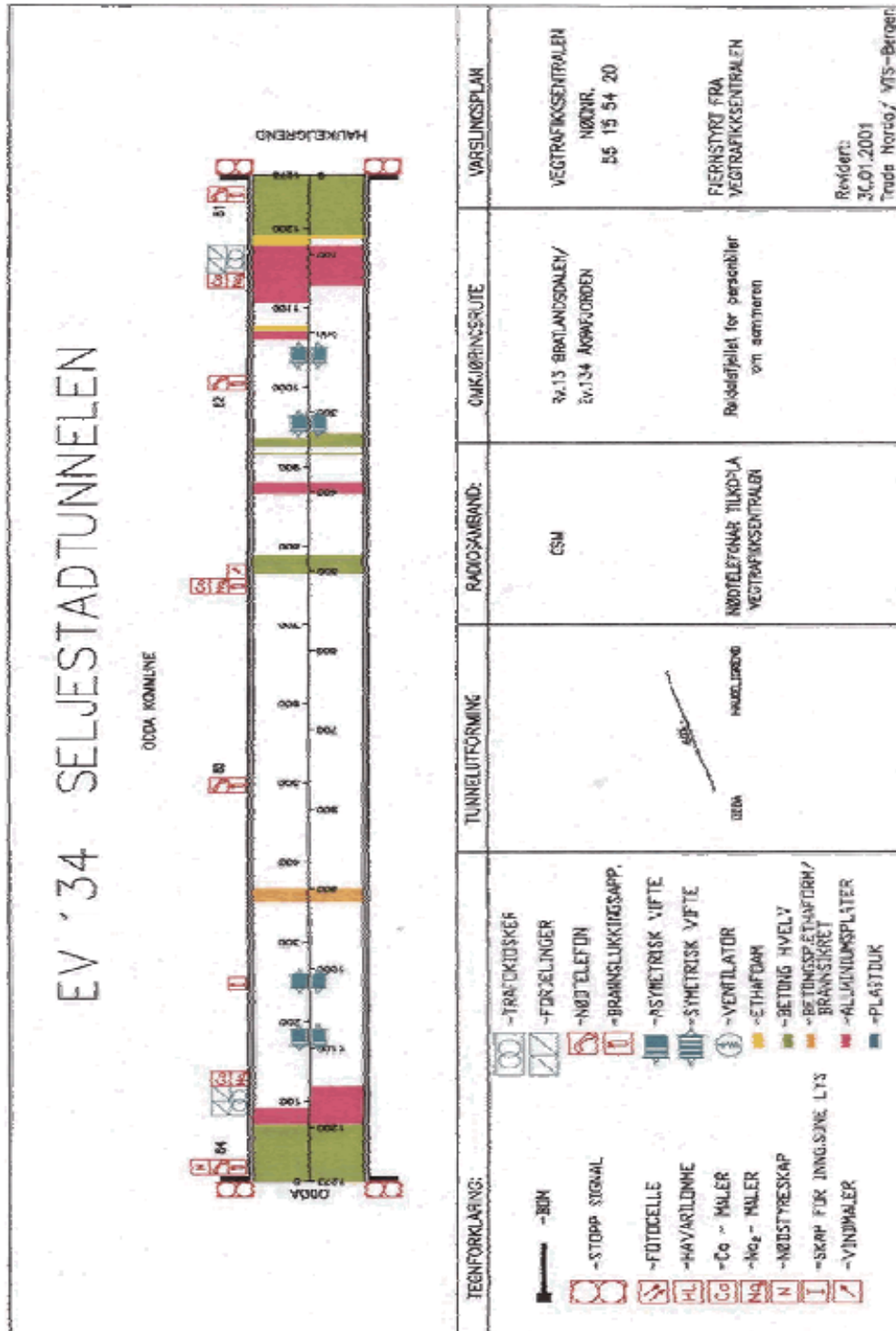


- Lönnermark, A. (2005). *On the characteristics of fires in tunnels* (doktergrad avhandling, Universitet i Lund). ISBN: 91-628-6637-0.
- Marlair, G., Lemaire, T. & Öhlin, M. (2002). *Scenarios and accidents in the past* (UPTUN Work Package 2, Task 2.1, part 1, side 7). s.l.
- Mostue, B. A., Stensaas, J. P. og Wighus, R. (2003). *Forventet effekt av faste, aktive slokkeanlegg – Boligsprinkler og vanntåke* (A030105). Trondheim: SINTEF-NBL
- Nilsen, A.R. (2011). *Contributions to fire safety design of tunnels* (doktergrad avhandling, Universitet i Stavanger). ISBN: 978-82-7644-472-8. (side 25-28)
- Nilsson, D., Johansson, M. & Frantzich, H. (2009). Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behavior and technical installations. *Fire Safety Journal* 44 (2009), 458-468. doi:10.1016/j.firesaf.2008.09.009. (side 467)
- Papaioannou, P. & Georgiou, G. (2003). *Human behaviour in tunnel accidents and incidents: End-users, operators and response teams* (UPTUN Work Package, Task 3-1). Hellas: CERTH-HIT.
- Statens vegvesen. (2010). *Håndbok 021*. Hentet fra http://www.vegvesen.no/_attachment/61913/binary/249783 (versjon fra 19. mars 2010).
- Thomas, P.H. (1968). *The movement of smoke in horizontal passages against an air flow*. Fire research station, Fire research note no. 723.
- van Waterschoot, A., Jenssen, G., Terje, M., Bjørkli, C., Brenkley, D., Ellis, J., ... Martens, M. (2002). *Human factors aspects in tunnels: Tunnel user behaviour and tunnel operators* (UPTUN Work Package 3, Task 3-3). s.l. (s. 176-185).

Bilde på forside: Aftenblad

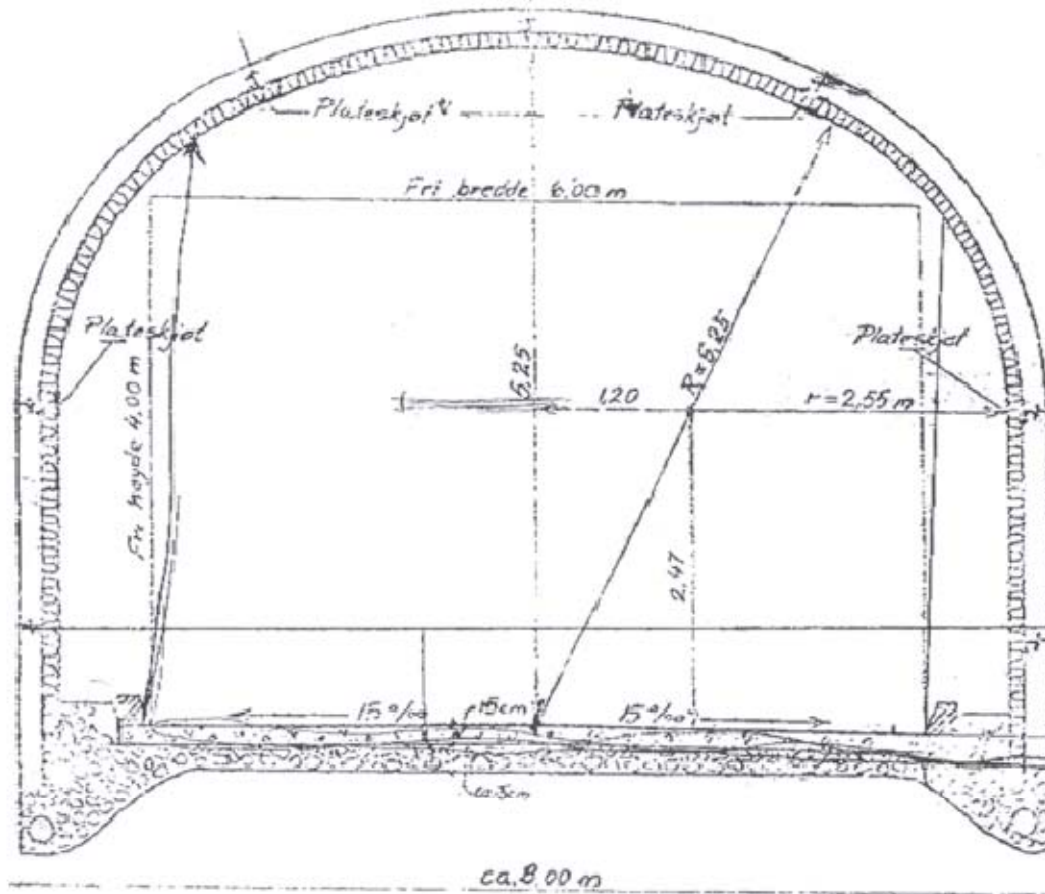
Vedlegg

A Oversiktskart Seljestadtunnelen



Figur 5: Oversiktskart over Seljestadtunnelen (Grimstvedt, 2004)

B Tunnelverrsnitt



Figur 6: Tunnelverrsnittet (Grimstvedt, 2004)



C Dagens metode å bruke skilt or å informere bilister om tunnelen

