



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Resultater fra tunnelbrannsimulering i FDS sammenlignet med fullskalaforsøk



Bacheloroppgave utført ved
Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for ingeniørfag

Sikkerhet, brannteknikk

Av: Mikael Jacobsen Vang
Vladimir Gillstrøm

Kand.nr.

132016

Kand.nr.

131096

Haugesund

Våren 2013

HOVEDPROSJEKT

Studentenes navn: Mikael Jacobsen Vang og Vladimir Gillstrøm.

Linje & studieretning: Sikkerhet, brannteknikk.

Oppgavens tittel: Resultater fra tunnelbrannsimulering i FDS sammenlignet med fullskalaforsøk.

Oppgavetekst: Norge er det landet i Europa med flest tunneler. Å bygge en veitunnel representerer en stor investering. Dermed er det viktig å etablere godt verifiserte verktøy, som gjør at sikkerhetskrav blir effektivt ivaretatt ved prosjektering.

Dimensjonering av røykventilasjon i tunneler baserer seg hovedsakelig på håndberegninger iht. Statens Vegvesens veinormal, håndbok 21. Det er først i senere tid, i forbindelse med utbygging av lengre tunneler, at det kreves røykventilasjon dimensjonert for å takle større branner. Det er ikke vurdert som forsvarlig å gjøre større brannforsøk i nye tunneler (f.eks. brann i vogntog) og CFD-simuleringsverktøy kan dermed være et egnet alternativ for å forutsi virkningene av brann.

En ønsker i denne oppgaven å vurdere evnen til å forutsi røykspredning i en tunnel med langsgående ventilasjon, ved hjelp av CFD-programvaren FDS. Dette oppnås ved å simulere en tunnelbrann i størrelsesorden 100 MW, basert på fullskalaforsøk fra Memorial Tunnel-prosjektet, MTFVTP. Et viktig mål med simuleringene vil være å vurdere modellens forutsigelse av den kritiske ventilasjonshastigheten med hensyn på backlayering. Resultatene fra simuleringen vil bli vurdert opp mot testresultatene fra aktuelle fullskalaforsøk.

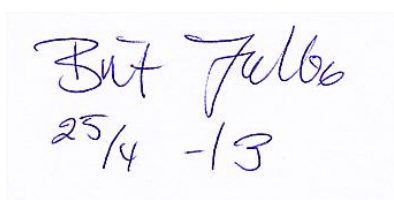
Endelig oppgave gitt: Torsdag 7. mars 2013.

Innleveringsfrist: Fredag 10.mai 2012 kl. 12.00.

Intern veileder Alf Reidar Nilsen og ekstraveileder Bjarne P. Husted.

Ekstern veileder Anne Kathrine Bøe, Multiconsult.

**Godkjent av
studieansvarlig:
Dato:**



Handwritten signature: Alf Reidar Nilsen
Date: 25/4 -13

FORORD

Denne bacheloroppgaven er skrevet i forbindelse med avslutningen av den treårige ingeniørutdannelsen ved Høgskolen Stord/Haugesund. Hensikten med oppgaven er at studentene skal få utøvd de faglige kunnskapene de har tilegnet seg i løpet av tre år ved Høgskolen. Studentene skal også tilegne seg faglig kunnskap, og erfaring i skriftlig og muntlig presentasjon.

Bacheloroppgaven har en bredde og arbeidsmengde som tilsvarer 15 studiepoeng, og tar sikte på å la studentene jobbe med tverrfaglige problemstillinger. Prosjektet skal bidra til at studentene får en mulighet til å vise faglig forståelse, samt evnen til å kombinere ulike fagkunnskaper mot et endelig mål.

Takk til Alf Reidar Nilsen, Bjarne Husted og Anne Kathrine Bøy for gode råd og tips underveis.

Haugesund 21.05.2013



Mikael Jacobsen Vang



Vladimir Gillstrøm

INNHOLDSFORTEGNELSE

| | |
|--|-------------|
| FORORD | I |
| INNHOLDSFORTEGNELSE | II |
| FIGURLISTE | V |
| TABELLISTE | VIII |
| FORMELLISTE | IX |
| ORDLISTE | X |
| NOMENKLATURLISTE | XI |
| 1 INNLEDNING | 1 |
| 1.1 FORMÅL | 1 |
| 1.2 BAKGRUNN | 1 |
| 1.3 TIDLIGERE ARBEIDER | 1 |
| 1.4 PROBLEMSTILLING | 2 |
| 1.5 METODE | 2 |
| 2 TUNNELBRANNTEORI | 3 |
| 2.1 ENERGIPRODUKSJON | 3 |
| 2.2 VARMETRANSPORT | 4 |
| 2.3 FASER I EN TUNNELBRANN | 6 |
| 2.4 TUNNELGEOMETRIENS INNVIRKNING | 8 |
| 2.5 VENTILASJON I EN TUNNEL..... | 9 |
| 2.5.1 Ventilasjonstyper..... | 9 |
| 2.5.2 Ventilasjonens påvirkning | 11 |
| 2.5.3 Backlayering og kritisk hastighet | 13 |
| 2.6 REGELVERK..... | 16 |
| 2.6.1 Geometrisk utforming..... | 16 |
| 2.6.2 Tunnelprofil og tunnelklasse | 16 |
| 2.6.3 Stigning og fall | 17 |
| 2.6.4 Dimensjonering for brann..... | 18 |
| 2.6.5 Ventilasjon..... | 19 |
| 2.6.6 Endringer i regelverket som følge av EUs branndirektiv | 22 |
| 2.7 SIMULERING AV TUNNELBRANN | 23 |
| 2.7.1 Håndberegningsmodeller | 23 |
| 2.7.2 Sonemodeller..... | 23 |
| 2.7.3 Feltmodeller | 24 |
| 3 MEMORIAL TUNNEL PROGRAM | 26 |
| 3.1 HISTORIE..... | 26 |
| 3.2 TESTFORSØKENE | 27 |
| 3.3 KRITISK HASTIGHET OG BACKLAYERING I MTFVTP..... | 29 |
| 3.4 RØYK- OG VARMEBEVEGELSE | 32 |
| 4 SCENARIOBESKRIVELSE | 33 |
| 4.1 BRANNOPPSETT OG MÅLINGER | 33 |



| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2 | SAMMENHENG MELLOM LUFTSTRØM OG ANTALL DRIFTSATTE IMPULSVIFTER | 36 |
| 4.3 | KRITISK HASTIGHET | 36 |
| 4.4 | EFFEKT AV BRANN PÅ LUFTSTRØM | 37 |
| 4.5 | TESTFORSØK NR.621A | 38 |
| 5 | FDS | 45 |
| 5.1 | BRUK AV FDS | 45 |
| 5.2 | OPPBYGNING AV INNDATAFIL..... | 46 |
| 5.3 | FORBRENNINGSMODELLER OG GRENSEBETINGELSER | 47 |
| 5.4 | TURBULENS..... | 48 |
| 5.5 | BEGRENSNINGER | 49 |
| 5.6 | FEILSØKING..... | 49 |
| 5.7 | KONTROLLPUNKTER TIL SIMULERING..... | 50 |
| 5.8 | NYTT FOR FDS 6..... | 52 |
| 6 | OPPSETT OG INNDATA TIL SIMULERING..... | 53 |
| 6.1 | MESH OG MISC. | 53 |
| 6.2 | GEOMETRI OG OBSTRUKSJONER | 55 |
| 6.3 | OVERFLATER OG MATERIALE | 59 |
| 6.4 | VENTILASJON | 62 |
| 6.5 | BRANN | 63 |
| 6.6 | MÅLEINSTRUMENTER..... | 65 |
| 6.7 | MÅLEINSTRUMENTER..... | 67 |
| 7 | BEREGNINGSRISULTAT..... | 69 |
| 7.1 | «COLD FLOW» | 69 |
| 7.2 | TEST 621A | 69 |
| 7.2.1 | <i>Scenariobeskrivelse</i> | 69 |
| 7.2.2 | <i>Simuleringsoversikt</i> | 70 |
| 7.3 | RESULTATER | 71 |
| 7.4 | BACKLAYERING | 72 |
| 7.5 | TEMPERATUR | 72 |
| 7.6 | SIMULERING FOR Å FINNE KRITISK HASTIGHET | 74 |
| 8 | DISKUSJON..... | 78 |
| 8.1 | SENSITIVITETSANALYSE | 78 |
| 8.2 | MESH-OPPLØSNING | 78 |
| 8.3 | SIMULERINGSDOMENE..... | 79 |
| 8.4 | SUBGRIDSCALE (SGS) TURBULENSMODELL | 79 |
| 8.6 | TERMISK STRÅLING | 79 |
| 8.7 | HVAC..... | 80 |
| 8.8 | VENTILASJON | 80 |
| 8.9 | OBSTRUKSJONER I TUNNELEN | 80 |
| 8.10 | SAMMENLIGNING AV FDS5 OG FDS6 | 80 |
| 8.11 | «BARACLINIC TORQUE» | 80 |
| 8.12 | INNVIRKNINGEN TIL VALGTE METODE FOR MODELLERING AV TAKPROFIL..... | 81 |
| | FDS 6 208 «TVERRSNITT»..... | 82 |
| 9 | KONKLUSJON..... | 84 |
| 9.1 | OPPNÅDDE MILEPÆLER | 84 |



| | | |
|-----------|------------------------|-----------|
| 9.2 | ANBEFALINGER | 84 |
| 10 | REFERANSER..... | 85 |

FIGURLISTE

| | |
|--|----|
| Figur 2.1: De ulike fasene i et typisk brannforløp. De to stripelete kurvene viser brannforløp som ikke utvikler seg til overtenning. | 7 |
| Figur 2.2: Karakteristikk for luftstrøm ved naturlig ventilasjon [14] s.130..... | 9 |
| Figur 2.3: Langsgående ventilasjonsmodeller [14] s.129 | 10 |
| Figur 2.4: Langsgående ventilasjon ved injeksjon [14] s.131 | 10 |
| Figur 2.5: Langsgående ventilasjon ved impulsvisiter [14] s.132..... | 10 |
| Figur 2.6: Varmetransport fra flammer til ubrent brensel [14] s.186..... | 11 |
| Figur 2.7: Varmetransport fra flammene til brensel [14] s.185 | 11 |
| Figur 2.8: Illustrasjon av backlayering..... | 13 |
| 2.9: Beregnet kritisk hastighet for Runehamar tunnelen [30] | 15 |
| Figur 2.10: Tunnelprofil T7,5 og T4 [8] kap. 4.5..... | 16 |
| Figur 2.11: Tunnelklasser for tunneler over 500m [8] kap. 4.4 | 17 |
| Figur 2.12: Standard tid-temperaturkurver for branndimensjonering [8] kap. 5.4.2 | 18 |
| Figur 2.13: Kroppens reaksjoner på CO-innhold i luften..... | 19 |
| Figur 2.14: Ventilasjonshastighet ved 100 MW brann, jevn helning og $\Delta p = 16\text{Pa}$ [8] | 22 |
| Figur 2.15: Ventilasjonstrykk ved 100 MW brann, jevn helning og $\Delta p = 16\text{Pa}$ [8] | 22 |
| Figur 2.16: Sonemodell | 24 |
| Figur 2.17: Brannrom med kontrollvolumer | 25 |
| Figur 2.18: RANS og LES | 25 |
| Figur 2.19: RANS og LES | 25 |
| Figur 3.1: Memorial tunnel størrelse [19] | 26 |
| Figur 3.2: Målepunkter i tunnelverrsnitt [19] | 27 |
| Figur 3.3: Vifter sør for brannområdet [10] | 28 |
| Figur 3.4: Målestasjoner og vifteplassering [19] | 28 |
| Figur 3.5: Tunnelverrsnitt – mål i meter [19] | 29 |
| Figur 3.6: Lufthastighet vs. HRR ved bulk lufthastighet [19] | 31 |
| Figur 3.7: Lufthastighet vs. HRR ved gjennomsnittlig lufthastighet [19] | 32 |
| Figur 4.1: Det nærmeste til høyre er stålkår for 30 MW, etterfulgt av 10 MW, det tildekte for 20 MW og det bakerste for 50 MW [10]..... | 33 |
| Figur 4.2: Stålkår brukt under Memorial forsøkene [3] s. 3-17 | 34 |
| Figur 4.3: Brannområdet i tunnelen med målestasjoner (Loop) og avstand i meter [3] s. 3-17 | 34 |
| Figur 4.4: Hele Memorial tunnelen med målestasjoner (Loop) og avstand i meter [3] s. 3-1734 | |
| Figur 4.5: Teoretisk og reell HRR fra forsøk 621A [19] | 35 |
| Figur 4.6: Tunnelluftmengde vs. antall impulsvisiter [19]..... | 36 |
| Figur 4.7: Tunnel sett fra nord til sør. I front til venstre og høyere ser en hastighets- og datainsamlingskabinetter, etterfulgt av måltre og brannkarene bakerst på bilde [19].... | 37 |
| Figur 4.8: Tunnelluftstrøm vs. impulsvisiter ved forskjellige brannstørrelser [19] | 38 |
| Figur 4.9: Vifteoppsett for 621A like etter antenning. Svart firkant indikerer brannområdet [19] | 38 |
| Figur 4.10: Temperaturprofil for 621A like etter antenning HRR = 10 MW. Ventilasjonsluften har ikke nådd brannområdet [19]..... | 39 |
| Figur 4.11: Røykbevegelse for 621A like etter antenning [19] | 39 |
| Figur 4.12: Hastighetsprofil for 621A like etter antenning. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]..... | 39 |
| Figur 4.13: Temperaturprofil for 621A 1 min etter antenning HRR = 105,2 MW. 8 impulsvisiter er aktivert og har nådd frem til brannområdet [19] | 40 |

| | |
|--|----|
| Figur 4.14: Røykbevegelse for 621A etter 1 min [19] | 40 |
| Figur 4.15: Hastighetsprofil for 621A 1 min etter antennelse. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]..... | 40 |
| Figur 4.16: Temperaturprofil for 621A 2 minutt etter antennelse HRR = 123,5 MW [19] | 41 |
| Figur 4.17: Røykbevegelse for 621A etter 2 min. De 8 impulsvifter stagnerer røyken nord for brannen [19] | 41 |
| Figur 4.18: Hastighetsprofil for 621A, 2 min etter antennelse. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]..... | 41 |
| Figur 4.19: Temperaturprofil for 621A, 12 minutt etter antennelse HRR = 85,4 MW [19] | 42 |
| Figur 4.20: Røykbevegelse for 621A, etter 12 min. 5 impulsviftene klarer ikke å kontrollere backlayering [19]..... | 42 |
| Figur 4.21: Hastighetsprofil for 621A, 12 min etter antennelse. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]..... | 42 |
| Figur 4.22: Temperaturoversikt for måleområdet 305, test 621A [19]..... | 43 |
| Figur 5.1: Illustrasjon av en SLCF slice-fil Smokeview | 47 |
| Figur 5.2: Meshoppsett, hentet fra FDS User's Manual [43]..... | 51 |
| Figur 6.1: FDS-kode 1: Typisk MISC-linje benyttet i simuleringene. Merk at definering av trykk og SGS turbulensmodell i dette tilfellet er overflødig, da angitte parametere er standard for FDS6. | 53 |
| Figur 6.2: FDS-kode 2: Mesh-linjen som ble benyttet ved simuleringer med fin oppløsning og domene fra loop 208..... | 54 |
| Figur 6.3: Illustrerer gravitasjonskomponentene som blir benyttet for å angi tunnelens helning. Gravitasjonskomponenten i negativ z-retning for modellen med helning settes lik normalkraften fra bakken. | 55 |
| Figur 6.4: Snittegning av en «fin oppløst» modell. Grafisk representasjon er generert i brukergrensesnittsprogrammet Pyrosim, utviklet av Thunderhead Engineering. | 56 |
| Figur 6.5: Snittegning av en «moderat oppløst» modell | 57 |
| Figur 6.6: Målestasjoner og veikanter sett ovenfra, med «fin» oppløsning | 58 |
| Figur 6.7: Målestasjoner og veikanter sett ovenfra, med «moderat» oppløsning | 58 |
| Figur 6.8: Oversiktsbilde av målestasjonsplassering, samt vifterom og brannsoner for modellen som starter ved «loop 208». Figuren er strukket i y-retningen for å lettere kunne tydes. Figuren viser modellen med «fin» oppløsning, men plasseringen er tilsvarende for «moderat oppløsning» | 59 |
| Figur 6.9: FDS-kode 3: «Surface id» og «material id» for betong, som ble benyttet i simuleringer som inkluderte surface roughness. T, representerer materialets temperatur, mens F, representerer den faktiske verdien for materialets konduktivitet eller spesifikke varmekapasitet..... | 61 |
| Figur 6.10: Tverrsnitt av tunnelen med «fin» oppløsning. Figuren viser oppdelingen av ventilasjonsoverflatene. Merk at flere av overflatene har samme hastighet, men må modelleres separat pga. trappetrinnformen i øvre halvdel av tunnelen..... | 62 |
| Figur 6.11: FDS-kode 4: Eksempel på ventilasjonsflater med tidsvarer hastighet. | 63 |
| Figur 6.12: Definering av brannen for simuleringer av kritisk hastighet. Reaction id er lik for samtlige simuleringer som er kjørt, mens en benytter av tidsavhengig HRRPUA for simuleringer av TEST621A. | 65 |
| Figur 6.13: FDS-kode 6: Brannens overflate id og de første tidsstegene for «ramping» av HRR i simuleringer av TEST621A. T, indikerer tid og F indikerer koeffisienten HRRPUA skal ganges med ved det gitte tidsintervall. | 66 |
| Figur 6.14: Oversiktsbilde av brannområdet i testtunnelen [3]..... | 66 |
| Figur 6.15: Oversiktsbilde av brannområdet med «fin» oppløsning..... | 67 |
| Figur 6.16: Geometriske data for modellene sammenlignet med testtunnelen | 67 |

| | |
|---|----|
| Figur 6.17: FDS-kode 7: Eksempel på måleinstrumenter ved loop 208 i simuleringer med «fin» mesh-oppløsning. Kun en av hver type er vist. Den fullstendige inputfilen inneholdt imidlertid måleinstrumenter som representerte samtlige plasseringer av data som ble loggført. | 68 |
| Figur 7.1: Oversiktsbilde av hele tunnelen som er strukket i y-retning. | 69 |
| Figur 7.2: Ventilasjonshastigheten i midten av tunnelen med «fin» oppløsning. Vegger og tak er gjort usynlige. De nederste tallverdiene til figurene angir hastighet i m/s, og hvilken hastighet som utheves med svart. | 69 |
| Figur 7.3: RR-kurver for simuleringene sammenlignet med testdata | 71 |
| Figur 7.4: Temperaturmålinger fra testdata gjort midt i brannsonen mellom brannkar med 50 MW og 20 MW effekt. | 73 |
| Figur 7.5: Typisk flammtemperatur for simuleringer gitt i grader celsius | 73 |
| Figur 7.6: Illustrasjon av simulering av kritisk hastighet, FDS 6 208. | 76 |
| Figur 7.7: Illustrasjonen viser hva en har ansett som begynnende backlayering. | 77 |
| Figur 7.8: Illustrasjonen viser når backlayering har nådd Loop 305, som er nærmeste målestasjon i forkant av brannkarene. | 77 |
| Figur 8.1: Begynnende backlayering illustrert med «vector-slice» for lufthastighet. De horisontale strekene langs tunnellengden illustrerer trappetrinnprofilen til taket. | 83 |

TABELLISTE

| | |
|---|----|
| Tabell 2.1: Maksimal stigning for vei i undersjøiske tunneler [8] kap. 4.2.3 | 17 |
| Tabell 2.2: Dimensjonerende brann [8] kap. 5.4.2 | 18 |
| Tabell 2.3: Dimensjoneringskrav for brannventilasjon i tunnel med stigning $\leq 2\%$ [8] kap. 10.4.4 | 20 |
| Tabell 4.1: Impulsvifte oppsett test nr.621A | 42 |
| Tabell 4.2: Verdiene for når backlayering startet for test 621A i tidsrommet | 44 |
| Tabell 5.1: REAC til «Fuel oil 2» fra inndatafil til simuleringene | 46 |
| Tabell 5.2: Material egenskaper til tunnelvegg av betong fra inndatafil til simuleringene | 46 |
| Tabell 6.1: Geometriske data for modellene sammenlignet med testtunnelen. | 59 |
| Tabell 7.1: Resultater for simuleringer myntet på bestemmelse av kritisk hastighet. | 76 |

FORMELLISTE

| | |
|--|----|
| 2.1: Energiproduksjon [kW]..... | 3 |
| 2.2: Massefluks [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]..... | 3 |
| 2.3: Massefluks for brann i tunnel [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]..... | 4 |
| 2.4: Biot-tall [-] | 4 |
| 2.5: Generell likning for oppvarming og avkjøling [-]..... | 4 |
| 2.6: Konveksjon [W/m^2] | 5 |
| 2.7: Termisk stråling [W/m^2] | 5 |
| 2.8: Mottatt stråling [-] | 6 |
| 2.9: Absorpsjonskoeffisient [-]..... | 6 |
| 2.10: HRR for tunnel [MW] | 8 |
| 2.11: Maksimal varmetapsrate [MW] | 12 |
| 2.12: Kritisk hastighet [m/s]..... | 13 |
| 2.13: Kritisk hastighet [m/s]..... | 14 |
| 2.14: Trykkbidrag [Pa] | 20 |
| 2.15: Nødvendig skyvekraft [N]..... | 21 |
| 3.1 Teoretisk kritisk lufthastighet [m/s] | 29 |
| 5.1: Enkeltstegsreaksjon [-]..... | 48 |
| 5.2: Brannens karakteristiske energiproduksjon [-] | 50 |
| 6.1: Forbrenning av hydrokarbon i luft [-] | 63 |

ORDLISTE

Forkortelser

| | |
|---------------|---|
| DOS | Disk Operation System, grunnleggende brukergrensesnitt i Windows. |
| CFD | Computational Fluid Dynamics er en fellesbetegnelse for kraftige for beregnings- og analyseverktøy for simulering av gass- og væsketransport. Også kalt felmodell |
| FDS | Fire Dynamics Simulator er et CFD-program som som er spesialisert for simulering av brann. |
| LES | Large Eddy Simulation er matematisk turbulensmodell som bl.a. benyttes i FDS. |
| SMW | Smokeview er en post-prosessor som tillater visualisering av utdata fra FDS |
| RANS | Reynolds-averaged Navier–Stokes likninger en alternativ turbulensmodell. for strømning. |
| MTFVTP | Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program |
| EUREKA | European Research Coordination Agency. Et felles europeisk program innen vitenskapelig forskning og utviklingsarbeid. |
| HRR | Heat Release Rate (varmeavgivelsesrate) [kW] |
| HRRPUA | Heat release rate per unit area [kW/m ²] |
| CFM | Cubic feet per minute |
| HSH | Høgskolen Stord/Haugesund |
| SINTEF | Stiftelsen for industriell og teknisk forskning |
| HGV | Heavy goods vehicle (lastebil/vogntog) |
| ÅDT | Årsdøgntrafikk |
| TERN | Trans-European road network |
| ASHRAE | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| BFRL | Building and Fire Research Laboratory |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| HVAC | Heating Ventilation and Air Conditioning |
| SGS | Subgrid-scale |

NOMENKLATURLISTE

| | | |
|---------------------|---|------------------------------------|
| \dot{Q} | Energiproduksjon | [kW] |
| Q^* | Energiproduksjon | [kW] |
| \dot{Q}''_F | Energiflukt fra flammen til brenselet | [kW/m ²] |
| \dot{Q}''_L | Energiflukstapet fra brenseloverflaten | [kW/m ²] |
| \dot{Q}''_E | Tilbakestråling fra røyklag, omhylning eller andre overflater i nærheten. | [kW/m ²] |
| \dot{q}''_k | Konveksjon | [W/m ²] |
| \dot{q}''_R | Mottatt strålingsenergi | [W/m ²] |
| \dot{q}''_x | Transportert varmeenergi pr. flateenhet | [W/m ²] |
| χ | Forbrenningseffektivitet | [-] |
| \dot{m}'' | Massefluks/fordampningsrate | [g/m ² s] |
| \dot{m}''_T | Massefluks/fordampningsrate i tunnelbrann | [g/m ² s] |
| ΔH_c | Forbrenningsvarme | [kJ/g] |
| $\Delta H_{c_{ox}}$ | Forbrenningsvarme til oksygen | [kJ/g] |
| Δx | Tykkelse på materialet | [m] |
| L_V | Fordampningsvarmen | [kJ/g] |
| k_x | Termisk konduktivitet for stoffet | [W/mK] |
| h | Konvektivt varmeoverføringstall | [W/m ² K] |
| ϕ | Konfigurasjonsfaktor | [-] |
| ε_R | Resulterende emissivitet | [-] |
| ε | Emissivitet | [-] |
| ε_g | Røyklagets emissivitet | [-] |
| ε_m | Mottakers emissivitet | [-] |
| σ | Stefan-Boltzmann-konstanten | [W/m ² K ⁴] |
| T_R | Temperatur i røyklaget | [K] |
| T_M | Temperatur i mottagende overflate | [K] |



| | | |
|-------------|--------------------------------------|----------------------|
| T_f | Temperatur i brannområdet | [K] |
| T_u | Temperatur utenfor brannområdet | [K] |
| T_0 | Temperatur i omgivelsene | [K] |
| ΔT | Temperaturdifferanse | [K] |
| Fr_c | Det kritiske Froude-tallet | [-] |
| D | Brannens diameter | [m] |
| K | Absorpsjonskoeffisient | [m ⁻¹] |
| L | Tykkelse | [m] |
| V | Volumetrisk luftmotstand per sekund | [m ³ /s] |
| V_0 | Lufthastighet | [m/s] |
| V_c | Teoretisk kritisk lufthastighet | [m/s] |
| u_{cr} | Kritisk lufthastighet | [m/s] |
| η_{ox} | Molfraksjonen av oksygen i luftstrøm | [-] |
| ρ_{ox} | Oksygentetthet | [kg/m ³] |
| ρ_o | Lufttetthet utenfor brannområdet | [kg/m ³] |
| ρ_f | Lufttetthet i brannområdet | [kg/m ³] |
| g | Gravitasjonens akselerasjon | [m/s ²] |
| c_p | Varmekapasitet til luft | [kJ/kgK] |
| k | Konstant | [-] |
| D^* | Brannens karakteristiske diameter | [m] |
| D | Brannens diameter | [m] |
| dx | Største sidelengde på cellen | [m] |
| A | Tunneltverrsnitt | [m ²] |
| A_f | Overflateareal til brenselet | [m ²] |
| H | Tunnelhøyde | [m] |

1 INNLEDNING

1.1 Formål

Det finnes flere indikasjoner på at CFD-programvare kan overpredikere omfang av røyk som beveger seg mot ventilasjonsretningen som følge av termiske oppdriftskrefter, ved tunnelbrann der en har langsgående ventilasjon og høy varmeavgivelsesrate, HRR (≥ 100 MW) [1], [2] og [3]. Fenomenet er mest kjent som backlayering, og evnen til å forutsi av fenomenet er av avgjørende betydning for prosjektering av tunneller med langsgående ventilasjon. Formålet med denne oppgaven er å undersøke overenstemmelse mellom nyeste versjon av FDS og fullskalaforsøk gjort i tunnelbrann med høy varmeavgivelsesrate og langsgående ventilasjon. Det legges særlig vekt på parametere som har en effekt på forutsigelsen av backlayering.

1.2 Bakgrunn

Norge er blant de landene i verden som bygger flest veitunneler [4]. Det var i oktober 2011 1039 vegtunneler i Norge. Veitunneler er vanligvis like sikre eller sikrere enn tilsvarende veistreknings i friluft uten veikryss, avkjørslar, gang- og sykkeltrafikk [5]. Veitunneler fortjener likevel spesiell oppmerksomhet fra et trafikksikkerhetsperspektiv, blant annet på grunn av katastrofepotensialet ved brann. Her kan et stort antall kjøretøy bli innesperret og veggene kan føre til kraftigere branner sammenlignet med fri luft.

I forbindelse med krav til økt sikkerhet, stilles det stadig strengere krav til ventilasjonsanleggenes kapasitet til å forhindre backlayering i større branner. Ettersom dimensjoneringskravene økes blir det vanskeligere å utføre relevante fullskalaforsøk, da kostnader og skader på materiell gjør slike tester lite hensiktsmessige. Det er dermed et økende behov for å kunne forutsi brannutvikling, røykspredning og overlevelseshforhold i tunneler ved hjelp av dataverktøy. Dette prosjektet vil kunne brukes som et ledd i en valideringsprosess for simulering av tunellbranner med langsgående ventilasjon og høy HRR med CFD-verktøyet FDS 6.

Resultater fra simuleringer med FDS6 vurderes opp mot brannforsøk som er foretatt i Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP), som beskrives nærmere i kapittel 4.5.

1.3 Tidligere arbeider

Bl.a. grunnet forholdsvis lave dimensjoneringskrav, begrenset mengde fullskalaforsøk med gode data, og teknologiske begrensninger, er CFD-validering for tunnelbranner med høy HRR manglende. FDS 6, som er benyttet i denne oppgaven, har en rekke endringer sammenlignet med tidligere versjoner (se kapittel 5.8). FDS 6, som nå nærmer seg slutten av utviklingsfasen, er et nytt og forholdsvis uprøvd program. Dermed vil denne oppgaven trolig være et av de første leddene i valideringsprosessen for tunellbranner i FDS 6.

Etter søk i vitenskapelige arkiver tyder mye på at de fleste tyder mye på at store deler av arbeidet med CFD-modellering av tunellbranner er gjort for mindre branner (1-50 MW) [6], [7] og [8]. Dette er naturlig, da de fleste sammenlignbare brannekspesimentene som er gjort i tunneler er mindre branner. Historisk sett har internasjonale og norske lovverk dimensjonert ventilasjonssystem for denne typen branner [8] kap.5.4. Videre tyder forskning på at kritisk ventilasjonshastighet i større tunnelbranner ikke kan forutsies på samme måte som for mindre

branner [9]. I dag er den største dimensjonerende brannen for ventilasjonssystemet i tunneler på 100 MW, iht. norsk lovverk. I starten av 2000-tallet var den største dimensjonerende brannen iht. håndbok 21 kun 20 MW [10] kap.1005.

Et forsøk på å simulere brann i størrelsesorden 100 MW gjort med FDS 4.0, viste seg å ikke kunne gi overensstemmende røykspredning [2]. Scenarioet benyttet langsgående ventilasjon og var hentet fra MTFVTP Test 621A. Simuleringene ga større utbredelse av backlayering enn det som ble påvist eksperimentelt. Problemene ble antatt å være et resultat av svakheter i turbulensmodellen og beregninger i nærheten av vegger/tak. En klarte ikke å korrigere problemene med den funksjonaliteten som var bygget inn i FDS 4.0.

1.4 Problemstilling

Kan FDS sammenlignet med fullskalaforsøk forutsi tilsvarende forhold for tunnelbrann med varmeavgivelsesrate i størrelsesorden 100 MW og langsgående ventilasjon?

1.5 Metode

For denne oppgaven har en valgt å videreformidle nødvendig bakgrunnsinformasjon i et eget teorikapittel. Oppgavens teorikapittel fremstiller anerkjent litteratur innen relevante temaer som energiproduksjon, varmetransport, faser i en tunnelbrann, tunnelgeometri, ventilasjon, CFD-simulering samt utdrag fra brukermanualer og andre hjelpemidler til bruk av programmene FDS 6, Smokeview og PyroSim 2012.

Følgende måter er brukt på å tilegne kunnskap om temaene i dette studiet:

- Søk etter artikler, rapporter og forsøk i arkivdatabasen til HSH, SINTEF, ScienceDirect og søkemotoren Google
- Gjennomgang av tidligere bachelor- og masteroppgaver innenfor relevante temaer
- Bøker innenfor relevante temaer fra biblioteket ved HSH

En har forsøkt å bruke kilder fra kjente forskningsinstitusjoner og forfattere som er anerkjente innenfor fagfeltet, da dette anses som pålitelige kilder.

En har valgt å utføre en kvantitativ analyse basert på brannsimulering med FDS 6 og brannscenario fra MTFVTP. Hensikten er å finne ut hvor vidt røykspredningen i en tunnel med langsgående ventilasjon for en brann på 100 MW er i samsvar med testdata fra fullskalaforsøk fra testprogrammet.

FDS-simuleringene er utført via kraftige datamaskiner i et nettverk ved HSH på Stord.

Tidligere i oppgavefasen ble andre simuleringsprogram som SmartFire, Solvent og Kameleon FireEx vurdert. Men da de enten var svært kostbare eller vanskelig å få tak i tidsmessig ble de nedprioritert. Valget falt på den nyeste versjonen av FDS 6, med relevante oppdateringer i forhold til FDS 5. Programmet er gratis, med omfattende og godt dokumentert verifikasjon og valideringsarbeid for tidligere versjoner. Programvaren oppdateres jevnlig og resultatene kan enkelt fremstilles grafisk. Den har også gode brukermanualer og støttefunksjoner via Google Groups. HSH sin kompetanse innen programvaren og tilgang til datamaskinnettverk med installert programvare underbygget valget av simuleringsprogrammet.

2 TUNNELBRANNTEORI

Teorien innen branndynamikk og tunnelventilasjon er i hovedsak hentet fra boken *An Introduction to Fire Dynamics* [11], *Enclosure Fire Dynamics* [12], *Gunnleggende brannteknikk* [13] og *The Handbook of Tunnel Fire Safety* [14].

2.1 Energiproduksjon

Brann er definert som en «...ukontrollert forbrenningsprosess som kjennetegnes av varmeavgivelse, ledsaget av røyk, flamme eller gløding» [16, 17, 18]. En brann er forbrenning ved en eksoterm oksidasjonsprosess, der brenselet reagerer med oksygen (O₂) og danner vandamp (H₂O), karbondioksid (CO₂) og karbonmonoksid (CO). Det dannes også andre produkter som følge av ufullstendig forbrenning. Energien som produseres i en brann er gitt ved:

$$\dot{Q} = \chi \cdot \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c$$

1: Energiproduksjon [kW]

hvor:

| | | | |
|--------------|---|---------------------------------|----------------------|
| χ | = | forbrenningseffektivitet | [0 < χ < 1] |
| \dot{m}'' | = | massefluks/fordampningsrate | [g/m ² s] |
| ΔH_c | = | forbrenningsvarme til brenselet | [kJ/g] |
| A_f | = | overflatearealet til brenselet | [m ²] |

Når en brann får brenne upåvirket i det fri, vil massefluksen være avhengig av energitapet fra flammen til brenseloverflaten, energitapet fra brenseloverflaten og ned i brenselet, og energien som går med til fordampning av brenselet. Massefluksen er gitt ved:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_v}$$

2: Massefluks [kg/m²s]

hvor:

| | | | |
|---------------|---|---|----------------------|
| \dot{Q}_F'' | = | energifluks fra flammen til brenseloverflaten | [kW/m ²] |
| \dot{Q}_L'' | = | energiflukstap fra brenseloverflaten | [kW/m ²] |
| L_v | = | fordampningsvarme | [kJ/g] |

En brann i en tunnel vil produsere røyk som vil samles opp under taket og danner et røyklag. Røyklaget vil reflektere energi i form av stråling mot brannarealet, tunnelens vegger og gulv samt varme opp berørte flater konvektivt. Strålingen og energioverføringen vil øke i takt med røykkonsentrasjonen, røyklagets tykkelse og temperaturen i røyklaget. Forbrenningen vil påvirkes av strålingen fra røyklaget, ved at brenselet varmes opp og massefluksen øker. Strålingen tilbake på brannen fra omhyllningsflatene og røyklaget kalles ekstern tilbakestråling. Massefluksen for brann i en tunnel er gitt ved:

$$\dot{m}''_T = \frac{\dot{Q}''_F + \dot{Q}''_E - \dot{Q}''_L}{L_V}$$

3: Massefluks for brann i tunnel [kg/m²s]

hvor:

$$\dot{Q}''_E = \begin{array}{l} \text{tilbakestråling fra de varme røykgassene eller} \\ \text{eksterne kilder} \end{array} \quad [\text{kW/m}^2]$$

2.2 Varmetransport

Varmetransport er en overføring av varme gjennom et medium eller et material. Varmetransport kan skje på tre måter: termisk konduksjon/varmeledning, konveksjon og stråling.

Termisk konduksjon er en overføring av varme ved termiske kollisjoner mellom molekyler langs en temperaturgradient. Varmeenergi forflytter seg fra området med høy temperatur til området med lav temperatur i faste materialer, noe som også forekommer også i fluider. Varmeenergi får atomer og molekyler til å vibrere i faste stoffer eller kolliderer med hverandre i væske og gass når temperatur øker. Kollisjonene med omliggende atomer og molekyler overfører varmeenergi slik at varmen over tid vil utjevnes. Ledningen vil variere avhengig av egenskapene til hvert enkelt materiale og temperaturen ved materialet. For en tunnelvegg av betong vil som regel ikke temperaturegjennomgangen være uniform. Her vil varmefronten endre posisjon som funksjon av tid som vist i formel 2.5. Før selve beregningen gjøres må det undersøkes om Biot-tallet, som er forholdet mellom konveksjon og varmeledning i et objekt med karakteristisk dimensjon V/A , er større enn 1 [14] kap.10.3 ved:

$$Bi = \frac{hV}{KA}$$

4: Biot-tall [-]

hvor:

$$\begin{array}{ll} h & = \text{konveksjonstallet} & [\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}] \\ k & = \text{varmeledningstallet} & [\text{W/m } ^\circ\text{C}] \\ V & = \text{volumet} & [\text{m}^3] \\ A & = \text{objektets areal} & [\text{m}^2] \end{array}$$

$$\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \text{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right]$$

5: Generell likning for oppvarming og avkjøling [-]

hvor:

$$\begin{array}{ll} T & = \text{temperatur som søkes} & [^\circ\text{C}] \\ T_0 & = \text{starttemperatur for objekt} & [^\circ\text{C}] \\ T_i & = \text{omgivelsestemperatur} & [^\circ\text{C}] \\ x & = \text{avstanden fra overflaten til et objekt} & [\text{m}] \\ t & = \text{tid i sekund} & [\text{s}] \end{array}$$

erf = Gauss error-funksjonen [-]

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

k = varmeledningstallet [W/m °C]
 ρ = tetthet [kg/m³]
 c_p = spesifikk varmekapasitet [J/kg °C]

Svaret fra error-funksjonen bestemmer den endelige verdien, hentet fra error-funksjonstabell, som blir til slutt brukt for å temperaturen i et objekt med x tykkelse etter en gitt tid t .

Konveksjon er varmetransport som følge av temperaturforskjeller mellom varme eller kalde gasser/væsker som strømmer over et objekt, og kan også bli omtalt som varmestrømning [13]. Energien som overføres konvektivt er i tillegg til å være avhengig av temperaturskjell, i stor grad av et definert varmeoverføringstall. Varmeoverføringstallet er et mål på hvor effektivt varmeoverføringen mellom to faser er, og påvirkes av en rekke faktorer som temperatur, konveksjonsform, hastighet på fluidet osv. Fastsetting av varmeoverføringstallet kan ofte være vanskelig. Typiske verdier ligger i området 5 – 25 W/m²K for naturlig konveksjon, og 10 – 500 W/m²K for tvungen konveksjon. Konveksjon er gitt ved:

$$\dot{q}_k'' = h \cdot \Delta T$$

6: Konveksjon [W/m²]

hvor:

h = konvektivt varmeoverføringstall [W/m²°C]
 ΔT = temperaturdifferanse fast stoff/fluid [°C]

Varme kan overføres mellom legemer i form av elektromagnetisk stråling. Varmestråling er elektromagnetisk stråling som sendes ut fra en overflate på grunn av dennes temperatur. Alle legemer med temperatur over det absolutte nullpunkt sender ut slik stråling som følge av elektronvibrasjoner som øker med økende temperatur. Bølgelengdene for stråling er mellom 0,1 μm – 100 μm. I motsetning til varmeoverføring ved konduksjon eller konveksjon trenger man ikke noe medium for å overføre strålingsvarme. Strålingsvarme kan passere gjennom vakuum og i stor grad gjennom luft (avhengig av absorbasjonskoeffisienten), og varmer for det meste opp faste materialer.

Den termiske strålingen er gitt ved:

$$\dot{q}_R'' = \phi \cdot \varepsilon_R \cdot \sigma \cdot (T_R^4 - T_M^4)$$

7: Termisk stråling [W/m²]

hvor:

ϕ = konfigurasjonsfaktor [0 < ϕ < 1]
 ε_R = emissivitet [0 < ε < 1]
 σ = Stefan-Boltzmann konstant [5,67·10⁻⁸ W/m²K⁴]
 T_R = temperatur i røyklaget [K]
 T_M = temperatur til mottakende overflate [K]

I forbindelse med termisk stråling er emissiviteten av betydning. Emissiviteten for en hvilken som helst overflate er definert som forholdet mellom dennes utstråling og utstrålingen fra en tilsvarende svart legeme, og sier noe om hvor effektiv et gitt legeme eller overflate stråler. Mottatt stråling er gitt ved:

$$\varepsilon_R = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_m} - 1}$$

8: Mottatt stråling [-]

hvor:

$$\begin{aligned} \varepsilon_g &= \text{røyklagets emissivitet} & [0 < \varepsilon < 1] \\ \varepsilon_m &= \text{mottakers emissivitet} & [0 < \varepsilon < 1] \end{aligned}$$

Emissiviteten til røyklaget avhenger av røyklagets tykkelse og røykens spesifikke absorpsjonskoeffisient, og er gitt ved:

$$\varepsilon_g = 1 - e^{-K \cdot L}$$

9: Absorpsjonskoeffisient [-]

hvor:

$$\begin{aligned} K &= \text{røykens spesifikke absorpsjonskoeffisient} & [m^{-1}] \\ L &= \text{røyklagets tykkelse} & [m] \end{aligned}$$

Når den optiske tykkelsen til røyklaget øker, vil emissiviteten gå mot 1. Emissiviteten til det mottakende objektet er ofte ukjent, og må antas ut fra materialspesifikke egenskaper.

2.3 Faser i en tunnelbrann

Brannutvikling for en tunnelbrann går normalt gjennom følgende faser: antenning, vekst, overtenning, fullt utviklet brann og reduksjon.

Antenning kan skje som følge av en kollisjonsulykke eller teknisk feil på kjøretøy. Like etter antennelse oppfører brannen seg som om den er i det fri. Etter hvert vil vegger og tak begynne å få innflytelse på brannen. Dette skjer blant annet ved dannelse av et røyklag, og varmeledning til vegger og tak som vist i formel 2.4.

Tunnelbrannen kan utvikle seg på mange ulike måter, avhengig av tunnelens tverrsnittsareal, ventilasjonsforhold og trykk. I tillegg til type, plassering, mengde og overflatearealet til brenselet.

Etter antennelse går forbrenningen til vekstfase og størrelsen på brannen øker. I denne fasen er brannen avhengig av brensel og tunnelstørrelse. Brannen varmer opp vegger og tak som fører til at det varme røyklaget stråler tilbake på brenselet og varmer overflaten ytterligere slik at brannen eskalerer. Forsøk har vist [16] at ved en tunnelbrann dannes det grovt sett to soner: et øvre sjikt bestående av varm røyk og ett nedre sjikt bestående av kald luft. Egenskapene til gassene i hver av de to lagene vil endre seg med tiden, samt avstanden i fra brannområdet.

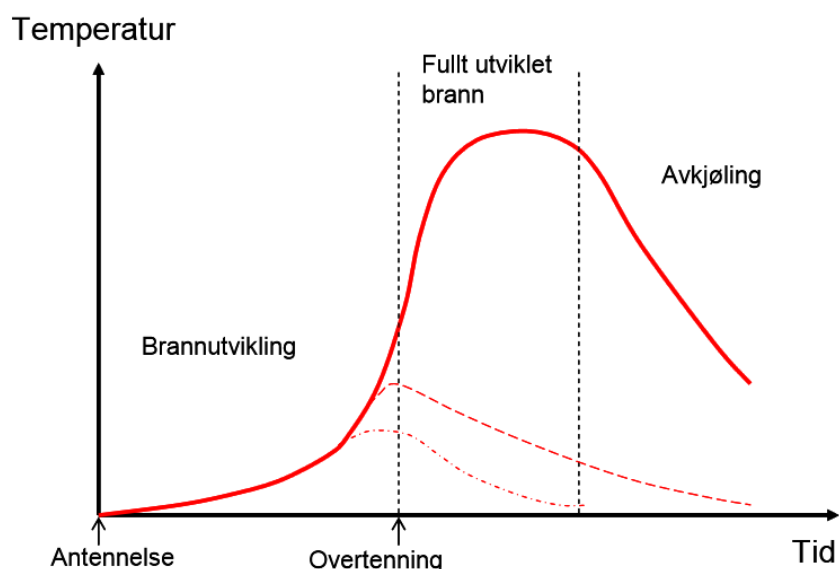
Etter hvert som temperaturen når 500 - 600 °C og strålefluks når 15 - 20 kW/m², får en overtenning. Det dannes undertrykk som fører den kalde luften til flammesøylen. Det økte lufttilfanget bidrar til at røykgassene øker i volum, kjøles og brer seg nedover mot gulvet. Overtening beskriver en overgang fra vekstfasen til fullt utviklet brann der alle brennbare flater, samt røyklaget under taket, antenner samtidig [13] kap.3.3.

Varmetransport økes via konveksjon og stråling. Tak og vegger vil bli varmet opp via konveksjon fra de varme røykgassene, mens gulvet og nedre del av veggene blir varmet opp av strålingen som reflekteres røyklaget. Strømningsretningen til røykgassene vil være avhengig av den naturlige eller mekaniske ventilasjonen i tunnelen og i noen tilfeller størrelsen på brannen. Dersom røyklaget spres i motsatt retning av mekanisk langsgående ventilasjon, får en backlayering.

For branner generelt, vil en fullt utviklet brann med mye tilgjengelig brensel vær styrt av tilgangen på oksygen. Dersom en tunnel er utstyrt med riktig dimensjonert mekanisk ventilasjon vil tilgangen til oksygen som regel alltid være god og brannen vil forbli brenselkontrollert. Tunnelbranner er dermed sjelden styrt av lufttilgang med mindre tunnelen er naturlig ventilert eller har ventilasjonsanlegg som er underdimensjonert for den aktuelle brannen.

I de tilfellene hvor brannen kommer i størrelsesorden der det ikke blir nok oksygen til fullstendig forbrenning, vil en ha en ventilasjonskontrollert brann som kan gi store mengder giftige gasser.

Hvis brannen ikke blir slokket, vil den etter hvert dø ut av seg selv, enten som følge av mangel på oksygen, eller som følge av mangel på tilgang av brensel. Nedenfor vises utvikling i de ulike fasene.



Figur 2.1: De ulike fasene i et typisk brannforløp. De to striplete kurvene viser brannforløp som ikke utvikler seg til overtenning.

- i) **Vekstfase - før overtenning:** Gjennomsnittstemperaturen i rommet er relativt lav, og brannen er liten og nært antennelsesstedet.
- ii) **Fullt utviklet brann - etter overtenning:** Tilstanden der alle brennbare materialer bidrar til brannen.
- iii) **Avkjøling:** Brannens intensitet reduseres, og kjennetegnes ofte ved at gjennomsnittstemperaturen reduseres med 80 % av maksimal verdi.

2.4 Tunnelgeometriens innvirkning

En tunnel er i utgangspunktet et trangt sted som presenterer en geometrisk form som kan skape “worst case scenario” for en brannutvikling. Lav takhøyde og små tverrsnitt gir forhold som bidrar til høye termiske belastninger til tunnelstrukturen. Testingen som ble utført i Runehamartunnelen [17] oppnådde varmetapsrate på 200MW da det ble brukt en tro kopi av en HGV/lastebil (Heavy Goods Vehicle) med svært brennbar last bestående av bl.a. trepaller, papp, madrasser og møbler. Dette var en tunnel med et relativt lite tverrsnittsareal og langsgående ventilasjon.

A.Beard og R. Carvel [14] har utviklet en tilnærming for å evaluere virkningen av geometri på brannveksten karakterisert gjennom FHRR (Fire growth rate, fuel load and products of combustion). Undersøkelsen viste at for en gitt brennbar last vil FHRR til en brann variere primært avhengig av den relative bredden til tunnelen og brannkilden. Det ble konkludert at branner som er små i forhold til tunnelbredden blir ikke vesentlig påvirket av tunnelgeometrien. Branner som er opp til omtrent halvparten av bredden av en tunnel vil bli styrket av tunnelgeometri, mens branner med dimensjoner nær den totale bredden av tunnelen vil bli redusert.

Ved sammenligning, vil branner i mindre tunneltverrsnitt generere større HRR for samme brenselmengde enn innenfor et større tunneltverrsnitt, forutsatt tilstrekkelig luft er tilgjengelig for forbrenning i begge tilfellene. Ved de nevnte undersøkelsene ble tunnelhøyden sett på som en mindre viktig faktor.

Ligningen som best beskriver forholdet mellom brannens HRR og tunnelbredde W_{tunnel} og brannbredde W_{brann} er gitt ved:

$$HRR_{tunnel} = (B_{tunnel} / B_{Runehamar}) HRR_{Runehamar}$$

10: HRR for tunnel [MW]

hvor:

$$B = 24(W_{brann} / W_{tunnel})^3 + 1$$

Likningen tillater en å anslå FHRR mot verdiene oppnådd i Memorial testene. Denne metodikken ble verifisert ved observasjon av et stort antall storskala tester og CDF resultater [18].

Skråning av tunnel har en viktig innflytelse på spredning av røykgasser. Generelt kan det sies at på grunn av skorsteinseffekten vil spredningshastigheten av røykgassene øke med økningen i tunnelens skråning.

2.5 Ventilasjon i en tunnel

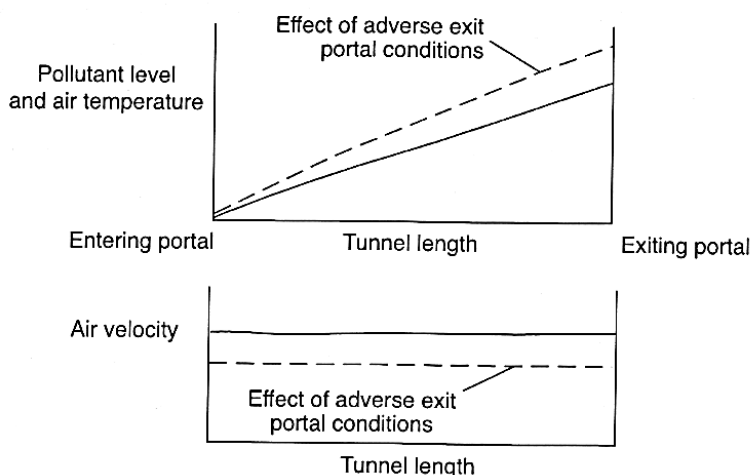
Ventilasjon i tunnel er avgjørende faktor for å redusere konsentrasjonen av uønskede gasser til et akseptabelt nivå ved normal drift og fjerne eller kontrollere spredning av røyk og varme gasser ved brann.

2.5.1 Ventilasjonstyper

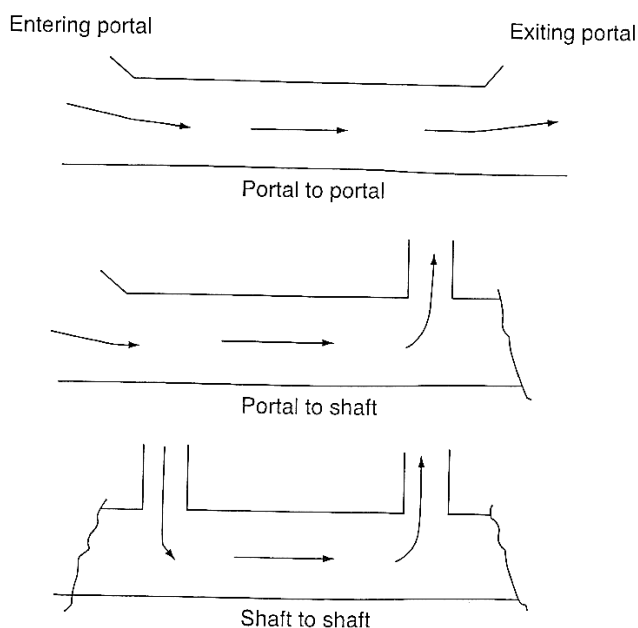
De to mest brukte ventilasjonstyper for tunnel er langsgående og tverrgående (blir beskrevet i vedlegg) ventilasjon. Tunneler som er kortere enn 1000 m og har en lavere årsgjennomsnittlig trafikktetthet (ÅDT) enn 1000 biler, kan klare seg med naturlig ventilasjon [8] kap.10.4. Det blir likevel foretatt en evaluering i alle tunneler hvor det ikke stilles krav til mekanisk ventilasjon for hvorvidt den naturlige ventilasjonen er tilstrekkelig for å kunne ventilere bort alle avgasser fra kjøretøy ved normal bruk. Hvis dette ikke fungerer må det benyttes mekanisk ventilasjon. For tunneler med trafikk i en kjøreretning, vil ventilasjonsretningen normalt være den samme som trafikketningen slik at ventilasjonen kan virke i samme retning som stempeleffekten fra trafikken.

Tunneler som er naturlig ventilert er avhengige av meteorologiske forhold og stempeleffekt fra kjøretøy for å bevare tilfredsstillende forhold i tunnelen. De viktigste meteorologiske effektene som kan påvirke tunnelforhold er trykkdifferansen mellom åpningene med hensyn på høydeforskjell, temperatur eller vind. Disse er dessverre aldri konstante. En tilfeldig retnings-, eller fartsendring i vinden kan gi en rask reduksjon/oppheving av ventilasjonen [8] kap.10.4. Dette er en av grunnene til at den naturlige ventilasjonen ikke blir vurdert med hensyn på ventilasjon ved tunnelbrann. I figur 2.2 vises effekten av redusert naturlig ventilasjon der konsentrasjonen til avgasser og lufttemperatur øker, samtidig som lufthastigheten synker.

Ved langsgående ventilasjon strømmer luften på langs med tunnelen og flytter avgasser og varm luft sammen med den friske luften fra den ene til den andre siden av åpningen. Det kan også bli også brukt sjakter, enten fra åpning til sjakt eller fra sjakt til sjakt som illustrert i figur 2.3



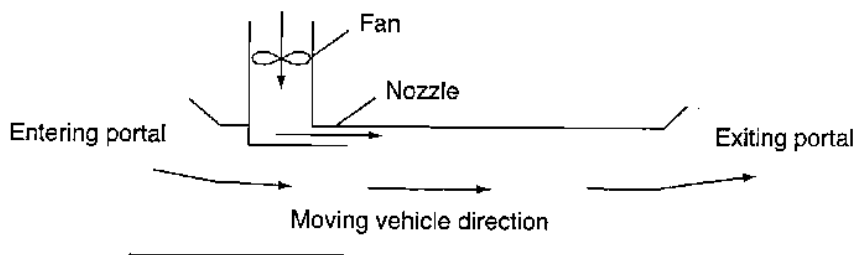
Figur 2.2: Karakteristikk for luftstrøm ved naturlig ventilasjon [14] s.130



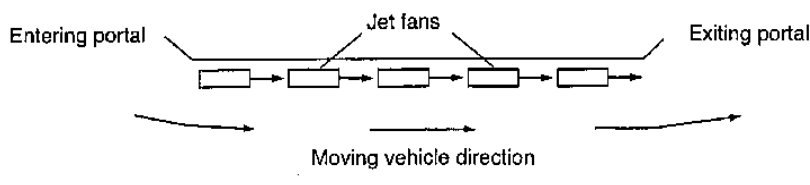
Figur 2.3: Langsgående ventilasjonsmodeller [14] s.129

For de tilfellene hvor naturlig ventilasjon ikke er tilstrekkelig må en bruke mekanisk ventilasjon.

En langsgående mekanisk ventilasjon kjennetegnes ved et system der luft fraktes i lengderetningen ved bruk av et visst antall vifter i tunnel. Det er to langsgående mekaniske ventilasjonstyper. De som benytter en injeksjon av luft inn i tunnelen fra sentralt lokaliserte vifter (fig.2.4) og de som bruker impulsvifter som er montert i tunnelen tverrsnitt (fig.2.5).



Figur 2.4: Langsgående ventilasjon ved injeksjon [14] s.131



Figur 2.5: Langsgående ventilasjon ved impulsvifter [14] s.132

Injeksjonsvarianten er mest brukt i togtunneler, men har også blitt benyttet i ordinære veitunneler. Luftstrålen blir injisert i en tunnel ved hjelp av høyhastighetsvifter via en

impulsdyse, eller bedre kjent som «Saccardo-dyse». Lufttrykket blir videre blandet med stempeeffekt fra kjøretøy og den naturlige ventilasjonen.

Langsgående ventilasjon ved bruk av impulsvifter baserer seg på en installasjon av en serie impulsvifter montert i tunneltaket. Dette er høyhastighetsvifter med stor skyvekraft som kan reverseres til å blåse i motsatt retning dersom nødvendig. Reversering medfører imidlertid redusert effekt og brukes sjelden i praksis.

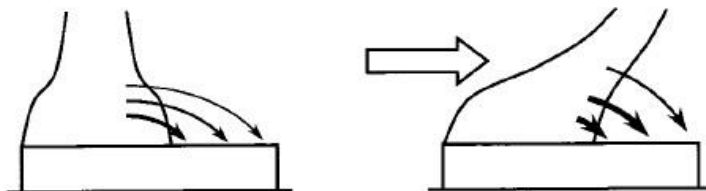
Den økte bruken av mekanisk tunnelventilasjon har blitt forsterket etter gode og informative fullskalatestprogrammene som ble gjennomført på nittitallet og tidlig totusentall, fortrinnsvis MTFVTP [19] og EUREKA Program [20].

Et av de viktigste resultatene fra MTFVTP er at det ble påvist at bruk av langsgående ventilasjon var svært egnet til å kontrollere strømmingen av røyk og varme gasser i både små og store branner opp til og med 100 MW [14] s.134. Mens testing av tverrgående ventilasjon var mindre vellykket, og kun egnet for mindre branner opp til 50 MW [19] Volum 3.

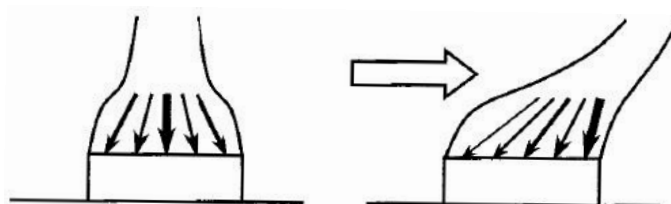
2.5.2 Ventilasjonens påvirkning

Mekanisk ventilasjon har ikke alltid en positiv effekt på kontrollen av røyk. Ved å øke luftstyrken på en brann vil en tilføre brannen mer oksygen og dermed få et kraftigere brannforløp. For at en brann skal kunne eksistere må det være tre elementer tilstede: brensel, oksygen og varme.

Mekanisk ventilasjon kan føre til at flammer lener mot den ene siden, og øker dermed sannsynligheten for flamme og røyk sprer seg til andre kjøretøy (fig. 2.6). Tilsvarende helning vil føre til at flammene avgir mindre varmestråling på det brennbare materialet (fig. 2.7).



Figur 2.6: Varmetransport fra flammer til ubrent brensel [14] s.186



Figur 2.7: Varmetransport fra flammene til brensel [14] s.185

Ventilasjonen kan i tillegg forsterke brannens varmeavgivelsesrate, noe som kan være avgjørende med hensyn på evakuering og slukkeinnsats. Varmeavgivelsesrate er brannens effekt, og blir sett i praksis på som voldsomheten til en brann [21]. En økt varmeavgivelsesrate kan gi redusert integritet i tunnelstruktur og økt fare for brannspredning.

For et gitt brannscenario er det mulig å kalkulere den maksimale varmeavgivelsesraten som kan forekomme avhengig av tilgjengelig luftstrøm [14] s.185:

$$HRR = \dot{Q}_{\max} = V \eta_{ox} \rho_{ox} \Delta H_{c_{ox}} 10^3 (kW)$$

11: Maksimal varmetapsrate [MW]

hvor:

| | | |
|---------------------|---|----------------------|
| V | = volumetrisk luftstrøm per sekund | [m ³ /s] |
| η_{ox} | = mol fraksjonen av oksygen i luftstrøm (som regel 0,21) | [-] |
| ρ_{ox} | = oksygentetthet (1 kg/m ³ ved standard temperatur og trykk) | [kg/m ³] |
| $\Delta H_{c_{ox}}$ | = forbrenningsvarmen til oksygen (for de fleste verdier 12 kJ/g) | [kJ/g] |

Ved innsetting av de faste konstantene videreføres ligningen der det gjenstår å sette inn verdier for den volumetriske luftstrømmen som består av arealet til en sirkel multiplisert med ventilasjonshastighet.

$$\dot{Q}_{\max} = 2,73 \cdot V (MW)$$

Hvis en som et eksempel tar Memorial Tunnel som er tilnærmet sirkelformet med radius på 4,37 meter og en gitt ventilasjonshastighet på $v = 2$ m/s, vil den maksimale tillatte varmetapsraten være:

$$\dot{Q}_{\max} = 2,73 \cdot (v \cdot \pi r^2) = 2,73 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 4,37^2) = \underline{\underline{327 MW}}$$

Økes ventilasjonshastigheten til 2,5 m/s, slik det ble gjort under testforsøkene, vil det teoretisk være mulig å oppnå 409 MW i tunnelen, hvis det er nok brensel.

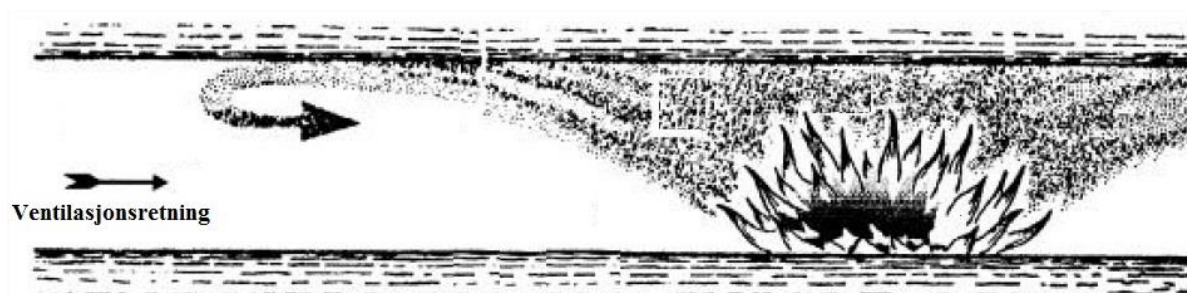
Beard, A. og Carvel, R. [14] s.196 viser til resultater fra testforsøk at økning av mekanisk ventilasjon ved en lastebilbrann gir en tydelig større brann. Varmeavgivelsesraten vil ha en økning på 50 % ved store bassengbranner (100MW), mens ventilasjonen fører til en reduksjon på 40 % ved små bassengbranner (10-50MW). Ut fra dette kom det frem at brann varmeavgivelsesraten i en passasjerbil blir ikke signifikant påvirket av mekanisk ventilasjon.

Beard, A. og Carvel, R. mener at ulike ventilasjonsstrategier vil være hensiktsmessig når en skal håndtere ulike typer branner. Ventilasjonen bør holdes på et absolutt minimum hvis brannen innebærer en lastebil eller drivstoffsøl, mens ventilasjonen kan økes dersom brannen innebærer en passasjerbil eller en mindre bassengbrann.

Det er viktig at en gjør et gjennomtenkt og bevisst valg for ventilasjonsretning, da vifter i praksis sjelden reverseres. Reversering har en viss tidsforsinkelse og i verste fall ramme personer som har evakuert i motsatt retning av den opprinnelige ventilasjonsretningen. En må ved valg av ordinær ventilasjonsretning ta stilling til angrepsveien til brannvesenet, og hvor den mest egnede innsatsstyrken befinner seg.

2.5.3 Backlayering og kritisk hastighet

Det kan oppstå problem dersom røyk beveger seg mot ventilasjonsretningen som følge av oppdriftskrefter – et fenomen kalt “backlayering” eller tilbakestrømning av røyk som i figuren under. Eisner, H.S og Smith, P.B (1954) [22] foreslo at det var avgjørende for brannmenn å kunne komme innenfor 11-14 meter fra brannområdet for effektivt å kunne angripe brannen. I praksis betyr dette at backlayering må forhindres eller tilstrekkelig kontrollers slik at røyklaget forplanter seg videre oppstrøms for ventilasjonsretningen..



Figur 2.8: Illustrasjon av backlayering

Utformingen av et langsgående ventilasjonssystem for å motvirke backlayering, har tradisjonelt vært basert på en ventilasjonshastighet kalt kritisk hastighet. Kritisk ventilasjonshastighet, eller fortrenningshastighet som er mest brukt i norsk litteratur, kan defineres som den minste gjennomsnittlige hastigheten oppstrøms for brannen som kreves for å hindre at røykgasser fra en brann med en gitt varmeavgivelsesrate forplanter seg i motsatt retning av ventilasjonsretningen. I praksis er dette den gjennomsnittlige ventilasjonshastigheten oppstrøms for brannen idet branntrykket er overvunnet pluss en sikkerhetsfaktor [8] Vedlegg D s.129.

I følge Wu, Y. et al. (1997) [23] vil den kritiske hastigheten variere avhengig av tunnelens utforming i form av tverrsnittsareal og profil, i tillegg til brannstørrelse. Det er viktig å påpeke at den kritiske hastighet er lufthastigheten som er nødvendig for å hindre all backlayering. Mens lavere lufthastigheter i mange tilfeller vil kunne være i stand til å begrense utbredelsen av backlayering til en fast lengde oppstrøms for brannen, som vist i figur 2.8. Hvis backlayering holdes til maksimalt 11-14 meter oppstrøms fra brannområdet vil kriteriet til Eisner og Smith være oppnådd med en ventilasjonshastighet som vil kunne være lavere enn den tradisjonelle kritiske hastigheten.

P.H. Thomas var den første til å presentere ligning for den kritiske hastigheten som trengs for å hindre tilbakestrømning av røyk fra brann i en tunnel [24]. Ved å sammenligne oppdrifts- og hastighetsprofil foreslo han følgende ligning for kritisk hastighet:

$$u_{cr} = k \left(\frac{g \dot{Q} H_t}{c_p T_R \rho_o A} \right)^{1/3}$$

12: Kritisk hastighet [m/s]

hvor:

| | | |
|-----|--------------------|-------------------|
| A | = tunneltverrsnitt | [m ²] |
| H | = tunnelhøyde | [m] |

| | | |
|-----------|------------------------------------|----------------------|
| T_R | = temperatur i røyklaget | [K] |
| g | = gravitasjonens akselerasjon | [m/s ²] |
| \dot{Q} | = varmeproduksjon | [kW] |
| ρ_o | = lufttetthet | [kg/m ³] |
| c_p | = varmekapasitet til luft | [kJ/kgK] |
| k | = konstanten k ble antatt å være 1 | [-] |

Konstanten k ble senere bestemt til 1,26 av en forskergruppe Wu, Y et al. [25]. Likningen har også i ettertid blitt videreutviklet og forbedret av flere forskerteam med bl.a. Danziger og Kennedy, [26], Oka og Atkinson [27] og Wu og Bakar [28].

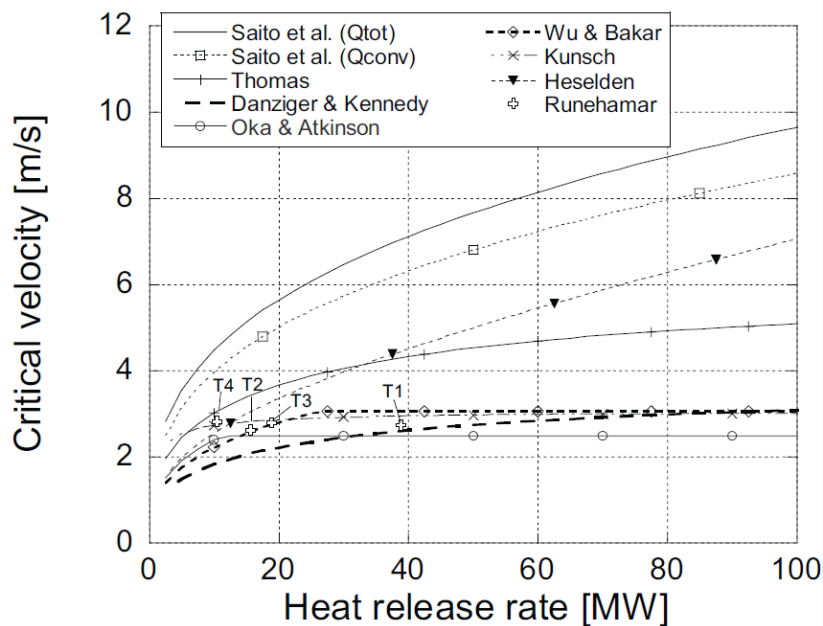
Som et eksempel kan en finne en estimert kritisk hastighet basert på formel 2.11 for Memorial tunnelen der en bruker følgende verdier:

- Varmeproduksjon: 100 MW
- Tunnelverrsnitt: 60 m²
- Tunnelhøyde: 7,85 m
- Konstanten k: 1
- Varmekapasitet for luft ved 273 K: 1,0035 J/gK
- Temperatur i røyklaget antas å ligge på ca. 600 Kelvin tatt fra Excel filen for brannforløp i Memorial tunnelforsøkt ved 100 MW
- Gravitasjons akselerasjon: 9,81 m/s²
- Lufttetthet ved 273 K: 1,293 kg/m³

$$u_{cr} = k \left(\frac{g \dot{Q} H_t}{c_p T_R \rho_o A} \right)^{1/3} = 1 \cdot \left(\frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 100000 \text{ kW} \cdot 7,85 \text{ m}}{1,0035 \text{ J/gK} \cdot 600 \text{ K} \cdot 1,296 \text{ kg/m}^3 \cdot 60 \text{ m}^2} \right)^{1/3} = \underline{\underline{5,5 \text{ m/s}}}$$

13: Kritisk hastighet [m/s]

Svaret kan gi en viss indikasjon ved å sammenligne forsøk gjort i Runehamar tunnelen [30] med figur 2.9, der også de andre forskerteam sine likninger ble brukt. Runehamar tunnelen er ikke så ulik Memorial tunnelen. Den er lenger (1650 m), har mindre tverrsnittsareal (50 m²), variert helning (1-3 %) og langsgående ventilasjon. I figuren ser en at ved 100 MW brann vil den beregnede kritiske hastigheten ligge på ca. 5,5 m/s med Thomas, P.H. sin likning, noen som også samsvarer med verdiene fra Memorial tunnelen.



2.9: Beregnet kritisk hastighet for Runehamar tunnelen [30]

Resultatet på 5,5 m/s må sees på som konservativ når teoretisk kritisk hastighet beregnet fra Memorial forsøkene gir vesentlig lavere hastighet. For den videreutviklede og forbedrede likning 3.1 er resultatet en hastighet på 3,5 m/s for en 100 MW brann, som en kan se ved hjelp av figur 3.5. I den samme figuren kan en se at den målte kritiske hastigheten ligger på 2,5 – 3,0 m/s.

Ifølge Carvel, R.O [31] finnes det ingen internasjonal standard for ventilasjonshastighet. Noen land har heller ikke nasjonale standarder. I en studie fra 1998 [32] som baserte seg på nasjonale tilnærminger til lovverk ble det påvist at de landene som hadde en anbefalt ventilasjonshastighet for å kontrollere røyk i en veitunnel anbefalte en minimum ventilasjonshastighet på 3 m/s for å kunne foreta rednings- og slukkearbeid i tunneler med langsgående ventilasjon.

2.6 Regelverk

I dette kapittelet vil det gjennomgås forskjellig regelverk med hensyn på tunneldimensjonering, bruk og sikkerhet som er hentet fra «Håndbok 21» [8].

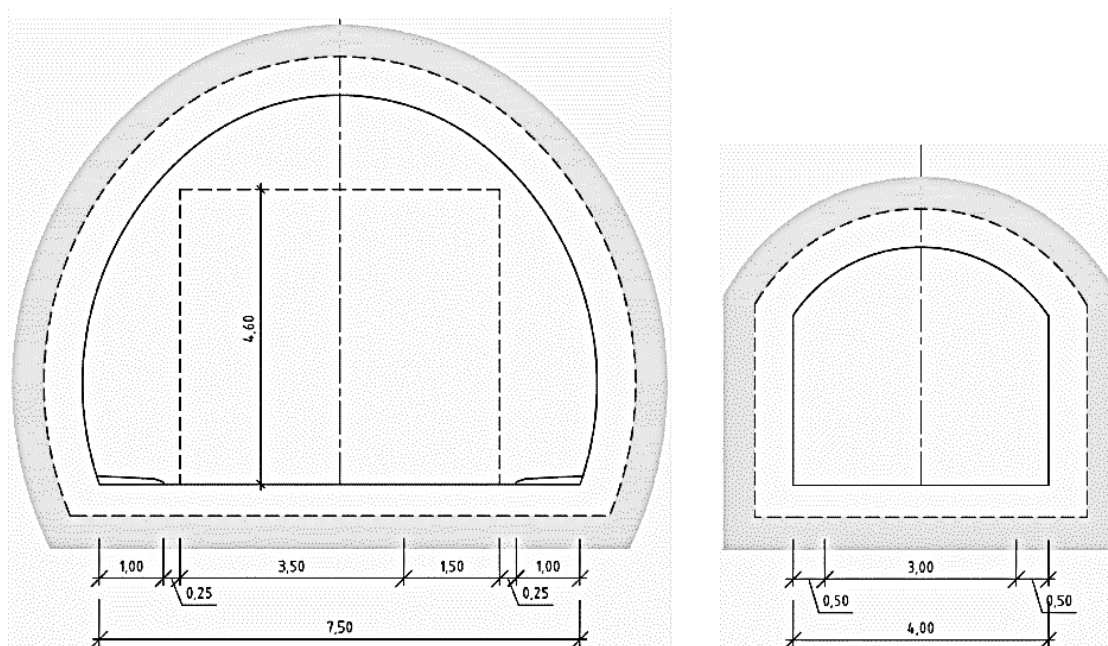
2.6.1 Geometrisk utforming

En vei i tunnel skiller seg fra en ordinær vei i åpne omgivelser. Veiforholdene vil i liten grad være påvirket av været, det vil stort sett være bra lys- og siktforhold og den vil trafikalt sett være sikrere å bruke [33]. Utformingselementer for en tunnel er markant annerledes enn for vei i åpne omgivelser, og en må i stor grad ta hensyn til vidt forskjellige sikkerhetsrisikoer.

De ulike kravene til sikkerhetsstandard øker med økende trafikkmengde og tunnellengde. Tunneler er derfor delt inn i tunnelklasser og tunnelprofiler som er bestemmende for geometri og utrustning.

2.6.2 Tunnelprofil og tunnelklasse

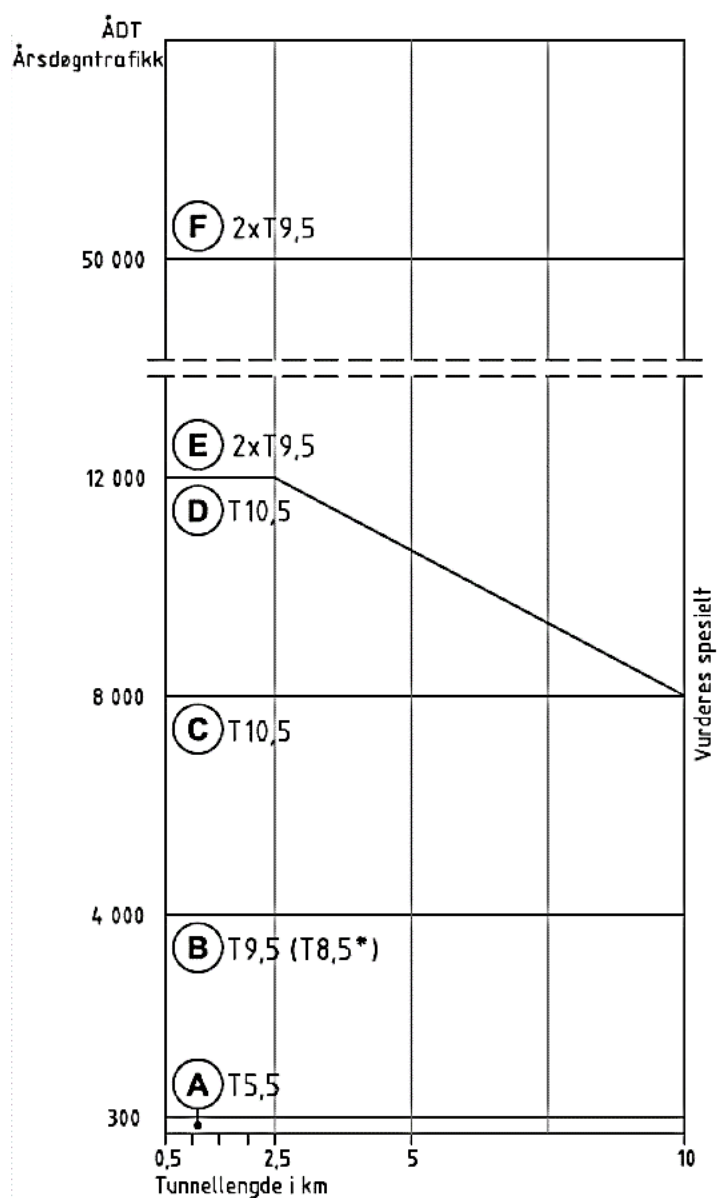
Tunnelprofilene baserer seg på den totale bredden til kjørebanelen. De blir utformet delvis sirkulært over kjørebanelen ved profil T5,5 til T14 med et krav om fri høyde på 4,6 meter.



Figur 2.10: Tunnelprofil T7,5 og T4 [8] kap. 4.5

De ulike tunnelprofilene er ment for forskjellige tunnelklasser. Valg av klasser skjer etter en vurdering av trafikkmengde og tunnellengde som vist i figur 2.2. Årsdøgnetrafikk (ÅDT) er summen av antall kjøretøy som passerer et punkt på en veistrekning, for begge retninger gjennom året, dividert på årets dager. Tunnelklasse skal velges ut fra den trafikkmengde som kan forventes 20 år etter at tunnelen er åpnet for trafikk (ÅDT (20)).

Tunnelklassene er utgangspunktet for å bestemme antall tunnellop, avstand mellom og utforming av snunisjer, behov for havarilommer, gangbare tverrforbindelser, nødutganger og annen sikkerhetsutrustning.



Figur 2.11: Tunnelklasser for tunneler over 500m [8] kap. 4.4

2.6.3 Stigning og fall

«Med unntak for undersjøiske tunneler skal ikke vei i tunnel bygges med mer enn 5 % stigning og fall. Vei i undersjøiske tunneler skal ikke overskride kravene til stigning gitt i tabell 4.1» [12] kap. 4.2.3.

| ÅDT (20) | Toveis trafikk | | Ensrettet trafikk | |
|----------------|----------------|---------|-------------------|----------|
| | 0 – 1 500 | > 1 500 | < 15 000 | > 15 000 |
| Maks. stigning | 8 % | 7 % | 7 % | 6 % |

Tabell 2.1: Maksimal stigning for vei i undersjøiske tunneler [8] kap. 4.2.3

Et viktig poeng for stigning og fall i en undersjøisk tunnel er at f.eks. et fall på 7 % med høydeforskjell på 50 meter begrenser kjørelengde til ca. 700 meter. Mens et tilsvarende fall

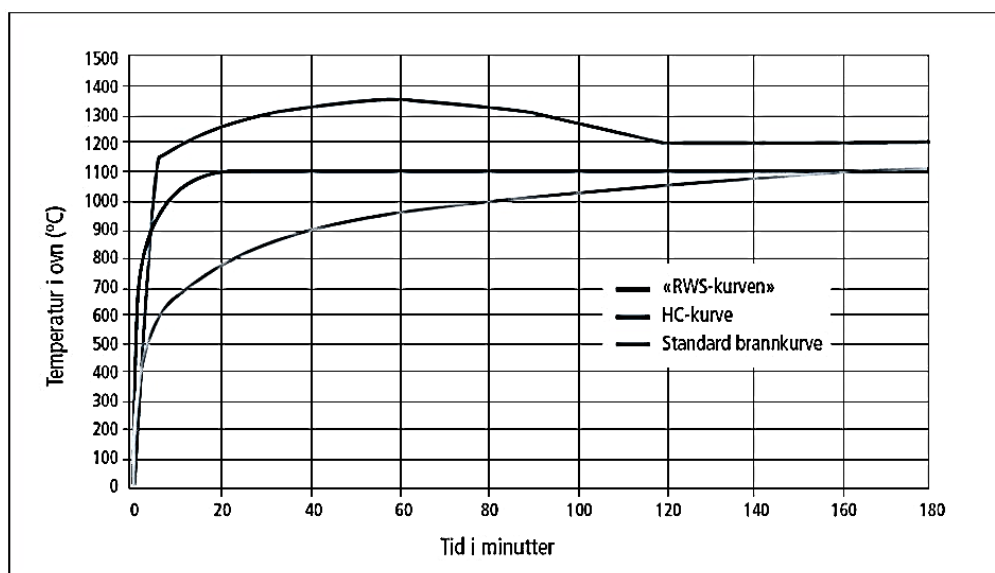
med en høydeforskjell på 600 meter vil gi en kjørelengde på ca. 8600 meter, som vil være problematisk.

2.6.4 Dimensjonering for brann

Dimensjonerende brann og krav til betong/sprøytebetong som brannbeskyttelse på brennbar isolasjon og til strukturbeskyttelse i forhold til tunnelklasser er gitt i tabellen under.

| 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 |

Tabell 2.2: Dimensjonerende brann [8] kap. 5.4.2



Figur 2.12: Standard tid-temperaturkurver for branndimensjonering [8] kap. 5.4.2

Standard brannkurve er iht. ISO 834, HC-kurven er en hydrokarbonbrann definert i ISO 834-3, mens RWS-kurven er definert av Rijkswaterstaat i Nederland.

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.

For å gi en indikasjon for temperaturskalaen vil det f.eks. oppstå små skader i yttersjiktet av tunnelbetongen ved temperatur opp til 200 °C. Eksplosiv avskalling og merkbart styrketap opp til 600 °C. 600 - 1400 °C vil føre til totalt styrketap, strukturell kollaps og til slutt smelting av betong som begynner ved 1200 °C. Smelting forekommer spesielt ved en RWS-brann.

Tilstrekkelig beskyttelse oppnås ved at gjennomsnittstemperatur mot brennbart materiale ikke overstiger 250 °C etter 60 minutters prøving, samt at det ikke skal oppstå vedvarende flammer i brennbart materiale [2].

2.6.5 Ventilasjon

Dagens standard påkrever at det skal monteres ventilasjonsanlegg i alle tunneler over 1000 meter og ÅDT over 1000. I tillegg skal luftkvaliteten overvåkes med måleutstyr for CO og NO₂.

For langsgående ventilasjon vil forurensningsnivået øke i tunnelens lengderetning. Dette oppstår som følge av trafikkmengden i tunnelen og annen utslipp som er nærliggende tunnelen. Hvis f.eks. konsentrasjonen av NO₂ eller CO stiger over henholdsvis 1,5 ppm og 50 ppm i tunnelen må ventilasjonsanlegget kunne reguleres for å redusere utslippet eller i verste fall må tunnelen stenges [8] kap.10.4.

Verdiene over er forholdsvis konservative med tanke på menneskets tåleevne som fremkommer i figuren under hentet fra «Brannfysikk – fra teori til praksis» [37]:

| CO-innhold i innåndningsluft | | Reaksjon |
|---------------------------------|-----------|---|
| % | ppm | |
| 0,01 | 100 | Eksposering kan aksepteres i fleretimer |
| 0,04-0,05 | 400-500 | Ingen merkbar effekt etter 1 time |
| 0,06-0,07 | 600-700 | Så vidt merkbar effekt 1 time |
| 0,10-0,12 | 1000-1200 | Ubehag etter en time (øresus, hodepine) |
| 0,15-0,20 | 1500-2000 | Farlig ved eksponering i 1 time (lammelse, bevistløshet) |
| 0,30 | 3000 | Farlig ved en halv times eksponering |
| 1,00 | 10000 | Dødelig ved 1 minutts eksponering |

Figur 2.13: Kroppens reaksjoner på CO-innhold i luften

Ventilasjonsystemet i norske tunneler dimensjoneres bl.a. ut fra krav til luftkvalitet og brannventilasjon. Naturlig trekk og ekstern vind vil påvirke behovet for brannventilasjon, men dette blir kompensert for ved beregninger og analyser.

Nødvendig ventilasjonshastighet oppnås ved bruks av impulsvifter som blir plassert i tunnelens lengderetning 60 meter etter hverandre. Ventilasjonen avhenger av stigning i tunnelen. Hvis stigningen er under 2 % blir det brukt en minimum ventiasjonshastighet avhengig av tunnelklasse og lengde som gitt i tabellen under.

| Tunnelklasse | Tunnellengde | Dimensjonerende branneffekt | Eksponerings- kurve * | 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 |

Tabell 2.3: Dimensjoneringskrav for brannventilasjon i tunnel med stigning $\leq 2\%$ [8] kap. 10.4.4

Ved stigning over 2 % og lengde over 500 meter må lufthastigheten beregnes med en modell fra vedlegg D i håndbok 21. Det er viktig å påpeke at beregningene i vedlegget er ment for å gi et estimat for viftekapasitet på et tidlig planleggingsstadium. Til slutt må det foretas en beregning basert på risikoanalyse.

Forskjellige tunnelkonfigurasjoner vil gi forskjellige viftekonfigurasjoner. Nødvendig ventilasjonshastighet vil øke med økende helning, branneffekt, ekstern vind, tverrsnittsareal, og tunnellengde [8] vedlegg D. Beregningsmodellen baserer seg på at røykgassene stige som i en skorstein på grunn av oppdrift. Beregningene skal utføres for situasjonen 60 minutter etter brannstart.

Modellen er gitt for branner i størrelsesorden 20, 50 og 100 MW og fremstilles grafisk som funksjon av tunnellengde og stigning. Resultatene baseres på gjennomsnittlig stigning (2 %, 4 %, 6 %, 8 % og 10 %) og tunnellengde inntil 10 km. Det blir brukt to typer tunneler i modellen, en som har stigning i hele lengden og en som først har helning og påfølgende stigning. Den sistnevnte er vanlig i undersjøiske tunneler.

For å finne et estimat for den nødvendige skyvekraften i en tunnel som har helning over 2 % blir det brukt likning nr.6 som beregner trykkbidrag Δp , fra naturlig vind og oppdrift i kombinasjon med likning nr.7 sammen med de grafiske modellene fra Håndbok 21, vedlegg D. Likning nr.6 er gitt ved:

$$\Delta p_s = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ute} \cdot u_{\infty}^2 + (\rho_{ute} - \rho_{inne}) \cdot g \cdot \Delta H$$

14: Trykkbidrag [Pa]

hvor:

u_{∞} = ekstern vind [m/s]

ρ = luftens tetthet, bestemmes av tilstandslikningen for luft,
atmosfærisk trykk delt på gasskonstanten og temperatur i Kelvin [kg/m³]

g = tyngdens akselerasjon [m/s²]

ΔH = høydeforskjell mellom tunnelåpningene [m]

Mens nødvendig skyvekraft er gitt ved likning nr.7:

$$P_V = \frac{n_s}{n_v} \cdot \Delta p_s \cdot A \quad (\text{N})$$

15: Nødvendig skyvekraft [N]

hvor:

$$n_s = \text{sikkerhetsfaktor for beregninger, anbefales lik 1,1} \quad [-]$$

$$n_v = \text{virkningsgrad for vifter} \quad [-]$$

$$\Delta p_s = \text{trykkbidrag fra naturlig vind og oppdrift} \quad [\text{N}]$$

$$A = \text{tunnelens tverrsnitt} \quad [\text{m}^2]$$

Som et eksempel kan en finne estimert trykk og hastighet for ventilasjonen, samt nødvendig skyvekraft etter Håndbok 21 for Memorial tunnelen (temperatur og ekstern vind er antatt) som har følgende verdier:

- Brann: 100 MW
- Tunnellengde: 854 m
- Tunnelstverrsnitt: 60 m²
- Temperatur utenfor og innenfor tunnel: 0 °C og 5 °C
- Tunnelhelning: 3,2 %
- Ekstern vind: 3 m/s og virkningsgrad for vifter: 0,8

1. En begynner med å finne luftens tetthet ute og inne:

$$\rho_{ute} = 1,01 \cdot 10^5 / 287 / (273 + 0) = 1,29 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{inne} = 1,01 \cdot 10^5 / 287 / (273 + 5) = 1,26 \text{ kg/m}^3$$

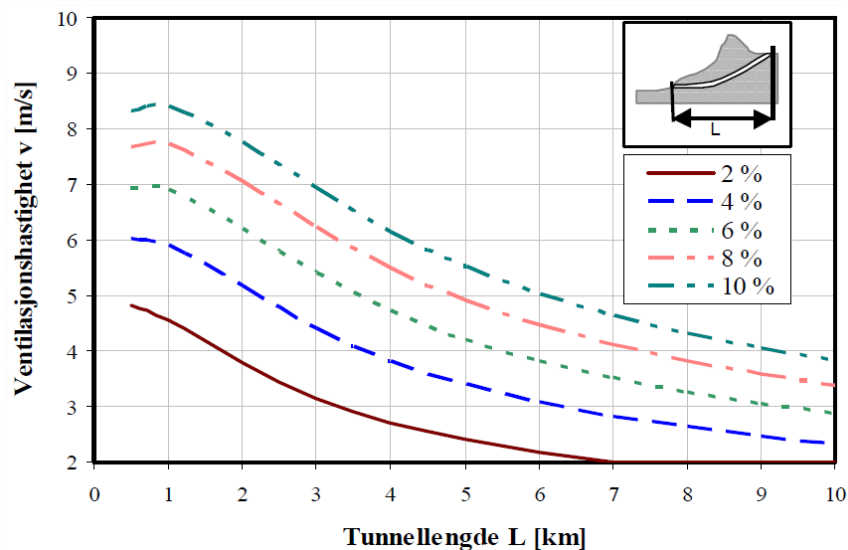
2. Høydeforskjellen mellom tunnelåpningene:

$$\Delta H = 0,032 \cdot 854 = \underline{27m}$$

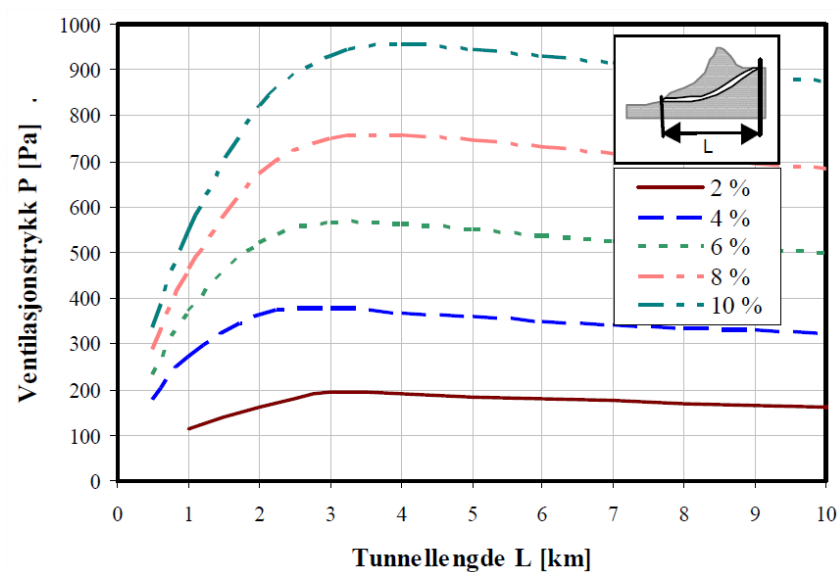
3. Trykkbidraget, Δp_s :

$$\Delta p_s = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \cdot 3^2 + (1,29 - 1,26) \cdot 9,81 \cdot 27 = \underline{14Pa}$$

Ventilasjons hastigheten er gitt i figur D.23 basert på 100MW brann og $\Delta p = 16\text{Pa}$ fra Håndbok 21 som vist under. De grafiske fremstillingene er basert på forventet branntrykk. Brannen er i den ene enden av tunnelen og viftene blåser nedover. Trykkbidraget $\Delta p = 14\text{Pa}$ er nærmest til den gitte verdi på 16Pa for figuren som gir en estimert ventilasjonshastighet på ca. 5,5 m/s for tunnelen basert på lengde og helning til Memorial tunnelen.


 Figur 2.14: Ventilasjonshastighet ved 100 MW brann, jevn helning og $\Delta p = 16\text{Pa}$ [8]

Tilsvarende ser en at det estimerte ventilasjonstrykket blir ca. 200Pa


 Figur 2.15: Ventilasjonstrykk ved 100 MW brann, jevn helning og $\Delta p = 16\text{Pa}$ [8]

4. Den nødvendige skyvekraften basert på trykkbidraget for tunnelen blir dermed:

$$P_V = \frac{n_s}{n_v} \cdot \Delta p_s \cdot A = \frac{1,1}{0,8} \cdot 14 \cdot 60 = \underline{1155N}$$

2.6.6 Endringer i regelverket som følge av EUs branndirektiv

Etter alvorlige tunnelbranner i Europa med bl.a. Mont Blanc, Tauern og St.Gotthard, har en etter årtusenskiftet fått økt oppmerksomhet på brannsikkerheten. Dette førte til at EUs tunneldirektiv foretok en større undersøkelse av standarden for de daværende 352 europeiske tunneler. 111 av

tunnelene var på det såkalte TERN-vegnettet (Trans European Road Network), sett på som de viktigste veistrekningene i Europa.

Ut i fra dette ble det valgt ut 52 tunneler i 14 forskjellige land, der i blant Norge, som ble nøye inspisert og rangert etter de nye kravene fra direktivet. Fra inspeksjonen der det ble brukt en skala fra 1 – 5, der 1 var dårlig og 5 best, kom det frem at nesten halvparten av tunnelene lå på gjennomsnittet eller dårligere. For Norges del, som representerte 5 tunneler, havnet tre av tunnelene på den karakter 1 og to på karakter 4.

Dette førte til at EUs branndirektivet påla alle EU- og EØS- land en rekke krav om utbedring av tunnelsikkerheten. De viktigste kravene til retningslinjer for minimum tunnelsikkerhet var:

- Maksimum 5 % stigningsgrad, med unntak for undersjøiske tunneler
- Rømningslys i alle tunneler
- TV-overvåking i alle tunneler over 3 km og med ÅDT 4000 eller lyssignaler

Kravene skulle tre i kraft fra 2006 for nye tunneler, mens oppgraderinger for eksisterende tunneler skulle være utført til 2019 [34].

2.7 Simulering av tunnelbrann

Simulering av tunnelbrann blir som regel utført ved hjelp av håndberegninger, sone- og feltmodeller.

2.7.1 Håndberegningsmodeller

Håndberegningsmodeller kan være basert på empiriske sammenhenger som kan løses for hånd eller enkle regneark og krever liten arbeidsinnsats. Modellene er nyttige ved enkle problemer der det er et behov for raskt svar. Det er flere begrensninger med slike beregningsmodeller. Forholdene må enten være konstante eller bare gyldige for en bestemt tid. I tillegg er de fleste likningene semi-empiriske, som betyr at de har blitt utviklet og basert på fysiske eksperimenter. En bør kjenne til disse forsøkene for å kunne avgjøre om modellen er relevant til oppgaven.

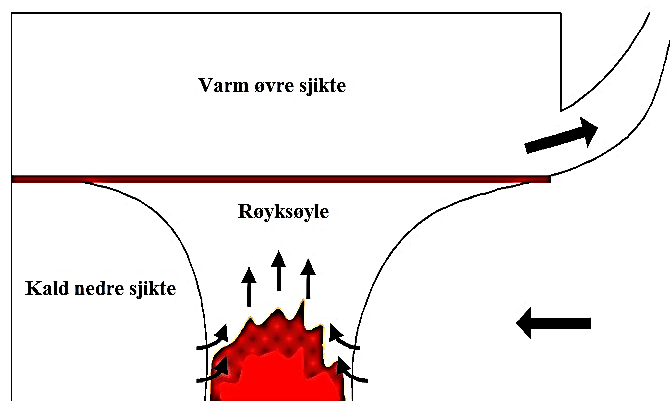
Variabler som kan kvantifiseres ved hjelp av håndberegninger er flammehøyde, røyksøyrens temperatur og hastighet, takstrålens temperatur og hastighet, tid og effektgrense til overtenning, røyklagets høyde, sikt, tid til røykfylling, fordampningsrate, aktiveringstid for røyk- og varmedetektorer, rømning og toksisitet.

Beregningene blir brukt fra anerkjente koder og standarder som HO-3/2000, CIBSE, BR368, Eurokoder, fagbøker [11], [12] og andre tidsskrifter [35], [36]. Her kan en bruke estimerte tabellverdier til beregning og få verifikasjon fra tabeller. Behov for forkunnskap er lav og de er godt egnet for situasjoner med relativt enkel geometri og strømningsforhold.

2.7.2 Sonemodeller

Sonemodeller er dataprogrammer som er enkelt å bruke generer relativt raske svar. Det består av algoritmer som beregner masse og energibalanse ved brann som løses numerisk for hvert tidssteg [37]. Modellen definerer forskjellige sjikter i ei branncelle, i tillegg til størrelse og temperatur i brannutviklingen [38]. Den består av ett øvre sjikt med varm røyk og ett nedre sjikt med kald røyk, brann med røyksøyle, røyk ut av cellen og frisk luft inn i cellen (fig.2.13).

Programmene beregner også strømming av røyk og giftige produkter. Grunnleggende for modellen er at hvert sjikt har uniforme egenskaper, dvs. samme temperatur, tetthet, gasskonsentrasjon o.l.



Figur 2.16: Sonemodell

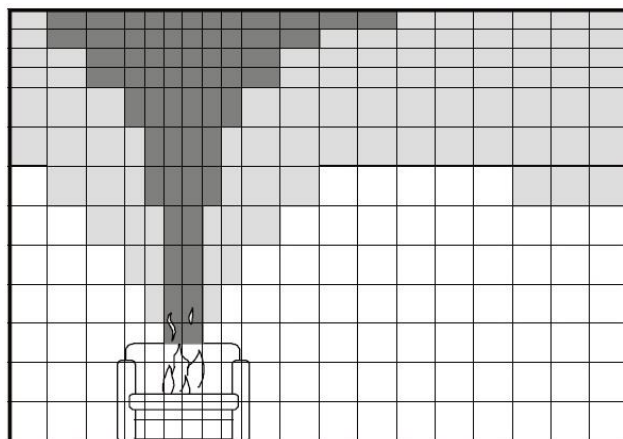
Modellen er godt egnet for situasjoner med relativ enkel geometri og strømningsforhold. Her kan en enkelt og raskt se utviklingen som funksjon av tid, men det tas ikke hensyn til momentet til røyken eller strømningsforhold. Brannen spesifiseres av brukeren der modellene ikke kan beregne brannspredning. Vegg- og hjørne-effekter som skaper tilbakestråling til brenselet blir ikke tatt hensyn til. I tillegg fungerer modellen ofte dårlig for overliggende plan, den tar ikke hensyn til flammer ut av åpninger, transiente strømmer i korridorer og sjakter. Det finnes mange typer sonemodeller, de mest vanlige er CFAST/FAST, Argos og FPETool.

2.7.3 Feltmodeller

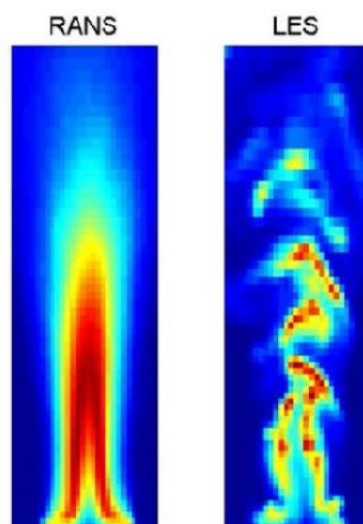
Feltmodeller er matematiske modeller basert på strømningsdynamikk, CFD (Computational Fluid Dynamics). Dette er prediktive verktøy for å beskrive spredningen av brann- og røyk bevegelsen tredimensjonalt når bruken av håndberegninger eller sonemodell ikke strekker til. Den består som regel av en pre-prosessor, "solver", og en post-prosessor.

Pre-prosessoren brukes ved hjelp av f.eks Notepad eller annen tekst program der en skriver inn koder/inndata for geometri, materialtype, brann type og effekt, målepunkter o.l. Solver er selve FDS programmet som utfører beregningene som kjøres i DOS (Disk Operating System). Mens post-prosessoren heter SMW (Smokeview) og tillater visualisering av utdata fra FDS.

Feltmodeller kan kreve mye datakraft til oppbygging av modellen og gjennomføring av selve beregningen. Den deler opp rommet i mange tusen celler eller kontrollvolumer der konservasjonslikningene RANS (Reynold Avarage Navier-Stokes) ved turbulens brukes på hver enkel celle for å beregne masse, moment, energi, temperatur, røyktetthet, trykk, hastighet og andre variabler (fig.2.18) [39]. En annen måte å modellere strømmingen på kalles Large Eddy Simulation (LES) som brukes i FDS. Denne modellerer tidsavhengige strømmer for store virvler og for beregner gjennomsnittsverdien for de små, samtidig som den gir et mer reelt bevegelsesmønster.



Figur 2.17: Brannrom med kontrollvolumer



Figur 2.18: RANS og LES

Mens RANS-modellen omhandler de statistiske egenskapene ved strømming, deler LES det turbulente strømningsområdet i et tredimensjonalt rutenett ved hjelp av lengdeskalaer eller mer kjent som «subgrid-scale»-enheter.

Feltmodell gir realistisk representasjon av geometri, transient fremstilling av brannenforløpet og det aktuelle brenselet. Den tar også for seg de gjeldende strømmingene i volumet i forhold til ventilasjon. I tillegg er det mulig å øke detaljeringsgrad og nøyaktigheten av resultater ved bruk av flere kontrollvolum.

Det er noen utfordringer og begrensninger med CFD. Det er ofte tidskrevende og lite fleksibelt i forhold til design endringer. Det settes store krav til modeller med hensyn på valg av scenario, grid oppløsning og antagelser. Det kan oppstå problem i forbindelse med overtenning og fullt utviklet brann. Brannen modelleres ikke spesielt. HRR øker ikke som følge av tilbakestråling og det er vanskelig å estimere total HRR når flere ting brenner samtidig. Det finnes mange ulike CFD programmer: FDS, CFX, FLACX, SmartFire, mfl.

3 Memorial tunnel program

Teorien til dette delkapittel er hentet fra rapporten om MTFVTP og er den tunnelen som blir brukt i simuleringsarbeidet for hovedoppgaven.

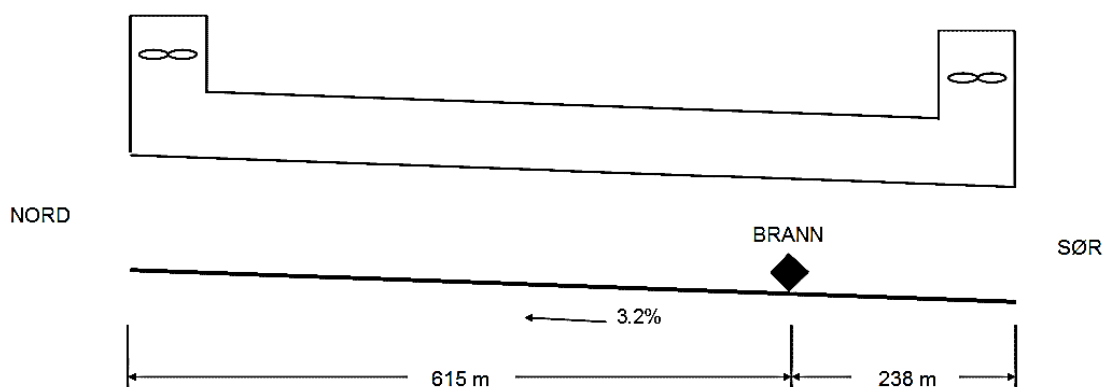
Programmet ble laget for å tilby fullskala brannventilasjons test for å bistå i utforming og drift av tunneler. De grunnleggende målene var å utvikle data som ville muliggjøre en definitiv evaluering av personsikkerhet ved ulike ventilasjonssystemer i en brannsituasjon.

3.1 Historie

The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP) besto av en rekke fullskala brann tester utført i en forlatt veitunnel. Ulike tunnelventilasjonsanlegg og konfigurasjoner av slike systemer ble operert for å evaluere henholdsvis røyk og temperatur. Testene genererte en betydelig database med relevans for utforming og drift av ventilasjonssystem i tunnel ved brannsituasjoner.

Behovet for et slikt program ble identifisert på 70-tallet av medlemmer i «American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers» (ASHRAE) teknikk-komite 5.9 i USA, som formulerte mål og omfang av arbeid i «Phase I - Development of Test Program» rapport. Den anerkjente samfunnets økende behov for å bedre personsikkerhet og riktig utforming og drift av veitunnelens ventilasjonssystemer ved brann.

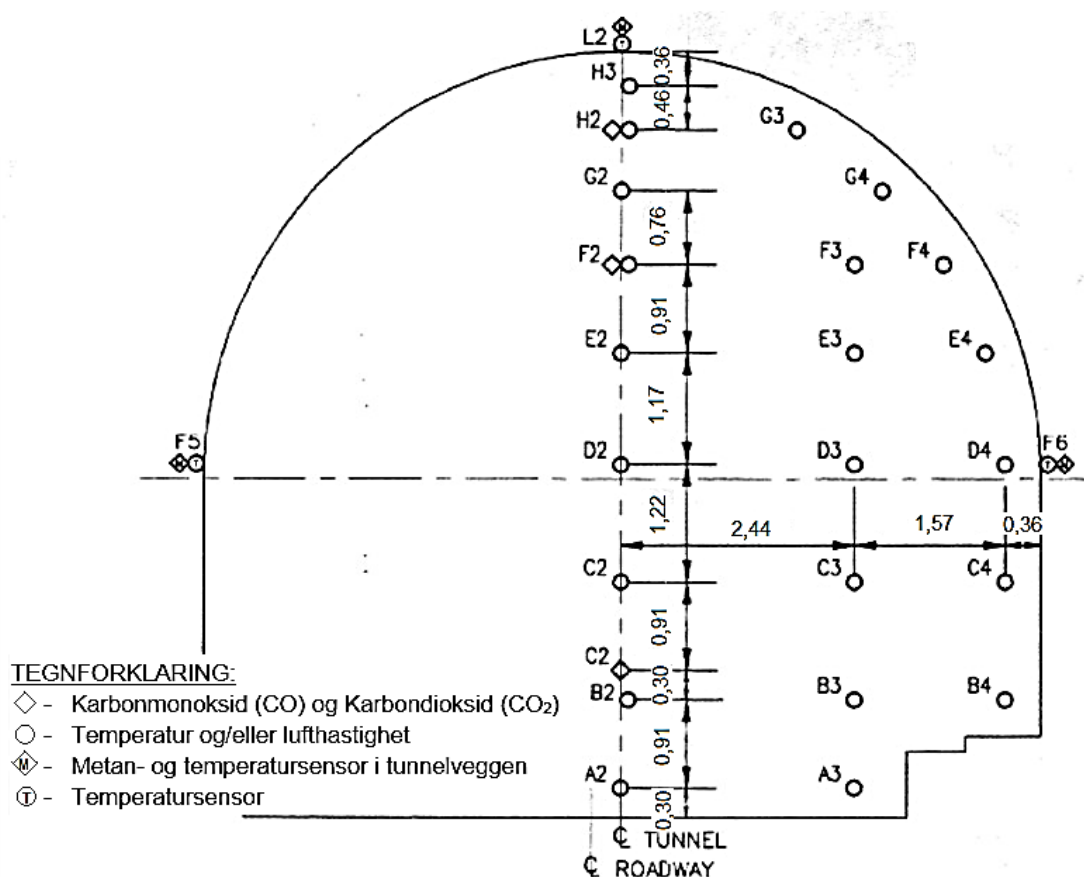
The Memorial tunnelen er lokalisert nær Charleston i West Virginia USA. Dette er en 853 meter lang tofelts fjelltunnel med en 3,2 % stigning (fig.3.1). Testforsøkene startet september 1993 og det siste av totalt 98 tester ble avsluttet mars 1995. Ved forberedelse til MTFVTP ble tunnelen endret og instrumentert for å kunne driftes og foreta evalueringer med ulike typer transversventilasjon, naturlig-, og langsgående ventilasjonskonfigurasjoner. I denne hovedoppgaven vil det bli fokusert på langsgående ventilasjon både i beregningene, simulering og videre i teorien.



Figur 3.1: Memorial tunnel størrelse [19]

3.2 Testforsøkene

Under forsøkene ble tunnelen utstyrt med sensorer som målte lufthastighet, temperatur, karbonmonoksid (CO), karbondioksid (CO₂) og metan (CH₄) i forskjellige områder av tunnelen som vist på figuren under. Dataen ble registrert og lagret. Røykutviklingen og bevegelse og den resulterende effekten på sikt ble vurdert av syv fjernstyrte overvåkningskameraer.



Figur 3.2: Målepunkter i tunnelverrsnitt [19]

Begrensningene til synlighet forårsaket av røyk skjedde raskere enn utvikling av høy temperatur som kunne være ødeleggende. Karbonmonoksid (CO) nivåer nær veien overskride ikke retningslinjene i testprogrammet.

Ventilasjonsystemets effektivitet i forvaltning av røyk- og temperaturendringer ble testet for fire ulike størrelser: 10, 20, 50 og 100MW. For å gi en indikasjon på de ulike størrelsene kan en vanlig personbil generere en HRR 4MW, en buss 30MW og en lastebil 15-130MW [40].

For langsgående ventilasjon ble det plassert 8 rekker med vifter (fig.3.4), der en rekke bestod av 3 vifter (fig.3.3). Seks rekker var plassert nord for brannområdet og de to siste sør for brannområdet. Viftene var utstyrt med en 56 kilowatts motor og hadde en innvendig diameter på 1372 mm. De kunne forflytte 43 m³/s mengde luft, tålte temperatur opp til 300 °C og genererte en starthastighet på 34,2 m/s.



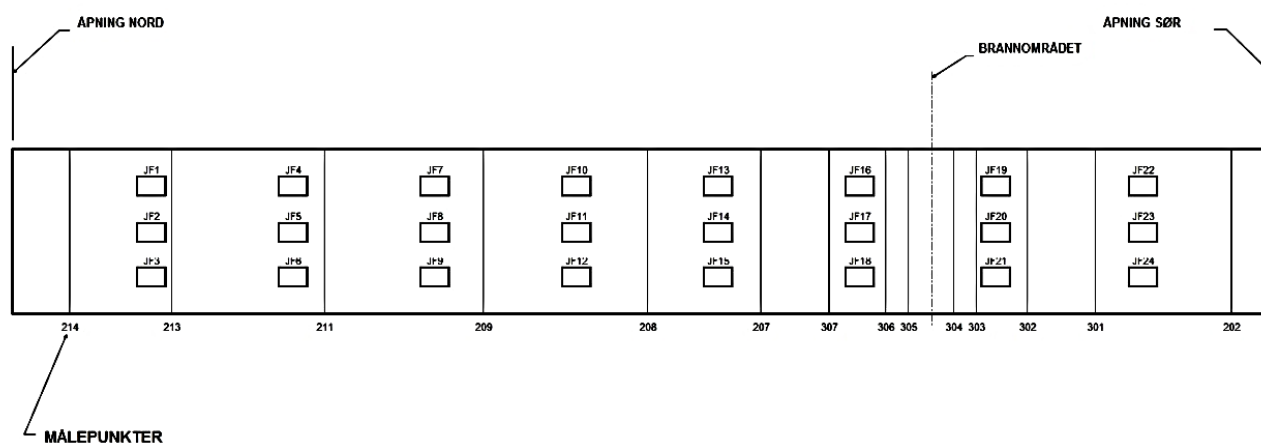
Figur 3.3: Vifter sør for brannområdet [10]

I tillegg til varierende brannstørrelse, ble det foretatt systematisk variasjon av luftmengde, langsgående ventilasjon i nærheten av brannen og responstiden på viftene for hver enkelt av ventilasjonssystemene. For å kunne variere brannstørrelsen ble det foretatt systematisk variasjon i lufthastighet.

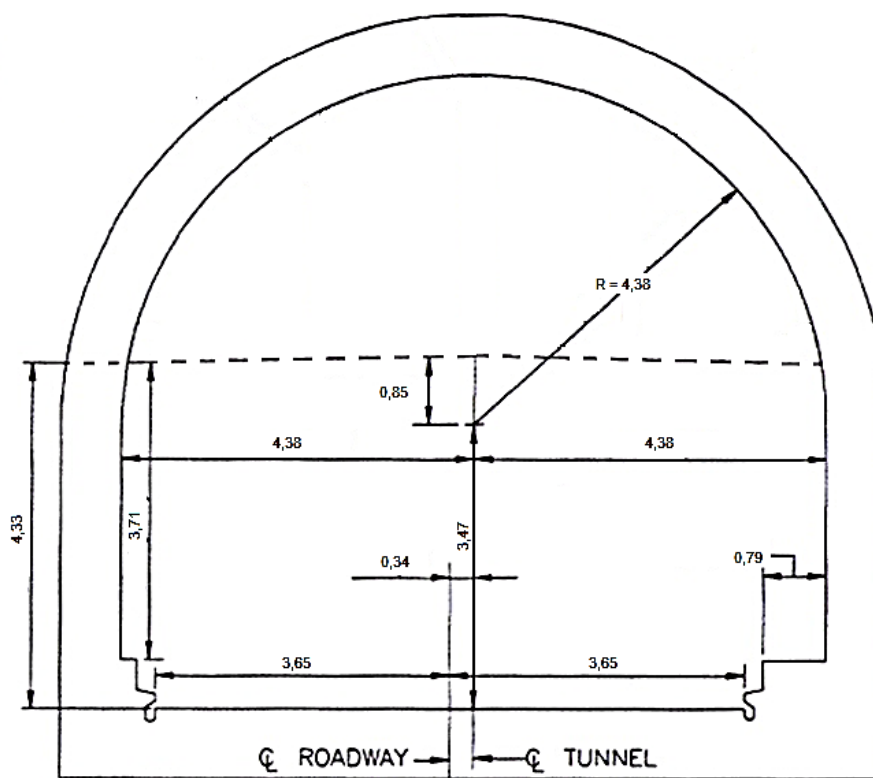
I Memorial tunnel brannventilasjonstester ble det påvist at langsgående luftstrøm i nærheten av en brann var like viktig som utvinningsrate for temperatur og røykstyring. Derfor ble det ikke tilstrekkelig å angi ventilasjonsrate for temperatur og røykstyring. I noen tester ble nord og/eller søråpningen tilpasset for å variere langsgående luftstrømmer over brannstedet. På den måten ble den langsgående ventilasjonen over brannstedet variert, mens eksosraten opprettholdt. Dette gav innsikt i betydningen av langsgående luftstrøm i styring og kontroll av røyk og varme gasser produsert av tunnelbrann.

Viftens responstid, intervallet mellom utbruddet av brann og ventilasjonssystemet aktivering, ble satt til 0, 2 og 5 minutter. Kapasiteten for viftene i langsgående ventilasjon var på $43 \text{ m}^3/\text{s}$.

Forsøk med naturlig ventilasjonsforhold ble bl.a. tatt med for å observere lengden, dybden, hastigheten og stabiliteten av den stratifiserte røyklaget som ble dannet av de forskjellige brannstørrelsene.



Figur 3.4: Målestasjoner og vifteplassering [19]



Figur 3.5: Tunneltverrsnitt – mål i meter [19]

3.3 Kritisk hastighet og backlayering i MTFVTP

Prosedyrer for å bestemme den kritiske hastigheten i MTFVTP, som var å finne den laveste lufthastigheten for å hindre backlayering, var å drive en forutbestemt antall impulsvifter i overkant av minstekravet og deretter sekvensielt redusere hastigheten til backlayering oppstod. For så å øke hastigheten til røykkontroll ble etablert. Hensikten med denne tilnærmingen var å finne den tilstanden hvor de termiske kreftene generert av brannen ble balansert av treghetskreftene fra den langsgående luftstrømmen ved brannområdet.

Under gjennomføring av testene, ble forekomsten av backlayering bestemt visuelt via overvåkningskameraene 60 meter nord for brannområdet. Vanligvis når backlayering ble forhindret kunne en observere røyk sør for 305 punket (fig.3.4) som var 12 meter fra senterområdet til brannen.

Foruten om de målte verdiene ble det beregnet en teoretisk kritisk lufthastighet basert på ligningen til P.H. Thomas som tidligere presentert i (kap.2.5.3) og videreutviklet [19] kap.8.7.1 med hensyn på Froude konstanten, Fr ved:

$$V_c = K_1 K_g \left(\frac{gH\dot{Q}}{\rho_0 c_p A T_f} \right)^{1/3}$$

16 Teoretisk kritisk lufthastighet [m/s]

$$K_1 = Fr_c^{-1/3}$$

$$K_g = 1 + 0,0374(\text{grade})^{0,8}$$

$$Fr_c = \frac{gH(\rho_0 - \rho_f)}{\rho_0 V_0^2}$$

$$T_f = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p A T_f} + T$$

hvor:

| | | |
|-----------|--|----------------------|
| g | = gravitasjonskonstanten | [m/s ²] |
| H | = tunnelhøyde | [m] |
| \dot{Q} | = varmeproduksjon (HRR) | [kW] |
| ρ_0 | = lufttetthet utenfor brannområdet | [kg/m ³] |
| ρ_f | = lufttetthet i brannområdet | [kg/m ³] |
| c_p | = varmekapasitet til luft (1,005) | [kJ/gK] |
| V_0 | = lufthastighet | [m/s] |
| A | = tunnel tverrsnitt (60 m ²) | [m ²] |
| T_f | = temperatur i brannområdet | [K] |
| grade | = absoluttverdi for tunnelhelning | [%] |
| T_u | = temperatur i luft utenfor brannområdet | [K] |
| Fr_c | = det kritiske Froude nummer (4,5) | [-] |

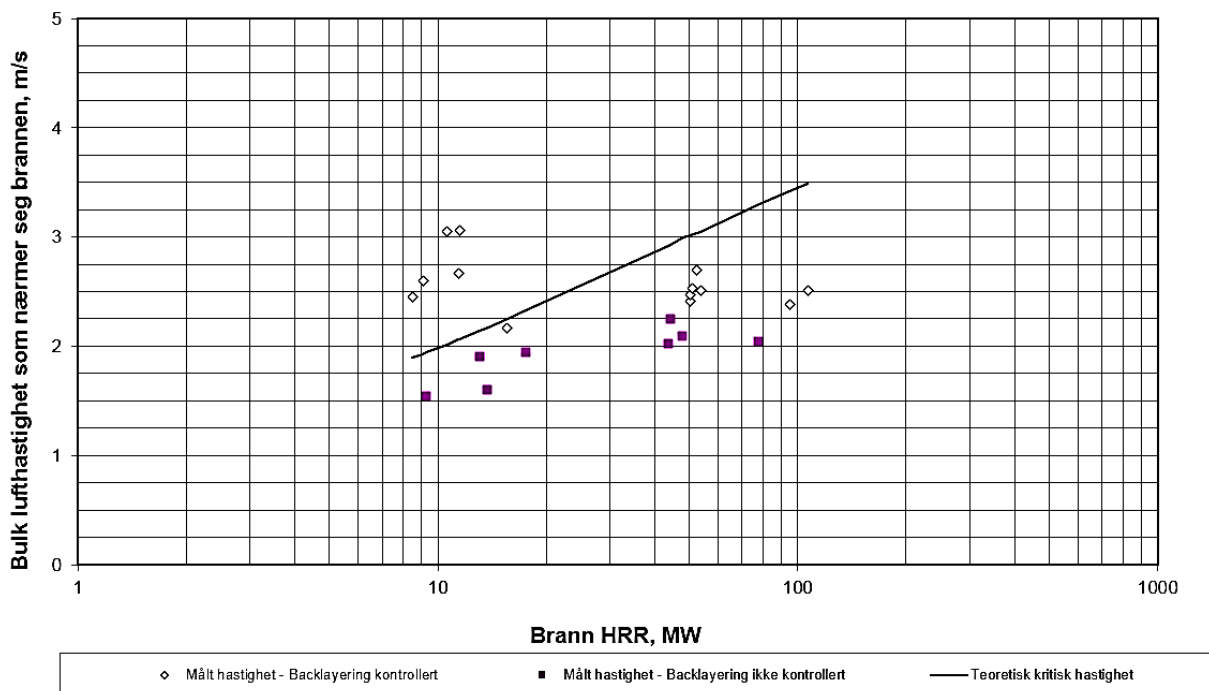
Fullskalaforsøk i MTFVTP har vist at den kritiske verdien for Froude nummer strekker seg fra 4,5 til 6,7. Konservativ verdi 4,5 ble brukt for å kalkulere den kritiske hastigheten.

Den teoretiske lufthastigheten ble bestemt ved å løse ligning 3.1. Denne lufthastigheten var den minste dynamiske likevekt for at den ventilerte luften ved brannområdet skulle forhindre backlayering.

En sammenligning av den målte lufthastighet og den teoretiske kritiske lufthastighet er vist i figuren under, hvor hastigheten er plottet som en funksjon av varmeutviklingshastighet. En logaritmisk skala har vært brukt for x-aksen, siden hastigheten forventes å variere med kubikkroten av varmeutviklingshastighet. Den generelle trenden indikerer at den teoretiske kritiske lufthastighet ble over estimert, særlig ved de høyere HRR.

Lufthastighet vs. HRR

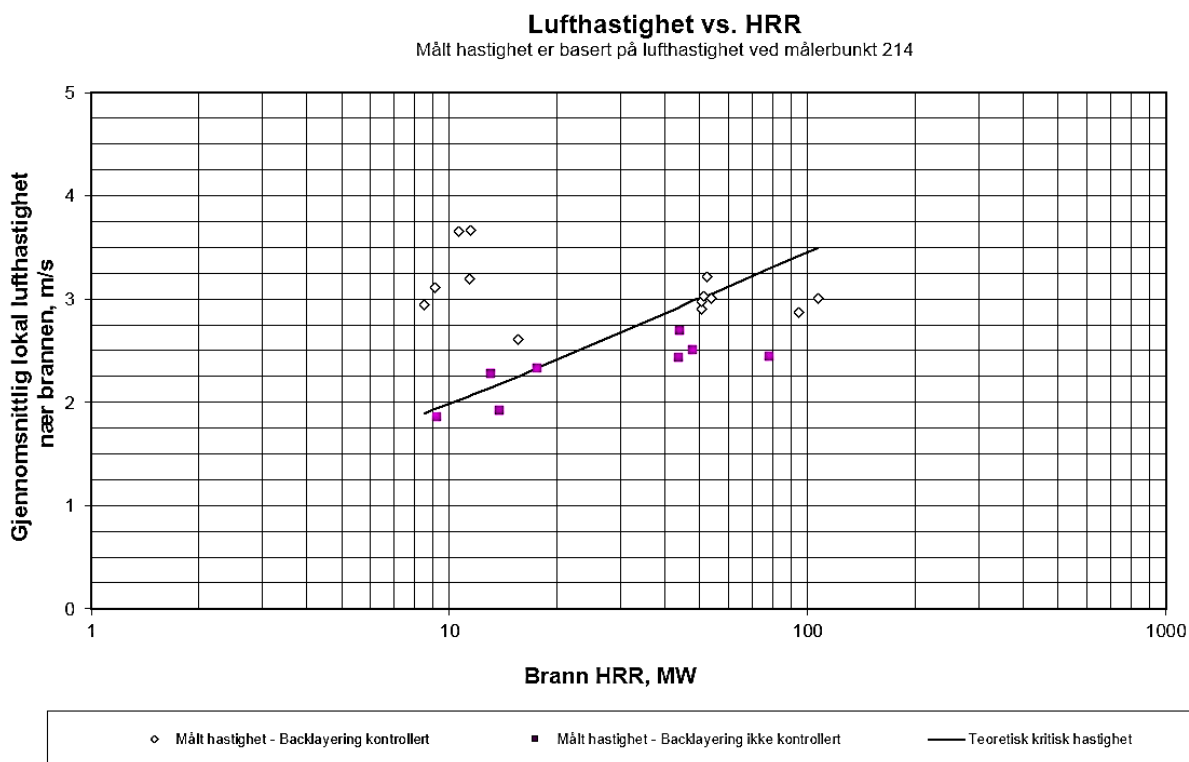
Målt hastighet er basert på lufthastighet ved målerbunkt 214


Figur 3.6: Lufthastighet vs. HRR ved bulk lufthastighet [19]

Avviket mellom de teoretiske og målte verdiene kunne delvis tilskrives ved bruk av bulk lufthastighet i stedet for den lokale lufthastigheten ved kontrollpunktet. Kontrollpunktet for denne beregningen ble etablert ved målepunkt 305 som lå 12 meter nord for sentrumsområdet til brannen. Området rundt målepunktet var godt isolert på grunn av sin nærhet til brannen. Denne isolasjonen førte til hindring for luftstrømmen som ble anslått til ca. $10,2 \text{ m}^2$ eller 17% av tunnelverrsnittet. Derfor ble den gjennomsnittlige lokale lufthastighet ca. 20% høyere enn bulk lufthastigheten som var basert på uhindret tunnelareal på 60 m^2 .

Korrelasjonen mellom de målte og teoretiske verdiene ble vesentlig forbedret når det ble brukt gjennomsnittlig lokal lufthastighet som vist i figuren under. Selv om den teoretiske lufthastighet ennå beregnet høyere ved de høyeste HRR, er imidlertid avviket mellom de teoretiske og faktisk kritiske lufthastigheter redusert til mindre enn 4 % og 16 % for henholdsvis 50 og 100 MW.

Lufthastigheter som krevdes for å hindre backlayering var begrenset til et snevert området, uavhengig av brannstørrelse. De teoretiske lufthastigheter for HRR på 50 til 100 MW varierte fra 2 m/s til 3,5 m/s. Men test data tydet på at backlayering ble forhindret med lufthastighet mellom 2,5 m/s og 3,0 m/s.



Figur 3.7: Lufthastighet vs. HRR ved gjennomsnittlig lufthastighet [19]

Det var dermed mulig å se at langsgående ventilasjon med impulsviser håndtere røyk og varmeutvikling på opptil 100 MW.

3.4 Røyk- og varmebevegelse

Fra testforsøkene kom det frem at spredning av de varme gassene og røyk var betydelig større med en lengre responstid. Viftens responstid måtte minimaliseres, da varmt røyklag ble observert å spre seg svært raskt (500-600 m på de første 2 minuttene). Dette gjorde at tunnelbelysningen ble raskt redusert.

Det ble påvist at naturlig ventilasjon resulterte i omfattende spredning av røyk og varme oppstrøms for brannen. Spredning av varme og røyk ved en 50 MW brann var vesentlig større enn for en 20 MW brann. Høyere HRR gav økt røyktykkelsen.

Eksposering av for høye nivå av karbonmonoksid (CO) var aldri mer kritiske enn røyk eller temperatur i noen av forsøkene. Maksimaltemperaturen som ble registrert på innløpet til impulsvisertene (nærmeste sted til brannen, ca. 215 meter), var på 165 °C for en 100MW brann, 125 °C for en 50MW brann og 110 °C for en 20MW brann.

Det ble som ventet konkludert i MTFVTP med, at uten et ventilasjonssystem vil retning og hastighet for røyk- og varmebevegelse bestemmes av tunnelhelning, forhold før brann og de meteorologiske forholdene.

4 Scenariobeskrivelse

Meningen med denne testen var å identifisere minimum antall impulsvifter og korresponderende lufthastighet som var nødvendig for å kontrollere «backlayering» ved en 100 MW brann med og uten oppstartforsinkelser på vifte.

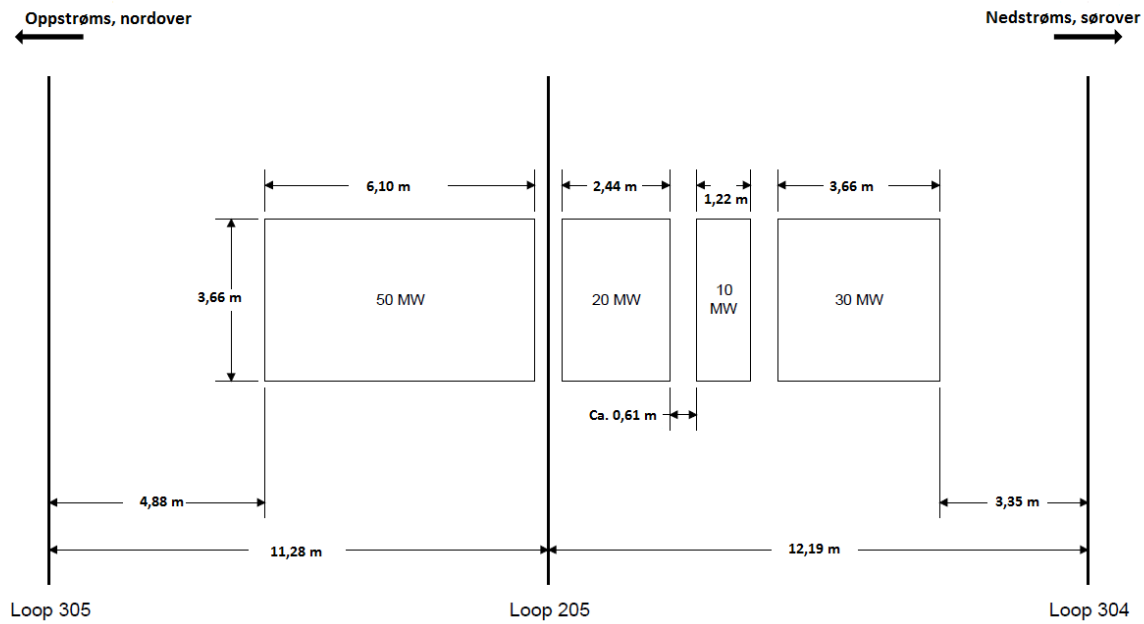
4.1 Brannoppsett og målinger

Fire rektangulære stålkår ble installert 238 meter i fra den sørlige åpningen. Karene ble fylt med diesel (Fuel Oil nr.2) og antent for å generer HRR fra 10 til 100 MW. Antenningsystem bestod av en elektrisk fjernstyrt gasstenner med flammesensor og flytende petroleumgass i et rørssystem. Det ble foretatt målinger av temperatur, CO, CO₂, metangass CH₄ i nærheten av brannområdet og fordampningsraten ved hjelp av massetap fra karene. Stråling ble ikke målt.

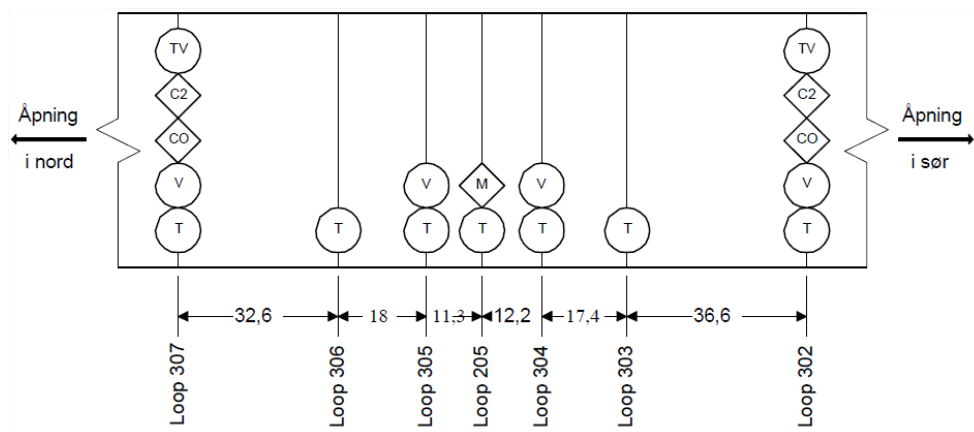
Basert på ingeniør beregninger kom de fram til at 4,46 m² eksponert brenseloverflate produserte omtrent 10 MW. Karstørrelsene skulle være beregnet for 10, 20, 30 og 50 MW som resulterte i den ønskede fleksibilitet for å variere den totale varmeavgivelsen. For det overnevnte forsøket ble 20, 30 og 50 MW kar brukt for å genere en 100 MW brann i et 15 meter langt området i tunnelen med et areal på 45 m² som vist på figurene under.



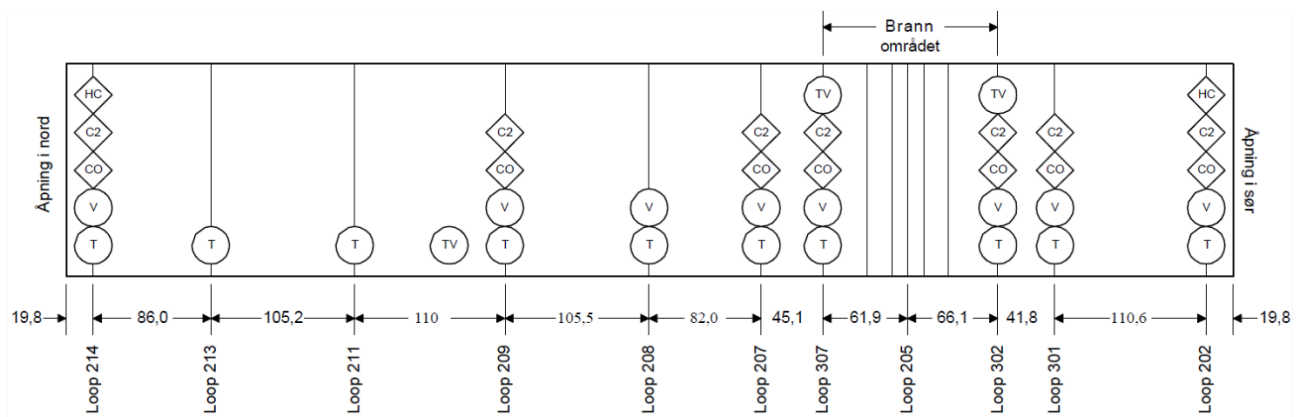
Figur 4.1: Det nærmeste til høyre er stålkår for 30 MW, etterfulgt av 10 MW, det tildekte for 20 MW og det bakerste for 50 MW [10]



Figur 4.2: Stålkar brukt under Memorial forsøkene [3] s. 3-17



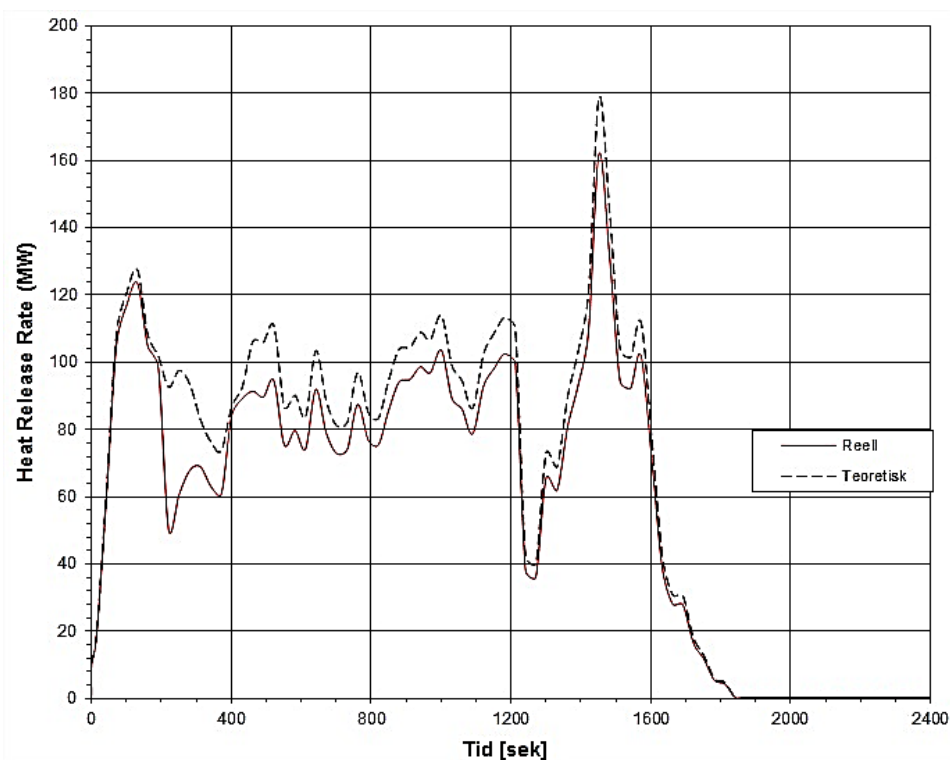
Figur 4.3: Brannområdet i tunnelen med målestasjoner (Loop) og avstand i meter [3] s. 3-17



Figur 4.4: Hele Memorial tunnelen med målestasjoner (Loop) og avstand i meter [3] s. 3-17

Stålkarene ble plassert 76,2 cm over tunnelgulvet og fylt med 15,2 cm med vann som en kunne måle hvor mye av diesel bestanden som fløt over vannet med hensyn på tilførsel av diesel under brannforløpet. Ekstra tilførsel av diesel, som ble oppbevart nær den sørlige åpningen, ble fjernstyrt fra kontrollrommet. Dieselnivået i karene ble regulert av vektceller under karene som gav data til kontrollrommet når det måtte pumpes mer diesel. Det ble i tillegg brukt termoelementer i hvert stålkår til å overvåke for høy væskebestand, vanntemperatur og instrumenttemperatur i gropen under karene.

Ut fra registrerte fordampningsraten fra karene ble det benyttet en forbrenningsenergi på 140.000 BTU/gallon (British thermal unit) som kunne slås sammen og konverteres til varmeavgivelsesrate i MW. Dette utgjorde den teoretiske HRR. I forsøket registrerte de konsentrasjoner av uforbrent brensel i gassform i nærheten av karene, og estimerte dermed forbrenningseffektiviteten. Basert på dette ble det laget en effektiv/reell HHR-kurve.

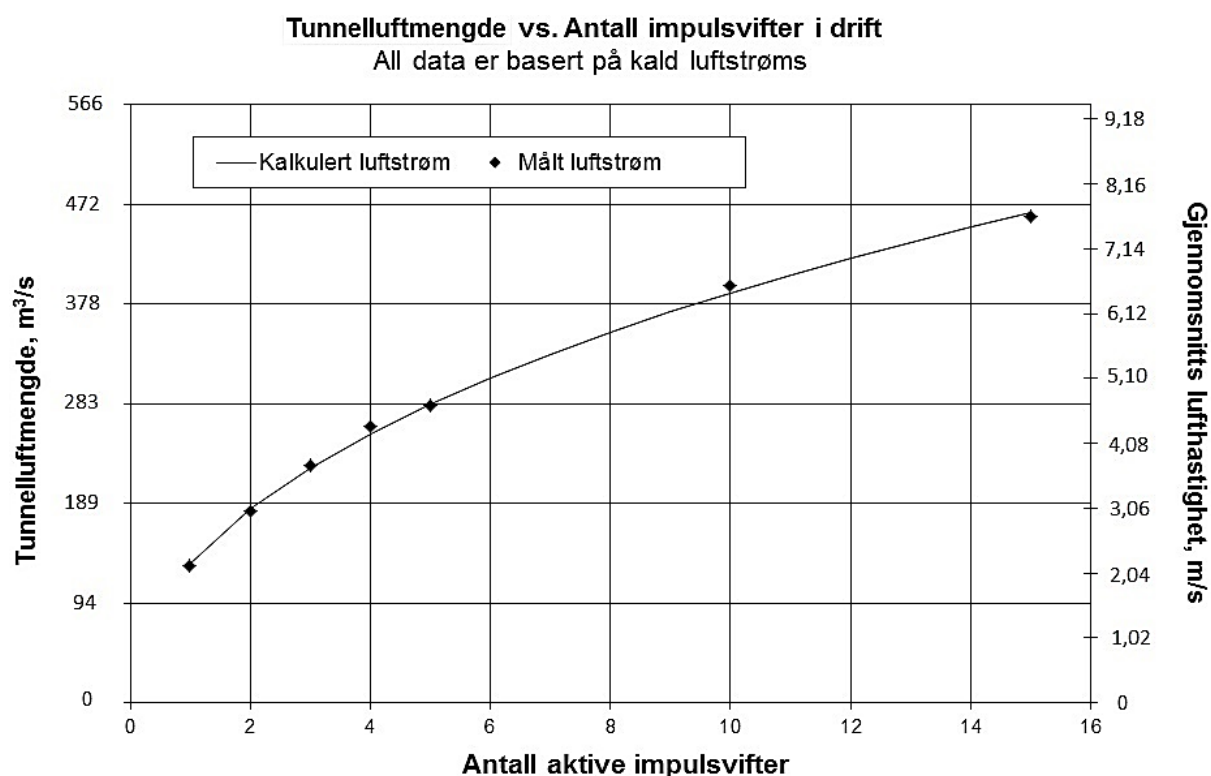


Figur 4.5: Teoretisk og reell HRR fra forsøk 621A [19]

Veggen ved brannområdet ble påført 15 cm tykk brannisolering. Isoleringen bestod hovedsakelig av sement og vermiculite (vulkansk leirskifer med stor evne til å absorbere og avgi vann).

4.2 Sammenheng mellom luftstrøm og antall driftsatte impulsvifter

En serie av kalde luftstrømforsøk ble utført før branntesting for å etablere forholdet mellom antallet driftsatte impulsvifter og luftstrøm som ble produsert i tunnelen. Testene bestod av å drift 1-15 vifter i ulike kombinasjoner for å definere egenskapene til ventilasjonssystemet. Prøveresultatene er vist i figur 4.3, som sammenligner de målte luftmengder med de kalkuleerte verdiene.



Figur 4.6: Tunnelluftmengde vs. antall impulsvifter [19]

Denne informasjonen ble brukt under de påfølgende brannventilasjons tester for å fastslå riktig antall impulsvifter som krevdes. Målet var å velge ut minste antall vifter som ville hindre backlayering for de gitte brannstørrelsene.

4.3 Kritisk hastighet

Fremgangsmåten som ble bruket i MTFVTP for å bestemme den kritiske hastighet, var å måle hvilken minste lufthastighet som krevdes for å forhindre backlayering. Dette ble utført ved å variere antall aktive impulsvifter til backlayering oppstod. Under gjennomføringen av testene, ble forekomsten av backlayering bestemmes visuelt ved å se på bildene fra overvåkningskameraer som var plassert strategiske plasser i tunnelen. Backlayering ble også påvist når det ble registrert temperaturøkning i de øverste målepunktene ved måleområdet 305 (12 meter nord for brannsenner) etter impulsvifteantallet ble redusert og ventilasjonsluften ikke klarte å holde røyken imot luftstrømmen.

Måleområdet 305 ble brukt som kontrolldatabase. Som følge av dette ble måltreene og utstyret rundt kraftig isolert som vist på bilde under. Dette utgjorde en hindring for luftstrømmen og ble anslått til ca. 10,2 m² eller rundt 17 % av tunnelens tverrsnitt. Derfor ble den gjennomsnittlige lokale lufthastigheten beregnet til å være 20 % høyere enn

gjennomsnittlig lufthastighet basert på uhindret tunnelområdet, også omtalt som bulkhastighet.

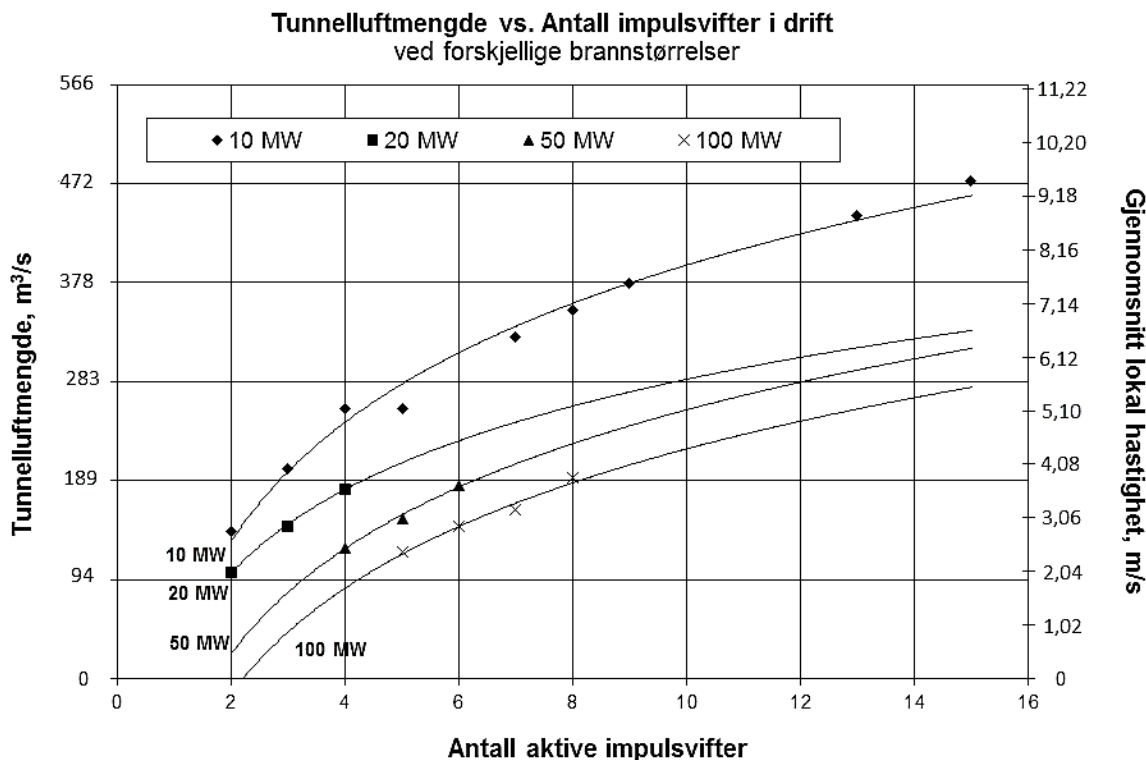


Figur 4.7: Tunnel sett fra nord til sør. I front til venstre og høyere ser en hastighets- og datainnsamlingskabinetter, etterfulgt av måletre og brannkarene bakerst på bilde [19]

4.4 Effekt av brann på luftstrøm

Det er i tillegg viktig å belyse, med hensyn på disse forsøkene, at en brann kan redusere en luftstrøm i en tunnel. Dette er forårsaket av den hurtige utvidelsen av luft som varmes opp mens den strømmer forbi et brannområde. Som følge av konserveringen av masse, øker hastigheten av de varme gasser nedstrøms for brannen, omvendt proporsjonal med lufttettheten (eller ekvivalent, direkte proporsjonal med den absolute temperatur av gassene) for derved å øke den viskøse trykktapet i denne seksjon av tunnelen. Dessuten forårsaker den raskere akselerasjon av de varme gassene som oppstår tvers over brannområdet en motvirkende trykk som har en tendens til å redusere tunnelens luftstrøm.

I tillegg vil oppdrift som genereres av tetthetsforskjellene mellom de varme gasser og den omgivende luften gi opphav til trykkdifferensialer som enten utvider eller reduserer tunnelen luftstrøm, avhengig av retningen av ventilasjon. Retning for langsgående ventilasjon med impulsventiler i de omtalte forsøkene var fra nord til sør. Derfor reduserte oppdriftskreftene fra brannen luftstrømmen i forhold til hva som ville ha blitt oppnådd ved å opererer impulsventilene når det ikke brant.



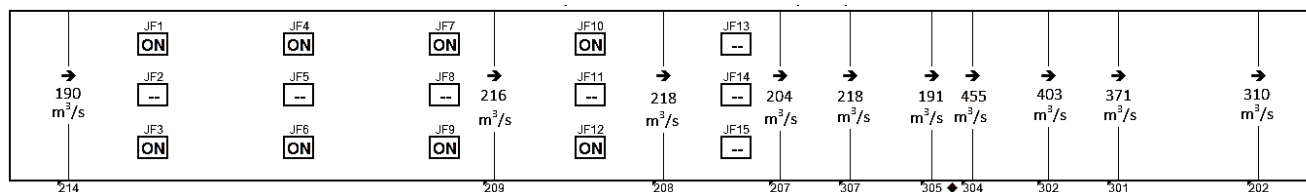
Figur 4.8: Tunnelluftstrøm vs. impulsvifter ved forskjellige brannstørrelser [19]

Som et eksempel vil det ved ca. 330 m³/s luftmengde som blir produsert med 7 impulsvifter i drift gi en luftmengdereduksjon på omtrent 1 % ved en 10 MW brann og 51 % ved en 100 MW brann. Ved et lavere ventilasjonsantall, f.eks. 3 impulsvifter, vil luftstrømmen reduseres ytterligere siden temperaturstigning i luften som strømmer forbi brannen er større enn for en gitt brann størrelse. 3 impulsvifter i drift, vil gi en luftmengde på 223 m³/s i tunnelen. Luftmengde som transporteres gjennom tunnelen vil bli redusert med om lag 11 % for en 10 MW brann og 62 % for en 100 MW brann.

Ut fra disse forsøkene ble det klart at reduksjon i tunnelens luftstrøm forårsaket av en brann var en viktig faktor i utforming av langsgående ventilasjonssystem. For å kunne opprettholde en positiv røykkontroll, må tunnelens lufthastighet som tilsvarer den reduserte luftmengde opprettholdes over den kritiske lufthastighet med hensyn på brannstørrelse.

4.5 Testforsøk nr.621A

For dette testforsøket ble det skapt en brann på HRR på 100MW og impulsviftene startet uten forsinkelser, med en gang etter antenning. Viftekonfigurasjonen var sammensatt av åtte impulsvifter vist i fig.4.6, med «ON» som var i drift på frem fra nord til sør som vist i figuren under. Deretter ble antall vifter som var i drift variert for å vurdere kontrollen på backlayering og virkningen av luftmassene som ble forflyttet i tunnelen.



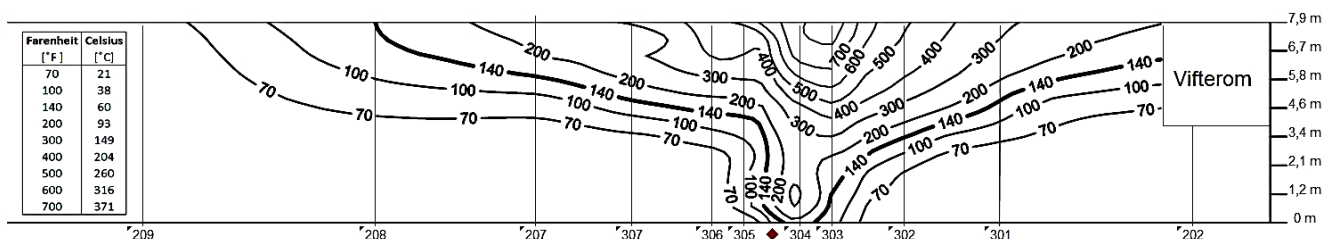
Figur 4.9: Vifteoppsett for 621A like etter antenning. Svart firkant indikerer brannområdet [19]

For testforsøket nr. 621A ved det 2. måleområdet (302) sør for brannen ble det registrert høyest temperatur på 413 °C ved målepunkt B (1,2 m) og 496 °C ved målepunkt C (2,4 m) over bakkenivå. Menneskets tåleevne for temperatur begynner ved 60 °C [ref.] og ble registrert ved målepunkt B etter 30 sekunder og nesten momentant ved målepunkt C etter at væskebassenget hadde tatt fyr.

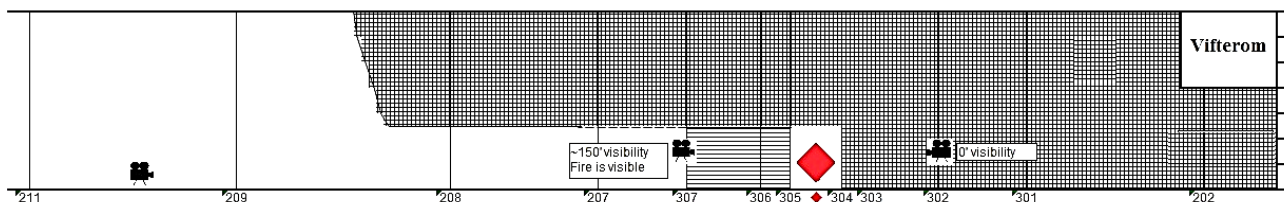
Det ble foretatt CO-målinger ved 3 målehøyder, 1,5, 5,7 og 7,1 meter. Målehøyden på 1,5 meter og CO verdiene ved denne høyden blir sett på som den mest aktuelle med hensyn på et menneske og vil bli omtalt videre i scenariobeskrivelsene. For dette måleområdet ble den høyeste CO konsentrasjonen registret til 439 ppm. Dette gir ikke merkbar effekt på et menneske som tidligere beskrevet i figur 2.13.

For det 2. måleområdet (307) nord for brannen ble den høyeste registrert temperaturen 15 °C ved målepunktene B og C. For dette måleområdet var CO-konsentrasjonen neglisjerbar og lavere enn 10 ppm.

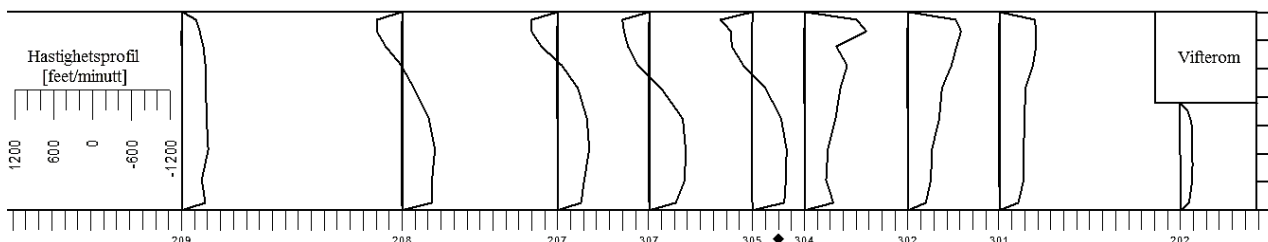
Like etter antennelse:



Figur 4.10: Temperaturprofil for 621A like etter antennelse HRR = 10 MW. Ventilasjonsluften har ikke nådd brannområdet [19]

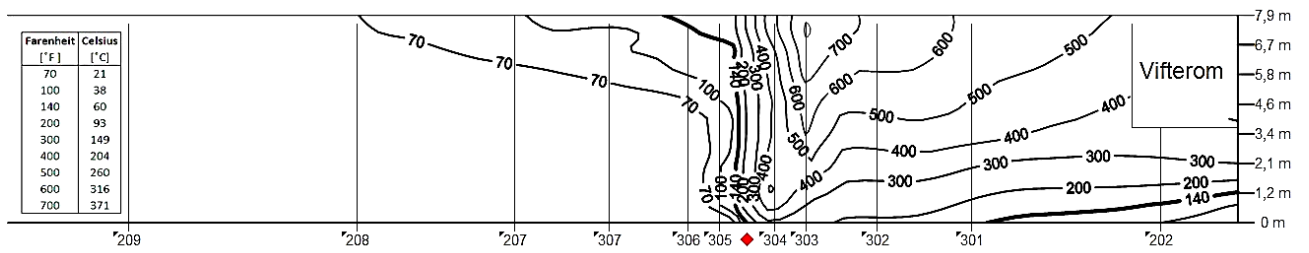


Figur 4.11: Røykbevegelse for 621A like etter antennelse [19]

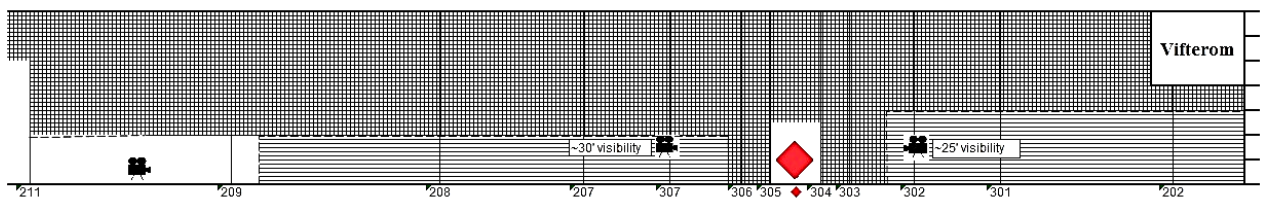


Figur 4.12: Hastighetsprofil for 621A like etter antennelse. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]

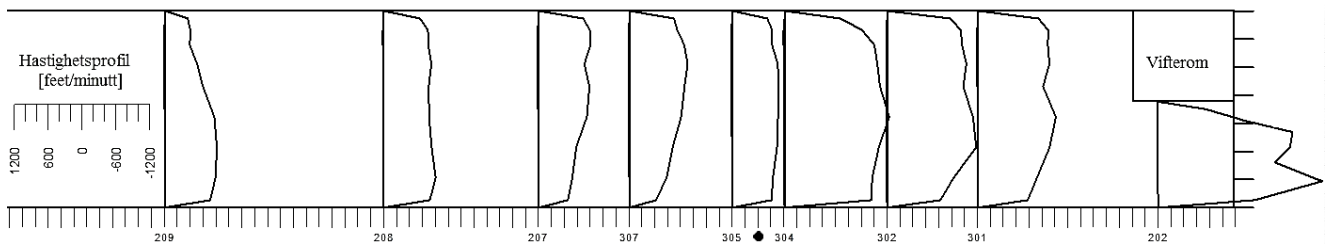
1 min etter antennelse:



Figur 4.13: Temperaturprofil for 621A 1 min etter antennelse HRR = 105,2 MW. 8 impulsvifter er aktivert og har nådd frem til brannområdet [19]

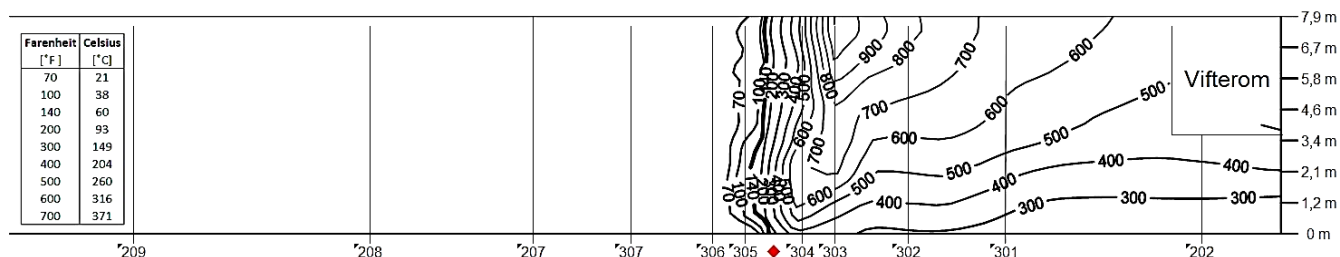


Figur 4.14: Røykbevegelse for 621A etter 1 min [19]

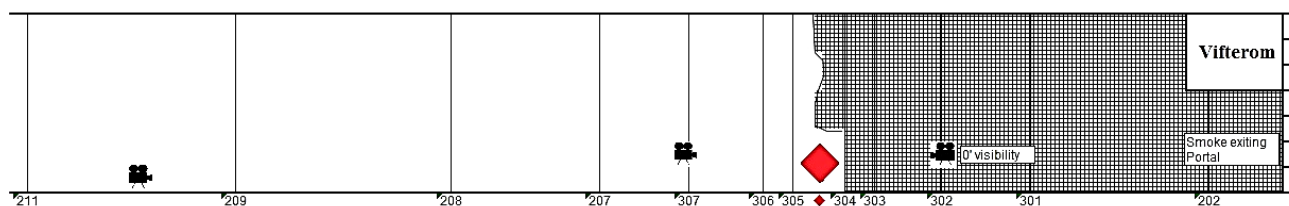


Figur 4.15: Hastighetsprofil for 621A 1 min etter antennelse. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]

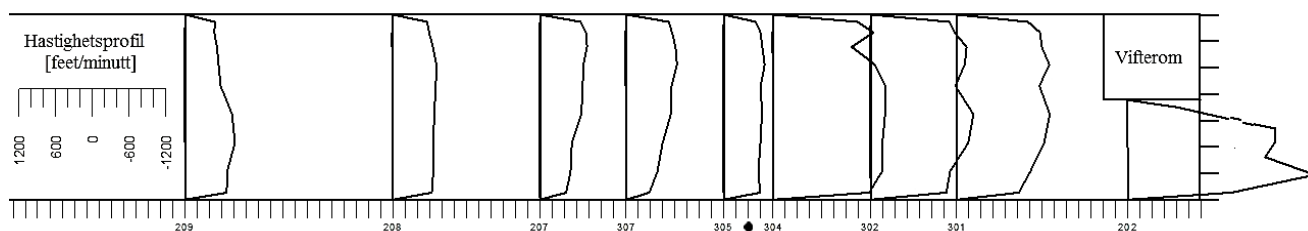
2 min etter antennelse:



Figur 4.16: Temperaturprofil for 621A 2 minutt etter antennelse HRR = 123,5 MW [19]



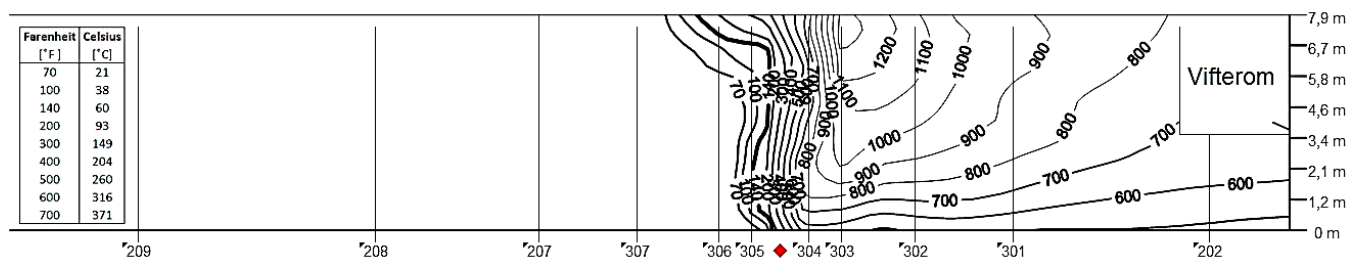
Figur 4.17: Røykbevegelse for 621A etter 2 min. De 8 impulsvifter stagnerer røyken nord for brannen [19]



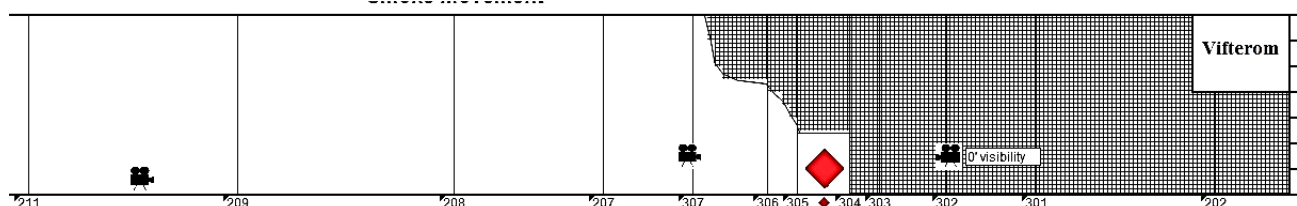
Figur 4.18: Hastighetsprofil for 621A, 2 min etter antennelse. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]

Ventilasjonshastigheten ble redusert når 2 impulsvifter ble stoppet. De resterende 6 viftene klarer å håndtere backlayering, men når enda en vifte stoppet begynner igjen backlayering å formes som vist i figuren under.

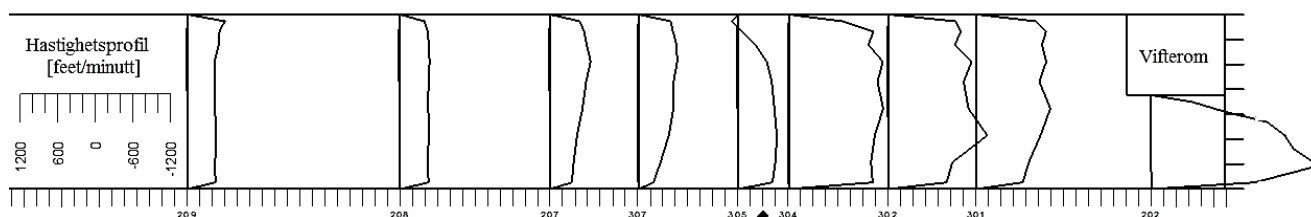
12 min etter antennelse:



Figur 4.19: Temperaturprofil for 621A, 12 minutt etter antennelse HRR = 85,4 MW [19]



Figur 4.20: Røykbevegelse for 621A, etter 12 min. 5 impulsviftene klarer ikke å kontrollere backlayering [19]



Figur 4.21: Hastighetsprofil for 621A, 12 min etter antennelse. Hvert måletrinn indikerer 200 ft/min som er 1,02 m/s [19]

| Aktiverte impulsvifter | Beregnet tidsforløp | Virkelig tidsforløp | Vifteprosess | | Backlayering kontrollert |
|------------------------|---------------------|---------------------|--------------|----|--------------------------|
| | | | Av | På | |
| 1,3,4,6,7,9,10,12 | 0:00-5:02 | 12:17:04 - 12:22:06 | | | Ja |
| 1,3,4,6,7,9,12 | 5:02-6:25 | 12:22:06 - 12:23:29 | 10 | | Ja |
| 1,3,4,6,7,9 | 6:25-10:05 | 12:23:29 - 12:27:09 | 12 | | Ja |
| 1,3,4,6,7 | 10:05-13:10 | 12:27:09 - 12:30:14 | 9 | | Nei |
| 1,3,4,6,7,9 | 13:10-21:23 | 12:30:14 - 12:38:27 | | 9 | Ja |
| 1,3,4,6,7,9,10 | 21:23-34:41 | 12:38:27 - 12:51:45 | | 10 | Ja |

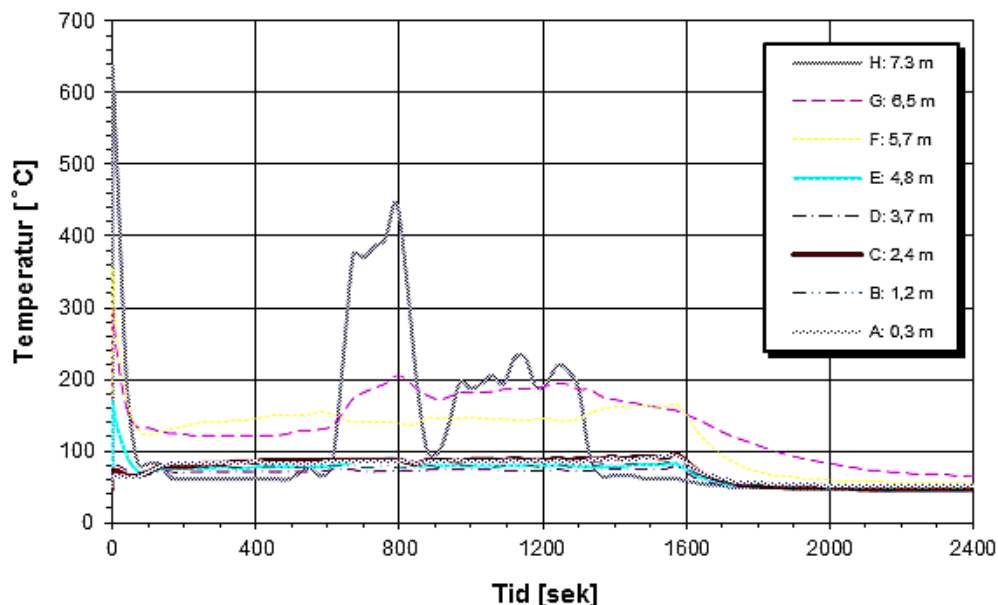
Tabell 4.1: Impulsvifte oppsett test nr.621A

Det var ingen backlayering selv om impulsvifte nr.10 og nr. 12 ble stoppet etter henholdsvis 5 og 6 minutter. De 6 resterende viftene klarte å håndtere røyken frem til vifte nr.9 ble stoppet i det 10 minuttet som vist i figuren over. Da begynte røyken å trekke seg sakte tilbake mot ventilasjonsstrømmen. Etter 13 minutter ble vifte nr.9 startet på nytt og backlayering minket.

Reell kritisk ventilasjonshastighet ble påvist ved å kalkulere massetapet fra karet subtrahert med målt brensel i røyken i nærhet. Dette ble målt under hvert av forsøkene. Ut i fra

forsøksdata med verdiene fra Excel, samt tiden på når backlayering var og ikke var under kontroll kan hastigheten påvises.

Det ble valgt å se på temperaturen for det nærmeste måleområdet, 305, 8,5 meter nord for brannsenderet (fig.5.16). Her tok en hensyn på temperaturøkning ved backlayering for å finne et eksakt tidspunkt for den kritiske ventilasjonshastigheten. På den måten var det mulig å påvise den reelle kritiske ventilasjonshastigheten på det samme tidspunkt, men da ved bruk av måleområdet 307 61,9 meter nord for brannsender på samme måte som det ble beskrevet i rapporten for MTFVTP.



Figur 4.22: Temperaturoversikt for måleområdet 305, test 621A [19]

Ved måleområdet 305 og etter at impulsvifte nr.9 ble deaktivert (12:27:09) ble det påvist temperatur økning som følge av backlayering ved det høyeste målepunktet H: 7,3 meter over bakken etter 10 minutter som illustrert i grafen over.

I tilgjengelig testdata hentet fra MTFVTP ble det benyttet hastighetsprofil for ventilasjon tatt fra senterlinjen i tunnelen. I FDS modellen, som blir brukt for å sammenligne resultatet, har en antatt denne hastigheten langs hele bredden i tunnelen. Derfor har det blitt valgt å bruke en korrigert «bulk airflow velocity» fra MTFVTP som er gjennomsnittshastigheten for luft i tunnelen oppgitt i kubikkmeter per sekund. Dette er for å gi en indikasjon på om den estimerte gjennomsnittshastigheten fra fullskalaforsøkene stemmer overens med modellen, uavhengig av variasjoner i høyde og bredde.

Fra fullskaladata for ventilasjonsstrøm ble verdiene oppgitt i CFM (Cubic Feet per Minute) og en tar utgangspunkt i verdiene i samme tidspunkt for når backlayering startet (temperatur økning målepunkt H ved måleområdet 305). Dette har blitt omregnet med utgangspunkt i 650 ft^3 i tverrsnittareal og gir følgende gjennomsnittlig kritiskhastighet for de aktuelle måleområdene som ligger etter viftene, men foran brannen er beregnet til:

| | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|
| Måleområdet | 305 | 307 | 207 | 208 |
| Kritisk ventilasjonshastighet [m/s] | 2,35 | 2,60 | 2,28 | 2,20 |

Tabell 4.2: Verdiene for når backlayering startet for test 621A i tidsrommet 12:27:17-12:27:47 (612–642 sek)

Under forsøket ble det ikke observert noen store skader. Det eneste var en del veggfliser som hadde falt av fra brannområdet til den sørlige åpningen og noe avskalling på taket. I måleområdet 302 ble målepunktene D, F, G og H ødelagt.

5 FDS

I dette kapitlet vil det beskrives feltmodellen Fire Dynamics Simulator (FDS) med vekt på modellens oppbygning, bruksområder, begrensninger. Programmet er fritt tilgjengelig og utviklet av Building and Fire Research Laboratory (BFRL) ved National Institute of Standards and Technology (NIST). FDS løser numerisk Navier-Stokes likninger for termisk drevet fluidstrøm med underlydshastighet, med fokus på røyk og varmetransport.

Programmet er ment som et lett tilgjengelig verktøy for å løse problemer innen brannteknisk prosjektering. Dette kan f.eks. være lavhastighetstransport av varme og forbrenningsprodukter fra brann, stråling og konvektive varmetransport mellom gasser og faste materialer [34]. Samtidig er det et forskningsverktøy for studier innen brannodynamikk og forbrenning. For å kunne håndtere utdata blir det benyttet programmet Smokeview for en grafisk brukergrensesnitt.

Den første versjonen av FDS ble tatt i bruk januar 2000, og er jevnlig oppdatert. I mars 2013 ble versjon 6.0 utgitt [41] og er den brukte i oppgavens simulering. Det eksisterer to separate manualer til FDS: *Technical Reference Guide* [42] som beskriver den teoretiske delen for FDS, og *User's Guide* [43] som beskriver hvordan modellen bygges opp og brukes. I tillegg er det utgitt *An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview* [44], som er en ekstra brukervennelig manual. De gitte manualene gir opphav til informasjonen brukt i de påfølgende delkapitlene.

5.1 Bruk av FDS

Når strømningsforholdet er formulert kan en begynne å modellere geometrien. Dette utføres ved å skrive koder manuelt i et tekst dokument eller ved å bruke et grafisk grensesnitt med programmet Pyrosim. Geometrien kan være utforming av en bygning eller et rom, planløsning og materialvalg som skal simuleres. Geometrien bør gjenskapes så lik mulig den fysiske originalen for at det skal være mulig å skape en reell simulering.

FDS-beregninger gjøres innen et domene bestående av rettlinjede kontrollvolumer, kalt mesh. Hvert mesh som defineres har en spesifisert kontrollvolumstørrelse, som angir oppløsningen på beregningene som utføres. Et domene kan imidlertid inneholde flere mesh dersom en av forskjellige grunner ønsker varierende oppløsning på beregningene avhengig av lokale forhold i domenet. Dette innebærer krav om at mesh-ene settes opp iht. til instruksjoner gitt i brukermanualen (mesh-oppsett figur 5.2) og vil alltid medføre en grad av usikkerhet knyttet til kontinuiteten i beregningene i grenseområdene mellom mesh. Utveksling av informasjon mellom kontrollvolumer i forskjellige mesh er ikke like nøyaktig som utvekslingen av informasjon mellom kontrollvolumer innbyrdes i et mesh [43] s.31. Dersom en inspiserer resultatene fra en simulering med flere mesh gjennom visualiseringsprogrammet Smokeview, vil en oftest kunne observere at bevegelsen av forskjellige kvantiteter som temperatur og trykk vil være mindre kontinuerlig ved mesh-grensene, sammenlignet med kontrollvolumene innad i meshene.

Dersom en benytter seg av flere mesh vil en også ha anledning til å fordele beregninger for hvert enkelt mesh til egne prosessorkjerner. Dette kalles parallellprosessering, og vil potensielt kunne kutte ned store deler av simuleringstiden for simulasjoner med høy oppløsning og/eller store domener.

En av de største ulempene ved simulering i FDS er tidsforbruket som kan ta fra timer til uker, avhengig av størrelsen på simuleringsobjektet og mesh-oppløsningen. Når simuleringen er fullført kan hele forløpet visualiseres i Smokeview og forskjellig forhåndsdefinert måleparametere kan analyseres fra utdata som blir generert av FDS. Disse verdiene kan enten sammenlignes med f.eks. fullskalaforsøk eller estimerte håndberegninger.

Videre kan en med fordel gjøre forandringer i inndata og starte nye simuleringer ved behov. Dette gjøres ofte for å undersøke sensitiviteten ved f.eks. å endre på det fysiske objektet eller justere mesh-oppløsningen. I slutfasen må resultatene rapporteres og eventuelle usikkerheter tas med til vurdering av aspekt til kvalitet på utdata.

5.2 Oppbygning av inndatafil

I dette kapittelet vil det kun bli omtalt de mest brukte kodene for oppgavens simuleringer. De resterende kodene er beskrevet i brukermanualen.

For å kunne utføre en simulering i FDS må en i første ledd få den nødvendige informasjon som skal skrives inn i en tekstfil. En inndatafil består av flere deler, der den første delen omfatter de grunnleggende forutsetninger [44] kap.4.3. Hver del begynner på tegnet «&» og etterfølgt av delens navn, spesifikasjon av inndataparameter og avsluttes med «/». Øverst i inndatafilen blir det angitt de fundamentale betingelser for med bl.a. simuleringsnavn ved «HEAD», simuleringstid «TIME», hvor ofte utdata skal lagres ved «DUMP» og andre variabler med hensyn på utdata ved «MISC». Videre settes forbrenningsreaksjonen ved «REAC» som beskriver det kjemiske oppsettet og sotproduksjonen som vises i illustrasjonen under, hentet fra oppgavens simulering.

```
&REAC ID='Fuel oil 2',
  C           = 7.00 ,
  H           = 13.00 ,
  O           = 0.00 ,
  N           = 0.00 ,
  HEAT_OF_COMBUSTION = 44000.0 ,
  CO_YIELD    = 0.03 ,
  SOOT_YIELD  = 0.0380 ,
  IDEAL       = .FALSE. ,
  SOOT_H_FRACTION = 0.1 / Default SOOT_H
```

Tabell 5.1: REAC til «Fuel oil 2» fra inndatafil til simuleringene

I det andre leddet må beregningsdomenet defineres ved «MESH» som er avgjørende for at en simulering skal kunne defineres i tillegg til «INIT» som angir startbetingelsene for domenet.

For det tredje leddet av oppbygningen må en angi de ulike egenskapene for hvert brukte material ved «MATL», egenskapene for gass ved «SPEC», typer av grensebetingelser ved «SURF» og tidsspesifisering av for ulike verdier ved «RAMP». Dette er den mest utfordrende leddet som settes opp med hensyn på simuleringen. For både en reell og simulert brann er veksten av brannen meget følsom med hensyn på de termiske egenskapene til de omgivende materialer.

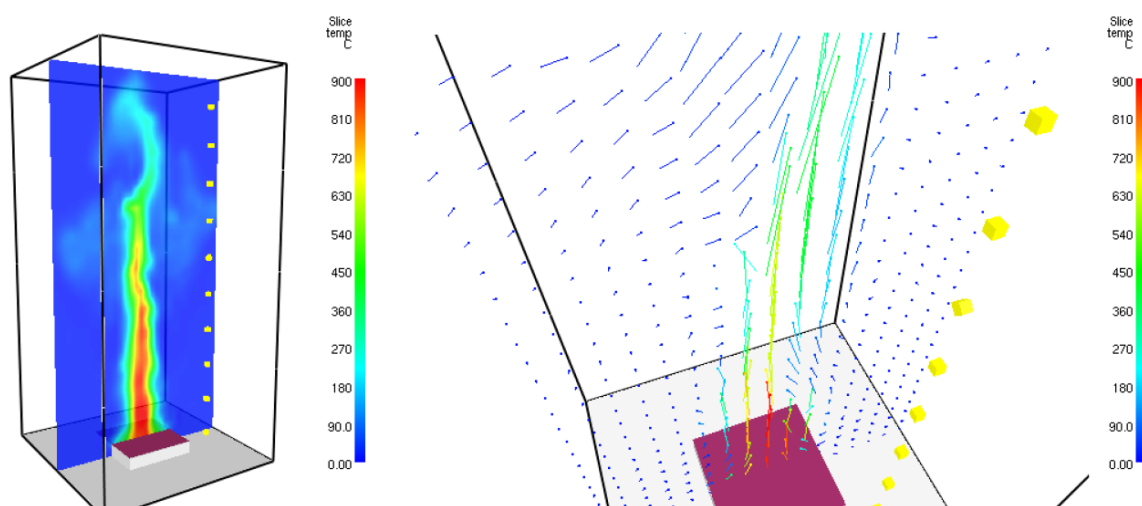
```
&MATL ID           = 'CONCRETE',
  SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_conc',
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_conc',
  DENSITY           = 2100,
  EMISSIVITY        = 0.7 /
```

Tabell 5.2: Material egenskaper til tunnelvegg av betong fra inndatafil til simuleringene

I det fjerde leddet baserer seg på den fysiske beskrivelsen av geometrien med obstruksjoner ved «OBST». Dannelse av grensebetingelser for et bestemt plan ved «VENT» som videre knyttes til en spesifikk grensebetingelse ved «SURF».

For det femte leddet skal det tildeles en grensetilstand til hver overflate i gassfasedomenet for å beskrive dens termiske egenskaper. Dette gjelder både de solide obstruksjonene og de utvendige grensedomenene. Her blir styringslogikken og automatiseringen introdusert ved «PROP», «DEVC» og «CTRL». Kodene kan brukes til å kontrollere ulike handlinger, eller aktivere og deaktivere vifter og ventiler.

Til slutt må brukeren angi ønsket utdataverdien ved «DEVC», «SLCF», «BNFD» og «ISOF». Alt som skal studeres må defineres i inndatafilen, og det er ikke mulig å hente ut informasjon som en ikke har definert at skal loggføres før simuleringen starter. «DEVC» er koden for punktlagring som imiterer reelle instrumenter som måler f.eks. temperatur, hastighet eller fluks. De resterende tar for seg en større mengde data over brukerdefinerte volumer eller areal. «SLCF» kan spesifiseres til å lage vektorer for de aller fleste kvantiteter. Dette kan f.eks. være temperatur- eller røykprofil i et brannforløp som vist i figuren under.

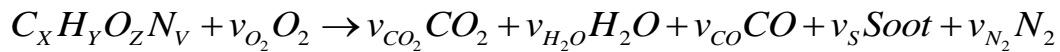


Figur 5.1: Illustrasjon av en SLCF slice-fil Smokeview

5.3 Forbrenningsmodeller og grensebetingelser

FDS løser numerisk form av Navier-Stokes likninger beregnet for lavhastighets og termiskdrevet strøm med vekt på røyk og varmetransport fra branner [44]. Den algoritmiske kjernen består av et eksplisitt prediksjonssystem og en del for nøyaktig behandling av tid og rom.

Forbrenningsmodellen som gjelder for LES-beregninger kalles «Mixture Fraction Model». Modellen bruker en blandingskontrollert kjemisk enkeltstegsreaksjon, som involverer tre hovedkategorier av kjemiske substanser (lumped species), som er luft, brensel og forbrenningsprodukt. Forbrenningen reguleres ved forholdet mellom oksygen og brensel og oppstår så snart de møtes – uavhengig av temperatur som vist i reaksjonen under. Siden modellen i seg selv forutsetter at forbrenningen skjer umiddelbart, vil koden bli implementert med en empirisk korrelasjon som beskriver hvordan forbrenningen påvirkes dersom oksygentilførselen begrenses. For den enkle kjemiske modellen, kan hver reaksjon antas å være gitt ved:



17: Enkeltstegsreaksjon [-]

En trenger videre å angi den kjemiske formelen av brennstoffet sammen med utbyttene av CO, sot og volumfraksjonen av hydrogen i sot, X_H . FDS vil bruke informasjonen internt for å bestemme forbrenningsprodukter som blir dannet.

I «Mixture Fraction» modellen blir en brann angitt ved to måter. Den første er ved å angi varmeavgivelsesrate per arealenhet (HRRPUA), mens den andre er ved å angi forbrenningsvarme fra reaksjoner til ulike brennbare materialer, ofte omtalt som «Heat of Reaction» [45]. I oppgavens simuleringer blir HRRPUA-modellen benyttet der det lages en brenneroverflate i form av et kar fylt med «Fuil Oil nr.2», med en total varmeavgivelse på 100 MW.

I FDS må alle faste overflater få tildelt en termisk grensebetingelse i tillegg til informasjon om forbrenningsegenskaper til materialet ved bruk av «MATL»-koder. Varme- og massetransport til og fra faste overflater håndteres til vanlig med empiriske sammenhenger, selv om det er mulig å beregne den direkte varme- og massetransport ved bruk av en numerisk simulering (DNS). Når en ikke bruker de forhåndsbestemte material alternativene kan en anvende følgende koder: «INERT», «ADIABATIC», «OPEN» og «MIRROR» [44] kap.4.3.

En «INERT» grensebetingelse representerer en isotermisk vegg med temperatur satt lik omgivelsestemperatur. «INERT» koden tillater varmetap, og er ikke det samme som en adiabatisk overflate. Et inert fast stoff er noe som aldri varmes opp [44] kap.4.3. Ved spesielle anvendelsesområder er det ofte ønskelig at en fast overflate må være adiabatisk ved bruk av «ADIABATIC», som betyr ingen varmeoverføring fra gass til fast stoff. «OPEN» er en grensetilstand som forutsetter at omgivelsene eksisterer utover det bestemte planet ved «VENT». Mens «MIRROR» er grensevilkår som betegner et symmetriplan, som strekker seg over hele flaten til det beregningsmessige domenet. Strømningen på motsatt side av koden blir nøyaktig reversert.

5.4 Turbulens

FDS sin modell for transport av fluider benytter seg av Navier-Stokes likninger som forutsetter strøm med underlydshastighet. Ettersom numerisk løsning av turbulens gjennom slike likninger er svært tidkrevende, benyttes en LES modell for simuleringer hvor cellene er større enn ca. 1 mm^3 . LES-modellen tillater eksplisitt løsning av turbulensstrømming av en viss størrelse, mens mindre eddier kalkuleres implisitt ved hjelp av flere alternative sub-scale modeller (SGS).

5.5 Begrensninger

Som ved alle simuleringsprogrammer har også FDS sine begrensninger som det er viktig å belyse. Nedenfor gis en oversikt på de viktigste begrensningene i FDS hentet fra «An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview» [44] og brukermanualen til FDS [43].

- FDS blir begrenset til lavhastighetsstrøm (under 100 m/s) for røyk- og varmetransport i en brann. Dette utelukker bruk av scenario som f.eks. eksplosjon eller detonasjon hvor strømningshastigheten nærmer seg lydens hastighet.
- Da oppbygningen av beregningsmodellen i FDS består av rettlinjede numerisk rutenett vil det være begrensninger når visse geometriske funksjoner ikke er i samsvar med det rutenettet. Begrensningen har bl.a. oppstått i denne oppgavens simulering der taket i tunnelen er buet. For geometrien vil det først og fremst legges en begrensning på modellens representasjon av den buede tunnelprofilen.
- Når varmeutviklingshastighet (HRR) med hensyn på varme- og røyktransport er spesifisert vil strømningshastighet og temperatur bli angitt med en nøyaktighet innenfor 10 – 20 % av eksperimentelle målinger, avhengig av oppløsningen av det numeriske meshet. Men for tilfeller hvor HRR kun er antatt og ikke spesifisert vil usikkerheten i modellen bli høyere.
- FDS bruker oftest en «Mixture Fraction» forbrenningsmodell, som tidligere omtalt. Modellen antar at reaksjonen av brennstoff og oksygen skjer uendelig raskt, uansett temperatur, og kan dermed anses som forblandet. For store og godt ventilerte branner er dette en stort sett en uproblematisk forutsetning, men passer dårlig for underventilerte branner hvor brensel og oksygen kan blandes uten forbrenning.
- Det er flere begrensninger for strålingsmodellen. For det første er røykgassens absorpsjon og emissivitet en kompleks funksjon av dens sammensetning og temperatur. Som følge av den forenklete forbrenningsmodellen, er røykens tilbakestråling avhengig av forbrenningsprodukter som er definert for brannen. Vanligvis er røykens bidrag til tilbakestråling avgjørende for mengden stråling som reflekteres tilbake på brannkilden eller bakken. Dermed kan beregningene være sensitive for forenklinger og antakelser som røykens sammensetning.

For det andre er stålingstransport kalkulert for 100 faste vinkler, men brukeren kan definere flere. For mål langt borte fra en strålingskilde, kan for få vinkler føre til en skjevfordeling av strålingsenergien, slik at den samles opp på enkelte punkter som svarer til vinklene. Økt vinkelantall vil imidlertid føre til betydelig lengre simuleringstid.

5.6 Feilsøking

I den 6. versjonen av FDS finnes det parametere eller funksjoner som er kjent for å ha problem der feil kan oppstå. Nedfor følger et utvalg av de mest kjente feilene i programmet.

Numerisk ustabilitetsfeil: Det er mulig at i løpet av en FDS beregning av strømningshastigheten at noen områder i domenet kan øke som følge av en numerisk feil forårsaket av et tidssteglengde reduseres til punkt hvor logikken i koden bestemmer at resultatene ikke lenger er fysiske og stopper.

Ved disse tilfellene ender FDS med å lage en avsluttende fil, «plot3D». Det er en filtype som sier noe om temperaturer, hastighetsprofiler, og HRR og lagres automatisk i det en FDS-fil krasjer. Dermed kan brukeren få mulighet til å se hvor feilen har oppstått innenfor beregningsdomenet. Her kan en analysere vektorene og få en indikasjon på hvorfor filen krasjet, oftest ved å identifisere unormalt store vektorer i et avgrenset område. Formatet kan også åpnes i andre plot-programmer enn SMOKEVIEW. Informasjonen lagres gjennom slicer langs x- og y-aksen gjennom midten av angitte mesh.

Vanlige årsaker til slike ustabiliteter er når meshcellene har et aspektforhold større enn 2 til 1, med høy hastighetsstrøm gjennom en liten åpning, en plutselig endring i varmeavgivelse, eller av en rekke plutselige endringer i strømningsfeltet.

Poisson oppstart: Feilmeldingen "Poisson initialization error" kan oppstå dersom angitte mesh mangler en eller flere dimensjoner, eller er feilaktig definert på annet vis.

Kjøretidfeil: Det kan oppstå feil enten i datamaskinens operativsystem eller i FDS programmet. Feilmeldingen vises enten i et vindu på operativsystem eller lagres i en fil. Det kan vise en indikasjon om en feil eller bare gi en enkel melding om segmenteringsfeil. Feilene kan være forårsaket av FDS og kan være mange forskjellige, som f.eks. når et tall blir delt med null eller en matrise blir brukt før den er tilordnet.

Foruten om de kjente feilene i programmet oppstår det ofte brukerfeil. Dette skyldes som regel skrivefeil i inndata, feil antagelser i med hensyn på inndatakoder og særlig med hensyn på forbrenningsmaterialet og generell mangel på forståelse.

5.7 Kontrollpunkter til simulering

For å unngå feil ved simulering kan en med fordel ha med kontrollpunkter både før og etter simulering for å kvalitetssikre beregningene i FDS. Punktene er hentet fra Nystedt og Frantzych [24] som omhandler brann, forbrenningsmodell, beregningsdomenet, materialdata og utdata.

Før simulering:

- En brann og effektutviklingen bør spesifiseres av brukeren og kan kontrolleres ved hjelp av den dimensjonsløse effektutviklingen, Q^* som er et mål på styrken av brannen i forhold til dens overflate. Den bør være i intervallet mellom 0,3 og 2,5 og beregnes på følgende måte:

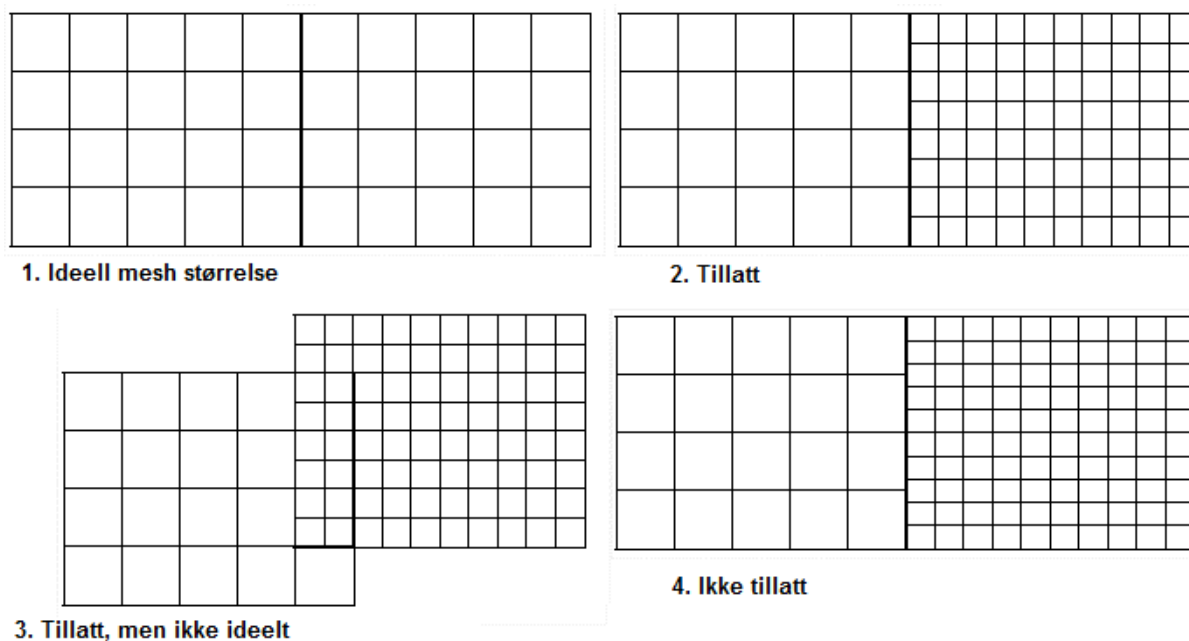
$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_\infty \sqrt{g D D^2}}$$

18: Brannens karakteristiske energiproduksjon [-]

hvor:

| | | | |
|-----------|---|---|----------------------|
| \dot{Q} | = | Brannens energiproduksjon | [kW] |
| ρ_0 | = | Lufttetthet (1,2 kg/m ³) | [kg/m ³] |
| c_p | = | Varmekapasitet (1 kJ/kgK) | [kJ/kgK] |
| T_0 | = | Omgivelsestemperatur (20°C = 293K) | [K] |
| g | = | Tyngdeakselerasjonen (9,81 m/s ²) | [m/s ²] |
| D | = | Brannens diameter | [m] |

- Kontroller at forholdet til beregningsmodellen ved $Q^*/\delta x$ som angir meshoppløsning bør være i størrelsesorden 10-20 nær brannen. δx angir lengde på ei celle i meter.
- Kontroller forbrennings- og materialeegenskaper
- Kontroller strålingsmodellen er brukt og at alle overflater har riktige varmeledningsegenskaper
- Kontroller at meshgrensen ikke er plassert i området med mye strømming
- Kontroller at meshene er satt opp riktig i forhold til hverandre. Som en ser av figuren under, innebærer den minste tillatte økningen i oppløsning ved mesh-grenser en halvering i cellestørrelsen. Dette vil utgjøre en forskjell på $2^3 = 8$ ganger celleantall per volumenhet. I utgangspunktet er den første overgangen vist på figuren, med størrelsesforhold 1:1, den beste. Og en bør vurdere om en vil øke oppløsningen på samtlige mesh, fremfor å åttedoble celleantallet i et begrenset område.



Figur 5.2: Meshoppsatt, hentet fra FDS User's Manual [43]

Etter simulering:

- Kontroller at strømningshastighetene ikke overstiger 10 m/s, særlig med vekt på åpninger og meshgrenser
- Kontroller at flammetemperaturen er mellom 700 og 1200 °C
- Kontroller at den adiabatisk flammetemperaturen ikke overstiger 1300 °C
- Ved forekomst av varmflekker på omsluttende vegger bør strålingsmollen justeres
- Kontroller at den simulerte effekten er i samsvar med den angitte

5.8 Nytt for FDS 6

FDS-versjonen som er brukt i forbindelse med dette prosjektet skiller seg ut fra tidligere versjoner, som den meste eksisterende litteraturen baserer seg på. Spesielt endringene i fysikk og SGS turbulensmodeller vil kunne ha stor betydning for hvordan brannenergien transporteres i tunnelen i samspill med ventilasjonsanlegget. Tidligere studier [2], [49] peker spesielt på kvaliteten av sub-grid turbulensresolusjon, som en viktig faktor for forutsigelsen av backlayering. Dersom det benyttes flere mesh, er forbedringene som er gjort for trykk- og hastighetskalkulasjoner i overgangene mellom mesher svært fordelaktige for tunellsimuleringer, hvor man gjerne forventer en gitt trykk og hastighetsprofil over større distanser.

Punktene under gir et innblikk i hvilke endringer som er gjort. Mange av endringene er svært tekniske, og befinner seg «under overflaten» med tanke på brukeropplvlsen.

- Store forbedringer innen hydrodynamikk og turbulensmodellering. Blant annet: Forbedrete veggfunksjoner (wall functions). Forbedret sub-grid turbulensresolusjon med dynamisk turbulent viskositet har tidligere vært problematisk jfr. referanse [49]. Støtte for fluider med variabelt Prandtl nummer. Problemer med energikonservering forårsaket av numerisk blanding (numerical mixing), er utbedret [46] kap.1.6. Forbedret prediksjon av kjemiske konsentrasjoner og temperatur, på bakgrunn av ny «flux limiter-modeller» både for LES og DNS (se kap 2.7.3).
- Tillater brukerdefinerte blandinger av kjemiske substanser.
- Mulighet for å produsere, transportere og konsumere forbrenningsprodukter som CO og sot.
- Bredere støtte for små objekter (Lagrangian Particles), som dråper eller kabler.
- Et system for HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) er implementert, og utvider mulighetene for å modellere vifter og transverse ventilasjonssystemer i tunneler.
- Forbedringer i strålingsmodellen.
- Forbedringer i trykk- og hastighetskalkulasjoner ved grensene av kumputeringsmesh.

6 Oppsett og inndata til simulering

6.1 Mesh og misc.

MISC linjen i FDS-inputfilen representerer globale verdier for simuleringen. For simuleringene blir det her lagt inn verdier for omgivelsestemperatur (vil også være hele domenets starttemperatur), SGS turbulent viskositetsmodell, og tilnærming av tunnelhelning ved å spesifisere gravitasjonsvektor tilsvarende tunnelgradienten på 3,2 %.

```

&MISC
  &MISC
    TMPA = 5.0 ,
    GVEC = 0.314 , 0 , -9.805 ,
    BAROCLINIC = .FALSE. ,
    P_INF = 101325.0 ,
    TURBULENCE_MODEL = 'DEARDORFF' /
  
```

Figur 6.1: FDS-kode 1: Typisk MISC-linje benyttet i simuleringene. Merk at definering av trykk og SGS turbulensmodell i dette tilfellet er overflødig, da angitte parametere er standard for FDS6.

I forbindelse med denne oppgaven har en benyttet simuleringer med ett enkelt mesh. Dermed unngikk man usikkerhet knyttet til bruk av flere mesh, og simuleringstidene viste seg å være akseptable uten å benytte seg av parallellprosessering.

For oppsett av mesh ble retningslinjene presentert i FDS User's Guide [46] s. 29 benyttet, slik at antall kontrollvolum i y- og z-retning blir tall som kan skrives på formen $2^l 3^m 5^n$, hvor l , m og n er heltall. Dette gjøres for å sikre mest mulig effektive beregninger.

Mesh-størrelse og oppløsning ble variert etter behov. Simuleringene ble dermed utført med en av to kontrollvolumstørrelser. Ved den groveste størrelsen, heretter kalt «moderat», hadde kontrollvolumene dimensjonene, xyz, $0,3751 \times 0,365 \times 0,39$ [m³]. Den mest detaljerte oppløsningen, heretter kalt «fin», hadde dimensjonene, xyz, $0,35 \times 0,292 \times 0,29$ [m³]. Gjennomsnittlig kontrollvolumstørrelse, δ_x , ble dermed 0,3767 m og 0,3107 m for henholdsvis «moderat» og «fin» mesh-oppløsning.

Forskjellen kan ved første øyekast se ut til å være relativt liten. Men en simulering med «fin» oppløsning medførte nesten dobbelt så mange kontrollvolumer som en simulering med samme ytre dimensjoner og «moderat» oppløsning. Dette som følge av sammenhengen påvist i [kap. 5.3](#). Simuleringene som ble gjort med ca. halve den totale tunnallengden inneholdt 546.240 og 988.200 208 kontrollvolumer for henholdsvis «moderat» og «fin» mesh-oppløsning.

De ytre målene for domenet ble også variert etter behov. Tunnelen ble forkortet i samtlige beregninger ved å avkorte tunnelen oppstrøms for brannen (i nordlig retning). Det ble hovedsakelig benyttet to standardlengder. Den korteste lengden startet ved målestasjonen «loop 207» ca. 100 m oppstrøms for brannen. Den lengste startet ved målestasjonen «loop 208» ca. 180 m oppstrøms for brannen, noe som ga en total lengde på 427 m, og tilsvarer omtrent halve tunnallengden. Det ble ikke utført sensitivitetsanalyse, hvor en simulerte hele

tunnellengden på 854 m. Dette har imidlertid blitt gjort i en rekke tidligere studier uten at det har blitt påvist vesentlig grad av sensitivitet [2], [20] og [1].

Følgende kode ble brukt for å definere mesh-et i simuleringene:

```

&MESH ID='MESH', IJK=1220,30,27, XB=-82.0,345.0,0.0,8.76,0.0,7.83/
  
```

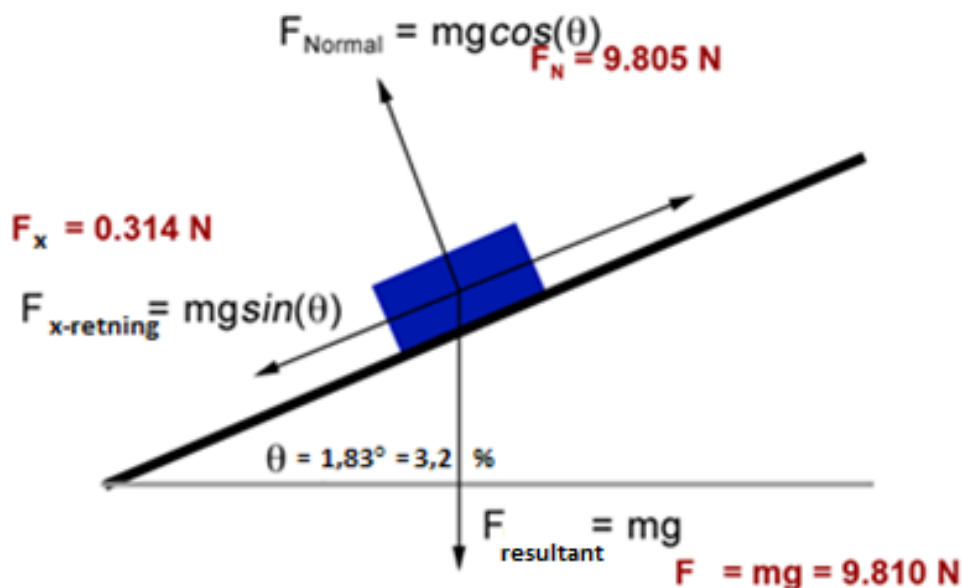
Figur 6.2: FDS-kode 2: Mesh-linjen som ble benyttet ved simuleringer med fin oppløsning og domene fra loop 208.

I figur 6.1 finner parameteren som heter «TURBULENCE_MODEL». En rekke småskalaprosesser i FDS krever beregninger som ikke kan løses på skalaen til de normale kontrollvolumene, og løses dermed på «subgrid-scale» (SGS), altså en skala som er mindre enn et kontrollvolum. For å oppnå god hydrodynamisk turbulensresolusjon, kreves SGS-beregninger for småskala fluidbevegelser som små Eddy-er eller virvler. En sentral parameter i disse beregningene er bestemmelsen av turbulent viskositet, μ_t .

Tidligere FDS-versjoner har vært begrenset til å beregne turbulent viskositet ved hjelp av én enkelt modell, kalt «Constant Smagorinsky model». Modellen har vist seg å være lite tilpassningsdyktig, og problematisk for lignende scenarioer [49] vedlegg A.2.2.3. FDS 6 har imidlertid introdusert tre nye modeller, som hver for seg har sine fordeler og ulemper. Det ble utført simuleringer med alle de fire modellene, Deardorff, Vreman, Dynamic Smagorinsky, og Constant Smagorinsky.

Det må også bemerkes at effekten av disse modellene vil være avhengig av kontrollvolumstørrelsen som velges for simuleringene, og den resulterende distribusjonen av turbulensresolusjon (se figur). Valg av størrelse for kontrollvolumer ble gjort blant annet etter vurderinger av simuleringenes turbulensresolusjon, der en ønsker at minst mulig av turbulensberegningene skulle løses på «subgrid» nivå.

For å gjenskape tunnelens reelle helning på 3,2 % fra nord til sør, ble gravitasjonskomponentene endret slik at resultanten i reflekterte den reelle vinkelen til tyngdekraften. Dette er en tilnærming som kun er egnet til tunneler med forholdsvis jevn helning uten lav- eller høybrekk. Tilnærmingen var imidlertid godt egnet til Memorial Tunnel.



Figur 6.3: Illustrerer gravitasjonskomponentene som blir benyttet for å angi tunnelens helning. Gravitasjonskomponenten i negativ z-retning for modellen med helning settes lik normalkraften fra bakken.

6.2 Geometri og obstruksjoner

Tunellgeometrien ble utformet for å representere de faktiske forhold i tunnelen på best mulig måte. Imidlertid må geometrien tilpasses slik at den kan representeres med de rettlinjede rektangulære kontrollvolumene i et mesh. Dette gjør at strukturerer som er for små eller komplekse til å representeres med firkanter i kontrollvolumenes størrelse må forenkles eller fjernes. På bakgrunn av at det ble benyttet to forskjellige oppløsninger i simuleringene måtte det følgelig modelleres to forskjellige tilnærminger til tunnelgeometrien.

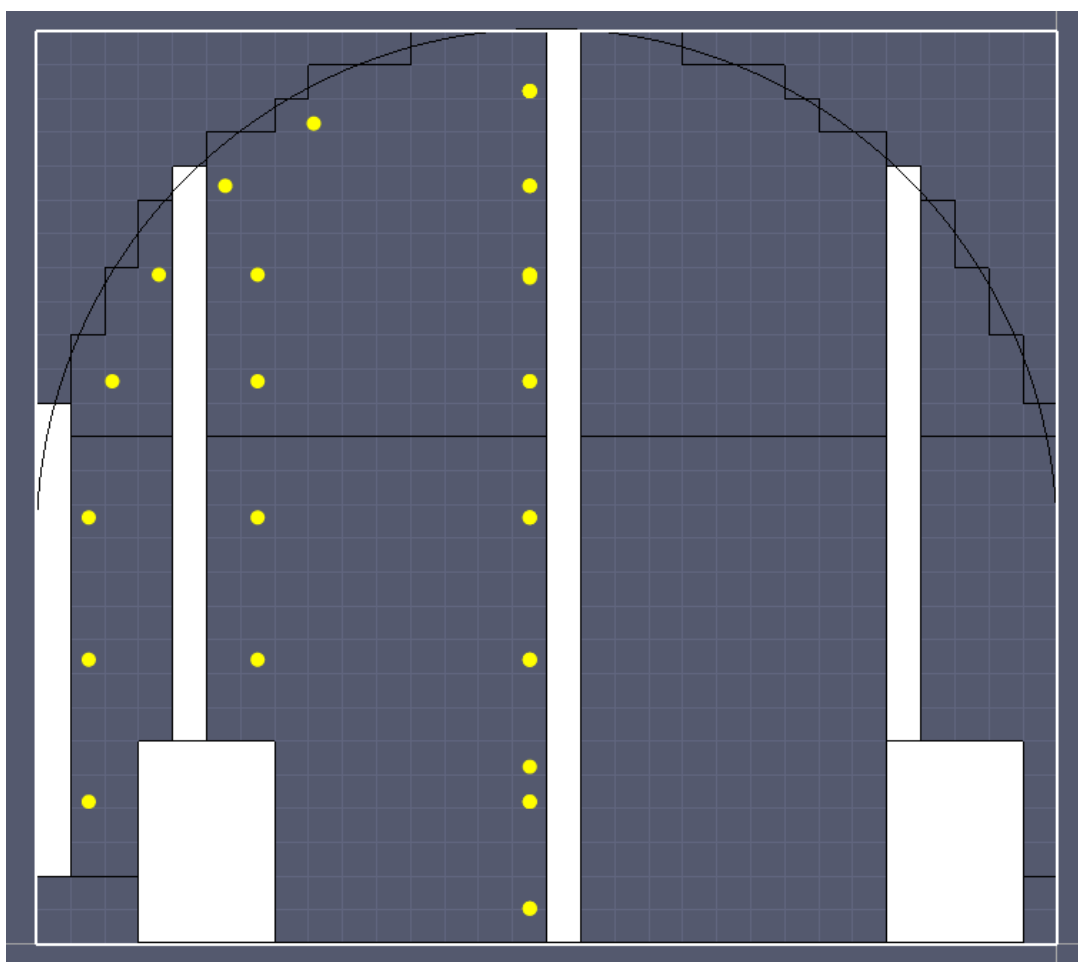
Tunnelbredden og høyden i midten av tunnelen var uproblematisk å modellere. Imidlertid bød den avrundete profilen i den øvre delen av tunnelen på en utfordring. Her måtte takets krumning tilpasses til de rektangulære kontrollvolumene som vist på figurene 6.4 og 6.5. Denne tilnærmingen ga tilsvarende tverrsnittsareal som i den reelle tunnelen, ca. 60 m^2 .

Ved hver enkelt målestasjon var det utplassert en rekke instrumenter. Der hvor en i de eksperimentelle forsøkene kunne forventet at instrumentene ville bli eksponert for sterk varme, ble instrumentene isolert. Isoleringen førte til at instrumentene ble forholdsvis store, og medførte ca. 17 % prosent mindre åpent tverrsnittsareal akkurat ved målestasjonene. Ikke bare utgjorde dette et hinder for luftgjennomstrømningen, men det medførte også økt lufthastighet akkurat ved målepunktene. Dette skyldes av at en lik mengde luft presses gjennom et mindre volum ved målestasjonene. Dermed ble det ansett som nødvendig å modellere måleinstrumentene i simuleringene.

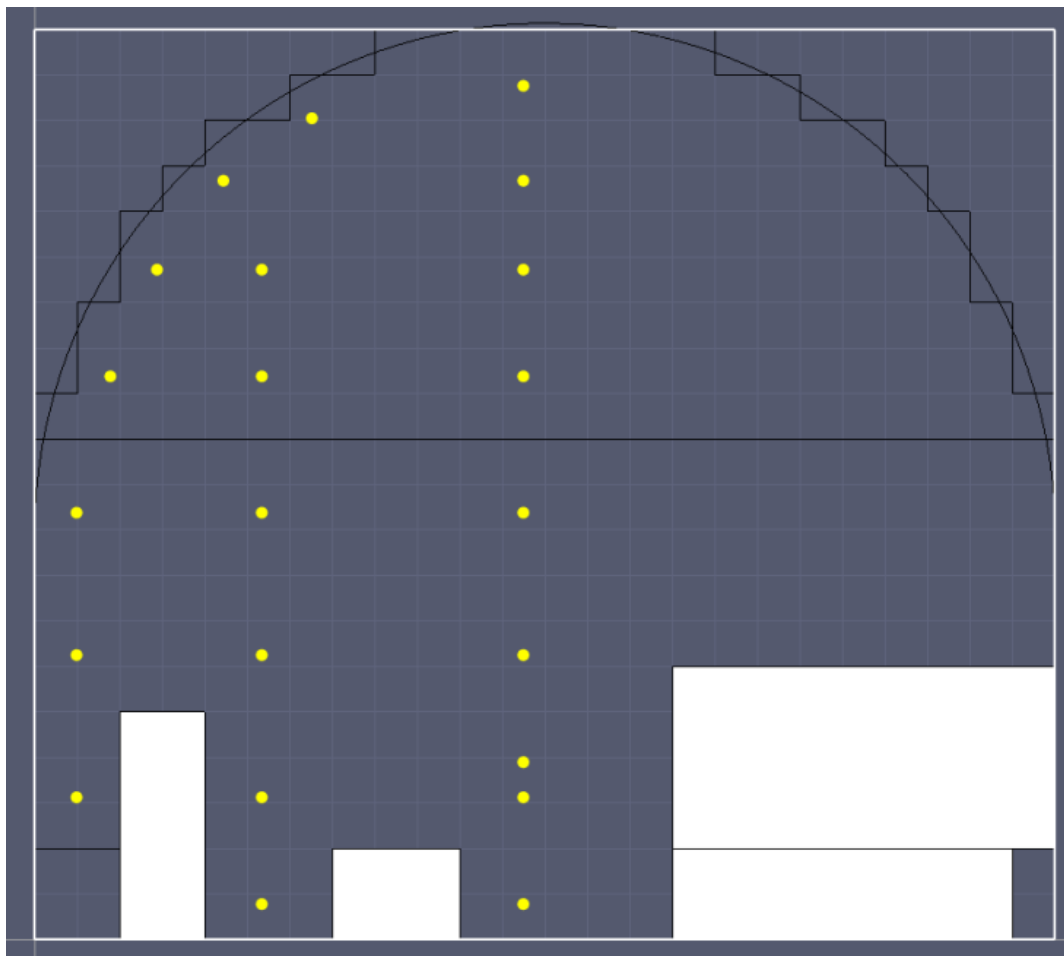
Alle målestasjonene var utstyrt med fire søyler som strakk seg opp til taket, kalt instrumenttrær. Ved de isolerte målestasjonene hadde disse instrumenttrærne en diameter på ca. 30 cm. Søylene ble modellert til å oppta akkurat én celle i x- og y-retning for simuleringer med «fin» oppløsning. Derimot ble «moderat» oppløsning vurdert til å være uegnet for slike søyler, da de ville oppta uforholdsmessig stort volum i høyden, sammenlignet med de faktiske forhold. Dermed ble måleinstrumentene kun representert gjennom blokker ved gulvet, for denne oppløsningen.

Målestasjoner med kun temperaturmålinger («loop 306» og «loop 303») ble kun representert ved instrumenttrær med «fin» mesh-oppløsning, med unntak av «loop 205». Sistnevnte målestasjon var plassert midt i brannsonen mellom brannkarene med 50 MW og 20 MW teoretisk HRR, og kan ses på figur 4.3. Dette ble gjort for å unngå usikkerheten knyttet til den ekstra turbulensen dette ville medført midt inni flammene. Uisolerte stasjoner innenfor domenet ble ikke modellert («loop 202»). Resterende målestasjoner («loop 207», «loop 307», «loop 305», «loop 304», «loop 302» og «loop 301») var isolerte og inkluderte måleinstrumenter representert gjennom bokser på bakken, i tillegg til instrumenttrærne i bakkant som vist på figur 4.7. Totalt opptok obstruksjonene for isolerte målestasjoner 10 m² både for «fin» og «moderat» oppløsning, noe tilsvarer 17 % av tunnelens tverrsnittsareal.

En fjernet imidlertid alltid obstruksjoner tilknyttet målestasjonen som var plassert helt i starten av domenet (typisk «loop 207»).



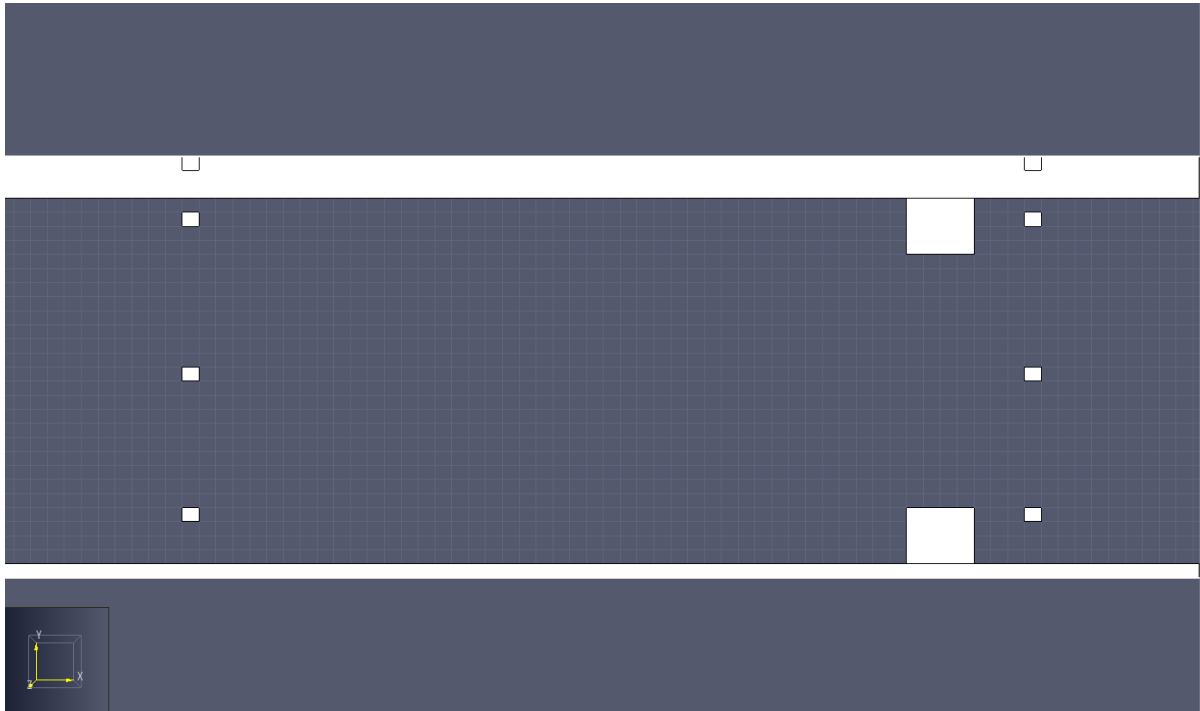
Figur 6.4: Snittegning av en «fin oppløst» modell. Grafisk representasjon er generert i brukergrensesnittprogrammet Pyrosim, utviklet av Thunderhead Engineering.



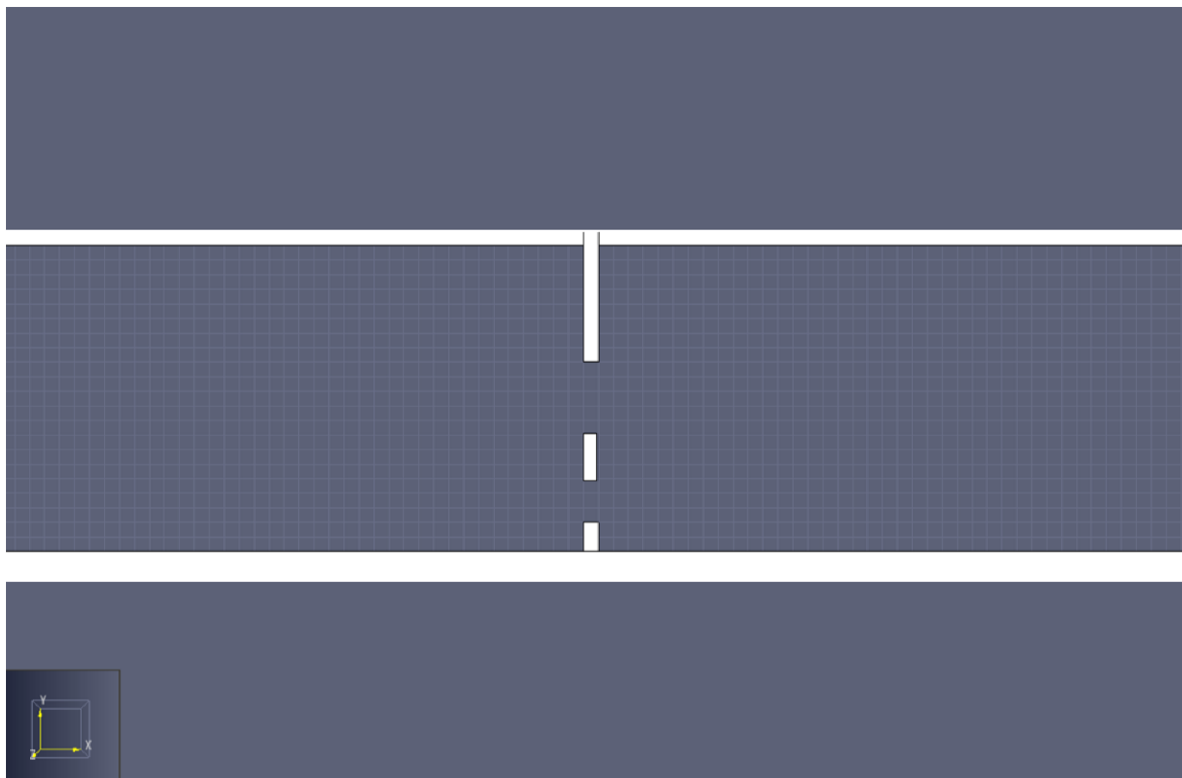
Figur 6.5: Snittegning av en «moderat oppløst» modell

Figur 6.4 og 6.5 viser en snittegning av modellene. Den ytre firkanten representerer grensen for domenet. Hver enkelt rute innenfor firkanten representerer ett kontrollvolum. Hver side av veibanen hadde veikanter, som kan ses nederst i venstre og høyre hjørne. Måleinstrumentene er representert med gule punkter, og er plassert for å reflektere den virkelige plasseringen angitt i testbeskrivelsen kap. 4.5. Isolerte målestasjoner er representert ved blokkene i forgrunnen. FDS-modellenes tilnærming til den sirkulære takprofilen er representert gjennom trappetrinnene øverst. Den faktiske profilen er representert som en hvit halvsirkel ved hjelp visuell modellering spesifikt for brukergrensesnittsprogrammet Pyrosim, og er kun med som et visuell sammenligningsgrunnlag for trappetrinntilnærmingen i taket. Den tynne vertikale linjen ca. på høyde med starten av takprofilen representerer takhøyden til vifterommet i enden av tunnelen.

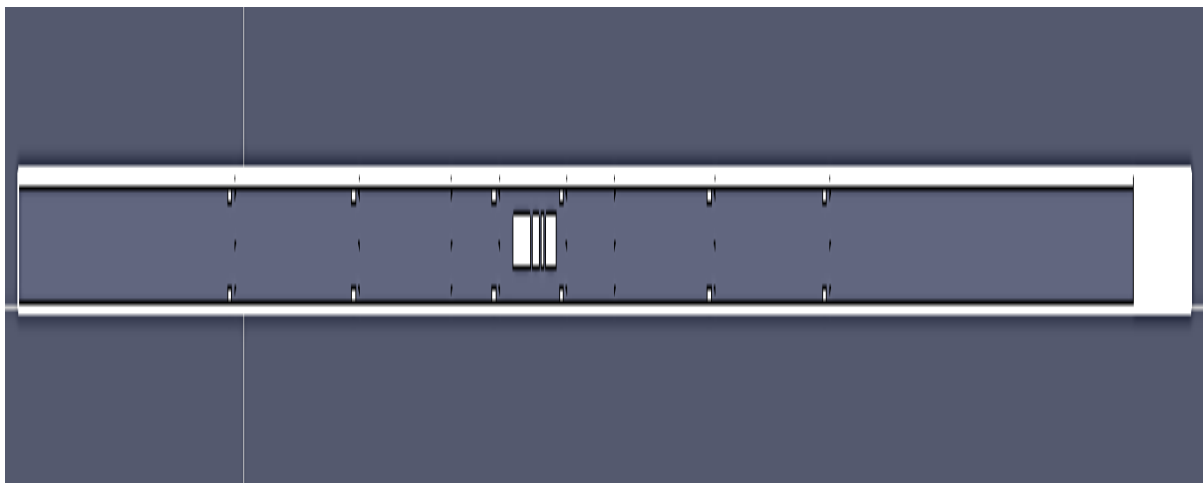
Ettersom tunnelen opprinnelig var utstyrt med tverrgående ventilasjonssystem var det konstruert et vifterom i hver ende av tunnelen, som opptok tverrsnittarealet til tunnelprofilen 4,33 m over gulvnivå og opp til taket. Vifterommene var 21,3 m lange og strakk seg til tunnelåpningene. Vifterommet i den sørlige enden nedstrøms for brannen ble modellert for begge oppløsninger. Det brått i reduserte tverrsnittarealet i enden av tunnelen bidro til å øke luftmotstanden, og lufthastigheten i det reduserte tverrsnittet ble betraktelig øket på samme måte som en opplevde ved det reduserte arealet tilknyttet isolerte målestasjoner.



Figur 6.6: Målestasjoner og veikanter sett ovenfra, med «fin» oppløsning



Figur 6.7: Målestasjoner og veikanter sett ovenfra, med «moderat» oppløsning



Figur 6.8: Oversiktsbilde av målestasjonsplassering, samt vifterom og brannsoner for modellen som starter ved «loop 208». Figuren er strukket i y-retningen for å lettere kunne tydes. Figuren viser modellen med «fin» oppløsning, men plasseringen er tilsvarende for «moderat oppløsning»

| Geometriske data | Reell tunnel | Simuleringer med «fin» oppløsning | Simuleringer med «moderat» oppløsning |
|---|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Bredde [m] | 8,76 | 8,76 | 8,76 |
| Høyde (høyeste punkt) [m] | 7,85 | 7,83 | 7,8 |
| Lengde [m] | 854 | 427 (loop 208) 345 (loop 207) | 427 (loop 208) 345 (loop 207) |
| Vifterommets lengde, bredde og høyde fra gulv [m] | 21 , 8,76 , 4,33 | 21,0 , 8,76 , 4,35 | 15,00 , 8,76 , 4,29 |
| Tverrsnitt [m ²] | Ca. 60 | Ca. 60 | Ca. 60 |
| Tverrsnittsareal, isolerte måleinstrumenter [m ²] | Ca. 10 | 10,2 | 9,68 |
| Omkrets for takoverflate [m] | 13,73 | Ca. 16 | Ca. 16 |

Tabell 6.1: Geometriske data for modellene sammenlignet med testtunnelen.

6.3 Overflater og materiale

FDS tillater at en spesifiserer overflate- og materialegenskaper for alle obstruksjoner og mesh-grenser. I hovedsak vil disse egenskapene angi hvordan enhver overflate absorberer og reflekterer energien den blir eksponert for.

Egenskapene ble basert på antatte reelle materialegenskaper hentet fra forskjellige kilder. De viktigste materialene ble ansett som tunellvegger og tak, fordi det er disse som i størst grad kommer i kontakt med røyklaget, hvor det skjer konvektiv varmetransport, og termisk konduksjon videre inn i materialet. Det er også forventet at vegger og tak vil absorbere og reflektere størst mengde varmestråling av overflatene i tunnelen.

Tunnelveggene ble definert som 1 m tykk betong, med uendelig godt isolert bakside (BACKING=INSULATED). Alle materialegenskaper for betong ble hentet fra NS-EN 1992-1-2:2004 [17]. Ettersom en forventet at betongen ville bli utsatt for varierende temperaturer benyttet en seg av formlene for temperaturavhengig termisk konduktivitet og spesifikk varmekapasitet, hentet fra Eurokode 2. Overflate- og materialegenskaper som ble definert for betong blir illustrert i figur 6.9, FDS-kode 3.

Data for veibanen ble hentet fra «Assessment of Temperature Fluctuations in Asphalt (...)» [50] og A Laboratory Investigation of Temperature Profiles and Thermal Properties of Asphalt Pavements [51].

Det ble i kap. 7.4.4 av MTFVTP Phase IV rapport [3] konkludert med at ca. 0,003 m var en egnet «roughness height» for vegger og tak i Memorial Tunnelen. Denne verdien ble benyttet til betongvegger, betongtak, og veibane.

Ca. 70 meter nord og sør for sentrum av brannen var tunnelen utstyrt med et ca. 15 cm tykt lag med isolasjon av typen «Vermiculite». Her ble det benyttet materialegenskaper hentet fra Temperature Dependent Thermal Properties of Fire Protection Materials [52], med temperaturavhengig varmekonduktivitet. Dette laget ble definert via en egen «surface id» for tak og vegger i det angitte området. Hvor materialet ble angitt som det ytterste laget, med et 1 m tykt betonglag på innsiden.

Den nordlige veggen mot vifterommet ble angitt som «Free slip», altså uten overflatefriksjon, for å unngå uhensiktsmessige turbulensberegninger inntil veggen i et område som hadde liten betydning for simuleringresultatene. Det samme gjaldt obstruksjonene som var generert i forbindelse med målestasjonene, da en ønsket å begrense turbulensen disse forårsaket.

Brannkarene ble modellert med inerte sider, og brenseloverflate med materialegenskaper tilsvarende et 5 cm tykt lag med Fuel Oil No. 2 i væskeform, med egenskaper hentet fra Applications Guide [18]. Et inert materiale vil alltid holde omgivelsestemperatur.

```

&SURF      ID              = 'TUNNEL WALL' ,
           COLOR          = 'INVISIBLE' ,
           MATL_ID        = 'CONCRETE' ,
           BACKING        = 'INSULATED' ,
           THICKNESS      = 1.0 ,
           ROUGHNESS      = 0.003 /

&MATL ID              = 'CONCRETE' ,
FYI= 'EN 1992-1-2:2004 ,

           SPECIFIC_HEAT_RAMP      = 'c_conc' ,
           CONDUCTIVITY_RAMP       = 'k_conc' ,
           DENSITY                  = 2100 ,
           EMISSIVITY              = 0.7 /

&RAMP ID='c_conc' , T=20. , F=0.9 /
&RAMP ID='c_conc' , T=100. , F=1.5 /
&RAMP ID='c_conc' , T=115. , F=1.5 /
&RAMP ID='c_conc' , T=130. , F=1.41176470588235 /
&RAMP ID='c_conc' , T=145. , F=1.32352941176471 /
&RAMP ID='c_conc' , T=160. , F=1.23529411764706 /
&RAMP ID='c_conc' , T=175. , F=1.14705882352941 /
&RAMP ID='c_conc' , T=190. , F=1.05882352941176 /
&RAMP ID='c_conc' , T=200. , F=1 /
&RAMP ID='c_conc' , T=300. , F=1.05 /
&RAMP ID='c_conc' , T=400. , F=1.1 /
&RAMP ID='c_conc' , T=1200. , F=1.1 /

&RAMP ID='k_conc' , T=20. , F=1.642218 /
&RAMP ID='k_conc' , T=100. , F=1.49765 /
&RAMP ID='k_conc' , T=200. , F=1.3317 /
&RAMP ID='k_conc' , T=300. , F=1.18215 /
&RAMP ID='k_conc' , T=400. , F=1.049 /
&RAMP ID='k_conc' , T=500. , F=0.93225 /
&RAMP ID='k_conc' , T=600. , F=0.8319 /
&RAMP ID='k_conc' , T=700. , F=0.74795 /
&RAMP ID='k_conc' , T=800. , F=0.6804 /
&RAMP ID='k_conc' , T=900. , F=0.62925 /
&RAMP ID='k_conc' , T=1000. , F=0.5945 /
&RAMP ID='k_conc' , T=1100. , F=0.57615 /
&RAMP ID='k_conc' , T=1200. , F=0.5742 /
  
```

Figur 6.9: FDS-kode 3: «Surface id» og «material id» for betong, som ble benyttet i simuleringer som inkluderte surface roughness. T, representerer materialets temperatur, mens F, representerer den faktiske verdien for materialets konduktivitet eller spesifikke varmekapasitet

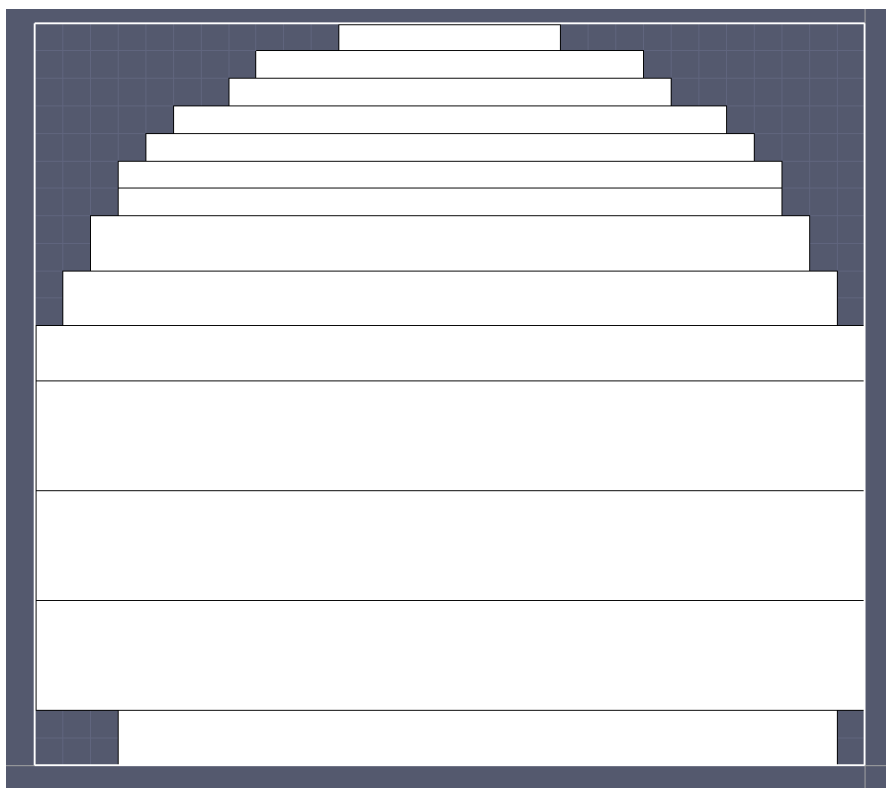
6.4 Ventilasjon

I de eksperimentelle forsøkene ble den langsgående ventilasjonen levert av en rekke takmonterte vifter, montert iht. beskrivelsene i kap.3.2. Hastighetsprofilen i tunnelen ble så målt i midten av tunnelen i åtte forskjellige høyder ved de fleste målestasjonene, noe som muliggjør forholdsvis detaljert gjenskaping ventilasjonsforholdene ved en CFD-simulering.

For å reproducere den langsgående tidsvarierte ventilasjonen som ble målt i fullskalaeksperimentene, benyttet en aksiale utblåsningsoverflater («exhaust vents») med tidsavhengig utblåsningshastighet. Hver overflate angir en gitt lufthastighet i tunnelens lengderetning. Det ble spesifisert flere overflater i høyden, slik at man gjenskapte høydevariasjonen i ventilasjonshastighetsprofilen.

Hastighetsprofilen ble direkte reproduisert akkurat ved målestasjonen en hentet dataen fra. Korrelasjon med øvrige målepunkter er avhengig av FDS-modellens evne til å gjenskape de reelle fysikalske forhold. Det er viktig å merke seg at alle aktive vifter i fullskalaforsøk TEST621A var plassert i nordlige halvdel av tunnelen, oppstrøms for målestasjon loop «208». Ventilasjonshastigheten langs den simulerte delen av tunnelen vil dermed variere hovedsakelig basert på trykkvariasjon og fysiske hindringer i tunnelen.

Den sørlige enden av tunnelen (x_{max}) var definert som åpen til omgivelsene. Ventilasjonsflatene oppstrøms for brannen kunne gjennomtrenges, og den nordlige enden av domenet (x_{min}) var dermed blokkert. Da det ikke eksisterte øvrige åpninger måtte all massetransport og trykkavlastning ut av domenet skje gjennom åpningen i sør.



Figur 6.10: Tverrsnitt av tunnelen med «fin» oppløsning. Figuren viser oppdelingen av ventilasjonsoverflatene. Merk at flere av overflatene har samme hastighet, men må modelleres separat pga. trappetrinnformen i øvre halvdel av tunnelen.

```

&OBST XB=-82.0,-82.0,3.212,5.548,7.54,7.82,
SURF_IDS='INERT','VENT H SURF' / Vent H3

&SURF ID='VENT A SURF',VEL=-3.918,RAMP_V='VENT A' /

&RAMP ID='VENT A',T=0,F=0.0 /
&RAMP ID='VENT A',T=10,F=0.826960888370829 /
  
```

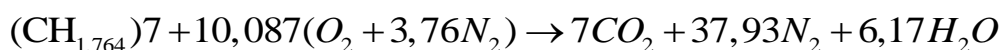
Figur 6.11: FDS-kode 4: Eksempel på ventilasjonsflater med tidsvarer hastighet.

6.5 Brann

I fullskalaforsøkene ble det benyttet bassengbrann i kar med Fuel Oil No. 2. Dette hydrokarbonbrenselet er et petroleumdestillat med egenskaper svært lik diesellole, uten de tilsetningsstoffer som assosieres med diesel i drivstoffrom [53]. Det har også et nært slektskap med parafin (kerosene), som også betegnes som Fuel Oil No. 1 i ren form. Forskjellen mellom råoljedestillat nummer 1 og 2 er den typiske lengden på karbonkjedene, hvor nummer 1 typisk har kjedelengde mellom C9 og C16, mens nummer 2 er noe tyngre og har kjedelengde mellom C11 og C20. Den kjemiske sammensetningen av en gitt brenselolje vil kunne variere fra parti til parti, og da distinksjonen mellom brenselolje nummer 1 og 2 overlapper med hensyn på karbonkjedelengde er det rimelig å vurdere bruk av forbrenningskarakteristika for både brenselolje 1 og 2, for å representere brannen i tunnelen.

Den sammensetningen av Fuel Oil No. 2 er i boken Combustion Fundamentals [54] angitt til å være ca. 86,4 % karbon og 12,7 % hydrogen basert på stoffenes massefraksjon. Når en videre vet at karbon veier 12 ganger mer enn hydrogen kommer en fram til kjemisk likning $\text{CH}_{1,764}$.

For fullstendig forbrenning i teoretisk luft får følgende basert på likning for forbrenning av hydrokarbon i luft [54] s. 63:



19: Forbrenning av hydrokarbon i luft [-]

Da brenselet er et hydrokarbon kan dens kjemiske struktur legges direkte inn i den forenklete forbrenningsmodellen til FDS se likning 5.1 i kap. 5.3. understøttet av FDS User's Guide [46] kap.11 s. 117. Dermed kan en definere alle kvantiteter gjennom de enkle kjemiparameterne (Simple Chemistry Parameters) på reaksjonslinjen.

En har brukt verdier for forbrenningsvarme hentet fra «Combustion Fundamentals» [54] kap. 2 s.77. Verdien er videre korrelert med tabell C4, appendix C «The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering» [38]. CO- og sotproduksjon var mer problematisk å definere, da det er begrenset tilgang på gode måledata, og fordi produksjonen er avhengig av hver enkelt brann beskaftenhet og forbrenningseffektivitet.

Enheten for sot og CO-produksjon er masseforholdet mellom 1 kg forbrent brensel og den resulterende mengden av forbrenningsproduktet målt i kilo. Det ble her benyttet verdier hentet fra en amerikansk forsvarsstudie av forbrenningsprodukter for Diesel Oil No. 2 [55]. CO-produksjonen ble angitt til å være 0,03 kg/kg, mens sotproduksjonen ble angitt som 0,038 kg/kg. Tilsvarende verdier for parafin, hentet fra «The SFPE Handbook of Fire Protection

Engineering [38] The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering» angir 0,012, og 0,042 kg/kg. Det er videre benyttet standardverdi for hydrogeninnholdet i soten.

FDS-modellen for pool fires har liten grad av validering, og det ble vurdert som hensiktsmessig å simulere brannen som en gassbrenner med enkel forbrenningskjemi, og definert varmeavgivelse per arealenhet (HRRPUA). Det totale brannarealet ble målt til å være 44,15 m² for «fin» oppløsning. For simuleringer med tidsavhengig HRR ble «ramp»-funksjonen benyttet. Her definerte en den tidsavhengige varmeavgivelsesraten.

For å unngå numerisk ustabilitet benyttet en som regel de første sekundene av simuleringen til å gradvis eskalere varmeavgivelsesraten. For simuleringer av TEST621A hadde en tilgang til eksperimentelle HRR-verdier for 30 sekunders intervaller gjennom hele forsøket. Disse dataene ble tilpasset til rampfunksjonen ved hjelp av et Excel-regneark. FDS benytter automatisk lineær interpolasjon for å generere verdier mellom hvert definerte tidssteg. Det største registrerte toppen for et eksperimentelt HRR-intervall var et hopp fra 130 til 160 MW. Denne toppen ble fjernet og, høyeste HRR-verdi fordelt på brannarealet ble dermed 130 MW.

En har benyttet standardverdien i FDS for strålingsandel i brannen, altså 0,35. Strålingsandelen vil trolig ligge et sted mellom 0,2 og 0,4 [56]. Typisk vil de være avhengig av type brensel og brannens diameter, og mengden røyk som dekker brannen. Til tross for at det ikke ble gjort strålingsmålinger i Memorial Tunnel forsøkene ble det i Memorial Tunnel Phase 4 rapport [3] kap.6.2.3 utført usikkerhetsanalyse i forbindelse med strålingsandelen fra brannen. Her endte man opp med en strålingsandel på 0,3 med usikkerhet ±0,05. Dette kan indikere at benyttede strålingsandel ligger i øvre sjiktet av hva man skulle forvente, men er på ingen måte en uakseptabel antakelse.

```

&REAC ID='Fuel oil 2',
      C           = 7.00 ,
      H           = 13.00 ,
      O           = 0.00 ,
      N           = 0.00 ,
      HEAT_OF_COMBUSTION = 44000.0 ,
      CO_YIELD     = 0.03 ,
      SOOT_YIELD   = 0.0380 ,
      IDEAL        = .FALSE. ,
      SOOT_H_FRACTION = 0.1 / default SOOT_H

&SURF ID           ='FIRE',
      COLOR         ='ORANGE RED',
      HRRPUA        =2040.0 / 44.15 x 2040 gives 90 MW

Fire pans with total fuel area 44.15 m2:

&VENT XB=98.25,104.55,2.628,6.132,1.16,1.16, SURF_ID= 'FIRE' / 50
MW 22.0752 m2 (18 x 12 cells)

&OBST XB=98.25,104.55,2.628,6.132,0.0,1.16, SURF_IDS='FUEL
SURFACE', 'INERT', 'INERT' / 50 MW FUEL SURFACE

&VENT XB=105.25,107.7,2.628,6.132,1.16,1.16, SURF_ID= 'FIRE' / 20
MW 8.5848 m2 (7 x 12 cells)

&OBST XB=105.25,107.7,2.628,6.132,0.0,1.16, SURF_IDS='FUEL
SURFACE', 'INERT', 'INERT' / 20 MW FUEL SURFACE

&VENT XB=110.15,114.0,2.628,6.132,1.16,1.16, SURF_ID= 'FIRE' / 30
MW 13.4904 m2 (11 x 12 cells)

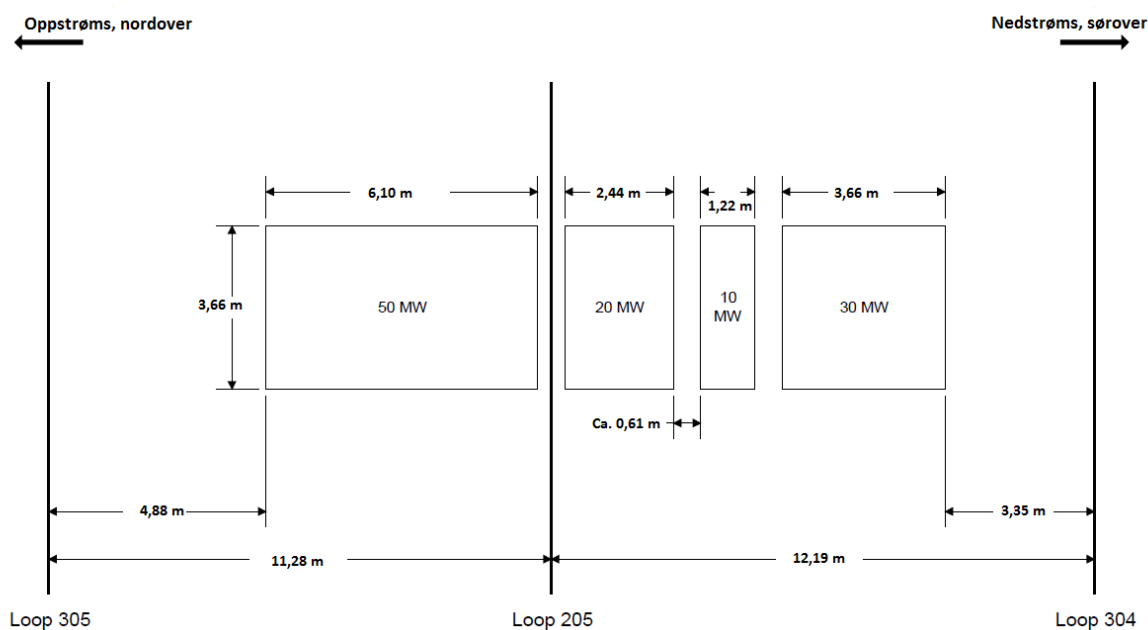
&OBST XB=110.15,114.0,2.628,6.132,0.0,1.16, SURF_IDS='FUEL
SURFACE', 'INERT', 'INERT' / 30 MW FUEL SURFACE
  
```

Figur 6.12: Definerings av brannen for simuleringer av kritisk hastighet. Reaction id er lik for samtlige simuleringer som er kjørt, mens en benytter av tidsavhengig HRRPUA for simuleringer av TEST621A.

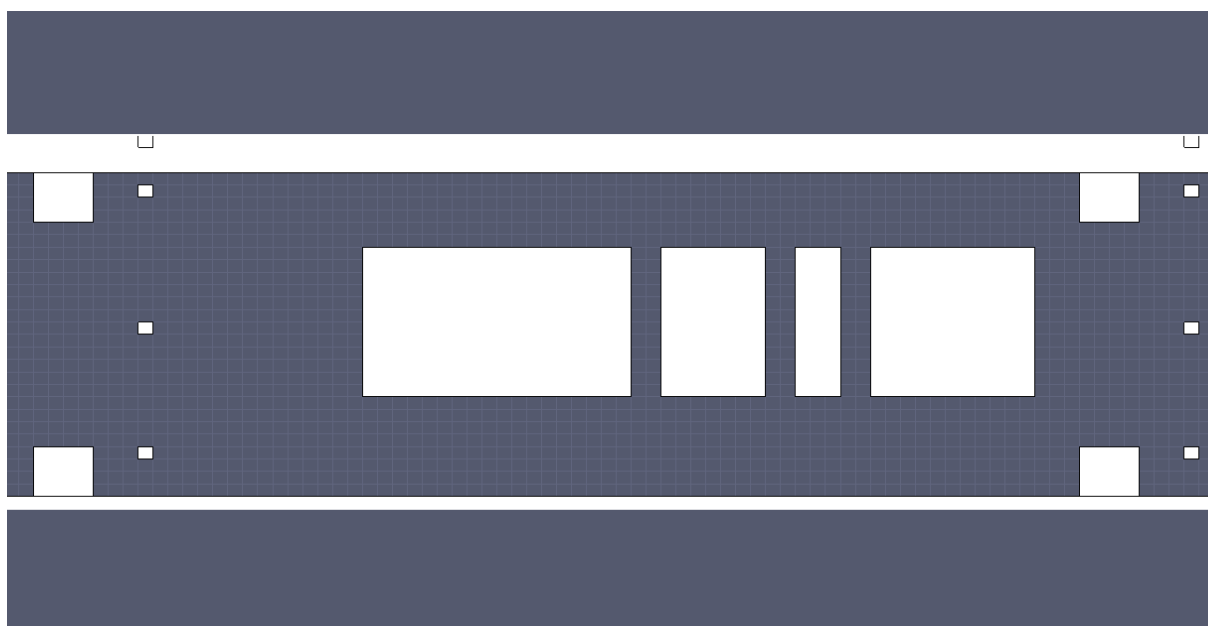
| | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| &SURF ID | = 'FIRE ' |
| COLOR | = 'ORANGE RED ' |
| HRRPUA | = 2918.68 , |
| RAMP_Q | = 'FIRE_RAMP_Q' / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=0, | F=0 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=10, | F=0.134128768597068 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=38, | F=0.437407878743955 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=68, | F=0.800871933107152 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=98, | F=0.892628336016142 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=128, | F=0.940250299129346 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=158, | F=0.796628212396656 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=188, | F=0.748637444773268 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=217, | F=0.383135380944042 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=247, | F=0.461060801222044 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=278, | F=0.517140725790005 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=308, | F=0.5249930264649 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=338.5, | F=0.479496089531784 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=368, | F=0.462624981977528 / |
| &RAMP ID= 'FIRE_RAMP_Q', T=397.5, | F=0.641157910257827 / |

Figur 6.13: FDS-kode 6: Brannens overflate id og de første tidsstegene for «ramping» av HRR i simuleringer av TEST621A. T, indikerer tid og F indikerer koeffisienten HRRPUA skal ganges med ved det gitte tidsintervall.

Det ble brukt samme brannoverflate (Surface ID) på samtlige kar, og dermed hadde hvert av karene, med unntak av 10 MW karet som ikke var i bruk i de aktuelle eksperimentelle testene, samme HRRPUA.



Figur 6.14: Oversiktsbilde av brannområdet i testtunnelen [3]



Figur 6.15: Oversiktsbilde av brannområdet med «fin» oppløsning

| Dimensjoner for brannkar | Reell tunnel | Simuleringer med «fin» oppløsning | Simuleringer med «moderat» oppløsning |
|--|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Høyde [m] | 0,914 | 1,16 | 1,17 |
| Bredde [m], og antall celler | 3,66 | 3,504 , 12 celler | 4,38 12 celler |
| Total lengde fra ende til ende av brannområdet [m] | 15,24 | 15,75 | 14,63 |
| Lengde, hhv. 50, 30, og 20 MW [m] og antall celler. | 6,10 , 3,66 , 2,44 | 6,3 , 3,85 , 2,45 18, 11, 7 celler | 5,25 , 3,00 , 2,25 14, 8, 6 celler |
| Karenes areal, hhv. 50, 30, og 20 MW [m ²] | 22,30, 13,38 , 8,92 | 22,10 , 13,49 , 8,60 | 23,00 , 13,14 , 9,86 |
| Totalt brannareal [m ²] | 44,59 | 44,15 | 46,00 |

Figur 6.16: Geometriske data for modellene sammenlignet med testtunnelen

6.7 Måleinstrumenter

Måleinstrumentene ble i FDS konfigurert til å etterligne instrumentering i fullskalaforsøkene. Det for måleinstrumenter der en hadde tilgang til instrumentdata har en forsøkt å produsere sammenliknbar utdata i FDS. Dette gjaldt i hovedsak målinger for temperatur, og ventilasjonshastighet, men også CO-konsentrasjoner.

I tillegg ble det utplassert diagnostiske verktøy som mål for turbulensresolusjon, og en rekke slice-filer for å lettere visualisere forholdene i tunnelen gjennom Smokeview.

En var påpasselig med å plassere punktinstrumenter slik at de var utelukkende inne i én enkelt celle. Punktinstrumenter måler normalt kvantiteter for hele cellen den befinner seg i, uten

noen form for interpolering, jf. FDS User's Guide [46] kap.15.1. Slice-filer vil imidlertid automatisk interpolere skalare kvantiteter som normalt måles i midten av cellene til cellehjørnene før de vises i Smokeview, jf. FDS User's Guide [46] kap.16.4.

Thermocouples:

```
&DEVC ID='Loop 208 A Centre Thermo',          QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=-81.125,4.526,0.3048,  PROP_ID='BEAD 1mm' /
```

```
&DEVC ID='2Loop 208 A Centre Thermo',        QUANTITY='THERMOCOUPLE',
XYZ=-81.125,4.526,0.3048,  PROP_ID='BEAD 3mm' /
```

```
&DEVC ID='3Loop 208 A Centre Thermo',        QUANTITY='TEMPERATURE',
XYZ=-81.125,4.526,0.3048,  PROP_ID='BEAD 3mm' /
```

Velocity:

```
&DEVC ID='VP 208 A Local',                    QUANTITY='U-VELOCITY',
XYZ=-81.125,4.526,0.3048 /
```

CO:

```
&DEVC ID='CO 208 5 ft',                      XYZ=-81.125,4.526,0.3048
QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', DRY=.TRUE. /
```

Non local measurements (local in this instance as no obstructions are modelled):

```
&DEVC XB=-81.125,0.01,8.75,0.01,7.82,      QUANTITY='VOLUME FLOW',
ID='Loop 208' /
```

```
&SLCF PBX= -81.125,                          QUANTITY='U-VELOCITY',
VECTOR=.TRUE. / loop 208
```

```
&SLCF PBX= -81.125,                          QUANTITY='TEMPERATURE' /
```

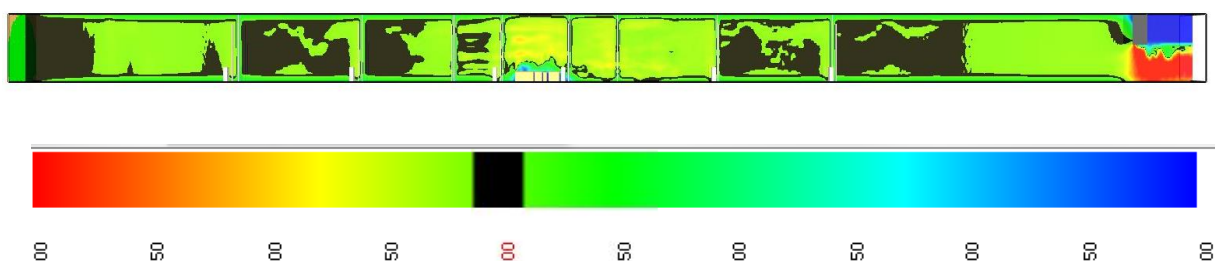
```
&DEVC XYZ=-81.125,4.38,7.82,                QUANTITY='INSIDE WALL
TEMPERATURE', DEPTH=0.005, ID='wt_lp_208_dp005', IOR=-3 /
```

Figur 6.17: FDS-kode 7: Eksempel på måleinstrumenter ved loop 208 i simuleringer med «fin» mesh-oppløsning. Kun en av hver type er vist. Den fullstendige inputfilen inneholdt imidlertid måleinstrumenter som representerte samtlige plasseringer av data som ble loggført.

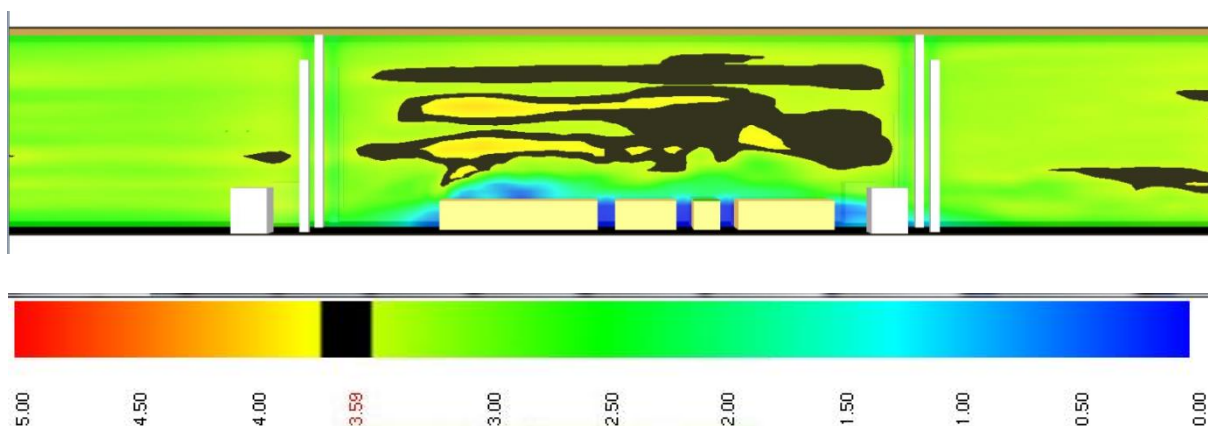
7 BEREGNINGSRISULTAT

7.1 «Cold flow»

For å undersøke at luftgjennomstrømningen i tunnelen var representativ, ble det kjørt en test uten brann, med konstant ventilasjonshastighet over hele tverrsnittet ved ventilasjonsoverflatene. Figurene under viser slice-filer for lufthastighet [m/s] i senter av tunnelen, som er visualisert i Smokeview. Merk den økte hastigheten under vifterommet på den øverste illustrasjonen, og den nederste illustrasjonen som viser at den kalde lufstrømmen har noe høyere hastighet over brannområdet, da tverrsnittet blir redusert av brannkarene. Figurene viser også at instrumentreet i senter av tunnelen har forholdsvis beskjeden lokal effekt på lufthastigheten i midten av tunnelen.



Figur 7.1: Oversiktsbilde av hele tunnelen som er strukket i y-retning.



Figur 7.2: Ventilasjonshastigheten i midten av tunnelen med «fin» oppløsning. Vegger og tak er gjort usynlige. De nederste tallverdiene til figurene angir hastighet i m/s, og hvilken hastighet som utheves med svart.

7.2 Test 621A

7.2.1 Scenariobeskrivelse

Testdata viser at backlayering forekom i perioden ca. 600-900 sekunder, etter at den gjennomsnittlige ventilasjonshastigheten oppstrøms for brannen underskred empiriske kritisk hastighet på 2,5-3,0 m/s. I denne tidsperioden ble HRR noe redusert på grunn av mindre lufttilgang.

7.2.2 Simuleringsoversikt

Simuleringene har følgende oppsett med mindre noe annet er nevnt spesifikt i beskrivelsen:

SGS turbulensmodell: Standard «Deardorff».

Overflategrovheter (wall roughness): 0,003 m for tunnelvegger og tak utenfor «fire zone», og 0,004 m for vegger og tak i «fire zone». Gulvet hadde over hele lengden 0,003 m grovhet. «Fire zone» er som nevnt en sone med ekstra isolasjon av vegger og tak som strekker seg 75m i hver retning av sentrum for brannkarene.

Ventilasjons hastighet: Ventilasjonshastigheten følger de tidsavhengige eksperimentelt målte hastighetene ved de 8 forskjellige målehøydene i tunnelen. Det er benyttet data fra målestasjon 208 eller 207 avhengig av hvor den nordlige domenegrensen går.

HRR: Følger eksperimentelt målte verdier for effektiv varmeavgivelsesrate, angitt for hvert 30. sekund.

Obstruksjoner: Målestasjoner og vifterom som angitt i simuleringsoppsett.

FDS 6 208 fin:

Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208. «Fin» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 480 sekunder.

FDS 6 208 moderat csmag:

«Constant Smagorinsky» SGS-turbulensmodell. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208. «Moderat» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 1600 sekunder.

FDS 6 207 fin:

Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 207. «Fin» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 420 sekunder.

FDS 6 207 fin freeslip:

Ingen overflategrovheter, og tak med «FREESLIP=.TRUE.». Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 207. «Fin» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 410 sekunder.

FDS 6 207 fin koeffisient:

Ventilasjons hastigheten er for denne simuleringen doblet, sammenlignet med de eksperimentelle dataene. Dette samsvarer med at kritisk hastighet ser ut til å være ca. 5 m/s for simuleringene. Simulering foretatt i FDS6 med domene fra og med loop 207. «Fin» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 300 sekunder.

FDS 6 207 moderat:

Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 207. «Moderat» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 1600 sekunder.

FDS 6 207 moderat csmag:

«Constant Smagorinsky» SGS-turbulensmodell. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 207. «Moderat» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 1600 sekunder.

FDS 6 207 moderat csmag uten loops:

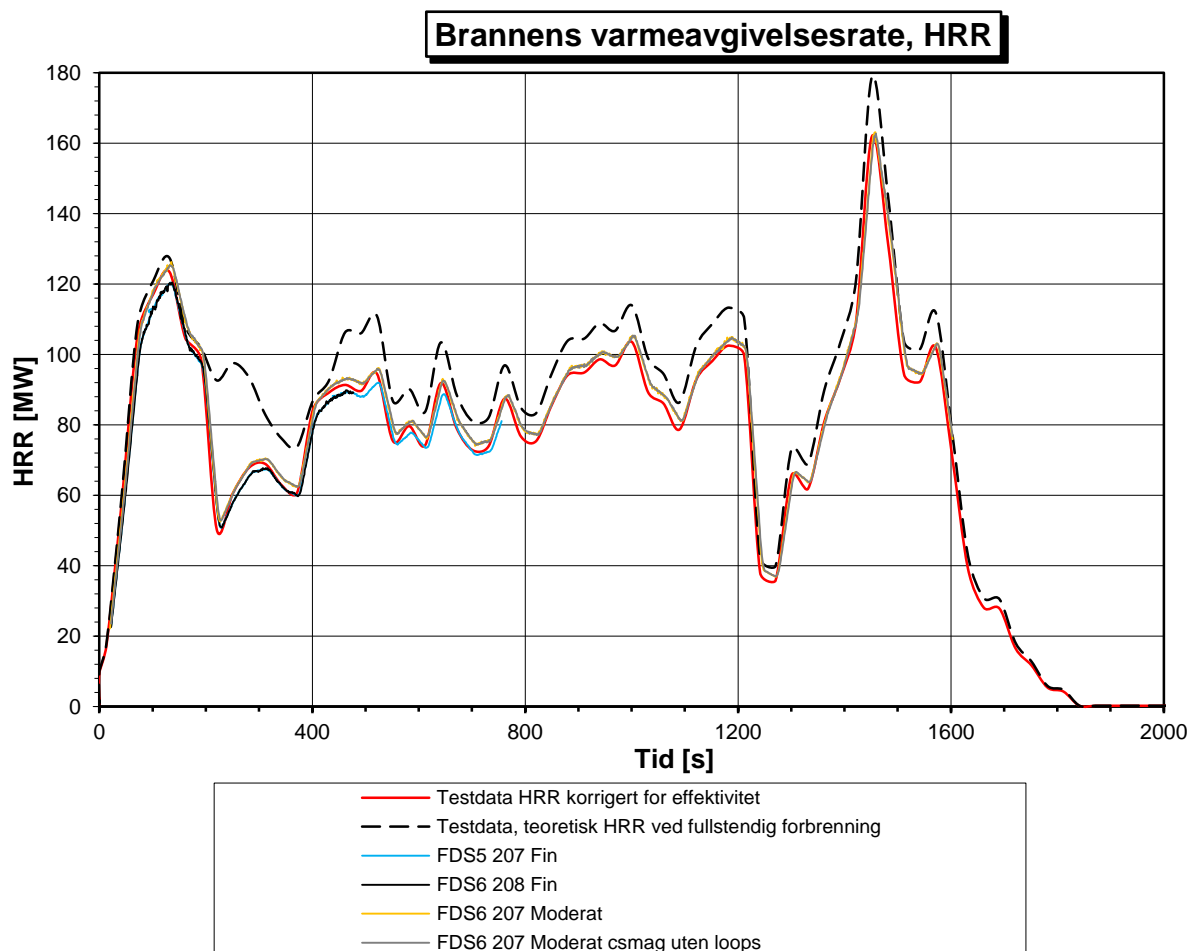
Alle obstruksjoner som representerte målestasjoner ble fjernet. «Constant Smagorinsky» SGS-turbulensmodell. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 207. «Moderat» mesh-oppløsning. Simuleringen ble kjørt for ca. 1600 sekunder.

FDS 5 207 fin:

Simulering foretatt i FDS 5 med domene fra og med loop 207. «Fin» mesh-oppløsning. FDS 5 har «Constant Smagorinsky» som eneste tilgjengelige SGS-turbulensmodell og benytter seg følgelig av denne. Simulert for ca. 760 sekunder.

7.3 Resultater

En har valgt ut resultater fra simuleringer som en har vurdert som karakteristiske for oppfylging av oppgavens formål. Å vurdere FDS 6 sin evne til å forutsi sentrale kvantiteter under forholdene som angis av det utvalgte Memorial Tunnel forsøket, TEST621A. I tillegg har en sammenlignet resultatene med tilsvarende simuleringer gjort i FDS 5.



Figur 7.3: RR-kurver for simuleringene sammenlignet med testdata

Det er brukt glidende gjennomsnitt for intervaller på 10 sekunder for FDS-dataen.

Merk at det var kun simuleringene med moderat oppløsning som ble helt kjørt helt til brannen begynte å avta etter 1600 sekunder. De andre simuleringene ble stoppet etter tidene som beskrevet i simuleringsavsnittet over. HRR-kurven som ble lagt inn var testkurven som var korrigert for forbrenningseffektivitet. HRR-kurven for FDS-simuleringene skiller seg i liten grad ut fra den eksperimentelt definerte kurven, noe som tyder på at brannen har hatt tilstrekkelig oksygen gjennom hele simuleringstiden.

En kan se av diagrammet at HRR er noe høyere for simuleringer med moderat oppløsning sammenlignet med fin oppløsning. Dette skyldes trolig at totalt karareal ganger HRRPUA ga en noe høyere effekt for simuleringene med moderat oppløsning, altså en liten feilmargen grunnet brukerfeil. Det er tilnærmet ingen forskjell innbyrdes mellom simuleringer med samme mesh-oppløsning.

Maksimalt avvik mellom en spesifisert eksperimentell verdi og nærmeste HRR-verdi fra FDS-simuleringene ble funnet ved hjelp av «FINN.RAD»-funksjonen i Excel. Avviket var maksimalt 5,1 %.

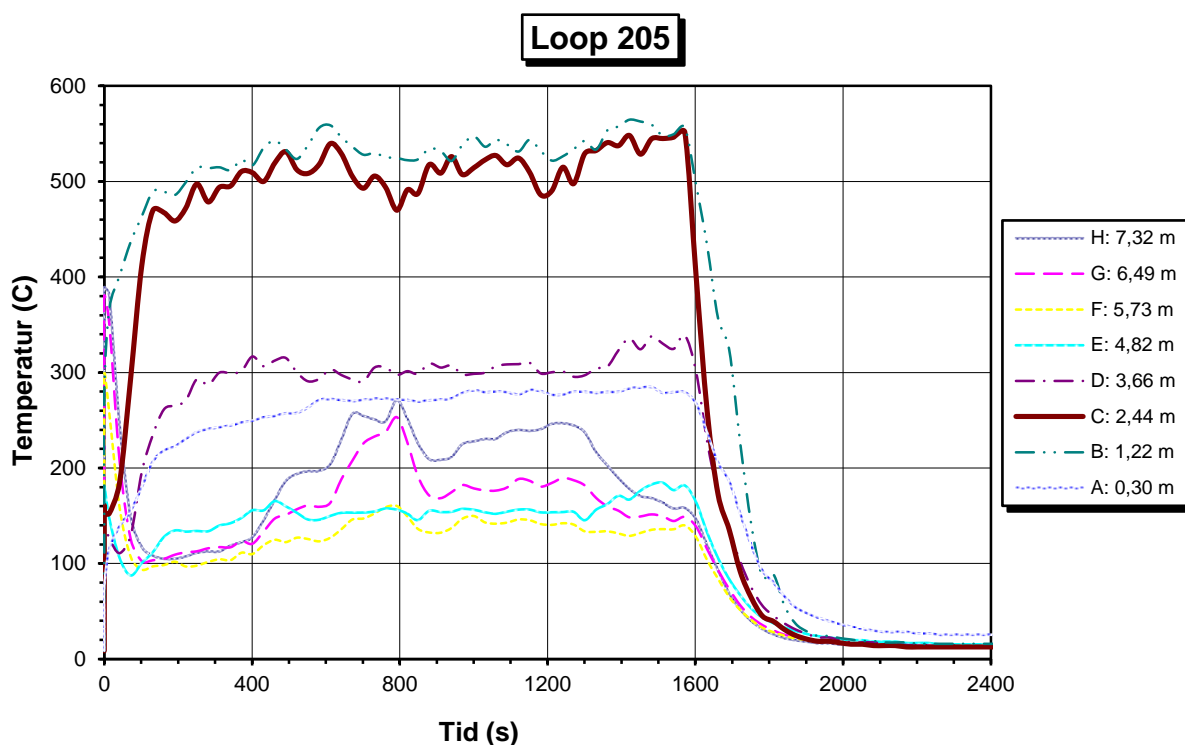
Det er imidlertid verdt å merke seg at dette er et mål på total varmeavgivelse, og sier ikke noe om andelen stråling sammenlignet med andelen konvektiv varme.

7.4 Backlayering

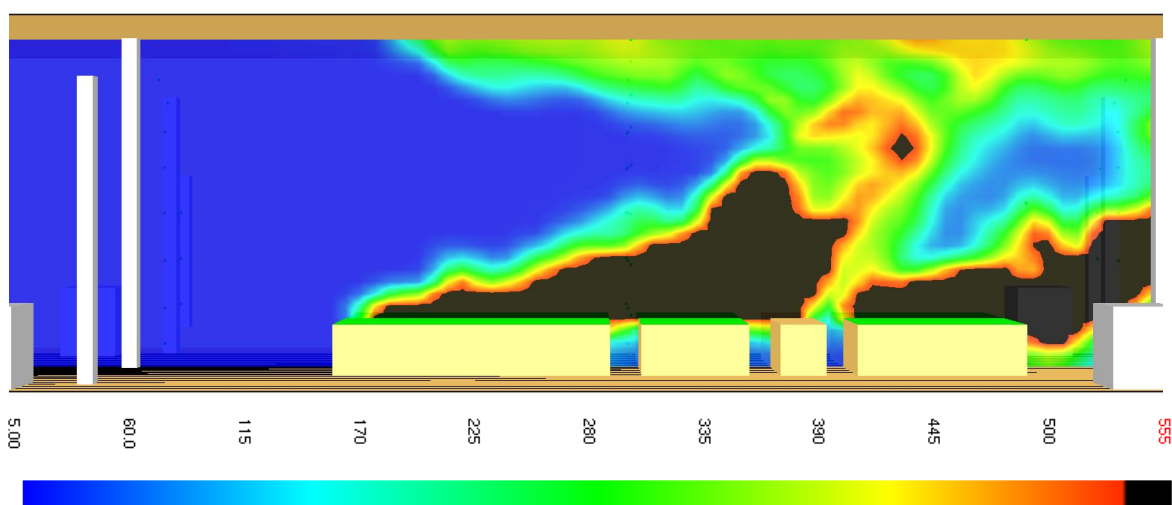
I samtlige simuleringer med unntak av «FDS 6 207 fin koeffisient» ble det registrert backlayering i løpet av ca. ett minutt, der hvor det i fullskalatestene først ble registrert etter omtrent 10 minutter. For simuleringene med «moderat» mesh-oppløsning ble backlayeringen holdt stabilt helt oppe ved den sørlige domenegrensen og ventilasjonsoverflatene i perioden 500 – 1250 sekunder, før den sakte trakk seg noe tilbake i de siste drøye 300 sekundene. I denne perioden var omtrent hele tunnelhøyden fylt med røyk oppstrøms for brannen. Typisk ventilasjonshastighet og HRR da backlayering startet var ca. 3,2 m/s, og en brann i vekstfasen med ca. 70 MW. Da varmeavgivelsesraten nådde en bølgedal ca. 250 sekunder ut i forløpet klarte en ventilasjonshastighet på ca. 4 m/s å holde tilbake videre forplantning oppstrøms. Backlayering hadde på dette tidspunktet typisk rukket å spre seg til «loop 207», slik at simuleringer som med domenegrense på dette punktet merket lite til denne bølgedalen. For simuleringer fra «loop 208» fortsatte spidningen oppstrøms da HRR hentet seg opp av bølgedalen og igjen nådde ca. 70 MW. Alle simuleringene hadde tilsvarende tidsavhengig utbredelse backlayering, med unntak av simuleringen med dobbel ventilasjonshastighet, hvor det ikke forekom backlayering i løpet av de 300 simulerte sekundene.

7.5 Temperatur

Simuleringene gir forholdsvis lave flammtemperaturer. Sammenligning av temperaturer utenfor brannområdet er vurdert som mindre viktig, da utbredelsen av backlayering oppstrøms fra brannen forutsigbart nok fører til lavere temperaturer i røyken nedstrøms for brannen, og høyere temperaturer for målepunktet oppstrøms.



Figur 7.4: Temperaturmålinger fra testdata gjort midt i brannsonen mellom brannkar med 50 MW og 20 MW effekt.



Figur 7.5: Typisk flammtemperatur for simuleringer gitt i grader celsius

Overenstemmelsen mellom flammtemperaturene betyr at det trolig ikke er diskrepans i flammtemperatur som er årsak i overprediksjonen av backlayering. For høye temperaturer ville trolig ha medført større oppdrift i plumen, mens lave temperaturer ville lettere bli avkjølt av ventilasjonen og ville i større grad tendere til bli trukket med langs ventilasjonsretningen og helningen i tunnelen. For simuleringen med dobbel ventilasjonshastighet er høyeste registrerte flammtemperatur ca. 100 grader lavere enn øvrige simuleringer med sine 405 Celsius. I denne simuleringen forekommer det heller ikke backlayering i løpet av de 300 sekundene som ble simulert. Høyeste flammtemperatur på 500-555 grader Celsius ble registrert på samtlige simuleringer med unntak av sistnevnte, uavhengig av «fin» eller «moderat» mesh-oppløsning, eller bruk av FDS 5 eller FDS 6.

7.6 Simulering for å finne kritisk hastighet

Simuleringsoversikt

Simuleringene hadde tilsvarende standardoppsett som beskrevet for simuleringene i forrige avsnitt, med unntak av HRR og ventilasjonshastighet. Samtlige simuleringer ble foretatt med «fin» mesh-oppløsning. HRR var konstant, og justert til 90 MW, som var omtrent den varmeavgivelsesraten som ble målt i perioden hvor det ble påvist backlayering i TEST621A. Ventilasjonshastigheten fra ventilasjonsoverflatene i nordlige enden av tunnelen var i disse simuleringene uniform, og ble altså ikke variert i høyden slik som var tilfellet for de øvrige simuleringene. Hastigheten startet på 6 m/s og ble nedjustert hvert 60. sekund. Skiftet i ventilasjonshastighet ble interpolert over de 2 siste sekundene for hvert intervall. Hastigheten ble justert på følgende måte:

- 0-60 s. 6,0 m/s
- 60-120 s. 5,0 m/s
- 120-180 s. 4,5 m/s
- 180-240 s. 4,0 m/s
- 240-300 s. 3,5 m/s
- 300-360 s. 3,0 m/s
- 360-420 s. 2,5 m/s
- 420-500 s. 2,0 m/s

FDS 6 208:

Standardsimulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208. «Deardorff» turbulensmodellen er benyttet på lik linje med alle andre standardsimuleringer der ikke noe annet er nevnt.

FDS 6 208 csmag:

«Constant Smagorinsky» SGS-turbulensmodell. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 6 208 dynsmag:

«Dynamic Smagorinsky» SGS-turbulensmodell. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 6 208 vreman:

«Vreman» SGS-turbulensmodell. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 6 208 50 MW:

Brannen ble nedjustert til 50 MW konstant HRR. Kun brenseloverflate på det fremste karet som alene leverer 50 MW. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 6 208 GVEC:

Simulert helning ved justering av gravitasjonskomponenter ble fjernet. Gravitasjonens angrepsvinkel ble dermed tilsvarende flatmark. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 6 208 flatt tak:

Taket ble endret fra trappetrinnformen til flatt tak i toppen av domenet. Tverrsnittsareal ble følgelig øket fra ca. 60 til 69 m². Ventilasjonshastigheten ble bevart, og dermed ble også luftens volumstrøm økt i takt med det økte tverrsnittsarealet. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 6 208 freeslip:

Ingen overflategrovhet, og tak med «FREESLIP=.TRUE.». Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 6 208 uten loops:

Obstruksjonene som representerte målestasjonene ble fjernet. Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 208.

FDS 5 208:

Standardsimulering foretatt i FDS 5 med domene fra og med loop 208. FDS 5 har «Constant Smagorinsky» som eneste tilgjengelige SGS-turbulensmodell og benytter seg følgelig av denne.

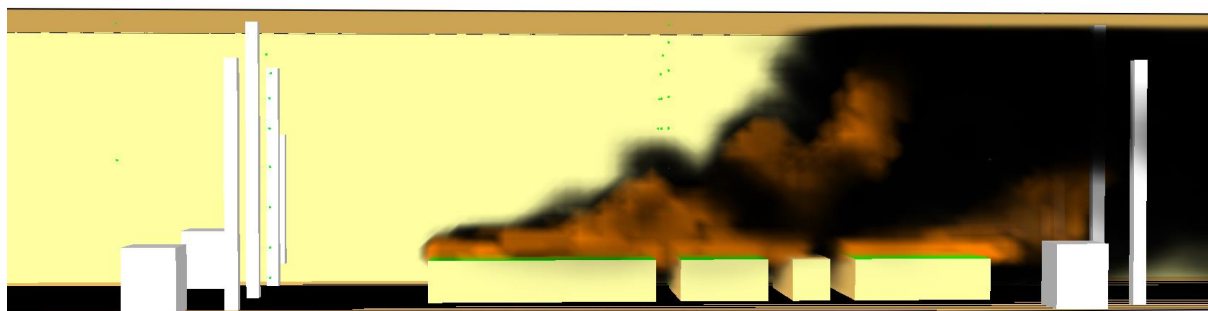
FDS 6 207:

Simulering foretatt i FDS 6 med domene fra og med loop 207. For denne simuleringen ble en ytterligere endring gjort, ved at det ble lagt til et 60 sekunders trinn mellom 6,0 m/s og 5,0 m/s.

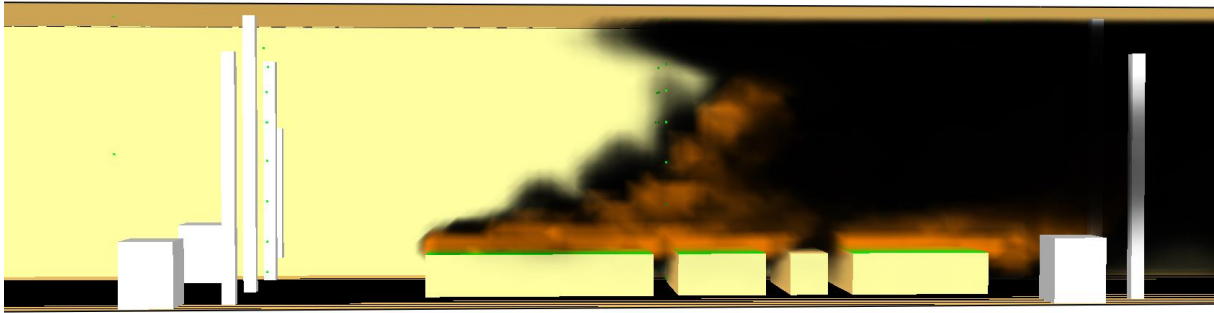
| Simulering | Tid for begynnende backlayering [s] | Backlayering passerer loop 305, 5 m oppstrøms for kar [s] | Kritisk hastighet [m/s] |
|-------------------|---|---|-------------------------|
| FDS 6 208 | 60 | 130 | Mellom 6,0 og 5,0 |
| Kommentar | Røyksøylen begynner å bevege seg oppstrøms etter nøyaktig 60 sekunder. Imidlertid er denne bevegelsen svært begrenset til få meter så lenge ventilasjonshastigheten er 5 m/s. Backlayering forplanter seg forbi kanten på det fremste brannkaret først idet hastigheten nedjusteres til 4,5 m/s. Etter dette beveger røykplumen seg jevnt oppstrøms før den når den nordlige domenegrensen etter 395 sekunder. | | |
| FDS 6 208 csmag | 60 | 92 | Mellom 6,0 og 5,0 |
| Kommentar | Svært likt forløp som FDS 6 208. Den mest vesentlige forskjellen er at backlayering spres noe hurtigere med ventilasjonshastighet 5 m/s. | | |
| FDS 6 208 dynsmag | 60 | 133 | Mellom 6,0 og 5,0 |
| Kommentar | Tilnærmet identisk til standardsimulering FDS 6 208. | | |
| FDS 6 208 vreman | 60 | 133 | Mellom 6,0 og 5,0 |
| Kommentar | Tilnærmet identisk til standardsimulering FDS 6 208. | | |
| FDS 6 208 50 MW | 120 | 150 | Mellom 5,0 og 4,5 |

| | | | |
|----------------------|--|-----------|-------------------|
| Kommentar | Kritisk hastighet er nærmere eksperimentelt påvist kritisk hastighet, enn for 100 MW brann, men fortsatt noe høyere. Se figur 3.6. | | |
| FDS 6 208 GVEC | 60 | 138 | Mellom 6,0 og 5,0 |
| Kommentar | Svært likt forløp som FDS 6 208. | | |
| FDS 6 208 flatt tak | 180 | 242 | Mellom 4,5 og 4,0 |
| Kommentar | Markant redusert kritisk hastighet. Ikke helt uventet da mengden luft som skyves mot brannen økes. | | |
| FDS 6 208 freeslip | 60 | 170 | Mellom 5,0 og 4,5 |
| Kommentar | Det er i dette tilfellet vanskelig å definere når påbegynnende backlayering skjer. Etter ca. 60 sekunder er det svært flyktige tendenser til backlayering. Røyklaget pulserer frem og tilbake over det fremste brannkaret. Sammenlignet med øvrige simuleringer skiller denne simuleringen seg ut ved at påbegynnende backlayering trekker seg frem og tilbake i perioden 60-120 s. I øvrige simuleringer har begynnende backlayering i liten grad blitt reversert, mens det skjer gjentatte ganger i dette tilfellet. Vedvarende backlayering skjer først etter 120 sekunder, og en har dermed angitt kritisk hastighet for denne tiden. | | |
| FDS 6 208 uten loops | 60 | 97 | Mellom 6,0 og 5,0 |
| Kommentar | Meget likt forløp som standardsimulering FDS 6 208. Det ser ut til at flammen lener noe mer nedstrøms enn ved nevnte simulering, uten at det ser ut til ha noen effektiv for når backlayering inntreffer. | | |
| FDS 5 208 | 70 | 140 | Mellom 6,0 og 5,0 |
| | Noe tregere utbredelse av backlayering enn for standardsimuleringen i FDS 6, og tilsvarende FDS 6 simulering med «Constant Smagorinsky» modell. Røyken når enden av domenet oppstrøms for brannen etter 424 sekunder. | | |
| FDS 6 207 | 125 (185) | 160 (220) | Mellom 5,0 og 4,5 |
| | Simuleringen gir starter ikke backlayering før få sekunder etter at ventilasjonshastigheten gires ned fra 5,0 m/s til 4,5 m/s. Tiden i parentes er den reelle tiden, mens tiden uten er tiden som vil være sammenlignbar med øvrige simuleringer. | | |

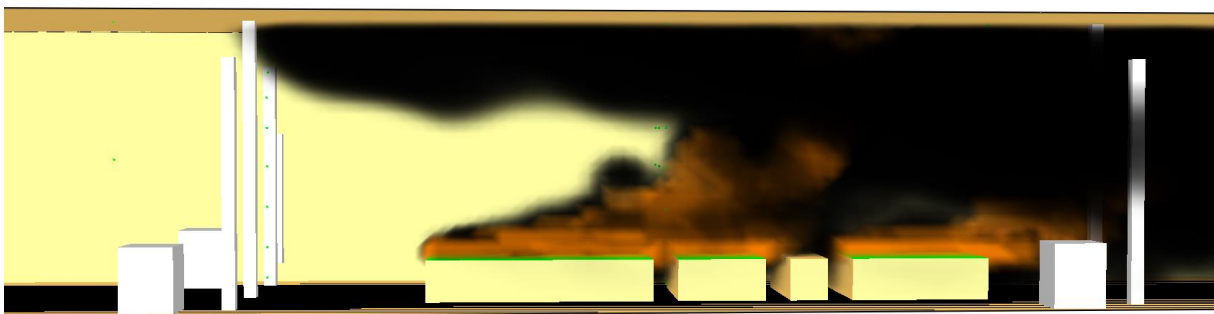
Tabell 7.1: Resultater for simuleringer myntet på bestemmelse av kritisk hastighet.



Figur 7.6: Illustrasjon av simulering av kritisk hastighet, FDS 6 208.



Figur 7.7: Illustrasjonen viser hva en har ansett som begynnende backlayering



Figur 7.8: Illustrasjonen viser når backlayering har nådd Loop 305, som er nærmeste målestasjon i forkant av brannkarene.

8 DISKUSJON

8.1 Sensitivitetsanalyse

I likhet med alle andre modeller, har CFD-simuleringene som er gjort en rekke begrensninger som følger av FDS-kodens beskaffenhet. FDS har utviklet seg til å bli en svært sammensatt og komplekse kode. Selv i enkle simuleringer kan det være vanskelig å forutsi akkurat hvordan en gitt variabel eller parameter påvirker sluttresultatet, eller å isolere årsaken til manglende samsvar med eksperimentell data.

Når det er vanskelig å se klare sammenhenger mellom input og output, er det vanlig benytte seg av sensitivitetsanalyse, for å studere påvirkningen av gitte variabler eller parametere. Input vil ofte være gjenstand for usikkerhet, enten det er begrensninger i instrumentering, målefeil, manglende informasjon, eller som et resultat av kompromisser som er gjort for modellen. Sensitivitetsanalysen vil derfor være avgjørende for å etablere konfidens for resultater.

Sensitivitetsanalysen benytter seg av «one at a time» metodikken (OAT), hvor hver enkelt variabel forandres for seg selv, mens de andre variablene holdes på fastsatte standardverdier for simuleringsscenarioet. På denne måten kan en isolere effekten av en gitt variabel, på simuleringresultatet. Dersom en må forandre mer enn én variabel om gangen, er det vanskeligere å bestemme sammenhenger. Denne tilnærmingen sikrer også meget god sporbarhet i forbindelse med ustabilitet og tekniske problemer som programkrasj.

8.2 Mesh-oppløsning

En sentral parameter i scenariooppsettet er valg av antall kontrollvolumer som skal kalkuleres for simuleringene. Jo flere kontrollvolumer en har, desto høyere oppløsning vil resultatene ha, og en vil teoretisk forvente bedre resultater ved høyere oppløsning. Simuleringstiden er imidlertid svært avhengig av antall kontrollvolumer, og en vil typisk prøve å finne et kompromiss mellom oppløsning og simuleringstid, der høyere oppløsning vil ha liten praktisk betydning for resultatene. Dermed oppnår en effektiv simulering med hensyn på komputeringstid.

I forbindelse med bestemmelse av mesh-oppløsning benytter en seg ofte av brannens karakteristiske diameter, D^* .

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} = \underline{\underline{6,174}}$$

8.1: Karakteristisk diameter

Videre bruker en antall kontrollvolumer som strekker seg over brannens karakteristiske diameter, som mål på oppløsning. Dette fordi behovet for oppløsning i FDS-sine kalkulasjoner oftest er avhengig av brannstørrelsen, i stedet for absolutte mål for kontrollvolumer. Imidlertid kan også andre forhold, som geometri og «vents» være med på å bestemme behovet for kontrollvolumoppløsning.

Basert δx som er redegjort for i kap. 6, får en for benyttede mesh-oppløsninger $D^*/\delta x$ på 16,4 og 19,9, for henholdsvis «moderat» og «fin» mesh-oppløsning. Ratioene for karakteristisk

diameter delt på cellestørrelse, $D^*/\delta x$, på 4, 10 og 16 omtales i utgangspunktet henholdsvis som grov, moderat og fin.

Imidlertid kan disse betegnelsen i enkelte tilfeller være noe misvisende. For det første består benyttede brannområde av flere brannoverflater med et visst mellomrom imellom. I tillegg er overflatene meget smale i bredden sammenlignet med den totale lengden av brannkarene. I bredden var det kun 12 celler, mens det var flere ganger dette antallet celler i lengden for begge mesh-oppløsningene. En undersøkelse men enda finere mesh-oppløsning ville nok vært fordelaktig. Dette ville også tillat bedre modellering av tunnelprofilen ved hjelp av trappetrinn.

Det må bemerkes at der hvor det tilfellet hvor det ble benyttet 50 MW brann i en analyse av kritisk hastighet, vil D^*/dx være betraktelig mindre, og usikkerheten i beregningen er større.

Flammesjekk ble ikke vurdert som relevant, da flammen i stor grad presses i retning av ventilasjonsstrømmen, slik at en eventuell utregnet flammehøyde ikke er representativ.

Det ble ikke avdekket vesentlige forskjeller mellom simuleringer som var direkte sporbare til de forskjellige mesh-oppløsningene «fin» og «moderat».

8.3 Simuleringsdomene

Det ble undersøkt gjort beregninger for to forskjellige tunnellengder, uten at en generelt sett opplevde store variasjoner i interessante parametere. Det ble imidlertid påvist en forskjellig kritisk hastighet ved en anledning. For simuleringer hvor en forsøkte å reprodusere testforløpet i TEST621A benyttet en forskjellig ventilasjonshastighet etter testdata, når tunnellengden ble variert. For simuleringer myntet direkte på mål av kritisk hastighet ble det imidlertid spesifisert samme ventilasjonsoverflater ved begge lengdene. Da er det fare for at eventuelle trykkpåvirkninger kan reagere annerledes. Ideelt sett burde man testet en modell for hele tunnellengden

8.4 Subgridscale (SGS) turbulensmodell

Det var knyttet en hvis forventning til at de nye SGS-modellene i FDS 6 ville ha betydning for utbredelsen av backlayering. En klarte ikke å etablere noe slikt forhold.

Turbulensresolusjonen for beregningene var imidlertid ganske god for begge mesh-oppløsningene, og kanskje vill disse modellene kunne hatt større betydning for branner av mindre størrelse i tilsvarende geometri.

8.5 Definerings av brannmodell og brensel

Det er knyttet en uvis usikkerhet opp til bestemmelsen av brannmodell og brenselparametere. Det ble ikke utført sensitivitetsanalyse av disse parametere. Da en benyttet seg av forenklet forbrenningskjemi i en godt ventilert brann forventer en ikke stor usikkerhet knyttet til parametere. Ideelt sett skulle en imidlertid ha gjort analyse av parameternes påvirkning på resultatene. Ideelt sett burde en også testet den nye og forbedrede pool-fire modellen for FDS. En burde også undersøkt effekten av å variere kardimensjoner i bredden, og med sammenslått lengde.

8.6 Termisk stråling

Begrensninger i FDS sin strålingsmodell er ansett å ha liten betydning for resultatene. Det ble ikke foretatt strålingsmålinger i Memorial Tunnel-forsøkene, og en har dermed ikke sammenlignbar data for strålingsfluks. Den viktigste antakelsen som er gjort for

strålingsmodellen, er valgt av strålingsandel, radiative fraction. Denne vil avgjøre hvor mye av energien i brannen som transporteres gjennom enten konvektiv varme eller stråling. En større andel konvektiv varme vil trolig medføre større oppdrift i røykplumen. Andelen er satt til standardverdien for FDS, på 35 % strålingsandel. I realiteten vil strålingsandelen variere avhengig av en rekke faktorer, og den vil i realiteten ikke være konstant gjennom hele forløpet.

8.7 HVAC

En valgt en forholdsvis direkte tilnærming for å skape ventilasjonshastigheten i tunnelen, framfor å prøve reprodusere forholdene ved direkte simulering av takvifter. Med tanke på korrelasjon mot empiriske resultat, er det kun den resulterende den hastighetsprofilen som er relevant. Direkte simulering av vifter gjennom FDS 6 nye HVAC-system ville hovedsakelig bidratt til å komplisere modellen, da en allerede kjenner de resulterende ventilasjonsforholdene. En vurdering av HVAC-systemets egnethet til å gjenskape reelle forhold i fullskalaeksperimenter er imidlertid svært relevant for simuleringer med mindre grad av sammenlignbare data, og et interessant emne for framtidige oppgaver.

8.8 Ventilasjon

Ventilasjonshastighetsprofilen i tunnelen er en svært avgjørende variabel med tanke på korrelasjon med empiriske, og teoretiske, kritiske hastighetsintervaller for backlayering. Omfattende backlayering vil blant annet ha påvirkning på hvordan brannenergien distribueres i tunnelen, og vil dermed være toneangivende for korrelasjon med eksperimentelle resultater. Det er dermed viktig at hvordan ventilasjonen i tunnelen modelleres, korreleres nøye med eventuelle forekomster av backlayering. Kanskje skulle en ha tatt lenger tid til å interpolere mellom ventilasjonshastighetene i de kritiske testene. Det kan tenkes at interpoleringen på kun to sekunder bidro til å utløse backlayering akkurat i overgangene mellom de forskjellige ventilasjonshastighetene. Imidlertid burde en hastighet som var høyere enn den kritiske være tilstrekkelig til å hindre ytterligere spredning.

8.9 Obstruksjoner i tunnelen

En rekke obstruksjoner ble plassert ut i tunnelen i forbindelse med tekniske installasjoner og måleinstrumenter. Det er en noe usikkerhet knyttet til manglende beskrivelsene av disse obstruksjonene, og hvordan FDS-løser strømmingen rundt dem. Tilsvarende simuleringer med og uten disse obstruksjonene kunne ikke påvise signifikant effekt på parametere av betydning. Sensitiviteten av å modellere instrumenttreet mellom brannkarene med 50 MW og 20 MW effekt ble aldri utprøvd.

8.10 Sammenligning av FDS5 og FDS6

Benyttede versjoner for av programvaren var versjon FDS 5.5.3 og FDS 6, Release Candidate 4. Endringer gjort i fra versjon til versjon er først og fremst «under panseret». Resultatene viste ikke markante forskjeller for tilsvarende simuleringer. De største påviste sensitiviteter hadde årsak i parametere som kunne modelleres med begge versjoner.

8.11 «Baraclinic torque»

En av endringene som har implementert i FDS 6 sammenlignet med tidligere versjoner, er at bevaring av baroklinisk moment er nå kalkulert som standard, dersom man ikke velger å slå termen av ved hjelp av en kommando på MISC-linjen. I seneste versjonen av FDS 5 var

baroklinisk moment en eksperimentell funksjon som en selv måtte slå på, med en advarsel om at den ville øke faren for ustabilitet.

En hadde i en lengre periode i store problemer med å gjennomføre simuleringer i FDS 6, da simuleringene forløp seg svært tregt og stoppet med feilmeldingen «numerical instability» på tilsynelatende vilkårlige tidspunkt og uten at det kunne påvises gjennom tradisjonell problemsøking ved å undersøke CFL-tall og vektorer i Plot3D-data. Imidlertid kunne observere plutselige fluktuasjoner i trykk, langs hele lengden av tunnelen. Etter en omfattende gjennomgang av mulige feilkilder ble det funnet at problemene forsvant idet en skrev kommandoen «BAROCLINIC=.FALSE.», på MISC-linjen.

Ifølge brukermanualen til FDS [46] kap 6.4.7, bidrar kalkulering av baroklinisk moment til å bevare transport av trykk i simuleringene. Funksjonen genererer vortisitet, eller sirkulasjon, som følge av lagdeling (baroklinitet) i fluidenes trykk og tetthet.

Brukermanualen står det at baroklinisk moment er en term som kan ha mye å si for vortisiteteten i røykplumen. En vil ofte kunne observere at røykplumen i større grad puster (kalt «puffing») når termen blir kalkulert. Varmeavgivelsesraten vil bli påvirket av baroklinisk moment ved at forbrenningsmodellen er avhengig at gasser transporteres og reagerer med luften. Denne transporten vil altså påvirkes av baroklinisk moment.

I forbindelse med problemene som ble påvist, ble det opprettet en såkalt «issue» i den offisielle rapporteringstjenesten for FDS. Ifølge en av utviklerne av FDS, Randall J. McDermott, burde baroklinisk vortisitet i utgangspunktet ikke ignoreres. Imidlertid mente han at det ikke var helt uventet at en kombinasjon av forbedringer in FDS 6, eksempelvis forbedringer i flammekvelningssmodellen, ventilasjonsåpninger og forbedret fysikk kunne komme sammen og skape problemer.

En annen utvikler, Kevin McGrattan, mistenkte at problemene kunne skyldes trykkvirkninger som skjer i en forholdsvis lang tunnel. Videre ble det foreslått å lage mindre åpninger langs tunnellengden, for å hindre voldsomme trykkoppbygninger i tunnelen. Det ble videre påpekt at FDS alltid vil forplante trykkendringer uendelig raskt gjennom fluider. Dermed kunne det være lurt å lage åpninger i domenet langs lengden av tunnelen, slik at store trykkoppbygninger kunne begrenses før de nådde helt ut til endene av domenet, hvor den nordlige enden (xmin) var fullstendig lukket, mens den sørlige enden var den eneste mulige trykkavlastningen. Dette ble berettiget med at tunneler i realiteten aldri vil være helt trykkette, selv inni et fjell. Noe av trykket vil høyst sannsynlig avlastes gjennom porer og andre åpninger i vegger, tak, eller vegbane.

Dessverre rakk en ikke å følge opp disse forslagene innen innleveringsfristen. Det ble generert nye simuleringfiler, men resultatene ble ikke klare i tide. Saken, inkludert responsen fra utviklerne og aktuelle vedlegg og inputfiler, kan finnes ved slå opp Issue 1922 i Google-gruppen «FDS-SMV». Saken vil trolig bli oppdatert etter at innleveringsfristen for rapporten er nådd.

8.12 Innvirkningen til valgte metode for modellering av takprofil

Det er kun mulig å definere rektangulære kontrollvolum i FDS, og følgelig må den avrundede tunnelprofilen tilnærmes på et vis. Dersom en forsøker å gjenskape den avrundede profilen gjennom tappetrinnoppstilling av kontrollvolumene, vil det trolig kunne oppstå uønsket

turbulens i forbindelse røykens forsering av den kantede geometrien, sammenlignet med den reelle avrundete strukturen som fantes i de eksperimentelle forsøkene. En forventer allikevel at den meste av strømmingen skjer i lengderetningen av tunnelen, og ikke på tvers.

Med trappetrinntilnærmingen vil det totale overflatearealet bli økt sammenlignet med en sirkulær profil. Dette vil kunne medføre noe større overflatefriksjon i taket. Videre finnes det en funksjon i FDS, kalt FREE_SLIP (tidligere SAWTOOTH), myntet på obstruksjoner i sagtann-konfigurasjon. Funksjonen fjerner all overflatefriksjon endrer dermed måten fluiden beveger seg langs obstruksjonene på. Dette for å minimere uønsket turbulens. Imidlertid vil denne funksjonen også kunne forandre hvordan fluiden beveger seg langs lengderetningen av tunnelen, ved å endre friksjonen langs taket, der en forventer at eventuell backlayering vil forekomme.

En kan anta at kompromisser som gjøres ved tilnærming av tunnelprofilen har svært sammensatt påvirkning på simuleringene. De vil påvirke tilbakestråling fra vegger og røyklag, distribusjon av røyk i tunnelens høyde og bredde, samt samvirkning med fluiden langs tunnelveggen. De kan også tenkes å påvirke flammehøyden og avkjøling av røyklaget.

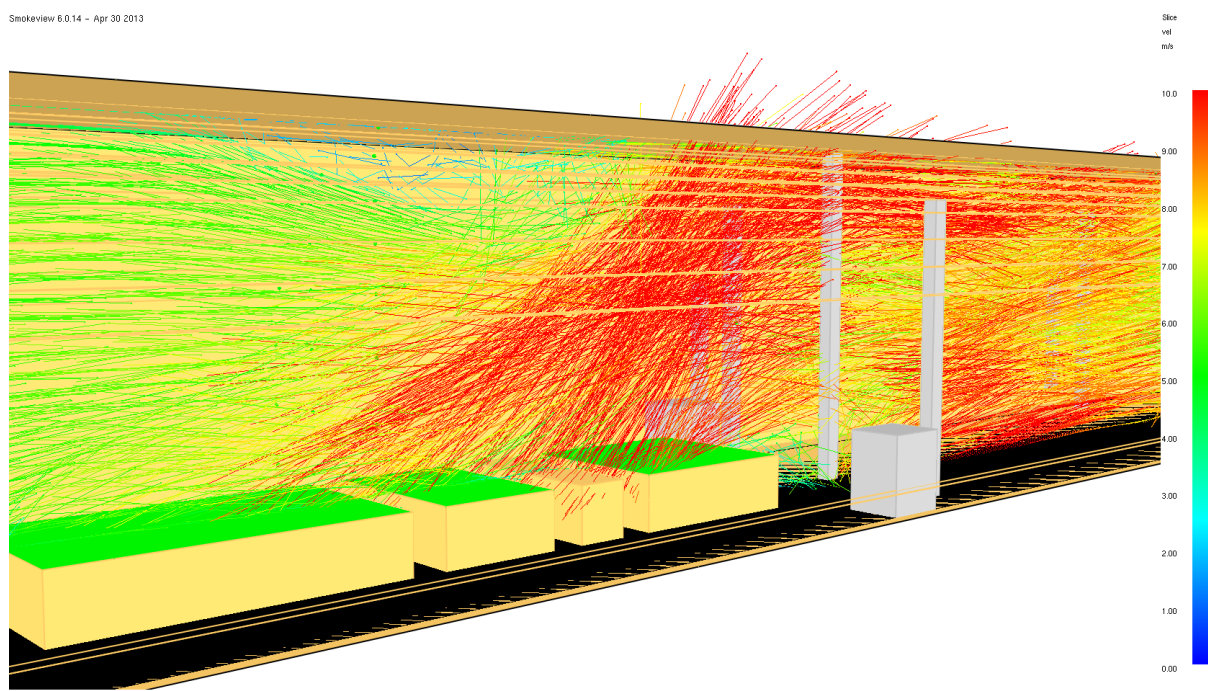
I forbindelse med simuleringer ment for å avdekke kritisk hastighet ble det avdekket at røyken beveget seg lettere langs taket da overflatefriksjonen ble slått av og det ble definert «free slip»-overflate. I disse simuleringene var det påviselig effekt på når røykplumen klarte å opprettholde bevegelsen i motsatt retning av ventilasjonsretningen. Denne effekten var imidlertid ikke tydelig for tilsvarende simulering med transient HRR og ventilasjonshastighet som etterliknet forholdene i TEST621A. Det er fullt mulig at «free-slip» har størst effekt ved ventilasjonshastigheter akkurat på grensen til modellens kritiske hastighet, og at ventilasjonshastighetene som stort sett ble holdt under 4 m/s, ikke nådde eller klarte å opprettholde dette grenseområdet. Det er også verdt å merke seg at ventilasjonshastigheten med hensyn på ventilasjonsoverflatene i gjenskapingen av TEST621A konstant interpolerte mellom forskjellige hastigheter, og hadde hele tiden åtte variasjoner avhengig av høyden. Sammenlignet med testene for å finne kritisk hastighet skapte dette mer flyktige ventilasjonsforhold, mens man i forbindelse med å kvantifisere kritisk hastighet ønsket mest mulig uniforme ventilasjonsforhold.

FDS 6 208 «tverrsnitt»

I tillegg til de nevnte simuleringene myntet på å finne kritisk hastighet, ble det foretatt en simulering lik standard simuleringen, men hvor trappetrinnformen til ble endret til flatt tak på en slik måte at det normale tverrsnittarealet ble bevart. Taket holdt altså den gjennomsnittlige høyden til tunnelprofilen. Den maksimale høyden til taket i midten av tunnelen ble dermed redusert mens høyden ut mot sidene øket. Denne simuleringen ga tilsynelatende oppsiktsvekkende resultater sammenliknet med øvrige simuleringer i samme kategori. Her startet backlayering først etter 180 sekunder med en og en ventilasjonshastighet på 4 m/s. Til tross for at dette er ca. 1 m/s sekundet over de eksperimentelle testresultatene, er dette meget interessant, da det kun er endring takets høyde og utforming som er utslagsgivende; i motsetning til simuleringen hvor taket endres slik at luftmengden som strømmer gjennom tunnelen blir markant forhøyet. Denne simuleringen ble opprinnelig avvist, da visualiseringen av smok3D data for sotfraksjon og «heat release-rate per unit volume» ble korrumpert ca. 100 sekunder ut i simuleringen. Imidlertid så øvrige kvantiteter normale ut, og en har i ettertid antatt at simuleringen trolig er representativ når en studerer slice-kvantiteter og DEVC-instrumenter.

Gjennom korrespondanse med en av Statens Vegvesens ledende fagmenn innen tunnelventilasjon, Gunnar Lotsberg, fremkom det at ikke bare burde det være en viss hastighet i forkant av brannen. En burde også sørge for minimum vindstyrke på 2-3 m/s over brannen, for å sikre avkjøling av de varme branngassene. Det kan tenkes at trappetrinntilnærmingen i taket kan påvirke hvordan ventilasjonsstrømmen angriper de varme gassene over brannen. Det er mulig at varm røyk som har drevet opp til taket kan presses opp i den øverste lommen i trappetrinnprofilen, mellom angripende ventilasjonsluft forfra, og branntrykk bakfra. De lodrette veggene vil i tillegg kunne skjerme sidene for eksponering mot den kalde lufttilstrømmen. Dette vil kunne gjøre det vanskeligere for tilstrømmende luft å strømme på oversiden av de varmegassene over brannen, som i tillegg ikke vil kunne fortrenkes i bredden slik som de kunne gjort i en avrundet profil. Dette kan også være en mulig forklaring på hvorfor kritisk ventilasjonshastighet reduseres ved flatt tak, og likt tversnittareal.

Smokeview 6.0.14 - Apr 30 2013



Figur 8.1: Begynnende backlayering illustrert med «vector-slice» for lufthastighet. De horisontale strekene langs tunnelengden illustrerer trappetrinnprofilen til taket.

9 KONKLUSJON

9.1 Oppnådde milepæler

Gjennom arbeidet med hovedoppgaven har en dokumentert tidlig valideringsarbeid for simuleringer av tunnelbrann med FDS 6-koden. En har avdekket at prediksjon av backlayering stadig er problematisk samt feilrapportert problemer med den barokliniske termen. Om enn i liten grad har en i så måte bidratt til å videreutvikle programmet frem mot en offisiell utgivelse.

9.2 Anbefalinger

På bakgrunn av det som fremkommer av diskusjonen og simuleringsresultatene, bør en være kritisk til hvordan definerer tunnelprofilen. En bør videre vurdere å plassere ut trykkavlastingsåpninger ved simulering av lengre sjakter eller tunneler, da hurtige trykkendringer som forplanter seg over store avstander uten tilstrekkelig avlastning kan føre til numerisk ustabilitet i FDS 6. En kan enn så lenge ikke forvente at simuleringer av tunneler med langsgående ventilasjon vil gi en representativ prediksjon av nødvendig ventilasjonshastighet for å forhindre backlayering. Mer inngående analyser av sensitivitet for backlayering med hensyn på modellering av avrundet tak vil potensielt være givende.

10 Referanser

- [1] F. Jia, Z. Wang og E. Galea, Modelling factors that influence CFD fire simulations of large tunnel fires, F. S. E. Group, Red., London, Greenwich : Interscience Communications, 2010.
- [2] E. Kim, J. Woycheese og N. A. Dembsey, «Fire dynamics simulator (Version 4.0) Simulation for tunnel fire scenarios with forced, transient, longitudinal ventilation flows,» *Fire Technology* 44, pp. 137-166, 2008.
- [3] B. Brinckerhoff, «MTFVTP Phase IV Report,» Massachusetts Highway Department, Massachusetts, 1999.
- [4] T. Nævestad og S. Meyer, «Etatsprogram Moderne Vegtunneler 2008 - 2011,» Statens Vegvesen, Oslo, 2012.
- [5] F. H. Amundsen og A. Engebretsen, «Trafikkulykker i Vegtunneler 2,» Statens vegvesen, Oslo, 2008.
- [6] K. McGrattan og A. Hamins, «Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire,» Maryland, USA, 2001.
- [7] C. Hwang og J. Edwards, «The Critical Ventilation Velocity in Tunnel Fires - A Computer Simulation,» *Fire Safety Journal*, vol. 40, pp. 213-244, 2005.
- [8] S. Lee og H. Ryou, «A Numerical Study on Smoke Movement in Longitudinal Ventilation Tunnel Fires for Different Aspect Ratio,» *Building and Environment* vol.41, pp. 719-725, 2006.
- [9] Statens Vegvesen, Vegtunneler normaler – Håndbok 021, Oslo, 2010.
- [10] L. Hu, R. Huo og W. Chow, «Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 1468-1483, September 2008.
- [11] Statens Vegvesen, Vegtunneler normaler - Håndbok 021, Oslo, 2004.
- [12] D. Drysdale, An introduction to fire dynamics, vol. 3, Chichester: John Wiley & Son, 2011.
- [13] B. Karlsson og J. G. Quintiere, Enclosure Fire Dynamics, Florida, USA: CRC Press , 1999.
- [14] B. C. Hagen, Grunnleggende brannteknikk, Haugesund: Hagens Forlag , 2004.
- [15] A. Beard og R. Carvel, The Handbook of Tunnel Fire Safety, London: Thomas Telford Publishing, 2005.
- [16] Standard Norge, NS 3900: Brannpøving – Terminologi. Termer og definisjoner, Oslo, 1994.
- [17] Standard Norge, NS-EN 1992-1-2:2004 Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering, Oslo, 2012.
- [18] Watlow, «Watlow,» [Internett]. Available: <http://www.watlow.com/literature/catalogs.cfm>.
- [19] K. Suzuki, T. Tanaka og K. Harada, «Tunnel Fire Simulation Model With Multi-Layer Zone Concept,» *Fire Safety Science* 9, pp. 713-723, 2008.
- [20] M. Cheing, M. Spearpoint og C. Fleischmann, «Calibrating an FDS Simulation of Goods- Vehicle Fire Growth in a Tunnel Using the Runehamer Experiment,» *Journal of*

- Fire Protection Engineering Vol.19 Nr.3*, pp. 188-196, 2009.
- [21] B. Malvin og J. Gonzalez, «Considering Tunnel Geometry When Selecting a Design Fire Heat Release Rate for Road Tunnel Safety System,» Proceedings of the 13th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, New Brunswick, USA, 2009.
- [22] Massachusetts Highway Department, «The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Interactive CD,» Parsons Brinckerhoff 4D imaging, Boston Massachusetts, USA, 1997.
- [23] Project EU 499, «Fires in Transport Tunnels, (FIRETUN). Report on Full Scale Tests,» Østeriket, Finland, Frankrike, Tyskland, Storbritannia, Italia, Norge, Sverige og Sveits, 1995.
- [24] V. Babraukas og R. D. Peacock, «Heat release rate: the single most important Variable in fire hazard,» *Fire Safety Journal*, pp. 255-272, 1992.
- [25] H. Eisner og P. Smith, «Convection Effects from Underground Fires: the Backing of Smoke Against the Ventilation,» Safety in Mines Research Establishment, Sheffield, 1954.
- [26] Y. Wu, M. Atkinson og S. Jagger, A study of the of tunnel aspect ratio on control of smoke flow in tunnel fire, Aosta: Proceedings of the 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 1997, pp. 573-587.
- [27] P. Thomas, «The Movement of Smoke in Horizontal Passages Against an Air Flow,» Fire Research Note nr.723, Watford, UK, 1968.
- [28] N. Saito, Y. Yanai, E. Yamada og S. Miyazaki, Experimental Study on Fire Behavior in a Wind Tunnel with a Reduced Scale Model, Granada, 1995, pp. 303-310.
- [29] N. Danziger og W. Kennedy, Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood canyon tunnels, York, 1982 .
- [30] Y. Oka og G. Atkinson, «Control of smoke flow in tunnel fires,» *Fire Safety Journal*, Vol. 25, Nr.4, pp. 305-322, 1995.
- [31] Y. Wu og M. Bakar, «Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity,» *Fire Safety Journal*, Vol. 35, Nr.4 , pp. 363-390, 2000.
- [32] H. Ingason, A. Lönnemark og Y. Li, «Runehamar tunnel fire tests,» SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sverige, 2011.
- [33] A. Lönnemark, «On the Characteristics of Fire in Tunnels,» Lund Institute of Technology, Lund, Sverige, 2005.
- [34] R. Carvel, «Fire Size in Tunnels,» Heriot-Watt University, Edinburgh, England, 2004.
- [35] A. Nordmark, «Fire and Life Safety for Underground Facilities: Present Status of Fire and Life Safety Principles Related to Underground Facilities,» *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, Nr. 3, pp. 217-269, 1998.
- [36] H. Buvik, «Etatsprogrammet Moderne vegtunneler,» NPRA raports, Oslo, 2012.
- [37] G. Liebe, Brannfysikk - fra teori til praksis, Oslo: Norsk Brannvern Forening, 2000.
- [38] Official Journal of the European Union, «Minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network,» Directive 2004/54/EC of the European Parliament, 2004.
- [39] P. J. DiNenno,, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, R. L. P. Custer, J. R. Hall og J. M. Watts, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, vol. 3, National Fire Protection Association, 2002.

- [40] U.S. Nuclear Regulatory Commission, «Verification & validation of selected fire models for nuclear power,» Washington, DC, 2007.
- [41] F. Nystedt og H. Frantzich, «Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar,» Lund Universitet, Lund, Sverige, 2011.
- [42] A. Buchanan, *Structural Design for Fire Safety*, Chichester, England : John Wiley & Sons, 2002.
- [43] A. Jakobsen, M. Valkvist, J. C. Bennetsen, R. Carstensen, G. Madsen, K. Sommerlund, C. Hansen, C. Schmidt, S. Nygaard og L. Sørensen, «CFD Best Practice,» Best Practice gruppen, København, 2009.
- [44] H. Ingason, Fire development in large tunnel fires, Beijing, Kina: 8th International Symposium on Fire Safety Science, 2005, pp. 1497-1508 .
- [45] N. I. o. S. a. T. (NIST), *NIST - FDS 6*, Maryland, USA: Fire Research Division Engineering Laboratory, 2013.
- [46] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FDS: Technical reference Guide, version 6*, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology (NIST), 2013.
- [47] National Institute of Standards and Technology (NIST), *FDS: User's Guide, version 6*, Maryland: National Institute of Standards and Technology (NIST), 2013.
- [48] E. Gissi, «An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview,» Creative Commons Attribution-Share, Genova, 2009.
- [49] Thunderhead Engineering Consultants, «PyroSim User Manual,» Manhattan, USA, 2012.
- [50] E. K. Mihyun, «A study on pulsation in Runehamar tunnel fire tests with forced longitudinal ventilation,» Worcester Polytechnic Institute, Worcester , 2006.
- [51] C. Yavuzturk og K. Ksaibati, «Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional transient finite difference approach,» University of Wyoming, Wyoming, 2002.
- [52] B.-L. Chen, L. Rockett og R. Mallick, «A Laboratory Investigation of Temperature Profiles and Thermal Properties of Asphalt Pavements with Different Subsurface Layers,» *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 77*, pp. 327-360, 2008.
- [53] Y. Wang, «Temperature dependent thermal properties of fire protection materials».
- [54] Virginia Department of Health, *Fuel Oils*, Virginia: Division of health hazards controll, 2001.
- [55] R. Strehlow, *Combustion Fundamentals*, New York: McGraw-Hill Book Company, New York, 1984.
- [56] M. H. Topal, J. Wang, Y. A. Levendis, J. Carlson og J. Jordan, «PAH and other emissions from burning of JP-8 and diesel fuels in diffusion flames,» *Fuel, Volume 83, Issues 17-18*, pp. 2357-2368, Desember 2004.
- [57] G. Markstein, «Relationship between smoke point and radiant emission from buoyant turbulent and laminar diffusion flames,» *Symposium (International) on Combustion, Volume 20, Issue 1*, pp. 1055-1061, 1985.
- [58] L. Hu, R. Huo og W. Chow, «Studies on buoyancy-driven back-layering flow in tunnel fires,» *Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 32, issue 8* , pp. 1468-1483, September 2008.
- [59] M. Cheong, C. Spearpoint og C. Fleischmann, «Calibrating an FDS Simulation of

Goods-vehicle Fire Growth in a Tunnel Using the Runehamar Experiment,» *Journal of Fire Protection Engineering* , 10 August 2009.