

Analytisk brannprosjektering med simulering

*Alternativ røykventilering i Alabasterhallen i det
nye Nasjonalmuseet*

Maiken Larsen
Nina Tøndevold

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Harald Landrø, BAT

Medveileder: Barbro Storm, Rambøll Oslo

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg, anlegg og transport



| | | | |
|--|---------------------------------|---|-----------------|
| Oppgavens tittel: Analytisk brannprosjektering med simulering <i>Alternativ røykventilering i Alabasterhallen i det nye Nasjonalmuseet</i> | Dato: 11.06.12 | | |
| | Antall sider (inkl. bilag): 275 | | |
| | Masteroppgave | X | Prosjektoppgave |
| Navn: Maiken Larsen, Nina Tøndevold | | | |
| Faglærer/veileder: Harald Landrø | | | |
| Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Barbro Maria Storm, Rambøll | | | |

| |
|--|
| <p>Ekstrakt:</p> <p>Oppgaven tar for seg Alabasterhallen i det nye Nasjonalmuseet på Vestbanen i Oslo. Dette er en utstillingshall som per dags dato er under prosjektering. Det er undersøkt hvordan en alternativ røykventilasjonsløsning vil fungere. Løsningen er arkitektønsket og består av 20 cm brede slisser i himling nær yttervegg som røyken skal bevege seg gjennom for deretter å trekkes videre ut av avtrekksluker eller -vifter i tak. Den alternative løsningen er vurdert opp mot en tradisjonell termisk røykventilasjonsløsning dimensjonert etter <i>Melding HO-3/2000 Temaveiledning Røykventilasjon</i>. Den tradisjonelle løsningen består kun av avtrekks- og tilluftsluker.</p> <p>Rapporten består av et litteraturstudie, en kvalitativ- og en kvantitativ analyse. Litteraturstudiet inkluderer teori om brannprosjektering, regelverk, røyk, røykventilasjon og CFD-simulering.</p> <p>I den kvalitative analysen er brannscenarier fastsatt på bakgrunn av befaringer på museer, informasjon funnet gjennom litteraturstudiet og brannstatistikk. To brannscenarier ble valgt for videre kvantitativ analyse.</p> <p>I den kvantitative analysen er den alternative røykventilasjonsløsningen vurdert ved bruk av CFD-programmet FDS. Det er også foretatt en evakueringssimulering i Pathfinder. Dette er gjort for å kunne sammenligne nødvendig rømningstid, funnet i Pathfinder, med tilgjengelig rømningstid funnet fra brannsimuleringene.</p> <p>De ulike røykventilasjonsløsningene er sammenlignet med hverandre, og i tillegg vurdert opp mot tålegrenser for evakuering gitt i NS 3901:1998 <i>Risikoanalyse av brann i byggverk</i> og HO-meldingen.</p> <p>Følgende anbefalinger er gitt i oppgaven:</p> <ul style="list-style-type: none">• Alternativ røykventilasjonsløsning med slisser, avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter i fasade bør benyttes i Alabasterhallen.• Det bør benyttes røykskjermer som er dimensjonert for å hindre at røyken synker og spres på undersiden av skjermene, og som kan aktiveres avhengig av brannens plassering.• Det bør benyttes røykseksjonering over himling for å unngå at røyken sprer seg på oversiden og trekker ned i de andre delene av hallen. Dette vil også kunne hindre sotlegging av hele himlingen. |
|--|

Stikkord

| |
|--------------------|
| 1. Røykventilasjon |
| 2. FDS |
| 3. Brannsimulering |
| 4. Evakuering |

Forord

Denne rapporten er skrevet som masteroppgave i emnet *TBA4905 Bygnings- og materialteknikk* ved Institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU i Trondheim, våren 2012. Oppgaven utgjør det avsluttende arbeidet på masterprogrammet Bygg- og miljøteknikk. I tilknytning til oppgaven er det gjennomført et kurs i bruk av numerisk strømningsanalyse ved Universitetet i Lund, Sverige.

Oppgaven er utformet i samarbeid med avdeling for Brann og sikkerhet ved Rambøll i Oslo, og omhandler røykventilering av Alabasterhallen i det nye Nasjonalmuseet på Vestbanen i Oslo.

Vi ønsker å rette en spesiell takk til vår eksterne veileder, Barbro Maria Storm ved Rambøll i Oslo, for hennes tålmodighet, gode veiledning og oppmuntrende ord. I tillegg vil vi takke følgende personer for deres oppfølging og støtte ved gjennomføringen av denne oppgaven:

- Vår veileder ved NTNU, Harald Landrø
- Sigrid Kartveit og Lars Kristian Tredal ved Rambøll i Oslo
- Vitenskapelig assistent ved Institutt for bygg anlegg og transport, NTNU, Jon Ivar Belghaug Knarud
- Vegar for datahjelp og korrekturlesing av rapporten

Til sist ønsker vi å takke hverandre for et godt samarbeid i løpet av arbeidet med oppgaven.

Trondheim, 11. juni 2012

Maiken Larsen

Nina Tøndevold

Sammen drag

Oppgaven tar for seg Alabasterhallen i det nye Nasjonalmuseet på Vestbanen i Oslo. Dette er en utstillingshall som per dags dato er under prosjektering. Det er undersøkt hvordan en alternativ røykventilasjonsløsning vil fungere. Løsningen er arkitektønsket og består av 20 cm brede slisser i himling nær yttervegg som røyken skal bevege seg gjennom for deretter å trekkes videre ut av avtrekksluker eller -vifter i tak. Den alternative løsningen er vurdert opp mot en tradisjonell termisk røykventilasjonsløsning dimensjonert etter *Melding HO-3/2000 Temaveiledning Røykventilasjon*. Den tradisjonelle løsningen består kun av avtrekks- og tilluftsluker.

Rapporten består av et litteraturstudie, en kvalitativ- og en kvantitativ analyse. Litteraturstudiet inkluderer teori om brannprosjektering, regelverk, røyk, røykventilasjon og CFD-simulering.

I den kvalitative analysen er brannscenarier fastsatt på bakgrunn av befaringer på museer, informasjon funnet gjennom litteraturstudiet og brannstatistikk. To brannscenarier ble valgt for videre kvantitativ analyse.

I den kvantitative analysen er den alternative røykventilasjonsløsningen vurdert ved bruk av CFD-programmet FDS. Det er også foretatt en evakueringssimulering i Pathfinder. Dette er gjort for å kunne sammenligne nødvendig rømningstid, funnet i Pathfinder, med tilgjengelig rømningstid funnet fra brannsimuleringene.

De ulike røykventilasjonsløsningene er sammenlignet med hverandre, og i tillegg vurdert opp mot tålegrenser for evakuering gitt i NS 3901:1998 *Risikoanalyse av brann i byggverk* og HO-meldingen.

Følgende anbefalinger er gitt i oppgaven:

- Alternativ røykventilasjonsløsning med slisser, avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter i fasade bør benyttes i Alabasterhallen.
- Det bør benyttes røykskjermer som er dimensjonert for å hindre at røyken synker og spres på undersiden av skjermene, og som kan aktiveres avhengig av brannens plassering.
- Det bør benyttes røykseksjonering over himling for å unngå at røyken sprer seg på oversiden og trekker ned i de andre delene av hallen. Dette vil også kunne hindre sotlegging av hele himlingen.

Summary

The thesis deals with an exhibit hall named Alabasterhallen, which is currently in the design phase. The hall is located in the new National museum at Vestbanen in Oslo. In this thesis, it is examined how an alternative smoke ventilation solution will work. The solution is proposed by the architect and consists of 20 cm wide, longitudinal slots in the ceiling near the wall. The smoke is supposed to move through the slot and further out via exhaust vents or fans in the ceiling. This solution is evaluated against a traditional solution designed from specifications in a smoke ventilation guide used in fire safety engineering. The traditional solution consists of natural venting.

The report consists of a study of relevant literature and a qualitative and a quantitative analysis. The literature study includes theory on fire engineering, regulations, smoke, smoke ventilation and CFD simulation.

In the qualitative analysis, fire scenarios are determined on the basis of visits to museums, information found through the literature study and fire statistics. Two fire scenarios were selected for the quantitative analysis.

In the quantitative analysis the alternative smoke ventilation solution is evaluated by using the CFD program FDS. An evacuation simulation has also been done with the program Pathfinder to compare the necessary escape time (from Pathfinder), to the available escape time found from the fire simulations in FDS.

The various smoke ventilation solutions are compared to each other and the tolerance limits for evacuation given in NS 3901:1998 *Risk analysis of fire in buildings and civil engineering works* and the mentioned smoke ventilation guide.

The following recommendations are given:

- The architect-proposed smoke ventilation solution, including exhaust fans in the ceiling and supply vents in the facade, should be used in Alabasterhallen.
- Draft curtains should be used to prevent the smoke from migrating below the curtains. The draft curtains should be activated based on the location of the fire.
- Smoke sectioning should be used above the ceiling to prevent the smoke from spreading on the upper side of the ceiling and sink down into other parts of the room. This will also prevent sooting of the entire ceiling.

Innholdsfortegnelse

| | |
|-----------------------------------|------|
| Forord..... | I |
| Sammendrag | III |
| Summary..... | V |
| Innholdsfortegnelse | VII |
| Figurliste..... | XI |
| Tabelliste..... | XVII |
| Ordliste | XIX |
| 1 Innledning | 1 |
| 1.1 Bakgrunn | 1 |
| 1.2 Problembeskrivelse | 4 |
| 1.3 Målsetting | 5 |
| 1.3.1 Resultatmål..... | 5 |
| 1.3.2 Effektmål | 6 |
| 1.3.3 Suksessfaktorer | 6 |
| 1.4 Avgrensing av oppgaven | 6 |
| 1.5 Rapportens oppbygning..... | 8 |
| 2 Metodebeskrivelse og valg | 11 |
| 2.1 Litteraturstudie..... | 11 |
| 2.2 Analyse | 12 |
| 2.2.1 Kvalitativ analyse | 12 |
| 2.2.2 Kvantitativ analyse..... | 12 |
| 3 Litteraturstudie..... | 15 |
| 3.1 Regelverk | 15 |
| 3.1.1 TEK 10 | 16 |
| 3.1.2 Veiledning til TEK 10 | 16 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1.3 | Melding HO-3/2000 | 17 |
| 3.2 | Analytisk brannprosjektering..... | 18 |
| 3.3 | Brannmodeller | 21 |
| 3.3.1 | Håndberegning | 22 |
| 3.3.2 | Tosonemodeller..... | 22 |
| 3.3.3 | Feltmodeller/CFD-modeller..... | 23 |
| 3.3.4 | Simuleringsprogrammer | 24 |
| 3.4 | Computational Fluid Dynamics (CFD)..... | 24 |
| 3.4.1 | RANS- og LES-modeller | 25 |
| 3.4.2 | Bruk av CFD..... | 27 |
| 3.5 | Fire Dynamics Simulator (FDS)..... | 28 |
| 3.5.1 | Bruk av FDS | 29 |
| 3.5.2 | Oppbygging av inndatafil..... | 31 |
| 3.5.3 | Matematisk bakgrunn | 33 |
| 3.5.4 | Fastsetting av materialegenskaper..... | 38 |
| 3.5.5 | Røyk og sot | 38 |
| 3.5.6 | Mesh | 39 |
| 3.5.7 | Utvalgte funksjoner | 41 |
| 3.5.8 | Begrensninger og ulemper..... | 42 |
| 3.5.9 | Mulige feilkilder..... | 44 |
| 3.5.10 | Kontroll av modellen..... | 44 |
| 3.5.11 | Pyrosim | 46 |
| 3.6 | Røyk og røykventilasjon..... | 47 |
| 3.6.1 | Røyk | 47 |
| 3.6.2 | Tålegrenser ved evakuering..... | 49 |
| 3.6.3 | Røykkontroll..... | 51 |
| 3.7 | Evakuering..... | 57 |
| 3.7.1 | Rømningstid | 57 |
| 3.7.2 | Menneskelig oppførsel under evakuering | 58 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.7.3 | Aktuelle krav i regelverk | 59 |
| 3.8 | Pathfinder | 61 |
| 4 | Analyse | 63 |
| 4.1 | Kvalitativ analyse | 64 |
| 4.1.1 | Introduksjon..... | 64 |
| 4.1.2 | Fremgangsmåte og metoder | 66 |
| 4.1.3 | Mål for kvalitativ analyse..... | 66 |
| 4.1.4 | Systemdefinisjon | 67 |
| 4.1.5 | Identifikasjon av farer og trusler | 70 |
| 4.1.6 | Beskrivelse av farer og trusler. | 75 |
| 4.1.7 | Brannforløp..... | 80 |
| 4.1.8 | Brann i Alabasterhallen..... | 84 |
| 4.1.9 | Brannscenarioer | 86 |
| 4.1.10 | Oppsummering og videre analyse..... | 91 |
| 4.2 | Kvantitativ analyse..... | 92 |
| 4.2.1 | Generelt | 92 |
| 4.2.2 | Røykventilasjon etter HO-melding..... | 94 |
| 4.2.3 | Brannsimulering..... | 99 |
| 4.2.4 | Simuleringsmodell..... | 99 |
| 4.2.5 | Vurdering av innledende simuleringer | 116 |
| 4.2.6 | Kontroll av modell for hovedsimuleringer | 153 |
| 4.2.7 | Simuleringsresultater fra FDS | 156 |
| 4.2.8 | Evakueringssimulering i Pathfinder | 167 |
| 4.2.9 | Simuleringsresultater fra Pathfinder | 171 |
| 4.2.10 | Feilkilder | 173 |
| 5 | Vurdering av løsninger..... | 177 |
| 5.1 | Oppsummering av hovedsimuleringer | 177 |
| 5.2 | Sammenligning av løsninger | 180 |
| 5.2.1 | Sikt..... | 181 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.2.2 | Varmepåkjenning..... | 184 |
| 5.2.3 | Gasskonsentrasjoner | 186 |
| 5.2.4 | Valg av endelig røykventilasjonsløsning..... | 187 |
| 5.2.5 | Nødvendig og tilgjengelig rømningstid | 188 |
| 6 | Konklusjon..... | 191 |
| 6.1 | Anbefalinger | 192 |
| 7 | Videre arbeid..... | 193 |
| | Referanseliste..... | 195 |
| | Liste over simuleringsverktøy | 203 |
| | Vedleggsliste | 205 |

Figurliste

| | |
|---|----|
| Figur 3.1: Oversikt over en ytelsesbasert prosjekteringsprosess for brannsikkerhet. Gjengitt fra [21]. | 19 |
| Figur 3.2: Sammenhengen mellom tilgjengelig rømningstid, nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin ved rømning. Gjengitt fra [18]. | 57 |
| Figur 4.1: Oversiktsbilde av Nasjonalmuseet på Vestbanen. Alabasterhallen er den lysende delen av bygget plassert midt i bildet. Foto er hentet fra [65]. | 68 |
| Figur 4.2: Plassering av kunstinstallasjoner (foto fra befaring på Nordenfjeldske Kunstindustrimuseum i Trondheim). | 72 |
| Figur 4.3: Trematerialer (foto fra befaring på Vitensenteret i Trondheim). | 73 |
| Figur 4.4: Claire Fontaines utstilling av et brennende Frankrike på galleriet Air de Paris. Gjengitt fra [69]. | 74 |
| Figur 4.5: Sharon Levys pappinstallasjon på Museum of Contemporary Art i San Diego. Gjengitt fra [70]. | 74 |
| Figur 4.6: Antall dødsbranner i Norge (1999-2008) etter brannsted. Gjengitt fra [75]. | 79 |
| Figur 4.7: Illustrasjon av et brannforløp. X: tid, Y: varmeavgivelse, 1: begynnende fase, 2: vekstfase, 3: fullt utviklet fase, 4: nedbrytings-/avkjølingsfase, 5: aktivering av sprinkler, 6: overtenning, 7: ventilasjonskontrollert, 8: sprinklerkontrollert. Gjengitt fra [22]. | 81 |
| Figur 4.8: Utstillingsdukker med klær (foto fra befaring på Nordenfjeldske Kunstindustrimuseum i Trondheim). | 88 |
| Figur 4.9: Fotografier som viser testprosedyren for test C. Gjengitt fra [80]. | 88 |
| Figur 4.10: HRR (kW). Gjengitt fra [80]. | 90 |
| Figur 4.11: Brannutvikling for en bil, uten ventilasjon (Test 6) og med 6 m/s langsgående ventilasjon (Test 7). Gjengitt fra [83]. | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figur 4.12: Tradisjonell røykventilasjonsløsning..... | 92 |
| Figur 4.13: Røykventilasjonsløsning med slisser, røykluker eller avtrekksvifter i tak og tilluftsluker eller -vifter i fasade..... | 93 |
| Figur 4.14: Røykventilasjonsløsning med slisser, avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter i trapperom..... | 94 |
| Figur 4.15: Dragsugeffekten medfører at friskluft trekkes opp og delvis blokkerer røykavsugget. Figur gjengitt fra [1]...... | 97 |
| Figur 4.16: Inndeling av soner i modellen. | 100 |
| Figur 4.17: Rømningsvei i trapperom merket med rød ring. | 100 |
| Figur 4.18: Løsning med frittstående vegger. | 101 |
| Figur 4.19: Åpen løsning..... | 102 |
| Figur 4.20: Røykskjermenes plassering i tilknytning til trapperommene..... | 103 |
| Figur 4.21: Brenneren i brannscenario 1. Bildet er hentet fra Smokeview. | 104 |
| Figur 4.22: Brenneren i brannscenario 2. Bildet er hentet fra Smokeview. | 105 |
| Figur 4.23: Røykutvikling i simulering 1_20-20-20_grovsimulering ved (a) 0 sekunder, (b) 21,6 sekunder og (c) 201,6 sekunder. Utviklingen er sett på skrå ovenfra, hvor en i (b) og (c) kan se avtrekksslissene i langvegger ved tak. Bilder er hentet fra Smokeview. | 117 |
| Figur 4.24: Røykutvikling i simulering 1_20-20-20_grovsimulering ved (a) 201,6 sekunder, (b) 900 sekunder og (c) 1614,6 sekunder. Utviklingen er sett fra siden. Bilder hentet fra Smokeview. | 118 |
| Figur 4.25: Horisontalsnitt av meshoppsettet for nedre del av hallen (under øvre sjikt) for de innledende simuleringene (gruppe 2 til 5)..... | 119 |
| Figur 4.26: Vertikalsnitt av meshoppsettet for hele modellens høyde i de innledende simuleringene (gruppe 2 til 5)..... | 120 |
| Figur 4.27: Meshsensitivitet - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter... | 122 |
| Figur 4.28: Meshsensitivitet - CO-konsentrasjonen i åpningen til trapperom 1 i høyde to meter..... | 123 |

| | |
|---|-----|
| Figur 4.29: Meshsensitivitet - CO ₂ -konsentrasjonen i åpningen til trapperom 1 i høyde to meter..... | 124 |
| Figur 4.30: Meshsensitivitet - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1. | 125 |
| Figur 4.31: Meshoppsett for simulering 6_ho og 7_slots..... | 127 |
| Figur 4.32: Meshoppsett for simulering 7_7.4out, 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in. | 128 |
| Figur 4.33: Valg av brannscenario - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter..... | 130 |
| Figur 4.34: Valg av brannscenario - CO-konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter. | 131 |
| Figur 4.35: Valg av brannscenario - CO ₂ -konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter. | 132 |
| Figur 4.36: Valg av brannscenario - røykformørkelse inne i trapperom i høyde to meter..... | 133 |
| Figur 4.37: Valg av brannscenario - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1..... | 134 |
| Figur 4.38: Sammenligning av simulering 2_40-20-20 uten frittstående vegger og simulering 3_40-20-20_small_w med frittstående vegger. Bildet er hentet fra Smokeview..... | 135 |
| Figur 4.39: Valg av brannscenario - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter..... | 136 |
| Figur 4.40: Valg av brannscenario - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1..... | 137 |
| Figur 4.41: Materialeegenskaper - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter. | 139 |
| Figur 4.42: Materialeegenskaper - temperatur midt i del A i høyde to meter. | 139 |
| Figur 4.43: Materialeegenskaper - CO-konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter..... | 140 |
| Figur 4.44: Materialeegenskaper - CO ₂ -konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter. | 140 |
| Figur 4.45: Materialeegenskaper - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1. | 141 |

| | |
|--|-----|
| Figur 4.46: Ventilasjonsforhold - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter. | 143 |
| Figur 4.47: Ventilasjonsforhold - røykformørkelse inne i trapperom i høyde to meter. | 144 |
| Figur 4.48: Ventilasjonsforhold - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1. | 145 |
| Figur 4.49: Sammenligning av simulering 2_40-20-20 og simulering 5_40-20-20_smokelid+ med tredoblet røyklukeareal. Bildet er hentet fra Smokeview. | 146 |
| Figur 4.50: Avtrekksluker/vifter i tak, sett ovenfra. Avtrekksluker/-vifter er markert med rødt. | 147 |
| Figur 4.51: Dannelse av "vena contracta" utenfor en oppdriftsdrevet ventilasjonsåpning. Gjengitt fra [96]. | 148 |
| Figur 4.52: Himling og avtrekksløsning for simulering i gruppe 6. Avtrekksluke er markert med rødt. | 150 |
| Figur 4.53: Plassering av avtrekksluker i tak og tilluftsluker i fasade i simulering 6_ho. Luker i del A er markert med rødt. | 150 |
| Figur 4.54: Slisseløsning i himling for simuleringer i gruppe 7. Himlingen går ikke helt inntil yttervegger. | 151 |
| Figur 4.55: Plassering av avtrekks- og tilluftsluker i simulering 7_slots og plassering av avtrekksvifter og tilluftsluker i simulering 7_7.4out. Luker/vifter i del A er markert med rødt. | 151 |
| Figur 4.56: Plassering av avtrekk- og tilluftsvifter i simulering 7_7.4out_1.5in. Tilluftsvifter er markert med grønt. | 152 |
| Figur 4.57: Plassering av avtrekkvifter i tak og tilluftsvifter i trapperom i simulering 7_7.4out_5.2in. Tilluftsvifter er markert med grønt. | 153 |
| Figur 4.58: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 6_ho ved 0, 180, 601,2, 901,8 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview. | 157 |
| Figur 4.59: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_slots ved 0, 100, 180, 601,2, 898,2, 1202,4 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview. | 159 |

| | |
|--|-----|
| Figur 4.60: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out ved 0, 180, 601,2, 901,8, 1202,4 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview..... | 161 |
| Figur 4.61: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out_1.5in ved 0, 180, 601,2, 901,8 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview..... | 163 |
| Figur 4.62: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out_5.2in ved 0, 180, 601,2, 901,8 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview..... | 165 |
| Figur 4.63: Planløsning benyttet i evakueringssimulering i Pathfinder..... | 167 |
| Figur 4.64: Rømningsvei fra Alabasterhallen via trapperom slik hallen er modellert i Pathfinder. | 167 |
| Figur 5.1: Røyksjiktets høyde midt i del A..... | 181 |
| Figur 5.2: Røykformørkelse midt i del A i høyde to meter..... | 182 |
| Figur 5.3: Røykformørkelse utenfor trapperom 2 i høyde to meter..... | 183 |
| Figur 5.4: Røykformørkelse inne i trapperom 2 i høyde to meter. | 184 |
| Figur 5.5: Temperatur midt i del A i høyde to meter. | 185 |
| Figur 5.6: Stråling midt i del A i høyde to meter..... | 186 |

Tabelliste

| | |
|---|-----|
| Tabell 3.1: Parametre for bestemmelse av D^*/dx | 41 |
| Tabell 3.2: Parametre for kontrollberegning av modellen..... | 46 |
| Tabell 3.3: Forklaring til parametre i likning for nødvendig rømningstid..... | 58 |
| Tabell 3.4: Maksimal avstand fra hvilket som helst sted i branncelle til nærmeste utgang. Gjengitt fra [18]..... | 59 |
| Tabell 4.1: Risikoklasser, gjengitt fra [2]..... | 69 |
| Tabell 4.2: Brannklasser, gjengitt fra [2]..... | 69 |
| Tabell 4.3: Liste over aktuelle farer og trusler. | 75 |
| Tabell 4.4: Kilder til brann for næringsgruppen Informasjon og kommunikasjon i Norge i perioden 1985-2011 [67]..... | 76 |
| Tabell 4.5: Brannlast (MJ/m ²) og bidrag fra brennbare materialer til spesifikk brannbelastning for klesbutikker. Gjengitt fra [80]..... | 89 |
| Tabell 4.6: Oversikt over alle simuleringer ("br.sc." står for brannscenario)..... | 109 |
| Tabell 4.7: Parametre for beregning av sikt..... | 115 |
| Tabell 4.8: Tillatt formørkelse ved ulike siktkrav og for ulike målelengder (L)..... | 116 |
| Tabell 4.9: Meshoppsett for sensitivitetsanalyse..... | 120 |
| Tabell 4.10: Oversikt over antall celler i hvert mesh i simulering 6_ho og 7_slots.. | 127 |
| Tabell 4.11: Oversikt over antall celler i hver mesh i simulering 7_7.4out, 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in. | 128 |
| Tabell 4.12: Oversikt over simuleringer i gruppe 6 og 7 med tilhørende ventilasjonsløsninger, luke ¹ - og avtrekksareal samt viftekapasiteter. | 156 |
| Tabell 4.13: Evakueringstider for ulike evakueringsalternativer samt gjennomsnittsverdier for evakuering. | 171 |
| Tabell 4.14: Forskjeller i evakueringstid mellom de ulike evakueringsalternativene. | 172 |
| Tabell 5.1: Tålegrenser for personer under rømning. Gjengitt fra [46]..... | 180 |

Ordliste

Forkortelser

| | |
|---------|--|
| BFRL | The Building and Fire Research Laboratory ved NIST |
| CAD | Computer-Aided Design, konstruksjon og teknisk tegning som utføres ved hjelp av datamaskinbaserte programvarer og redskaper. DAK (dataassistert konstruksjon) på norsk |
| CFAST | Consolidate model of Fire Growth and Smoke Transport (tosonemodell) |
| CFD | Computational Fluid Dynamics, bruker numeriske metoder for å analysere strømminger |
| CFX | CFD-modell utviklet av ANSYS, Inc. |
| CIB | International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Nederland |
| CPU | Central Processing Unit. Prosesseringsenheten i en datamaskin |
| DNS | Direct Numerical Simulation |
| DSB | Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap |
| DWG | Filformat for CAD-modeller (står for "drawing") (se CAD) |
| DXF | Filformat som brukes for å vise CAD-informasjon fra i andre programmer |
| FDS | Fire Dynamics Simulator (CFD-modell) |
| FLUENT | CFD-modell utviklet av ANSYS, Inc. |
| FNO | Finansnæringens Fellesorganisasjon |
| HRR | Heat Release Rate (varmeavgivelseshastighet) |
| HRRPUA | Heat Release Rate Per Unit Area (varmeavgivelseshastighet per arealenhet) |
| HVAC | Heating, Ventilation and Air Conditioning, et system for klimakontroll |
| LES | Large Eddy Simulation |
| NBSG | Nationella Brandsäkerhetsgruppen, Sverige |
| NIST | National Institute of Standards and Technology, USA |
| NFPA | National Fire Protection Association, USA |
| PHOENIX | CFD-modell utviklet av Phoenix Analysis & Design Technologies, Inc. |
| PBL | Plan- og bygningsloven |
| RANS | Reynold's Averaged Navier-Stokes |

| | |
|--------|--|
| RTE | Radiative Transport Equation |
| SMAFS | CFD-modell utviklet ved Brandteknik ved universitetet i Lund, Sverige |
| SOFIE | Simulation of Fires In Enclosures. CFD-modell utviklet i et samarbeid mellom flere europeiske brannlaboratorier og universiteter |
| TEK 10 | Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift) |
| TEK 97 | Forskrift om krav til byggverk (erstattet av TEK 10) |

FDS-kode

| | |
|------------------|---|
| ADIABATIC | Adiabatisk termisk grensebetingelse |
| BNDF | Boundary, funksjon for å animere overflateverdier |
| CHID | Rekke med 30 tegn eller mindre som brukes til å navngi utdatafiler som opprettes av FDS |
| CO_PRODUCTION | Definerer at tre-parameters "Mixture Fraction"-modell (blandingfraksjon) skal benyttes ved simulering |
| CO_YIELD | Definerer fraksjonen av brenselmasse som konverteres til karbonmonoksid, CO |
| CTRL | Kontrollfunksjon for å kontrollere ulike hendelser |
| DEVC | Definerer ulike sensorer og instrumenter |
| DT_RESTART | Definerer hvor ofte det skal lages en oppstartsfil når simulering i FDS kjører |
| DUMP | Funksjon som bestemmer hyppighet for registrering av resultater og en rekke andre globale parametre assosiert med utdatafiler |
| HEAD | Definerer simuleringens tittel og navn på utdatafiler |
| HEAT_OF_REACTION | Definerer varme fra forbrenningsreaksjonen |
| HOLE | Funksjon som lager hull i faste gjenstander/blokker (se OBST) |
| INERT | Representerer en isothermisk flate der temperaturen ikke øker, men er fast på omgivelsestemperatur. Standard grensebetingelse for alle faste overflater og utvendige grenser for beregningsdomenet, hvis ikke annet er spesifisert. |
| INIT | Definerer startbetingelser for beregningsdomenet |
| ISO | Isosurface, funksjon for å animere ulike parametre for gassfase |
| MASS_EXTINCTION_ | Siktparameter |
| COEFFICIENT | |
| MATL | Definerer materialer og deres egenskaper |
| MESH | Definerer meshets parametre |
| XX | |

| | |
|-------------------|---|
| MIRROR | Grensebetingelse som definerer et symmetri sk plan |
| MISC | Miscellaneous, definerer ulike inndataparametre som trengs for å kjøre en simulering |
| MPI_PROCESS | Message Passing Interface, definerer ulike prosesser for å kunne kjøre parallellsimulering |
| MTR | Måler turbulensopløsning |
| OBST | Funksjon for å lage faste gjenstander/blokker |
| OPEN | Grensebetingelse som forutsetter at omgivelsesforhold eksisterer utenfor beregningsdomenet |
| PART | Definerer egenskapene til Lagrangepartikler |
| PROP | Definerer egenskapene til instrumenter/sensorer (se DEVC) |
| RADI | Definerer strålingsparametre |
| RADIATION | Parameter som angir om strålingstransport skal beregnes |
| RAMP | Definerer tidsavhengig endring for ulike parametre |
| REAC | Definerer forbrenningsreaksjonen |
| SLCF | Funksjon for å animere ulike verdier i et plant snitt |
| SOOT_YIELD | Definerer fraksjonen av brenselmassen som konverteres til sotpartikler |
| SPEC | Definerer egenskapene til gassarter |
| SURF | Definerer strukturen for alle overflater og åpninger i og på beregningsdomenets grenser |
| TAU_V | Parameter for å styre tidsavhengighet for en gitt hastighet |
| TAU_Q | Parameter for å styre tidsavhengighet for HRR (se HRR) |
| THERMOCOUPLE | Registrerer temperatur som et simulert termoelement |
| TIME | Definerer simuleringstiden |
| TITLE | Rekke med 60 tegn eller mindre som beskriver simuleringen og som inkluderes i ulike utdatafiler |
| VEL | Definerer hastighet i m/s |
| VENT | Definerer grensebetingelser for bestemte deler av en overflate eller beregningsdomenets grenser |
| VISIBILITY_FACTOR | Siktparameter |

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I store prosjekter, spesielt i bygninger beregnet for publikum, er det branntekniske aspektet svært viktig da store verdier kan bli utsatt for fare. *Det offentliges forventninger til brannsikkerhet i nye og eksisterende bygninger medfører en rekke krav om og til sikkerhet for personer og verdier* [1 s. 2]. I *Forskrift om tekniske krav til byggverk* (TEK 10) lyder det første generelle kravet til sikkerhet ved brann som følger:

(1) Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet ved brann for personer som oppholder seg i eller på byggverket, for materielle verdier og for miljø- og samfunnsmessige forhold [2] [§ 11-1].

Hvert år dør flere titalls personer som følge av brann i Norge. I 2010 omkom totalt 65 personer i brann, fem av disse i branner i næringsbygg [3]. Branner i næringsbygg utgjorde 31 % av alle bygningsbranner i perioden 1992-2009 [4]. Totalt 108 personer omkom i næringsbranner i perioden 1986-2009, noe som utgjør 7 % av det totale antallet omkomne i brann i denne perioden. Personskader og tap av menneskeliv påfører store lidelser for de som rammes, både de som er direkte innblandet og for pårørende.

I følge *Stortingsmelding nr. 35 (2008-2009) Brannsikkerhet* [5] fører branner til store kostnader i form av helseutgifter og skadeutbetalinger. I stortingsmeldingen er det fastsatt fem mål for det videre brannvernarbeidet i Norge. Disse målene skal redusere risikoen for og konsekvensene av brann. Dette gjelder i stor grad personsikkerhet,

1. Innledning

men også forebygging av brann i kulturhistoriske verdier er sentralt i dette arbeidet.

De fem målene er som følger:

- *færre omkomne i brann*
- *unngå tap av uerstattelige kulturhistoriske verdier*
- *unngå branner som lammer kritiske samfunnsfunksjoner*
- *styrket beredskap og håndteringsevne*
- *mindre tap av materielle verdier [5 s. 34]*

Flere av målene er sentrale for oppgavens analyseobjekt, Alabasterhallen. En eventuell brann vil utfordre sikkerheten til både menneskelige-, kulturhistoriske- og materielle verdier.

Funksjonsbaserte forskrifter som kom med *Forskrift om krav til byggverk* (TEK 97, nå erstattet av TEK 10) stiller ikke lenger spesifikke krav til løsninger, og har åpnet opp for alternative utforminger og metoder. Spenstige og nyskapende arkitektløsninger fører til at det er nødvendig å dokumentere løsninger med analyse. Dette er spesielt aktuelt ved store prosjekter, som f.eks. et av Norges nye signalbygg, Nasjonalmuseet på Vestbanen.

Eldre brannstatistikk fra bl.a. USA og England viser at omtrent 80 % av omkomne i bygningsbranner dør som følge av inhalering av røyk [6]. Nyere nasjonal brannstatistikk fra England viser også at røyk og røykgasser var den største årsaken til dødsfall i branner i 2010 og 2011 [7]. Et konkret eksempel som viser at røyk er hovedårsaken til at mennesker omkommer i brann er "Scandinavian Star"-ulykken i 1990. Omtrent 80 % av de 158 omkomne ombord i passasjerskipet døde av røykgassforgiftning, mens det er antatt at kun 6 % døde av varmpåvirkning [8]. Å hindre at røyken spres, og å holde rømningsveier røykfrie, er derfor viktig. Spredning kan forhindres ved hjelp av røykventilasjon og har derfor stor betydning, spesielt i

publikumsbygg slik som det nye Nasjonalmuseet, der utfallet av røykspredning kan få fatale følger.

Det finnes to metoder for å oppfylle brannkravene i TEK 10. Den ene er å prosjektere bygget i samsvar med de preaksepterte løsningene som er angitt i veiledningen til TEK. *Melding HO-3/2000 Temaveiledning Røykventilasjon* (heretter kalt HO-meldingen) er en temaveiledning for dimensjonering av røykventilasjonsanlegg ved bruk av tabeller. I følge HO-meldingen skal røykventilasjon være konstruert slik at røyk- og branngasser ventileres ut på et tidlig stadium [1]. Røykventilasjonen skal dermed øke tiden som er tilgjengelig for rømning og samtidig redusere skadeomfanget av brannen. I HO-meldingen blir det beskrevet minimumsløsninger som, hvis de følges, vil oppfylle kravene i TEK. Den andre metoden er analytisk brannprosjektering hvor bygget prosjekteres ved hjelp av analyse eller beregninger som dokumenterer tilfredsstillende brannsikkerhet.

I oppgavens analyseobjekt har arkitekten foreslått en utradisjonell røykventilasjonsløsning. For å kunne verifisere om arkitektens røykventilasjonsløsning oppfyller de gjeldende krav, er simulering ved hjelp av CFD (Computational Fluid Dynamics) et aktuelt alternativ. CFD er en fellesbetegnelse på dataverktøy som analyserer systemer som involverer fluidstrømning, varmetransport og tilhørende fenomener, som f.eks. kjemiske reaksjoner [9].

CFD-modeller, også kalt feltmodeller, er i stor grad blitt hovedformen for brannmodellering i rådgivningsbransjen [10]. Ved enkelte tilfeller kan ikke sikkerheten dokumenteres ved "sunn fornuft", enkle håndberegninger eller tosonemodeller [11]. Det er derfor:

Nødvendig å benytte et dokumentasjonsverktøy som kan gi et gyldig estimat for hvordan de fysiske forhold som røykspredning, røykkonsentrasjoner, varme-stråling og temperatur endres over tid i bygningen. Til dette formålet benyttes

CFD som dokumentasjonsverktøy i stadig økende grad [11 s. 4] (oversatt til norsk).

CFD som dokumentasjonsverktøy innen analytisk brannprosjektering er mye brukt blant rådgivende ingeniører, og bruken kan antas å være stadig økende. CFD er derfor benyttet som verktøy i denne oppgaven.

1.2 Problembeskrivelse

Oppgaven tar for seg en utstillingshall, kalt Alabasterhallen, som er en del av det nye Nasjonalmuseet på Vestbanen i Oslo. Arkitekten ønsker en ikke-synlig røykventilasjonsløsning og har derfor foreslått en alternativ løsning hvor røyken skal trekkes ut gjennom 20 cm brede gjennomgående slisser langs vegg eller himling i alle byggets yttervegger. Løsningen er utradisjonell og det settes spørsmålstegn ved slissenes størrelse og evne til å slippe ut nødvendig mengde røyk. Det er derfor ønskelig å undersøke om den foreslåtte løsningen er gjennomførbar, og eventuelt hvilke andre tiltak som må til for å tilfredsstille gjeldende krav til røykventilasjon.

Noen sentrale spørsmål forfatterne ønsker å besvare i denne oppgaven er:

- Hvordan vil den alternative røykventilasjonsløsningen fungere?
- Vil røyken møte for stor mekanisk motstand?
- Vil løsningen fungere med naturlig ventilasjon eller er mekanisk ventilasjon nødvendig?
 - Hvor høy vifteeffekt er i så tilfelle nødvendig?
 - Hvordan vil plassering av vifter påvirke luftstrømningene i rommet?
- Hvilken tilluftsløsning vil fungere best sammen med foreslått røykventilasjon?
 - tilluftsluker i fasade
 - tilluftsvifter i fasade
 - tilluftsvifter i trapperom

- Hvordan vil plassering av gjenstander/utstillinger påvirke røykens strømningsmønster?

Løsningen vurderes i forhold til hvordan tradisjonell termisk røykventilasjon prosjekteres i henhold til HO-meldingen [1].

Den formelle oppgaveteksten med generelle retningslinjer for masteroppgaver skrevet ved Institutt for bygg, anlegg og transport ved NTNU finnes i Vedlegg A.

1.3 Målsetting

Resultatmål og effektmål ble fastsatt i oppstartsfasen av oppgaven, og er beskrevet under.

1.3.1 Resultatmål

Innen 11. juni skal det undersøkes og vurderes om den alternative røykventilasjonsløsningen kan fungere slik den er foreslått. Dette innebærer at løsningen er like god eller bedre enn tradisjonell røykventilasjonsløsning dimensjonert direkte etter HO-meldingen. Den alternative løsningen må tilfredsstillende krav til tilgjengelig rømningstid og krav til tålegrenser ved evakuering. Hvis løsningen fungerer skal det også vurderes hvilke vifte- og tilluftsløsninger som vil kreves for at løsningen skal fungere best mulig. Dette skal oppnås ved å:

- avdekke faremomenter ved, og plassering av, ulike kunstinstallasjoner
- bestemme dimensjonerende brannscenarier
- simulere den alternative røykventilasjonen ved hjelp av CFD
- sammenligne den alternative røykventilasjonen med tradisjonell termisk røykventilasjon i henhold til HO-meldingen
- simulere evakuering i Pathfinder for å estimere nødvendig rømningstid

1.3.2 Effektmål

Generelt: Bidra til høyere kunnskap om mulighetene ved alternative røykventilasjonsløsninger som ikke oppfyller krav gitt av preaksepterte løsninger.

For forfatterne spesielt: Øke forståelsen for brannfaget og få kjennskap til relevante verktøy som benyttes innen røyk- og brannsimulering. Bli kjent med muligheter og begrensninger ved disse verktøyene, og få kunnskap om hvilke parametre som er viktige å ta hensyn til.

1.3.3 Suksessfaktorer

For å nå oppgavens målsetting er følgende suksessfaktorer definert:

- et vellykket litteraturstudium, som gir god og relevant bakgrunnsteori og bidrar til forståelse av de aktuelle temaene i oppgaven
- opplæring i bruk av de forskjellige verktøyene som benyttes i oppgaven
- god fremdriftsplanlegging med hensyn til tidkrevende simuleringer

1.4 Avgrensning av oppgaven

Generelt

Det er tatt utgangspunkt i Alabasterhallen i det nye Nasjonalmuseet, og oppgaven er derfor begrenset til å vurdere publikumsbygg. Det er imidlertid foretatt forenklinger med tanke på bl.a. geometri, materialvalg og omgivelser. Dette er gjort for at simuleringstiden for de ulike løsningene skal være overkommelig i forhold til tiden som er avsatt til oppgaven, og fordi tilgjengelig informasjon om Alabasterhallen har vært begrenset. Dette fører også til at vurderingen av røykventilasjonen i stor grad fokuserer på løsningsprinsippet, og er dermed relevante for andre lignende bygg.

Systemer

I oppgaven vurderes effekten av røykventilasjonsanlegg i kombinasjon med røyk-skjermer. Effekten av røykventilasjonsanlegget vurderes ikke i kombinasjon med

andre typer brannsystemer som f.eks. sprinkleranlegg. Av hensyn til at store materielle verdier kan gå tapt ved utløsning av et sprinkleranlegg, er det antatt at en brannsikkerhetsstrategi med sprinkleranlegg lite trolig vil velges i utstillingshallen.

Konsekvenser

Ved brannprosjektering vurderes brannsikkerhet opp mot konsekvenser for liv, helse, miljø og materielle verdier [2]. Hensikten med et røykventilasjonsanlegg er ifølge HO-meldingen å kontrollere den første fasen i et brannforløp [1]. Dersom dette lykkes vil rømning og slukking lettes, og brannutviklingen og skader på bygning og inventar reduseres. I denne oppgaven vurderes røykventilasjon etter en alternativ metode opp mot konvensjonell metode (etter HO-meldingen), og det er i hovedsak fokusert på personsikkerhet. Da oppgaven tar utgangspunkt i Alabasterhallen i Nasjonalmuseet er det naturlig at verdisikkerheten også er vurdert. Dette er gjort ved å vurdere effekten av røykventilasjonsanlegget, siden et godt fungerende røykventilasjonsanlegg som nevnt reduserer skadevirkningene på inventar. Konsekvenser for ytre miljø er ikke vurdert i oppgaven.

Simuleringsverktøy

Til brann- og røyksimuleringer er det brukt en fritt tilgjengelig programvare som heter *Fire Dynamics Simulator 5* (FDS 5). Programmet er utviklet av *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [12]. Oppgaven tar ikke for seg andre CFD-programmer, og FDS er dermed ikke vurdert eller sammenlignet med andre lignende programmer.

Pyrosim 2011 og 2012, utviklet av Thunderhead Engineering, er benyttet for å konstruere simuleringene som er utført i FDS. Disse er verktøy som gir en grafisk fremstilling av FDS-modellen [13].

Evakueringsforholdene er vurdert ved hjelp av programmet Pathfinder 2011 som også er utviklet av Thunderhead Engineering [14]. Andre evakueringsverktøy er ikke benyttet i oppgaven og Pathfinder er derfor ikke vurdert eller sammenlignet med andre lignende verktøy.

1.5 Rapportens oppbygning

Rapporten er bygd opp på følgende måte:

Kapittel 2 *Metodebeskrivelse og valg* gjennomgår hvilke metoder som er benyttet i oppgaven og begrunnelse for valg av simuleringsverktøy.

Kapittel 3 *Litteraturstudie* tar for seg den relevante litteraturen som er funnet innenfor temaene som beskrives i oppgaven. Alt som er skrevet i dette kapitlet er hentet fra litteraturen og er, så fremt ikke annet er spesifisert, ikke forfatterens personlige synspunkter eller meninger. Mye av litteraturen som er benyttet stammer fra utenlandske kilder. Deler av litteraturen som er brukt kan være nærmest direkte sitater, men siden de er oversatt til norsk er det valgt å ikke skrive dette som sitater. Dette er fordi det kan være flere måter å oversette teksten på og fordi det derfor kan være vanskelig å unngå fortolkninger.

Kilder er forsøkt referert slik at det tydelig kommer frem hvor informasjonen er hentet fra. Kildene er i hovedsak gitt etter første setning i et avsnitt, og vil gjelde frem til en ny kilde refereres.

Kapittel 4 *Analyse* er delt i to hoveddeler:

- Kvalitativ analyse
- Kvantitativ analyse

Disse delene beskriver det analysearbeidet som er utført og inkluderer også resultater fra ulike beregninger og simuleringer samt aktuelle feilkilder.

Kapittel 5 *Vurdering av løsninger* oppsummerer resultatene funnet i analysekapitlet, og sammenligner de ulike løsningene med hverandre og opp mot tålegrenser. Endelig røykventilasjonsløsning velges og nødvendig og tilgjengelig rømningstid vurderes.

Kapittel 6 *Konklusjon* inneholder konklusjon og anbefalinger som kan være aktuelle for analyseobjektet.

Kapittel 7 *Videre arbeid* tar for seg problemstillinger som kan være aktuelle å undersøke videre i lys av de funn som er gjort i oppgaven.

2 Metodebeskrivelse og valg

Flere metoder er benyttet i arbeidet med denne rapporten. Først er det utført et litteraturstudie hvor det er forsøkt gjennomgått mest mulig relevant litteratur innenfor temaene oppgaven omfatter. Det er deretter utført en analyse av brann og røykventilasjon i Alabasterhallen. Disse metodene er beskrevet nærmere i avsnitt 2.1 og 2.2.

I tillegg til studieprogrammet ved NTNU har forfatterne gjennomført et omfattende kurs i bruk av CFD ved Universitetet i Lund, Sverige. Kurset heter *Simulation of Fires in Enclosures* og gir i korte trekk en innføring i hvordan spredning av brann og forbrenningsgasser er simulert ved hjelp av CFD. Ved å gjennomføre kurset har forfatterne bygd kompetanse innenfor CFD-simulering, noe som i stor grad er benyttet i denne oppgaven. Kursbeskrivelse finnes i Vedlegg B.

2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudiet innbefatter en studie av relevant litteratur innen temaene brannprosjektering, røyk, røykventilasjon, regelverk, CFD-simulering, evakueringsteori, samt brukermanualer og andre hjelpemidler til bruk av programmene FDS 5, Pyrosim 2011 og 2012, og Pathfinder 2011.

I tillegg til kurset *Simulation of fires in enclosures* er følgende måter brukt for å erverve kunnskap om temaene i dette studiet:

- søk i *SINTEF Byggforsk kunnskapssystemer*, SINTEF-rapporter og gjennomgang av relevante byggdetaljblad
- deltakelse på webinar om røykventilasjon avholdt av Colt (utvikler og leverandør av bl.a. røykkontrollsystemer), fredag 9. mars [15]

- gjennomgang av tidligere prosjekt- og masteroppgaver innenfor relevante temaer skrevet ved f.eks. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Høgskolen i Stord/Haugesund, Universitetet i Stavanger og Universitetet i Lund
- søk etter artikler og rapporter i arkivdatabaser via NTNUs nettbibliotek, og søkemotorer som Google og Google Scholar

Kvaliteten på kildene er vurdert fortløpende gjennom arbeidet. Det er forsøkt benyttet kilder fra kjente forskningsinstitusjoner, universiteter og velrenommerte forfattere som er anerkjente innenfor fagfeltet, og som derfor regnes som troverdige. Mange av kildene som er benyttet er en del av pensumet i kurset ved Universitetet i Lund (spesielt litteratur angående CFD). Pensumlitteratur fra fagene *TBA 4175 Brannteknikk* (våren 2011), *TBA 4177 Brannsikkerhet i byggverk, videregående kurs* (høsten 2011) og *TPK 5160 Risikoanalyse* (høsten 2011), undervist ved NTNU, er også benyttet og anses som pålitelig. Denne litteraturen omfatter bl.a. regelverk, brannforløp, brannteknisk prøving, brannteknisk prosjektering og risikoanalyse.

2.2 Analyse

Det er gjennomført en kvalitativ og en kvantitativ analyse i arbeidet med denne oppgaven. Disse er beskrevet under.

2.2.1 Kvalitativ analyse

Hensikten med den kvalitative analysen er å danne grunnlag for valg av brannscenarier for bruk i den kvantitative analysen. I analysen er det tatt utgangspunkt i brannstatistikk, befaringer og informasjon funnet gjennom litteraturstudiet.

2.2.2 Kvantitativ analyse

Den kvantitative analysen tar utgangspunkt i litteratur for brannsimulering og opplæring i bruk av CFD-modeller. Hensikten med analysen er å undersøke om

røykventilasjonen foreslått for Alabasterhallen er mulig å gjennomføre etter gjeldende krav i regelverk.

Beregningene i denne delen av analysen består av håndberegninger for røykventilasjon i henhold til HO-meldingen, og kontrollberegninger av simuleringer ved bruk av ulike empiriske formler innen brannodynamikk og evakuering. Simuleringsverktøyene FDS 5, Pyrosim 2011 og 2012, og Pathfinder 2011 er benyttet for simulering av brann, røykventilasjon og evakuering i den kvantitative analysen.

Alle FDS-simuleringer er utført på datamaskiner tilhørende avdeling for Brann og sikkerhet ved Rambøll i Oslo. Grunnet simuleringenes omfang har dette vært avgjørende for gjennomføring av simuleringene innefor oppgavens tilmålte tid.

Begrunnelse for valg av simuleringsverktøy

For å representere CFD-modeller er programmet FDS valgt. Dette programmet har flere fordeler:

- det er fritt tilgjengelig og kan lastes ned gratis fra NISTs offisielle nettside for FDS [12]
- utviklerne av programvaren utfører en betydelig mengde verifisering og validering [16]
- det oppdateres jevnlig [12]
- det er kompatibelt med visualiseringsverktøyet Smokeview
- programvare for grafisk fremstilling av FDS-modellen er tilgjengelig (Pyrosim)
- det finnes gode brukermanualer og andre støttefunksjoner for hjelp til bruk av programmet

For forfatterne har det vært viktig å benytte en programvare som er mye brukt innenfor brannfaget og som dermed vil være relevant i arbeidslivet.

Pathfinder 2011 er valgt for simulering av evakueringsforhold. Dette programmet har flere fordeler: Det er tilgjengelig for gratis utprøving i en testperiode på 30 dager og

2. Metodebeskrivelse og valg

for lengre prøving ved bruk av studentlisens [14], det oppdateres jevnlig og har et intuitivt brukergrensesnitt.

3 Litteraturstudie

Temaene som er presentert i dette kapitlet anses som svært viktige for oppgaven, og er temaer som forfatterne ikke har hatt inngående kunnskaper om før arbeidet med oppgaven startet. Hovedfokus er på røyk, røykventilering, CFD-simulering generelt og CFD-modellen FDS spesielt. Disse temaene legger grunnlaget for brann- og røyksimulering av analyseobjektet i oppgaven, og er derfor grundig beskrevet i dette kapitlet.

Evakueringsteori og programmet Pathfinder er presentert for å danne bakgrunn for vurdering av evakueringsforholdene i Alabasterhallen ved de ulike røykventilasjonsløsningene som er simulert i FDS.

Det er gitt en kort innføring i aktuelle regelverk samt grunnleggende analytisk brannprosjektering. Aktuelle krav og anbefalinger beskrives nærmere i analysen der det er relevant.

3.1 Regelverk

Plan- og bygningsloven (PBL) med teknisk forskrift (TEK 10) og veiledning, og Brann- og eksplosjonsvernloven med forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn (FOBTOT), er to sett regelverk hvor det stilles branntekniske krav til byggverk i Norge [17]. Mens FOBTOT tar for seg eksisterende byggverk tar TEK 10 i hovedsak for seg nye byggverk, og det er det som er i fokus i denne oppgaven.

Funksjonsbaserte forskrifter kom med *Forskrift om krav til byggverk* (TEK 97) og stiller ikke lenger spesifikke krav til løsninger. TEK 10 trådte i kraft 1. juli 2010 og erstattet da TEK 97 [2]. Funksjonsbaserte forskrifter har åpnet opp for alternative utforminger og metoder, og slike løsninger må dokumenteres med analyse.

3.1.1 TEK 10

Forskrift om tekniske krav til byggverk, med korttittel Byggteknisk forskrift (TEK 10), ble fastsatt av Kommunal- og regionaldepartementet med hjemmel i plan- og bygningsloven (PBL) [2]. Forskriftens formål er å *sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi* [2] [§ 1-1].

3.1.2 Veiledning til TEK 10

Det er utarbeidet en veiledning til den tekniske forskriften. Denne forklarer og utdyper forskriftens krav og legger føringer for hvordan kravene kan etterkommes i praksis [18].

Verifisering av oppfyllelse av funksjonskrav i TEK 10 kan gjøres på følgende måter:

- a) ved at byggverk prosjekteres i samsvar med preaksepterte ytelser, eller*
- b) ved at byggverk prosjekteres i samsvar med ytelser verifisert ved analyse som viser at forskriftens funksjonskrav er oppfylt* [2] [§ 2-1].

Hvis alternativ b) velges, og verifisering av funksjonskrav gjøres ved analyse, skal det påvises at analysemetoden er egnet til, og gyldig for, formålet.

Forenklet brannteknisk prosjektering betyr, i følge veiledningen, at de preaksepterte ytelsene for brannsikkerhet følges uten fravik. Hvis det gjøres fravik må brannsikkerhet, som nevnt, verifiseres ved analyse. Dette kalles analytisk brannteknisk prosjektering. Analysens omfang avhenger av hvor omfattende fravikene er, og det er derfor nødvendig å gjøre en vurdering av konsekvensene av fraviket i forhold til de ulike kravområdene.

Veiledningen beskriver flere metoder for hvordan å verifisere løsninger ved analyse, både kvalitative og kvantitative metoder. En analyse kan være ren kvalitativ, ren

kvantitativ eller en kombinasjon av disse to. En ren kvalitativ analyse kan kun benyttes som metode hvis fravikene er begrensede. En ren kvalitativ vurdering må underbygges av statistikk, erfaring, forsøk, etc.

Det er viktig at verktøyet som brukes i analysen har tilfredsstillende pålitelighet [18]. I veiledningen er valg av metode, inngangsparametre og akseptkriterier beskrevet som avgjørende for resultatet. Dimensjonerende scenarioer for den enkelte prinsipp-løsningen, og dens ytelse, må inkluderes i analysen.

3.1.3 Melding HO-3/2000

Melding HO-3/2000 Temaveiledning Røykventilasjon, HO-meldingen, er en tema-veiledning for dimensjonering av røykventilasjonsanlegg ved bruk av tabeller [1]. Veiledningen ble utgitt av *Direktoratet for byggkvalitet* i 2000 (da under navnet Statens byggt tekniske etat), og blir benyttet av rådgivende ingeniører per dags dato. HO-meldingen er basert på massebalanse av luft som trekkes inn i brannen og utstrømning av varme gasser [19]. Formålet med temaveiledningen er at den skal være et hjelpemiddel for alle involverte parter ved installering av røykventilasjon, dvs. ansvarlig søker, prosjekterende, utførende, kontrollerende, tiltakshaver/eier og myndigheter [1].

Temaveiledningen legger til grunn at installasjoner for røykventilasjon skal være konstruert for å ventilere ut røyk og branngasser på et tidlig stadium, slik at mennesker som oppholder seg i bygningen skal få lengre tid til å rømme (øke tilgjengelig rømningstid). Røykventilasjon vil også være et egnet tiltak for å redusere skadeomfanget av en brann. Et røykventilasjonsanlegg som skal fungere godt må derfor tilpasses bygningen og virksomheten i bygningen ved riktig valg av komponenter og systemer [1 s. 2].

Løsninger beskrevet i HO-meldingen er minimumsløsninger for å oppnå tilfredsstillende brannsikkerhet.

3.2 Analytisk brannprosjektering

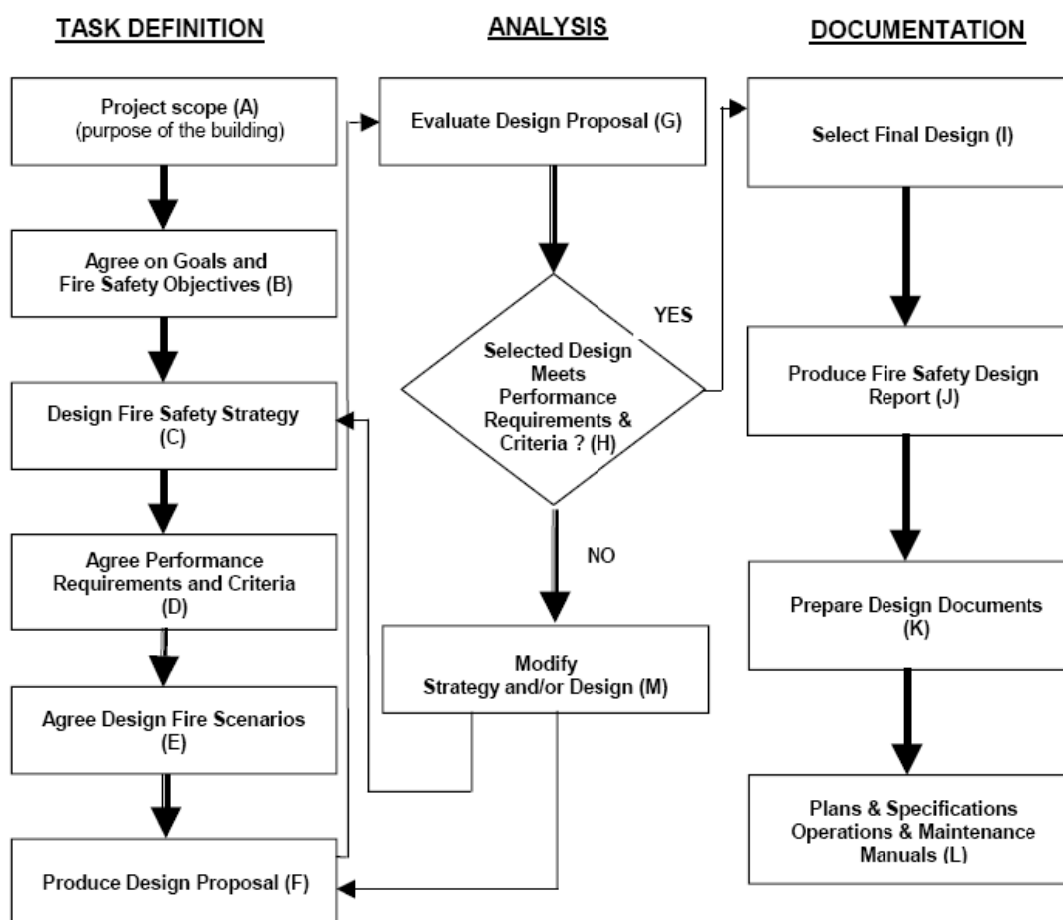
Resultater fra branntekniske analyser brukes ofte som underlag i ulike bygningsmessige beslutningsprosesser [20]. Dvs. at resultatene må være av tilstrekkelig høy kvalitet slik at beslutningen blir tatt på riktige premisser. Måten analysen presenteres og dokumenteres på vil være med å bestemme analysens kvalitet og nytteverdi. Det er mange faktorer som kan påvirke kvaliteten på analysen, og noen av disse er listet opp av Nystedt og Frantzich i en rapport finansiert av *Nationella Brandsäkerhetsgruppen* (NBSG) [20]:

- *Data som benyttes for å kvantifisere risiko er ofte ikke relevant i forhold til den spesifikke situasjonen som undersøkes i analysen.*
- *Risikoanalyser kan være svært ressurs- og tidkrevende, noe som kan føre til at et antall forenklinger og antagelser må gjøres.*
- *Modellering kan være altfor forenklet i forhold til omverdenens kompleksitet (for eksempel forenklinger ved modellering av ulykkesforløp og konsekvenser, begrensninger i beregningsmodeller etc.).*
- *Forenklinger og forutsetninger lagt til grunn for modellering og vurdering av noen uønskede hendelser kan være egnet for en rekke forhold, men helt uegnet for den spesifikke situasjonen som skal undersøkes [20 ss. 11-12] (oversatt til norsk).*

Det er viktig å være oppmerksom på at det som gjøres i de tidlige fasene av analysen påvirker alle de senere aktivitetene. Gjøres det feil her kan det føre til store feil i resultatene [20]. En god målsetning, en grundig problembeskrivelse og en nøye planlagt prosjekteringsprosess vil kunne bidra til å øke kvaliteten på analysen ved å gi de som utfører analysen riktig fokus i arbeidet.

Flere kilder beskriver prosjekteringsprosessen for brannsikkerhet, bl.a. er en ytelsesbasert prosess beskrevet i CIB-rapporten *Rational Fire Safety Engineering Approach to Fire Resistance of Buildings* [21]. Denne prosessen er vist i Figur 3.1.

Prosessen er delt i tre deler hvorav den første delen går ut på å definere oppgaven, den andre tar for seg selve analysen og den tredje er dokumentasjon. Denne beskrivelsen tar for seg hele brannprosjekteringsprosessen for en bygning.



Figur 3.1: Oversikt over en ytelsesbasert prosjekteringsprosess for brannsikkerhet. Gjengitt fra [21].

Nystedt og Frantzich [20] gir også en beskrivelse av en arbeidsprosess for brann-tekniske analyser. Denne deles inn i åtte steg:

Steg 1) Definere analysens målsetting

Steg 2) Beskrive brannscenarioer

Steg 3) Velge egnet brannmodell

Steg 4) Beregne brannforløpet

Steg 5) Vurdere resultatet

Steg 6) Evaluere resultatet gjennom en sensitivitets- og usikkerhetsanalyse for å kunne avgjøre om resultatet er tilfredsstillende

Steg 7) Dokumentere analysen

Steg 8) Utføre kontroll [20 ss. 18-39]

Å fastsette brannscenarioer er et av stegene som er tatt med i begge prosess-beskrivelsene. I rapporten *ISO/TS 16733 Fire safety engineering - Selection of design fire* introduseres en metodikk for valg av brannscenarioer og dimensjonerende brann [22]. Valg av brannscenarioer for analyse er svært kritisk da disse skal være dimensjonerende for nødvendige brannsikkerhetstiltak. Antallet brannscenarioer kan være veldig høyt, og det er ikke mulig å kvantifisere alle. Karakterisering av et brannscenario involverer beskrivelse av brannantennelse, vekstfasen, den fullt utviklede fasen og nedbrytningsfasen sammen med sannsynlig røyk- og brannspredning.

I følge rapporten er det nødvendig å fastsette hvilke verdier en primært ønsker å sikre [22]. Er det mennesker, materielle verdier, drift, miljø eller andre ting? Som nevnt kan antallet brannscenarioer være høyt og scenarioene bør derfor grupperes i forhold til hvilken verdi de er en risiko for. Det er viktig at den dimensjonerende brannen som velges er passende for det branntekniske målet. Hvis målet er å evaluere røykkontrollsystemet, bør det velges en dimensjonerende brann som utfordrer dette systemet. Hvis alvorligheten av en dimensjonerende brann er undervurdert kan det

føre til at en foreslår for enkle tiltak. Hvis alvorligheten blir overvurdert kan det føre til at en foreslår altfor kostbare tiltak.

Nystedt og Frantzich sammenfatter hvordan en bør utføre systematisk utvelgelse av brannscenarier i forhold til metoden gitt i ISO/TS 16377:

- *Undersøk først hvilken type virksomhet som skal drives i bygget og hva i bygget og virksomheten som kan forårsake brann.*
- *Identifiser så alle brannscenarier for å skape scenariokategorier og velg ut dimensjonerende scenarier som representerer den respektive kategori.*
- *For hvert av de dimensjonerende brannscenariene velges det relevante og representative parametre [20 s. 19].*

Tre spørsmål som kan være nyttige å besvare for å spesifisere et brannscenario er: *Hvor starter brannen? Hvordan ser brenselet og tennkilden ut? Finnes det annet brennbart materiale i nærheten som brannen kan spres til?* [20 s. 19]

Det finnes flere brannmodeller som kan brukes ved analytisk prosjektering. Disse er beskrevet nærmere i kapittel 3.3 nedenfor.

3.3 Brannmodeller

Brannmodeller som kan benyttes for å beregne brannforløpet i en bygning varierer fra enkle håndberegninger basert på empiriske korrelasjoner til mer kompliserte CFD-modeller (tosonemodeller og feltmodeller). CFD-modeller kan kreve mye ressurser til både oppbygging av modell og gjennomføring av selve beregningen [20].

Valg av modell styres av hvilket problem som skal løses og av bygningens kompleksitet [20]. De ulike modellene krever også ulik grad av kompetanse. Kompliserte modeller vil, i tillegg til kunnskaper om branndynamikk, kreve inngående kjennskap til den nødvendige programvaren og hvordan den fungerer.

Modellene brukes til å si noe om virkeligheten, men det er viktig å være klar over deres begrensninger.

Modeller er matematiske verktøy som brukes til å representere reelle situasjoner, og alle modeller har begrensninger. Det er viktig at brukeren kjenner begrensningene, bruker modellen riktig og tar hensyn til resultatene med en grad av konservatisme som illustrerer presisjonen av modellen og dens forutsetninger [20 s. 23] (oversatt til norsk).

3.3.1 Håndberegning

Håndberegningsmodeller kan f.eks. være empiriske korrelasjoner for bestemmelse av flammehøyde, temperatur i flammesøylen og røyksjiktet, eller røykklagets høyde [20]. Slike beregninger kan gjøres for hånd eller i enkle regneark og krever liten arbeidsinnsats. Håndberegningsmodeller er ofte nyttige ved enkle problemer og der raske svar kreves. Det er flere begrensninger ved slike beregningsmodeller, f.eks. angir de ofte stasjonær tilstand der forholdene antas enten konstante eller å gjelde kun for et spesifikt tidspunkt. Håndberegningsmodeller er som nevnt basert på empiriske korrelasjoner, og det kan være nødvendig å ha kjennskap til forsøkene de er basert på for å kunne avgjøre om modellen er relevant for problemet en søker å løse.

3.3.2 Tosonemodeller

Tosonemodeller er relativt enkle dataprogrammer bestående av algoritmer som beregner masse- og energibalansen i en brann [20]. Modellen deler et rom horisontalt i to soner som er koblet sammen med en brann- og røyksøyde [23]. Den øverste delen av rommet er det varme røyklaget, og den nederste delen er et kaldt lag med frisk luft [20]. Varmestråling fra det øvre laget og fra flammene kan gi en temperaturøkning også i det kalde laget. Det som er grunnleggende for tosonemodeller er at hver sone antas å ha homogene egenskaper, f.eks. at det i hvert punkt i det øvre laget er

lik temperatur, tetthet, konsentrasjon av branngasser etc. Programmer for beregning med tosonemodell bruker likninger for bevaring av masse, moment og energi, som anvendes på hver sone i en dynamisk prosess for å beregne bl.a. størrelse og temperatur ettersom brannen utvikler seg. Strømning av røyk og giftige produkter gjennom åpninger i vegger og tak beregnes også [23]. Slike modeller krever bruk av designbranner (funnet ved forsøk) fordi de ikke beregner brannens vekst på objekter og overflater.

Tosonemodeller kan kun anvendes på ukompliserte problemer [20]. De største ulempene med denne type modeller er at de ikke gir noen lokal informasjon og at de har store begrensninger i forhold til rommets geometri. Fordeler med tosonemodeller er at de ofte er enkle å bruke og at resultater genereres relativt raskt.

3.3.3 Feltmodeller/CFD-modeller

Antagelsen om to forskjellige lag av gasser er en forenklet måte å beskrive og beregne brannens oppførsel i et rom på [23]. I virkeligheten er det en gradvis tredimensjonal overgang av temperatur, tetthet og røyk mellom lagene. Feltmodeller er mer sofistikerte modeller som bruker strømningsdynamikk (CFD) til å modellere branner ved bruk av et stort antall diskrete soner i et tredimensjonalt rutenett. CFD-modeller deler altså rommet i et tusentalls celler (kontrollvolumer) hvor temperatur og andre variabler beregnes for hver celle [20].

CFD-modeller kan også håndtere turbulente gasstrømninger, noe som er karakteristisk for rombranner [20]. En av de store fordelene med CFD-modeller er at de kan benyttes for beregninger av konsekvenser av brannforløpet i rom hvor andre modeller er uegnede. Romgeometrien (rommets lengde, bredde og høyde) og rommets størrelse er avgjørende for mange av de brannfysiske effektene da volumet utgjør en stor del av likninger som bygger opp brannmodellen. De fleste romgeometrier avviker fra et terningformet utseende, og er derfor å anse som komplisert geometri i forhold til brannanalyse.

3.3.4 Simuleringsprogrammer

Numeriske simuleringsprogrammer kan være et godt alternativ til fullskalatester og laboratorietester [9]. Slike tester kan være svært tidkrevende og kan resultere i store kostnader. Det finnes mange typer simuleringsprogrammer som kan benyttes for simulering av en brann [20]. En av de vanligste sonemodellene er CFAST (Consolidate model of Fire Growth and Smoke Transport). Modellen brukes til å beregne utvikling av røykfordeling, branngasser og temperatur i hele seksjoner i en bygning under brann [24]. Programmet er utviklet av *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Det finnes flere typer feltmodeller (CFD-modeller) som f.eks. CFX, FLUENT og PHOENIX som er kommersielle modeller med et bredt bruksområde, samt SOFIE, SMAFS og FDS som er spesielt utviklet for å beskrive brann [20].

I kapittel 3.4 og 3.5 beskrives henholdsvis CFD-modeller generelt og FDS spesielt. Teorien i disse kapitlene er i hovedsak hentet fra Carlsson [25], *FDS Reference Guide* [26], Pettersen [10], Nystedt og Frantzich [20] og Jakobsen et al. [11].

3.4 Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD er analyse av systemer som involverer fluidstrømning (væske- og gasstrømning), varmetransport og tilhørende fenomener, som f.eks. kjemiske reaksjoner [9]. Slik analyse gjøres ved hjelp av PC-basert simulering. Teknikken er veldig kraftig og spenner over et bredt spekter av industrielle og ikke-industrielle bruksområder. CFD-programmer bruker forskjellige løsningsmetoder for å løse et sett av ikke-lineære partielle differensiallikninger avledet fra grunnleggende naturlover, inkludert bevaring av masse, moment, energi og kjemiske stoffer [25].

Likningene som beskriver fluidstrømning er kjent som Navier-Stokes-likningene. Disse likningene er for komplekse til å løses direkte og en rekke forenklete delmodeller må benyttes for å komplettere de originale transportlikningene. Dette inkluderer

modeller for å bestemme f.eks. turbulens, forbrenning, stråling og veggeffekter. Carlsson [25] forklarer denne overgangen fra *nøyaktighet/virkelighet* til *imitasjon av virkeligheten* på følgende måte: ”*This is where the calculations abandon exactness and leave it to the engineer to attempt to imitate reality in the best possible way.*” [25 s. 37]. Det er med andre ord viktig å kjenne til bakgrunnsteorien ved bruk av slike programmer.

Finite Volume, Finite Element og Finite Difference er tre tilnærminger for å transformere de originale partielle differensiallikningene til algebraiske likninger som kan løses numerisk [9]. Disse vil ikke beskrives nærmere i oppgaven, det henvises derfor til Versteeg og Malalasekera [9] for mer inngående beskrivelse av disse tilnærmingene.

3.4.1 RANS- og LES-modeller

For å fange effektene av turbulens i et strømningsfelt er flere modelleringsteknikker tilgjengelige [25]. Den mest populære og tidsbesparende tilnærmingen er RANS-modellen. RANS står for *Reynold's Averaged Navier Stokes* og henviser til hvordan turbulensen modelleres [11]. De fleste CFD-verktøyene er tidsgjennomsnittsmodeller av typen RANS, som f.eks. CFX og SOFIE. I RANS deles strømmingen i en middelvei og en fluktuerende verdi ut fra middelveien i den turbulente strømmingen. All turbulens beregnes i undermodeller og disse kan ha problemer med å beregne luftinnblanding i brannøylen helt korrekt [20]. Turbulensmodellene til RANS består som regel av tolikningsmodeller som k - ϵ - eller k - ω -modellene. Disse modellene vil ikke beskrives nærmere i denne rapporten, og det vises til Carlsson [25] for en mer inngående forklaring av modellene. Tolikningsmodeller er et minimumskrav for beregning av røykspredning [11].

LES står for *Large Eddy Simulation* og er en type modeller som har blitt benyttet stadig mer de senere årene [20]. I motsetning til RANS-metoden som har fokus på statistiske egenskaper i strømmingen, deler LES det turbulente strømningsfeltet inn i et tredimensjonalt rutenett ved hjelp av lengdeskalaer, kalt ”subgrid-scale”-

komponenter. Disse benytter et "filter" som fjerner de minste strukturene fra de generelle transportlikningene [25]. LES-modeller simulerer derfor de store virvlene og beregner middelverdien for de små. Dvs. at strukturene i strømmingen som er større enn cellene beregnes direkte ut i fra de grunnleggende likningene, mens en enklere empirisk modell benyttes for å beregne turbulensen for de virvlene som er mindre enn cellene [11]. Luftinnblandingen i brann- og røyksøylen har en direkte kobling til beregningens oppløsning og er mulig å forfine på bekostning av simuleringstiden [20]. Simuleringstiden øker med ca. seksten ganger om cellestørrelsen halveres. Eksempler på LES-modeller er SMAFS og FDS.

Forskjellen mellom RANS og LES er ganske stor, og påvirker flere aspekter relatert til kvaliteten på simuleringene [20]. I en RANS-modell beregnes de strømningsdynamiske likningene med et tidsgjennomsnitt før de går over til den numeriske modellen, og modellen gjør deretter en stasjonær løsning av likningene. Tidsavhengige strømmer kan styres dersom tidsskalaen på den gjennomsnittlige strømmingen er stor i forhold til de turbulente svingningene. En LES-modell bruker ikke tidsgjennomsnitt, men varierer med tiden, dvs. at modellen er transient. Svingningene kan observeres mellom ulike tidssteg, og er et mål på bevegelsene den numeriske modellen kan håndtere. LES-modellen går fremover med korte tidssteg som fastsettes av et konvergenzkriterium knyttet til løsningens stabilitet.

DNS (Direct Numerical Simulation) er CFD-beregning hvor Navier-Stokes-likningene løses numerisk uten bruk av turbulensmodell [27]. Dette betyr at hele spekteret av rom- og tidsskalaer må løses i beregningsdomenet. Hvis cellestørrelsene i en LES-modell er så små at de minste virvlene blir regnet med uten bruk av undermodeller så er dette regnet som DNS. Beregningskostnaden (i tid og datakapasitet) ved DNS er svært høy, og DNS er derfor ikke mulig å benytte ved løsning av praktiske ingeniørmessige problemer.

3.4.2 Bruk av CFD

I følge Versteeg og Malalaskera [9] er det flere unike fordeler ved bruk av CFD i forhold til eksperimentbaserte tilnærminger til design av fluidsystemer. Disse er:

- *betydelig reduksjon av gjennomføringstid og kostnader ved ny design*
- *muligheten til å studere systemer der kontrollerte eksperimenter er vanskelige eller umulige å utføre (for eksempel for svært store systemer)*
- *muligheten til å studere systemer under farlige forhold, og på og utenfor deres normale ytelsesgrense (for eksempel sikkerhetsstudier og ulykkes-scenarioer)*
- *praktisk talt ubegrenset detaljnivå av resultater [9 s. 2] (oversatt til norsk)*

I tillegg til de store fordelene ved bruk av CFD-modeller er det også viktig å ta hensyn til modellenes begrensninger. I følge rapporten *CFD Best Practice* er ”de resultater som anvendelse av CFD gir, [...] i beste fall et meget fornuftig estimat for de fysiske forhold [...] og kan dermed ikke betraktes som et uttrykk for et faktum” [11 s. 7] (oversatt til norsk). Rapporten påpeker at det er en relativt stor risiko for inntastingsfeil eller forglemmelse pga. de mange parametre som kan spille inn. Det er derfor viktig å utføre relevant intern egenkontroll. Beregningene bør også kontrolleres ved bruk av andre beregningsmetoder som f.eks. håndberegning, andre anerkjente programmer, forsøk eller lignende.

Selv om bruk av CFD-modeller kan spare både tid og kostnader i forhold til eksperimentbaserte tilnærminger er det en del likheter mellom disse som en bør være klar over. Ved bruk av simuleringsprogrammer, som f.eks. FDS, må en på forhånd bestemme all informasjonen som en ønsker å få ut av simuleringen [28]. Alle utdataverdier må derfor velges før simuleringen startes. Det er, i likhet med eksperimenter,

ikke mulig å hente ut data som ikke er spesifisert på forhånd. Om en mangler f.eks. temperatur i et viktig punkt i modellen må simuleringen kjøres på nytt.

3.5 Fire Dynamics Simulator (FDS)

Fire Dynamics Simulator (FDS) er en fritt tilgjengelig programvare utviklet av *Building and Fire Research Laboratory* (BFRL) ved *National Institute of Standards and Technology* (NIST) i samarbeid med *VTT Technical Research Centre of Finland* [12]. FDS er en CFD-modell for brannrevet fluidstrøm [28].

Den første versjonen av FDS ble publisert for første gang i februar 2000 [28] og den nyeste versjonen (FDS 5.5.3) ble sluppet i oktober 2010 [12]. Gjennom sin utvikling har FDS vært rettet mot å løse praktiske brannproblemer innenfor brannprosjektering, og samtidig har det vært et verktøy for å studere grunnleggende brann-dynamikk og forbrenning [27].

Eksempler på fenomener som effektivt kan modelleres i FDS er lavhastighets-transport av varme og forbrenningsprodukter fra brann, stråling og konvektiv varme-transport mellom gass og faste materialer, aktivering av sprinklersystemer, varme-detektorer og røykdetektorer [27]. Noen problemstillinger er fremdeles tema for forskning og en bør være svært kritisk til, og kanskje unngå, å bruke FDS for å modellere disse problemene. Dette gjelder bl.a. modellering av pyrolyse, flammespredning og brannvekst, spray fra sprinklersystem og undertrykkelse av brann ved bruk av vann.

For å visualisere resultatene fra FDS benyttes programmet *Smokeview* som er et visualiseringsprogram som også er utviklet av NIST [26]. Programmet viser brann og røyk på en forholdsvis realistisk måte.

FDS er ment benyttet av personer som har tilstrekkelig kompetanse innenfor feltene fluiddynamikk, termodynamikk, varmetransport, forbrenning og brannvitenskap [27]. For hjelp til bruk av programmet finnes det online ressurser og brukerstøtte. Det

finnes to separate manualer til FDS: *FDS5 Technical Reference Guide* [26] som beskriver det teoretiske grunnlaget for FDS, og *FDS5 User's Guide* [28] som beskriver hvordan en bygger opp og bruker en modell. I tillegg finnes det en egen manual til Smokeview. Alle disse manualene kan lastes ned fra den offisielle siden til FDS og Smokeview [12]. Andre ressurser som er tilgjengelig er en problemsøker hvor en kan rapportere programfeil, etterspørre funksjoner i programvaren og stille spesifikke spørsmål, samt muligheten for å delta i diskusjonsforum [27].

3.5.1 Bruk av FDS

En CFD-prosess kan deles opp i ti deler [29]:

1. *formuler strømningsproblemet*
2. *modeller geometrien*
3. *modeller det beregningsmessige domenet*
4. *generer meshet*
5. *spesifiser start- og grensebetingelser*
6. *sett opp CFD-simuleringen*
7. *gjennomfør og overvåk CFD-simuleringen*
8. *evaluer og prosesser CFD-resultatene*
9. *videre analyse*
10. *rapporter resultater [29 s. 2] (oversatt til norsk)*

Denne prosessen er gjeldende ved bruk av FDS. Det første en gjør i selve programmet er å modellere geometrien. Dette gjøres enten ved å skrive koder manuelt eller ved å bruke et grafisk brukergrensesnitt, som f.eks. Pyrosim (Pyrosim er nærmere beskrevet i avsnitt 3.5.11).

Geometrien som modelleres i FDS er utformingen av bygningen eller rommet som skal simuleres, planløsning, materialvalg og de systemer som er i bygningen. Eksempler på slike systemer er sprinklersystem og røykvarslere. Så langt det lar seg

gjøre bør modellen være så korrekt som mulig i forhold til den fysiske bygningsgeometrien [11]. Dette vil si at modellens detaljeringsgrad skal omfatte de objekter eller elementer som har vesentlig innflytelse på røykspredningen. Det er også viktig å huske på at FDS ikke er en CAD-tegning (Computer Aided Design), men en CFD-kode [27]. Dette betyr at ikke alle geometriske detaljer behøves å tas med i inndatafilen til FDS. Det er derfor viktig at første steg i analyseprosessen formulerer problemet som skal analyseres. Følgende spørsmål kan bidra til å formulere problemstillingen: *"Hva er målet med analysen? Hva er den enkleste måten å nå målet på? Hvilke inndata må inkluderes?"* [27 s. 34].

Det beregningsmessige domenet må defineres. Dette domenet er det volumet hvor strømningsfeltet skal beregnes. I det beregningsmessige domenet genereres meshet, også kalt gridet (i denne oppgaven brukes *mesh*). Bygningsgeometrien beskrives som hindringer i forhold til gasstrømninger [27]. Når geometrien modelleres lager brukeren rektangulære gjenstander/blokker som blir tvunget til å samsvare med det underliggende meshet. Hvis objekters størrelse eller plassering ikke samsvarer presist med meshet vil FDS justere objektenes geometri slik at de samsvarer. Det kan være nyttig å undersøke modellen i Smokeview før en simulering startes for å kontrollere inndataparametrene.

Ved starten av enhver simulering er temperaturen lik overalt, strømningshastigheten er null overalt, ingenting brenner og massefraksjonen av alle artene er uniform [27]. Startbetingelsene kan enten beholdes slik de er definert som standardverdi i FDS eller de kan defineres manuelt. Det er mulig å endre startbetingelsene på hele beregningsdomenet eller på ulike deler (volum) av domenet. Randbetingelser for alle grenser spesifiseres til hver av grenseflatene i strømningsdomenet, dvs. at både overflatene til de faste objektene, og også de utvendige grensene for beregningsdomenet, må fastsettes.

Neste steg er å sette opp simuleringen og starte den [29]. Det er viktig å overvåke resultatene underveis, dette kan bl.a. gjøres ved å se på simuleringen i Smoke-

view [27]. Simuleringene krever beregningstid i størrelsesorden timer og dager, og kan også ta opptil flere uker [29]. Dette avhenger i stor grad av meshoppløsningen og størrelsen på modellen. Som beskrevet tidligere øker simuleringstiden med ca. seksten ganger ved en halvering av cellestørrelsen i meshet.

Når simuleringen er ferdig og resultatene er klare er det tid for evaluering. Dette gjøres ved hjelp av visualisering i Smokeview, og behandling av de utdata som på forhånd er definert i inndatafilen. Det er viktig å kontrollere simuleringen med hensyn til aspekter som er kritiske i forhold til kvaliteten på resultatet [20].

Når en simulering har nådd iterativ konvergens og resultatene er undersøkt og behandlet, kan det være ulike grunner til at det ønskes å gjøre endringer og fortsette med en annen simulering [29]. En slik videre analyse kan f.eks. utføres fordi en ønsker å undersøke sensitiviteten ved å endre den fysiske modellen, kontrollere mesh-sensitivitet ved å endre oppløsningen på beregningsdomenet, endre geometrien som en del av en parameterstudie eller lignende. Når en skal kontrollere mesh-sensitiviteten bør en først bygge en FDS-kode med en relativt grov meshoppløsning, før en gradvis forfiner oppløsningen til en ikke lenger kan se vesentlige forskjeller i resultatene [27].

Til slutt må resultatene rapporteres. Usikkerheten til resultatene bør også tas med for å indikere hvor stor tiltro en har til kvaliteten på dataene [29]. I rapporten kan det bl.a. være interessant å drøfte de tekniske resultatene og hvilke usikkerheter som er knyttet til disse, samt hvor sensitive resultatene er i forhold til de parametrene som er brukt i modellen.

3.5.2 Oppbygging av inndatafil

All nødvendig informasjon for å utføre en simulering i FDS må spesifiseres i en tekstfil [27]. Informasjonen i filen deles inn med bruk av grupper. Hver gruppe skrives i en egen tekstlinje som startes med tegnet "&" etterfulgt av navnet på gruppen. Etter navnet følger inndataparametrene som skal spesifiseres. Tekstlinjen avsluttes til

slutt med en ”/”. Etter setningen er avsluttet er det vanlig å skrive korte kommentarer for å forklare hvilke data som er beskrevet. Disse kommentarene vil gjøre det lettere å gjennomføre kontroll av inndatafilen, og vil i tillegg være forklarende i tilfeller hvor inndatafilen skal brukes av andre enn de som har skrevet den.

De fleste FDS-koder bygges opp på samme måte [27]. Øverst i tekstfilen fastsettes grunnleggende forutsetninger som simuleringens navn, HEAD, og simuleringstid, TIME. Med gruppen DUMP angis parametre som kontrollerer hvor hyppig utdata lages, samt andre parametre forbundet med utdata. Ulike andre parametre fastsettes ved å bruke MISC. Selve forbrenningsreaksjonen, REAC, beskrives bl.a. med sin kjemiske struktur og sotproduksjon. I tillegg spesifiseres strålingsmodellen, RADI. Det beregningsmessige domenet, MESH, som må være med for å kunne utføre en simulering i FDS defineres, og startbetingelser for domenet beskrives med gruppen INIT. Nedenfor vises et eksempel på en tekstlinje i en FDS-kode der gruppen HEAD er benyttet. Denne gruppen må alltid inkluderes i en FDS-kode.

&HEAD CHID='alabasterhallen', TITLE='røyksimulering 1' / navnet på oppgaven og tittelen på den aktuelle simuleringen.

Etter at beregningsdomenet og startbetingelser er skrevet defineres ulike egenskaper for hvert materiale (MATL), gassarter (SPEC), Lagrangepartikler (PART), og ulike typer grensebetingelser (SURF) [27]. I tillegg er det mulig å spesifisere tidsavhengighet, RAMP, for ulike verdier. Geometrien beskrives som gjenstander/blokker (OBST), åpninger/hull i OBST (HOLE), samt med gruppen VENT som definerer grensebetingelser for bestemte deler av en overflate eller for beregningsdomenets grenser. Hver overflate må knyttes til en type grensebetingelse, SURF. Styringslogikk introduseres i filen ved gruppene PROP, DEVC og CTRL. Disse kan brukes til å kontrollere ulike hendelser som opprettelse eller fjerning av gjenstander/blokker, eller aktivering og deaktivering av vifter og ventilasjonsåpninger.

Til slutt beskrives de ulike data som er ønskelig å få ut av simuleringen, samt hvordan og hvor ofte disse verdiene skal beregnes (DEVC, SLFC, BNDF, ISOF) [27]. Dette kan være instrumenter, DEVC, som f.eks. termoelementer som måler temperatur, målere for hastighet eller varmekraft. SLFC kan f.eks. vise temperaturprofil gjennom brannen eller andre områder av interesse.

3.5.3 Matematisk bakgrunn

FDS-modellen løser numerisk en form for Navier-Stokes-likninger egnet for lavhastighets- og varmedrevet strømming med fokus på røyk- og varmetransport fra branner [27]. De partiellderiverte bevaringslikningene for masse, moment og energi er tilnærmet med "finite difference"-metoden, og løsningen er oppdatert i tid på et tredimensjonalt, rettlinjett rutenett (meshet). Termisk stråling er beregnet ved hjelp av "finite volume"-teknikk på det samme rutenettet som strømningsløsningen. For å simulere røykbevegelse, sprinklerutslipp og drivstoffspray brukes Lagrangepartikler. Dette er partikler som ikke er definert eller begrenset av det numeriske meshet (cellestørrelsen i meshet kan være mange ganger større enn partiklene). Noen ganger har partiklene masse og noen ganger har de det ikke. Noen fordamper, noen absorberer stråling, etc.

FDS-modellen er altså sammensatt av flere komponenter, og noen av de viktigste komponentene er beskrevet nedenfor. Mer litteratur om den matematiske bakgrunnen finnes i bl.a. *FDS Technical Reference Guide* [26].

Hydrodynamisk modell

Hydrodynamikk er læren om væskers og gassers bevegelse [30]. En detaljert beskrivelse av slike bevegelser, og årsakene til dem, er vanskelig og har utfordret fysikere og matematikere i mange hundre år. De generelle strømningsdynamiske likningene som beskriver masse-, moment- og energitransport kan brukes for å beskrive et stort og variert utvalg av fysiske prosesser [10]. Mange av disse har ikke noe med brann å gjøre og er ikke nødvendig å ha med i brannmodeller. De forenklede

Navier-Stokes-likningene som brukes i FDS er utviklet av Rehm og Baum [26]. Den forenklete formen oppnås ved å filtrere ut akustiske bølger for å oppnå det som er kjent som "lavt Mach-tall"-likninger. Mach-tall beskriver forholdet mellom et legemes hastighet og lydets hastighet ved samme temperatur og trykk [31]. Når en har Mach-tall som er mindre enn 1,0 er hastigheten lavere enn lydets hastighet, og forstyrrelser kan forplante seg foran legemet. Som nevnt er FDS begrenset til lavhastighetsstrømning, dvs. til Mach-tall mindre enn ca. 0,3 [26]. "Lavt-Mach-tall"-likninger beskriver lavhastighetsbevegelse av gasser drevet av kjemisk varmeavgivelse og oppdriftskrefter [10]. Likningene tillater store variasjoner i tetthet og temperatur, men bare små endringer i trykk, noe som er typisk for brannscenarier [10]. Det er to formål med å anta lavt Mach-tall [26]: a) filtrering av akustiske bølger innebærer at tidssteget i den numeriske algoritmen er bundet av bare strømningshastighet i motsetning til lydets hastighet, b) den modifiserte likningen fører til en reduksjon i antallet avhengige variabler i systemet.

De fire bevaringslikningene for masse, moment, energi og kjemiske stoffer er sentrale i denne generaliserte formen av Navier-Stokes-likningene. For å løse likningene i FDS numerisk er de diskretisert i rom og tid [10]. Likningene vil ikke forklares nærmere i denne oppgaven, det henvises derfor til *FDS Technical Reference Guide* for mer inngående informasjon [26].

Forbrenningsmodell

Det er to typer forbrenningsmodeller som brukes i FDS, og valget av modell er avhengig av benyttet meshoppløsning [10]. Når DNS utføres blir diffusjon av brensel og oksygen modellert direkte ved bruk av "finite-rate"-tilnærming [26]. Med denne tilnærmingen blir alle de individuelle gassartene som er involvert i forbrenningsprosessen definert og sporet individuelt [32]. For de fleste kommersielle bruksformål benyttes LES [10] hvor forbrenningen foregår med en "Mixture Fraction"-modell (blandingsfraksjon) [26]. Dette er den mest brukte forbrenningsmodellen i FDS [32].

I "Mixture Fraction"-modellen kan en representere en brannkilde på flere måter [11]. Varmekilden kan beskrives som et rent brennstoff eller som et kombinasjonsbrennstoff bestående av flere brennstoffer. Hvis en velger et kombinasjonsbrensel bør brenselets sammensetning velges på bakgrunn av de aktuelle materialene i bygningen. Blandingsfraksjonen er en skalar verdi som representerer fraksjonen av ett eller flere gitte materialer på et gitt sted i strømningsfeltet som blir til brensel [26].

Reaksjonen mellom brensel og oksygen var i tidligere versjoner av FDS øyeblikkelig og komplett, men dette er videreutviklet i FDS versjon 5, og det er utformet flere valgfrie ordninger for å forutsi omfanget av f.eks. forbrenning i underventilerte områder [26]. Massefraksjonen av alle hovedreaktantene og produktene kan utledes fra blandingsfraksjonen ved bruk av "state relations" (tilstandsforbindelser) som er funnet ved hjelp av forenklet analyse og målinger [26].

I FDS er det to måter å angi en brann på [32]. Den ene måten er å spesifisere HRRPUA (varmeavgivelseshastighet per arealenheter) over en flate, og den andre er å spesifisere HEAT_OF_REACTION (reaksjonsvarme) sammen med andre termiske parametre, som en del av et materiale. I begge tilfeller er "Mixture Fraction"-modellen benyttet.

HRRPUA-metoden er den enkleste måten å angi en brann på [32]. Ved bruk av denne metoden lages det en brenneroverflate med en ønsket varmeavgivelseshastighet. En reaksjon defineres på REAC-linjen i inndatafilen ved å spesifisere den kjemiske formelen for brenselet sammen med f.eks. andeler av CO, sot og H₂ [28]. Parametrene som angis brukes til å beregne forbrenningsproduktene som avgis i brannen. Hvis det ikke defineres noen reaksjon benyttes propan som standardverdi i FDS.

Strålingstransport

Strålingstransport er inkludert i FDS-modellen ved hjelp av likningen for strålingstransport av en grå gass [26]. Likningen for strålingstransport av grå gass er kjent som RTE (Radiative Transport Equation) [10]. Strålingsfluksene avledes fra RTE ved

bruk av en teknikk som er lik "finite volume"-metoden for konvektiv transport [26]. Se *FDS Technical Reference Guide* for mer inngående forklaring til "finite volume" metoden [26]. Strålingstransporten i FDS beregnes via strålingsvinkler. Når det brukes hundre diskrete vinkler, som er standardverdien i FDS, krever metoden omtrent 20 % av den totale CPU-tiden (beregningstiden for prosesseringsenheten i en datamaskin) til en beregning [26]. Dette kan sies å være en beskjeden kostnad gitt kompleksiteten ved strålingstransport.

Turbulens

I nesten alle brannscenarioer av interesse er gasstrømningen turbulent av natur, preget av tilfeldige, svært varierende rotasjonsbevegelser i tre dimensjoner [25]. Denne tilsynelatende kaotiske strømningen består av virvler på skalaer med ulik lengde, hvor de største virvlene, som er generert av ustabilitet i hovedstrømmen, blir brutt ned i mindre og mindre skalaer i en prosess kjent som "turbulent energikaskade". Lewis Fry Richardson, en engelsk matematiker, fysiker, meteorolog, og psykolog, oppsummerte turbulent energikaskade med følgende setning: *"Big whirls have little whirls, which feed their velocity; Little whirls have smaller whirls, and so unto viscosity* [33]." Dette tolker forfatterne slik at hvis de små virvlene ikke tas med i beregningen vil ikke de store virvlene modelleres på en realistisk måte.

Størrelsen, eller skalaen, på de største virvlene kalles "den integrerte lengdeskala" [25]. Uttrykket er relatert til geometrien og grensebetingelsene i scenarioet. Derimot er de minste strukturene som kan opprettholdes i det turbulente strømningsfeltet gitt av begrensninger som stammer fra viskøs spredning. Disse kalles "Kolmogorovs mikroskalavirvler". På denne lengdeskalaen slutter den turbulente energikaskaden og energien fra alle de resterende (Kolmogorov) virvlene blir borte som varme.

FDS beregner turbulens ved bruk av LES [26]. For å beregne turbulensen på de minste lengdeskalaene brukes en empirisk modell kalt Smagorinsky-modellen [11].

Dersom cellene i meshet er så små at Kolmogorovs mikroskalavirvler beregnes uten bruk av undermodell, kalles beregningen DNS.

Grensebetingelser

Termiske grensebetingelser fastsettes for alle faste flater og på de ytre grensene til beregningsdomenet [27]. Flatene knyttes i tillegg til informasjon om materialets egenskaper ved brann ved bruk av MATL-grupper [26]. I FDS håndteres varme- og massetransport til og fra faste flater vanligvis med empiriske korrelasjoner. Det er mulig å beregne direkte varme- og massetransport ved å utføre DNS. For praktiske problemer er DNS, som tidligere nevnt, ikke mulig å benytte.

Det finnes predefinerte grensebetingelser som kan benyttes hvis en ikke ønsker å bruke materialspesifikke betingelser. Disse er INERT, OPEN, MIRROR og ADIABATIC [27].

På en grense med inerte betingelser (INERT) vil det foregå en isoterm prosess og temperaturen endres ikke ($\Delta T = 0$) [27]. En konstruksjonsdel med inerte betingelser vil oppføre seg som en stålplate med kaldt vann konstant rennende på baksiden, slik at den ikke varmes opp, og ikke deltar i forbrenningsprosessen. Selv om temperaturen ikke endres, kan endringer i varmeenergien forekomme ($\Delta Q \neq 0$). Dvs. at varmeledning kan forekomme gjennom konstruksjonen, men veggene varmes ikke opp.

En OPEN grensebetingelse kan bare spesifiseres på beregningsdomenets ytre grense [27]. OPEN antar at omgivelsestilstand eksisterer bak grensen den blir knyttet til. Det er viktig å være klar over at bruk av OPEN grensebetingelse nær åpninger i bygningsgeometrien kan føre til at strømmingen ikke beregnes naturlig. For at strømmingen inn og ut av en åpning skal kunne beregnes på en realistisk måte bør en derfor strekke de ytre grensene et stykke utenfor åpningen.

MIRROR kan bare spesifiseres på beregningsdomenets ytre grense og vil da angi et symmetrisk plan [27]. Brukes denne grensebetingelsen vil beregningsdomenet speiles

og i teorien vil domenet derfor dobles. Strømningen på motsatt side av grensen vil være speilvendt på samme måte som alt annet som er modellert, også brannen.

På en adiabatisk grense (ADIABATIC) vil det foregå en adiabatisk prosess [27]. Her vil det ikke forekomme endringer i varmeenergien, og grensen vil dermed ikke utveksle varmeenergi med omgivelsene ($\Delta Q = 0$). Endringer i temperaturen kan forekomme ($\Delta T \neq 0$). En adiabatisk grense kan beskrives som en ideell isolator.

Å bruke materialspesifikke grensebetingelser vil være det mest nøyaktige, og er det alternativet som anbefales i Gissis veiledningsmanual til FDS [27].

3.5.4 Fastsetting av materialegenskaper

Alle materialegenskaper i FDS fastsettes ved hjelp av kodegruppen MATL, f.eks. tetthet, emissivitet, varmeledningsevne, spesifikk varmekapasitet, forbrenningsvarme med flere [27]. Egenskapene indikerer hvor raskt materialene varmes opp og hvordan de brenner. Hver MATL-oppføring i FDS-filen gis en identifikasjon (ID) som det kan refereres til der hvor materialet skal brukes.

3.5.5 Røyk og sot

Som standard antar FDS at røykavgivelsen fra en brann er direkte relatert til varmeavgivelseshastighet, HRR [27]. En sotproduksjon på 0,01 (SOOT_YIELD=0,01 på REAC-linjen) betyr at røykutviklingshastigheten er 1 % av drivstoffets forbrenningshastighet. Røyken er, i dette tilfellet, ikke eksplisitt sporet av FDS, men antas å være en funksjon av "Mixture Fraction"-variabler. FDS kan bare spore røyken hvis produksjonshastigheten og sammensetningen er spesifisert. Å forutsi dette er utenfor nåværende FDS-versjons kapasitet (5.5.3).

Det er tre parametre som kontrollerer røykutviklingen og røykens synlighet [27], SOOT_YIELD, MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT og VISIBILITY_FACTOR. Disse defineres i REAC-linjen i FDS-koden [28]. SOOT_YIELD angir den fraksjonen av brenselets masse som konverteres til røykpartikler [28]. Denne parameteren gjelder

ikke for prosesser som sotvekst og oksidasjon, men for netto produksjon av røykpartikler fra brannen. `MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT` er en koeffisient som angir massereduksjon. Standardverdien for denne er $8700 \text{ m}^2/\text{kg}$ (anbefalt verdi for flammende forbrenning av tre og plast). `VISIBILITY_FACTOR` er en dimensjonsløs konstant som avhenger av hvilke type objekter som skal ses gjennom røyken. Faktoren settes til 8 for et lysemitterende skilt og lik 3 for et lysreflekterende skilt, der 3 er standardverdien for visibilitetsfaktoren i FDS [27].

Med koden `CO_YIELD` defineres fraksjonen av brenselmassen som konverteres til karbonmonoksid, CO [28].

3.5.6 Mesh

Et mesh består av rektangulære celler, eller kontrollvolum, og størrelsen på disse må defineres [28]. Alle gjenstander/blokker og åpninger som er definert utenfor meshet kuttes ved domenegrensen. Objektene vil derfor ikke tas med i beregningene og vil ikke vises i Smokeview. Cellene i meshet er ideelt sett kubiske, dvs. at de bør ha lik lengde, bredde og høyde. Antallet celler avhenger av ønsket oppløsning på strømmingen. Når cellestørrelsen defineres er det viktig å ta hensyn til at turbulens og virvelformasjoner begrenses av de største celledimensjonene. Cellene må derfor være tilstrekkelig finoppløste.

Fordi en viktig del av beregningen i FDS bruker en "Poisson"-problemløser basert på "Fast Fourier"-transformasjon i y- og z-retning, bør dimensjonene i meshet (i y- og z-retning) være på formen $2^k \times 3^m \times 5^n$, der k , m og n er heltall [28]. For mer informasjon om hvordan "Poisson"-problemløser og "Fast Fourier"-transformasjon fungerer, henvises det til *FDS User's Guide* [28]. I denne er det også gitt en oversikt over hvilke tall mellom 1 og 1024 som kan faktoreres ned til 2, 3 og 5.

Det er mulig å lage flere rektangulære mesh for å håndtere situasjoner hvor beregningsdomenet ikke enkelt lar seg integrere i et enkelt mesh [27]. Det er viktig å

unngå å plassere meshgrenser der hvor kritiske hendelser kan oppstå, f.eks. i nærheten av selve brannen, i åpninger og lignende.

Meshets finhet

Meshets finhet er en av de viktigste parametrene ved simulering i FDS fordi kvaliteten av den numeriske løsningen i høy grad relateres til kvaliteten på meshet [11]. Det er derfor nødvendig å oppnå en meshuavhengig løsning for å minimere feilkilden i den numeriske løsningen. Ved å teste ulike oppløsninger på meshet vil en kunne finne den uavhengige løsningen. Uavhengighet kan betraktes som oppnådd når det ikke er noen store kvantitative eller kvalitative endringer i løsningen. Det kan være forskjell på uavhengig og akseptabel løsning. Det kan f.eks. være nødvendig å tillate en viss variasjon fordi tilgjengelig kapasitet tilsier det. Det er heller ikke nødvendig å ha like fin oppløsning over hele beregningsdomenet. De områder der det vil være store gradienter, f.eks. store endringer i hastighet og/eller temperatur, vil det være et større behov for en fin oppløsning.

For beregninger med oppdriftsdrevne brannsøyler brukes det dimensjonsløse uttrykket D^*/dx som et mål på hvor god oppløsningen av strømningsfeltet er [28]. D^*/dx er forholdet mellom brannens karakteristiske diameter, D^* , og den største sidelengden på cellene i beregningsdomenet, dx . Dette forholdet bør i følge *FDS User's Guide* være i intervallet 4-16 [28]. Det er også funnet kilder som anbefaler at verdien bør være høyere enn 10 nær brannen [11] [20]. Dette forholdet kan beskrives som antallet celler som spenner over den karakteristiske (ikke nødvendigvis den fysiske) diameteren til brannen [28]. Høy verdi betyr at det er flere celler som dekker brannen, og dette betyr en bedre oppløsning for beregningen.

Brannens karakteristiske diameter, D^* , beregnes på følgende måte [28]:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3.1)$$

I Tabell 3.1 angis parametrene som benyttes for å bestemme D^*/dx .

Tabell 3.1: Parametre for bestemmelse av D^*/dx .

| | |
|---------------|---|
| D^* | Brannens karakteristiske diameter [m] |
| dx | Største sidelengde på cellene (kontrollvolum) [m] |
| Q | Brannens effektutvikling [kW] |
| ρ_∞ | Tetthet [kg/m^3], settes til $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ |
| c_p | Varmekapasitet [$\text{kJ}/(\text{kgK})$], settes til $1,0 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ |
| T_∞ | Omgivelsestemperatur [K], settes til 293 K, dvs. $20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| g | Tyngdeakselerasjon, $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ |

3.5.7 Utvalgte funksjoner

Termoelementer

Termoelementer (THERMOCOUPLE) registrerer temperatur som et simulert termoelement, nært opp mot gasstemperaturen [27]. Et termoelement kan plasseres hvor som helst i en modell, og registrerer temperaturen i dette punktet over tid. Det er spesielt viktig å registrere temperaturen i selve brannen for å kontrollere at denne er realistisk. Termoelementene er små kuler som i FDS har en standardverdi for tetthet og spesifikk varme som representerer materialet nikkell [28]. Dvs. henholdsvis $8908 \text{ kg}/\text{m}^3$ og $0,44 \text{ kJ}/(\text{kgK})$. Standard diameter på termoelementet er $0,001$ meter.

SLCF og BNDF

For å visualisere strømningsmønster i modellen over et større område kan en "slice"- (SLCF) eller "boundary"-fil (BNDF) benyttes [28]. Parametrene som kan måles ved hjelp av SLCF og BNDF er f.eks. temperatur, hastighet, tetthet, trykk, spesifikk varme og visibilitet.

En "slice"-fil spesifiseres for en linje, over et volum eller i et plan i gassfase [28]. Vektorer kan også animeres i en "slice" hvis VECTOR=.TRUE. skrives i SLCF-

linjen. En "boundary"-fil registrerer overflateverdier på et objekt, f.eks. på en vegg, et gulv eller et tak. Både "slice"- og "boundary"-formatet animerer den valgte parameteren over tid.

MTR

MTR (Measure of Turbulence Resolution) er måling av turbulensoppløsning, dvs. fraksjonen av uløst kinetisk energi [28]. Meshet har, som nevnt, stor betydning for kvaliteten på en simulering. MTR kan brukes til å måle hvor godt turbulensen modelleres med den valgte meshoppløsningen, og sier derfor noe om simuleringens kvalitet. MTR kan måles i et punkt eller ved bruk av en "slice"-fil (SLCF). Resultatet av målingene gis som en verdi mellom 0 og 1, hvor 0 indikerer en perfekt oppløsning, mens 1 indikerer en dårlig oppløsning. I LES kreves det en oppløsning på 80 % av den kinetiske energien i et strømningsfelt, dette betyr en MTR-verdi mindre enn 0,2.

3.5.8 Begrensninger og ulemper

Selv om FDS kan løse de aller fleste brannscenarioer finnes det begrensninger i alle programmets ulike algoritmer [27]. Som nevnt tidligere er det viktig å være klar over programmets begrensninger slik at en ikke er ukritisk til resultater fra brannsimuleringer.

En kort oppsummering av de viktigste begrensningene følger under. Disse er beskrevet mer inngående i *An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview* av Gissi [27] og i *FDS User's Guide* [28].

- FDS er beregnet for lavhastighetsstrømning, og kan derfor ikke benyttes til simulering av eksplosjoner og sprengning hvor strømningshastigheten overstiger lydens hastighet.
- Det rettlinjede numeriske rutenettet, meshet, kan begrense modellen i tilfeller hvor geometrien ikke lar seg tilpasse til meshet, slik som objekter med buet geometrisk form.

- Når HRR ikke er kjent, men bare er antatt, vil usikkerheten kunne bli svært stor i forhold til tilfeller hvor HRR er kjent. Nøyaktigheten i forhold til eksperimentelle målinger kan da overstige 20 %.
- Forbrenningsmodellen i FDS antar, i sin enkleste form, at forbrenning er kontrollert av miksing av brensel og oksygen, og at dette skjer uendelig raskt uavhengig av temperaturen. Denne antakelsen er god for store og godt ventilerte branner, men ikke like gode ved brann i et underventilert rom hvor brensel og oksygen kan mikses uten at det brenner. Det finnes enkle empiriske regler som brukes av FDS for å forhindre at brenning skjer når atmosfæren i umiddelbar nærhet til brannen ikke kan opprettholde forbrenningen.
- Det er flere begrensninger ved strålingsmodellen. Absorpsjonskoeffisienten for røykgass er en kompleks funksjon av røykens sammensetning og temperatur. Grunnet den forenklete forbrenningsmodellen som benyttes i FDS vil ikke røykens sammensetning nødvendigvis være riktig, og dette gjør at absorpsjonskoeffisienten kan bli feil. I tillegg diskretiseres strålingstransporten i FDS via strålingsvinkler. Antall strålingsvinkler defineres av brukeren og standardverdien i programmet er angitt til 100. Hvis det brukes for få vinkler kan det føre til en uensartet fordeling av strålingsenergien. Flere vinkler gir en lengre simuleringstid.
- FDS inneholder en modell som kan beregne dannelse og eventuell oksidasjon av CO-produksjonen i en brann. Dette gjøres ved å sette `CO_PRODUCTION=.TRUE.` på MISC-linjen. En svakhet ved denne funksjonen er at CO-innholdet ved brannens slutt ikke kan beregnes. Dette innebærer at CO-produksjonen i en leilighet med en brann som har nådd overtenning kan beregnes, men innholdet av CO i røykgassene utenfor flammeområdet ikke kan beregnes.

3.5.9 Mulige feilkilder

Feilkilder ved bruk av FDS til analyse kan f.eks. være modelleringsfeil som følge av at fysikken bak programmet ikke er forstått, pga. den forenklete fysiske modellen som ligger til grunn eller konvergensfeil pga. bruk av feil meshoppløsning [34]. Noen av de mest aktuelle menneskelige feilkildene for denne oppgaven er listet opp nedenfor.

- Inndata kan skrives feil inn i simuleringsprogrammene. Dette er spesielt aktuelt i FDS fordi slike feil kan være vanskelig å oppdage ved kontroll av selve koden.
- Feil antakelser i forhold til inndataparametere kan gjøres. Dette gjelder spesielt selve forbrenningsmaterialet og dets egenskaper. Å finne en egnet HRR-kurve som kan brukes for det eksakte analyseobjektet kan være vanskelig siden det ikke finnes store databaser over slike kurver.
- En generell mangel på kunnskap innenfor brannfaget og de simuleringsprogrammene som er benyttet kan føre til feil bruk av programvarene og en feiltolkning av resultatene.

3.5.10 Kontroll av modellen

Nedenfor er det listet opp ulike elementer som bør kontrolleres for å bestemme modellens nøyaktighet. Sjekkpunktene er i hovedsak hentet fra Nystedt og Frantzich [20] og Jakobsen et al. [11]. Parametrene som brukes for de ulike beregningene er oppsummert i Tabell 3.2.

Før simulering bør følgende kontrolleres:

- Kontroller at den dimensjonsløse effektutviklingen Q^* er i intervallet 0,3 til 2,5 [20]. Q^* beregnes på følgende måte [20]:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}} \quad (3.2)$$

- Kontroller at forholdet D^*/dx er i intervallet 4-16 [28]. Enkelte kilder anbefaler at verdien bør være høyere enn 10 nær brannen [11] [20]. Kontroller også D^*/H , som er forholdet mellom den karakteristiske brann diameteren og romhøyden [20]. Hvis denne verdien er lavere enn 0,5 anbefales det at D^*/dx bør være større eller lik 15.
- Kontroller at meshene er riktig koblet sammen og at alle objekter som finnes i flere mesh er synlige for alle [20].
- Kontroller at det ikke er plassert meshgrenser i områder med mye strømming [20].
- Kontroller modellens forbrennings- og materialegenskaper [20].
- Kontroller strålingsmodellen og at alle overflater har riktig definerte varmeledningsegenskaper [20].

Etter simulering bør følgende kontrolleres:

- Kontroller at strømningshastighetene i modellen ligger under 10 m/s [20]. Se spesielt på åpninger og i forbindelse med meshgrenser.
- Kontroller at temperaturen i senteret av flammebrannen er mellom 700 og 1200 °C og at temperaturen i toppen av flammen er rundt 500 til 600 °C [11].
- Kontroller at flammehøyden er realistisk ved hjelp av f.eks. Heskestads røyksøylemodell [11]. Etter Heskestads modell beregnes flammehøyden, L , på følgende måte:

$$L = 0,235 \times Q^{2/5} - 1,02 \times D \quad (3.3)$$

- Kontroller at den adiabatisk flammemetemperaturen ikke overstiger 1300 °C [20].
- Kontroller om strålingsmodellen må forfines ved å kontrollere forekomsten av varmflekker på veggene [20].
- Kontroller at den simulerte HRR samsvarer med angitt HRR [20].

- Kontroller turbulensoppløsningen i modellen ved hjelp av MTR-funksjonen. MTR-verdien bør være mindre enn 0,2 [28].

Tabell 3.2: Parametre for kontrollberegning av modellen.

| | |
|---------------|--|
| Q^* | Brannens karakteristiske effektutvikling |
| Q | Brannens effektutvikling [kW] |
| ρ_∞ | Tetthet [kg/m^3], settes til 1,2 kg/m^3 |
| c_p | Varmekapasitet [$\text{kJ}/(\text{kgK})$], settes til 1,0 $\text{kJ}/(\text{kgK})$ |
| T_∞ | Omgivelsestemperatur [K], settes til 293 K, dvs. 20 °C |
| g | Tyngdeakselerasjon, 9,81 m/s^2 |
| D | Brannens diameter [m] |
| D^* | Brannens karakteristiske diameter [m] |
| dx | Største sidelengde på cellene (kontrollvolum) [m] |
| H | Romhøyden |
| L | Flammehøyde |

3.5.11 Pyrosim

Pyrosim er et komplett brannmodelleringsystem som brukes til å lage, kjøre og evaluere simuleringer [35]. Programmet kombinerer grafisk 3D-modellering med det velutprøvde programmet FDS. Ved bruk av fysikken i FDS kan Pyrosim modellere røykbevegelse, varmetransport og flammespredning, og rekonstruere ulike brannscenarier. Programmet er utviklet av Thunderhead Engineering og en full versjon av programmet er tilgjengelig for gratis prøving i 30 dager [13]. For bruk utover disse 30 dagene må det kjøpes lisens. Det finnes bl.a. en brukermanual, et eget supportforum og videodemoer for hjelp til bruk av programmet [13].

Å spesifisere og bygge opp geometrien er ofte den mest tidskrevende oppgaven når en lager en FDS-modell [35], da dette må gjøres ved å skrive koder. Ved hjelp av Pyrosim kan en enkelt tegne geometrien slik det gjøres i enkle tegneprogrammer (DAK), og en slipper å definere koordinater for hånd slik en må hvis en benytter FDS alene. Pyrosim tilbyr geometrifunksjoner i 2D og 3D for å lage objekter og

åpninger. Det er bl.a. mulig å kopiere objekter, vise modellen i både 2D og 3D, rotere visning og legge inn bakgrunnsbilder. Modellen kan organiseres i ulike grupper slik at en f.eks. kan skjule og vise objektgrupper etter ønske.

Det er mulig å importere CAD-filer (f.eks. DXF-filer) fra AutoCAD eller lignende modelleringsprogrammer som inkluderer enten 3D-modeller eller 2D-linjer som kan ekstruderes for å lage 3D-objekter i Pyrosim [35]. Den nyeste versjonen av Pyrosim, som ble utgitt i april 2012, kan også importere DWG-filer [13] (denne versjonen er kun benyttet i sluttfasen av arbeidet med oppgaven). En kan også importere FDS-filer for å få en grafisk fremstilling av koder som er skrevet manuelt. Importeringsmulighetene kan spare brukere for mye tid.

Programmet gir umiddelbart tilbakemelding hvis det er noe som er galt med modellen, og sikrer på denne måten et korrekt format for inndatafilen til FDS [32]. Til tross for dette er det viktig å være kritisk til hvilke parametre og funksjoner en benytter i oppbyggingen av modellen. Siden Pyrosim viser modellen grafisk kan det være lett å anta at hvis geometrien ser riktig ut så er hele modellen riktig, men dette trenger nødvendigvis ikke å være tilfelle. Hvis de grunnleggende forutsetningene er feil, vil resultatet bære preg av dette. Som for FDS er også Pyrosim ment for bruk av personer som har tilstrekkelig kompetanse innenfor feltene fluiddynamikk, termodynamikk, varmetransport, forbrenning og brannvitenskap.

3.6 Røyk og røykventilasjon

3.6.1 Røyk

Røyk er et produkt av forbrenningsprosessen og består av faste stoffer, forbrenningsgasser, vanndamp og luft [36]. Restproduktene som dannes, og røykens utseende, varierer avhengig av omgivelsene (tilgang på oksygen) og hvilke materialer som brenner [37]. Det er ikke mulig å forutsi røykutslippet, men det er kjent at enkelte materialer produserer mer røyk enn andre. F.eks. produserer polystyren mer røyk enn

polypropylen. Polystyren er termoplast som benyttes i en mengde artikler for husholdning, emballasje, veggfliser, leketøy [38], mens polypropylen er basisplast som benyttes i bl.a. bilkomponenter, husholdningsartikler, gulvbelegg, emballasje, tekstilfibrer, tauverk, rør og flasker [39].

Røykkonsentrasjonen i en bygning avgjøres av utslippene fra brannen samt strømningsmønsteret til røyken [37]. Når røyk stiger til værs og møter en hindring, eksempelvis et tak, spres den lateralt helt til den møter en vegg [40]. Det dannes deretter et røyklag som vokser nedover. Røyk trenger inn i hulrom, noe som bidrar til at røyken spres raskt. Dette fører til at røyken kan eksistere langt fra brannkilden. Brannrøyk er farligst dersom den inneholder store mengder ubrente gasser som kan eksplodere dersom de blandes sammen med oksygen, eller dersom temperaturen i blandingen blir tilstrekkelig høy.

Statistikk fra USA og England viser at flesteparten (80 %) av de omkomne i bygningsbranner, dør av røykforgiftning [6]. I SFPEs *Handbook of Fire Protection Engineering* konstateres det at røyk er den største bidragsyteren til dødsfall ved brann [41]. I tillegg til at røyk er giftig, reduseres sikten slik at evakueringstiden økes og brannvesenets redningsarbeid kan bli hemmet. Røyk kan, i tillegg til å skade mennesker, skade bygningsdeler, elektronisk utstyr og andre materielle verdier.

Røyk kan deles inn i to faser: den usynlige dampfasen og den synlige partikkelfasen [42]. Kvelende avfallsstoffer opptrer i den usynlige dampfasen, mens irriterende forbrenningsprodukter opptrer i begge fasene. Både faste og flytende partikler opptrer i den synlige partikkelfasen. Partikkelstørrelsen er interessant med tanke på hvor lett partiklene innåndes, og hvor i luftveiene de avsettes. Luftbårne partikler har uregelmessige former, og størrelsen måles i aerodynamisk diameter som er diameteren på en idealisert sfærisk partikkel [43]. Partikler med en aerodynamisk diameter mindre enn 5 μm kan trenge inn i lungene, mens større partikler gjerne avsettes i nesegangene og øvre luftveier [42]. Partikler fra ulmende branner og ikke-flammende nedbryting er som regel små (aerodynamisk diameter mindre enn 1 μm) og innåndes

lett. Partiklene i flammebranner er større, spesielt når røyken eldres og agglomereres (klumper seg). Selv om partiklene er større, viser rapporter at brannofre ofte har partikler fra den synlige partikkelfasen i lungene.

3.6.2 Tålegrenser ved evakuering

Følgende faktorer påvirker mennesker på en uheldig måte ved brann [44]:

- branngassers giftighet
- varmpåkjenning
- nedsatt sikt

Branngassers giftighet

De giftige gassene i røyk kan deles inn i narkotiske gasser og irriterende gasser [45]. De mest opptredende narkotiske gasser er CO, CO₂ og HCN. Disse kan føre til narkose og død pga. kvelning. De irriterende gassene som opptrer oftest er HCl, NO_x, NH₃, SO₂, HF, HBr og akrolein. Disse kan medføre nedsatt funksjonsevne som følge av skader på øyne og i de øvre luftveiene. Dette kan igjen føre til svekket evakueringsevne og i noen tilfeller død som følge av kvelning eller lungeskader. I NS 3901:1998 *Risikoanalyse av brann i byggverk* [46] og HO-meldingen [1] er tålegrenser for CO, CO₂ og O₂ oppgitt. Disse gassene beskrives nærmere nedenfor.

Karbonmonoksid, CO

Selv om CO i seg selv ikke er den giftigste gassen, fører de høye konsentrasjonene av denne gassen til at effektene av den anses som de farligste [45]. I de fleste branner kan en derfor vurdere tålegrenser ut i fra CO-konsentrasjonen. Det er allikevel viktig å være observant på at andre gasser kan være utslagsgivende for evakuering.

Tålegrenser for CO-innhold angis i *ppm* (parts per million), og er i NS3901 og HO-meldingen satt til 2000 ppm [46] [1]. CO-konsentrasjoner i denne størrelsesorden er vanlig i branner innendørs, og er svært giftige [44].

Karbondioksid, CO₂

CO₂-konsentrasjonen i de fleste branner anses ikke som farlig, men siden pustefrekvensen til et menneske øker med økende opptak av CO₂, vil inntaket av andre giftige gasser øke [44]. Tålegrensen for CO₂-konsentrasjoner er satt til 5 % [46] [1], og enkelte mennesker kan oppleve pustevansker ved denne konsentrasjonen [44]. Ved konsentrasjoner på over 10 % vil menneskers evne til å rømme uten assistanse trues.

Oksygen, O₂

Ved brann reduseres O₂-konsentrasjonen fra de normale 21 % i luft. Ved 17 % oksygen reduseres menneskers bevegelseskoordinering, og ved 14-10 % vil personer ha nedsatt dømmekraft og raskt bli utmattet [44]. Tålegrensen i NS 3901 og HO-meldingen er satt til 15 % [46] [1]. Ved 10-6 % oksygeninnhold vil personer miste bevisstheten og ha behov for livreddende hjelp [44]. Økt fysisk aktivitet fører til at symptomene kan inntreffe ved høyere oksygenkonsentrasjoner.

Varmepåkjønning

Varmepåkjønning fra en brann kan opptre på følgende to måter i følge Opstad og Stensaas [44]:

- 1. varmpåkjønning på grunn av direkte kontakt med røykgasser*
- 2. varmestråling fra brannen (ikke direkte kontakt med branngassene)*

I det førstnevnte tilfellet vil mennesker bli utsatt for en kombinasjon av konvektiv- og varmestrålebelastning, mens i det andre tilfellet vil de bare være eksponert for varmestråling fra flammer og varme røykgasser [44] [Kapittel 4.2].

Mens røyken kan bevege seg langt fra brannen og dermed hindre evakuering i et stort område, vil de termiske effektene av røyklaget være begrenset til et mindre område rundt brannen. I NS 3901 og HO-meldingen er tålegrensen for rømning satt til 60 °C

i røyksjiktet i hodehøyde [46] [1]. Denne temperaturen er ikke dødelig. I følge Stensaas [45] er det vanskelig å puste med munnen når røykgassene når 150 °C.

Tålegrensen for varmestråling fra brannen er satt til 10 kW/m² dersom en person ikke utsettes for dette nivået utover seks sekunder [46] [1]. Tålegrensen for det totale strålingsbidraget er satt til 60 kJ/m² + energi fra 1 kW/m². Dette kan tilsvare strålingen en person utsettes for dersom vedkommende opplever 2 kW/m² i 30 sekunder, dvs. 60 kJ/m², og en strålingseffekt på 1 kW/m², totalt 3 kW/m². Ifølge Stensaas er en strålingseffekt på 3 kW/m² i 30 sekunder omtrentlig grensen for når blemmer dannes [45].

Nedsatt sikt

Nedsatt sikt er ikke dødelig, men kan hindre evakuering og dermed føre til økt påkjenning fra giftige gasser og varme [44]. Røyken fra en brann spres gjerne til et stort område og sikten reduseres dermed over tilsvarende område. Nedsatt sikt er ofte den parameteren som først blir kritisk ved brann [45]. Ved sikt på en armlengdes avstand, dvs. omtrent en meter, vil evakuering være vanskelig. Ved to meter sikt har evakuering imidlertid ofte blitt rapportert som trygt og har foregått uhindret [45]. Ifølge Stensaas og Opstad er sikt på 4-10 meter i rømningsveiene nødvendig for sikker rømning avhengig av hvor kjent personene som evakuerer er i bygget [44]. I følge en amerikansk og en britisk undersøkelse valgte meget få personer å snu dersom sikten var bedre enn ti meter, mens de aller fleste snudde dersom sikten var mindre enn omtrent tre meter [47]. NS3901 og HO-meldingen krever tre meter sikt i brannrommet, og ti meter sikt i rømningsveier [46] [1].

3.6.3 Røykkontroll

Røykens drivkrefter

For å oppnå et fungerende røykkontrollsystem og kontrollere røyken må en forstå hvilke krefter som driver den. De største drivkreftene er [41]:

- skorsteinseffekt
- oppdrift
- ekspansjon
- vind
- oppvarming, ventilasjon og aircondition (HVAC)

Som regel påvirkes røyken av en kombinasjon av disse kreftene, men de vil også ha innvirkning når de opptrer alene.

Skorsteinseffekten innebærer luftbevegelser som følge av oppdrift [41]. Oppdrift oppstår pga. ulikheter i tetthet mellom inne- og uteluft som følge av forskjeller i temperatur og fuktinnhold. Dersom det finnes åpninger plassert høyt og lavt i bygningen vil det skapes en naturlig luftstrøm gjennom disse. Som oftest er inne-luften varmere og har mindre tetthet enn uteluften og stiger dermed. Når den varme luften stiger dannes et undertrykk og kald luft suges inn gjennom åpninger i bygningskroppen. Dersom inneluften er kaldere enn uteluften, vil luftstrømmen være nedadstigende, såkalt omvendt skorsteinseffekt [48]. Varm røyk kan imidlertid stige selv om luftstrømningene er nedadrettede, grunnet oppdriftskrefter [41]. Ulike bygningssjakter i bygningens høyderetning, eksempelvis trappe- og heishus og ventilasjonskanaler, bidrar til skorsteinseffekten. Lufthastigheten avhenger av temperaturforskjeller mellom inne- og uteluft, størrelsen på åpningsarealer og høydeforskjellen mellom disse åpningene [48]. I en brann er det spesielt viktig å kontrollere bidraget fra skorsteinseffekten, da den kan bidra til brann- og røykspredning. Det er også viktig å kontrollere effekten for å redusere skader og lette rednings- og slukkearbeid. Dette gjøres bl.a. med branncelleinndeling og -seksjonering.

Røyk med høy temperatur har lavere tetthet enn kaldere, omliggende luft, og opplever dermed en oppdriftskraft [41]. Dersom det er utettheter i rommet der brannen er lokalisert, vil oppdriftskreftene presse røyken ut av brannrommet gjennom utettheter i vegger og tak. Røykens temperatur avtar med avstand fra

brannen som følge av varmetransport og utblanding med omliggende luft. Dette fører til at oppdriftseffekten generelt avtar med avstand fra røyken.

Energi som blir frigitt i en brann er med på å forflytte røyken ved at røyken ekspanderer [41].

Vind har, dersom en bygning er relativt tett, lite innvirkning på røyken [41]. Dersom f.eks. et vindu knuser som følge av brann, har vinduets plassering i forhold til vinden stor betydning. Dersom vinduet ligger på lesiden av vinden, vil røyken suges ut av vinduet. Dersom vinduet ligger mot vinden vil vinden presse røyken inn i brannrommet og muligens spre røyken til andre etasjer i bygningen.

Varme-, ventilasjons- og airconditioningsystemer har tradisjonelt blitt skrudd av når en brann oppdages for å hindre at brannen blir forsynt med oksygen fra anlegget, og at røyk spres til andre deler av bygget [41]. Selv om anlegget skrues av, vil røyken bevege seg i systemsjaktene som følge av de tidligere nevnte kreftene: skorsteins-effekten, oppdrift og vind. Røyken kan hindres i å bevege seg i systemsjaktene ved å innføre automatiske spjeld som stenger sjaktene ved deteksjon av f.eks. røyk eller etter at en viss temperatur er nådd.

Røykventilasjon

Det finnes to prinsipper å prosjektere etter slik at oppsamling av dødelige mengder røyk ikke forekommer [48]. Enten kan røyken samles opp eller den kan luftes ut. Røyk i store volumer kan kontrolleres ved bruk av ulike strategier [49]. Disse kan f.eks. være å kontrollere tilgjengelig brennbart materiale, fysiske barrierer som røykskjørt, eller ved termisk eller mekanisk ventilasjon. En metode som benyttes i f.eks. tunneler er røykfortrengning [50]. Her økes lufthastigheten med vifter slik at det oppstår en horisontal blokade for røyken, og røykfrie soner dannes.

Hensikten med røykventilasjon er å hindre eller forsinke brann- og røykspredning, samt hindre overtenning. Røykventilering fører røyk ut samtidig som det tilføres frisk luft utenfra [51]. Det er ønskelig å holde røyksjiktet så høyt som mulig for å lette

evakuering. Når røykgassene blandes med luft, avkjøles blandingen og siger nedover. For at røyksjiktet skal holdes høyt, må dermed store luftmengder byttes ut.

Termisk og mekanisk røykventilasjon

Røykventilasjon deles inn i termisk og mekanisk røykventilasjon [1]. Termisk røykventilasjon er basert på oppdriftskreftene i den varme røyken. Varme branngasser stiger, og lukene som skal slippe ut disse, plasseres derfor høyt. For å få inn tilstrekkelig luft må tilluftsluker med omtrent samme areal som avtrekksluker plasseres lavt i rommet. En fordel med termisk ventilasjon er at kapasiteten endres lite ved høye temperaturer, og trykket styres naturlig avhengig av hvor mye energi brannen genererer [51].

Mekanisk røykventilasjon benytter vifter som trekker ut røyk. Viftene plasseres høyt, og fordeles jevnt i det aktuelle rommet [1]. Mekanisk ventilasjon kan bestå av:

- avtrekksvifte og tilluftsåpninger
- tilluftsvifte og røykluker
- balansert ventilasjon: både tilluftsvifte og avtrekksvifte

Fordelen med mekanisk røykventilasjon er at den vil gi god ventilasjon, selv ved små branner og i avkjølte rom om sommeren, fordi den er mindre avhengig av oppdrift og vindtrykk [51]. Ulemper med mekanisk ventilasjon er at det kreves stor viftekapasitet og kontinuerlig strømtilførsel. Avtrekksviftene suger ut en fast mengde volum per tid, m^3/s . Når temperaturen i røyken stiger, ekspanderer gassen, og et større volum må dermed ventileres ut, og dette må tas hensyn til ved dimensjonering. I tillegg stilles det temperaturkrav til avtrekksviftene da de må tåle temperaturen til branngassene.

Røykluker må ikke kombineres med mekanisk ventilasjon uten at strømningsbildet i rommet er grundig undersøkt [1]. Grunnen til dette er at røyklukene kan fungere som tilluftsluker for lukene med avtrekksvifter, slik at frisk luft trekkes inn der røyken er ment å gå ut.

Faremomenter ved røykventilasjonsanlegg

Ved bruk av røykventilasjonsanlegg er det enkelte fenomener det er viktig å påse at en unngår. Disse er beskrevet under.

Lagdeling av røyken

I enkelte lokaler, gjerne store med glasstak, kan temperaturforskjellen mellom luften ved gulv og tak bli stor, opptil 50 °C [49]. Dersom omliggende luft er varmere enn røyken vil ikke røyken stige, men legge seg som et lag under den varmere luften. Dette kan føre til en forsinket aktivering av røykventilasjonsanlegg dersom sensorer for røykdeteksjon er plassert høyt. Røyklagets høyde kan beregnes etter metode beskrevet i SFPEs *Handbook of Fire Protection Engineering* [49], og detektorer bør plasseres under denne høyden.

Begrenset strømming

Når en røyksky stiger, utvides den fordi røykgassene blandes ut med omliggende luft [49]. I høye, smale rom hender det at røykskyen fyller hele bredden av rommet før den når taket. Siden det ikke lenger er stor tilgang på frisk luft, blandes luften som ligger over røyklaget sakte med røyken. Denne innblandingen kan beregnes ved å anta lik strømming som i en kanal. Hvor langt ned røyklaget synker kan beregnes ved å sette takhøyden lik underkanten av røyksjiktet.

Dragsugeffekt

Dragsugeffekt oppstår når avtrekksluker eller -vifter er overdimensjonert slik at frisk luft trekkes ut sammen med røyken [49]. Dette medfører et dypere røyksjikt fordi det totalt fjernes mindre røyk. For å unngå dragsugeffekt bør avtrekksmengden per avtrekk begrenses [1]. Flere avtrekk med begrenset avtrekksmengde er bedre enn få avtrekk med høy avtrekksmengde.

Lufttilførsel

Luft som tilføres et rom bør [49]:

- ikke være forurenset
- slippes inn under røyklaget
- slippes inn med en lavere hastighet enn nødvendig utslippshastighet

For å unngå at tilluften er forurenset, bør inntakene plasseres i god avstand fra avtrekkene [49]. Frisk luft bør slippes inn via inntak som er plassert under røyklaget. Dersom inntakene plasseres i, eller over røyklaget, øker dybden av røyklaget, og utslippseffekten må økes tilsvarende. Røykdetektorer kan brukes for å oppdage røyk som blandes med innslippsluften.

Det er viktig at luften slippes inn med lav hastighet slik at turbulens ikke genereres [49]. Turbulens kan påvirke brannen slik at den vokser grunnet høyere oksygentilførsel. Hvis luften slippes inn med for høy hastighet øker innblandingen av luft i røyklaget, og dybden av røyklaget økes. For å unngå omrøring av røyken og forverring av siktforhold i et rom bør lufthastigheten i røyksjiktet ikke overstige 1 m/s [51]. Det er vanligvis ønskelig å ikke ha en innslippshastighet på tilluften som er høyere enn 1,5 m/s for ikke å forstyrre brannen og skape økt virveldannelse og innblanding av luft (noe som vil forverre forholdene for evakuerende) [52]. Dersom hastigheten på luft som slippes inn i rommet er høyere enn hastigheten på utgående luft kan overtrykk føre til røykspredning [49].

Røykskjermer

Røykskjermer kan benyttes som røykseksjonering, og er hensiktsmessig å benytte i store arealer (over 1000 m²) som vil fylles langsomt opp med røyk [51]. Røykseksjonering vil hindre røykspredning, sikre oppdrift av røyk fordi arealet deles opp og røyken ikke blander seg med luft og kjøles ned, samt gi hurtigere deteksjon av brann og lengre tid til rømning [1] [51]. Hver røykseksjon krever egen ventilering, og avstanden mellom skjermene bør ikke overstige åtte ganger romhøyden og må være

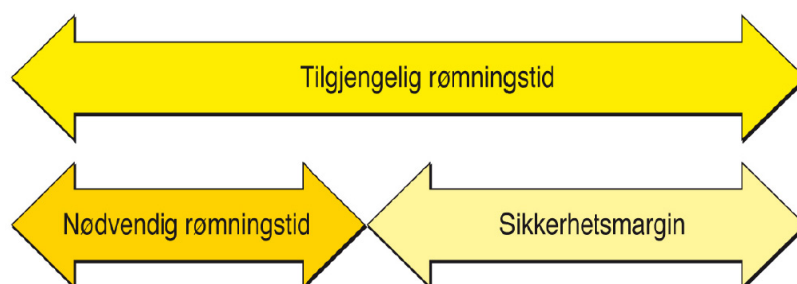
mindre enn 100 meter. Skjermene må være laget av ubrennbart materiale og ha god mekanisk styrke. De må ha en høyde fra himling som tilsvarer røyklaget tykkelse.

3.7 Evakuering

Som tidligere beskrevet er røykforgiftning hovedårsaken til at mennesker omkommer ved brann. Under evakuering er det dermed spesielt viktig at rømningsveier holdes frie for røyk. I følge TEK 10 skal byggverk prosjekteres og utføres slik at det er tilstrekkelig med tid tilgjengelig for rømning og redning, og at en tilfredsstillende sikkerhetsmargin er inkludert [2]. Det er også spesifisert tiltak for å påvirke den tilgjengelige rømnings- og redningstiden.

3.7.1 Rømningstid

Rømningstiden er påvirket av flere forhold; menneskelige, bygningsmessige og brann-tekniske [18]. Den tilgjengelige rømningstiden er tiden fra en brann oppstår til forholdene blir kritiske. *Tilgjengelig* rømningstid må være lengre enn *nødvendig* rømningstid. Sikkerhetsmargin er benevnningen på differansen mellom tilgjengelig og nødvendig rømningstid. Sammenhengen mellom tilgjengelig rømningstid, nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin ved rømning er vist i Figur 3.2.



Figur 3.2: Sammenhengen mellom tilgjengelig rømningstid, nødvendig rømningstid og sikkerhetsmargin ved rømning. Gjengitt fra [18].

Suksessfull evakuering er beskrevet i likningen under, og viser at tilgjengelig rømningstid, som nevnt, må være lengre enn nødvendig rømningstid [48]. Parametrene i formelen er beskrevet i Tabell 3.3.

$$t_p + t_a + t_{rs} < t_u \quad (3.4)$$

Tabell 3.3: Forklaring til parametre i likning for nødvendig rømningstid.

| | |
|----------|---|
| t_p | tid fra antennelse til brannen blir oppdaget |
| t_a | tid fra brannen oppdages til evakueringen begynner |
| t_{rs} | tid det tar å bevege seg til et relativt sikkert sted |
| t_u | tid fra antennelse til forholdene blir uholdbare |

t_p og t_a er hovedsakelig avhengig av hvor oppmerksom personer er, mens t_{rs} avhenger av mange faktorer, deriblant personers bevegelighet, bygningens geometri og i hvilken grad personer er påvirket av brannforholdene [48].

3.7.2 Menneskelig oppførsel under evakuering

I SFPEs *Handbook of Fire Protection Engineering* [53] beskrives funn fra flere ulike studier som tar for seg oppførselen til mennesker i en evakuerings situasjon. I studier utført på helsesentre (av Lerup et al.) er det vist at oppførselen til de som først observerer en brann har betydning for utfallet av brannen [47]. Det er videre vist at de fleste oppfører seg på en måte som er til samfunnets beste (f.eks. tilkalling av hjelp og slukking av brann), mens panikkoppførsel er uvanlig. I en annen studie (av Latane og Darley) er det vist at det er vanlig å etterligne oppførselen til andre ved brann på offentlige steder [47]. Horiuchi, Murozaki and Hokugo fant i sin studie av brann i en åtte etasjer høy kontorbygning at de som hjalp til med å slukke brannen, redde eller advare andre, var de som vanligvis holdt til i bygningen, mens de som var på besøk hovedsakelig konsentrerte seg om å evakuere [47]. I offentlige bygninger,

f.eks. museer, føler ikke besøkende ansvar når brannalarmen går [54]. De forholder seg rolig, og forventer å få beskjed dersom situasjonen er alvorlig. Tiden før besøkende starter å evakuere avhenger dermed av tiden de ansatte bruker på å be folk om å evakuere. Denne tiden avhenger igjen av hvor godt instruert og trente de ansatte er på evakueringssituasjoner.

Studier om evakuering i røyk fra USA og England viser at få personer snur når sikten er bedre enn ti meter (3 % av 322 mennesker i studiet fra USA og 6 % av 1316 mennesker i studiet fra England) [47]. Studiene viste at de aller fleste valgte å snu dersom sikten var mindre enn omtrent tre meter, henholdsvis 91 og 76,4 %.

3.7.3 Aktuelle krav i regelverk

I følge HO-meldingen er det et krav til ti meter sikt i rømningsveier, og tre meter sikt i brannrommet [1]. Selv om kravet til sikt i brannrommet er tre meter, er det ønskelig å opprettholde sikt på over ti meter for å lette evakuering.

Det er viktig at forbindelsen fra ethvert arbeids- eller oppholdssted til rømningsvei i byggverket er oversiktlig, uten hindringer og med færrest mulig retningsforandringer [18]. Det er derfor nødvendig å unngå at innredningen gjør det vanskelig å orientere seg samt finne utgangene. I veiledningen til TEK 10 er det gitt krav til maksimal avstand fra hvilket som helst sted i en branncelle til nærmeste utgang, se Tabell 3.4.

Tabell 3.4: Maksimal avstand fra hvilket som helst sted i branncelle til nærmeste utgang. Gjengitt fra [18].

| Risikoklasse | Maksimal lengde (m) på fluktvei |
|--------------|---------------------------------|
| 1 og 2 | 50 |
| 3 og 5 | 30 |
| 6 | 25 |

Det stilles krav til oppdeling av byggverk i brannseksjoner og brannceller. Brannceller skal i følge forskriftens § 11-8 være utført slik at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tid som er nødvendig for rømning og redning [2]. Det er i veiledningen gitt krav til hvilke rom, samling av rom eller lokaler som må være egne brannceller. Blant disse er f.eks. rømningsvei og trapperom (gjelder også selv om trapperommet ikke er del av rømningsvei). Hovedhensikten med oppdeling i brannceller er å hindre brann- og røykspredning utenfor den branncellen hvor brannen startet, og gi nødvendig rømnings- og redningstid fra andre brannceller. Spesielt er det viktig å hindre spredning til rømningsveiene.

Fra brannceller skal det være minst én utgang til sikkert sted, eller utganger til to uavhengige rømningsveier, eller én utgang til rømningvei som har to alternative rømningsretninger, som igjen fører videre til uavhengige rømningsveier eller sikre steder [2]. Om branncellen er beregnet for et stort antall personer skal den ha et tilstrekkelig antall utganger til rømningsvei (minimum to). Det er også gitt krav til størrelse og utslagsretning på dører i rømningsvei slik at det sikres rask rømning, og ikke oppstår fare for oppstuvning av mennesker.

For å redusere den nødvendige rømningstiden, samt øke den tilgjengelige rømnings-tiden er bruk av aktive og passive tiltak effektivt. Passive tiltak kan beskrives som byggets “skjelett”, dvs. vegger, tak, vinduer, dører og lignende, som er konstruert på en måte som gir en ønsket funksjon ved et branntilfelle [55]. Passive branntiltak kan være bygningstekniske løsninger som branndører, bruk av materialer med lavt bidrag til brann, oppdeling i brannceller etc. Aktive branntiltak kan beskrives som “levende” i den forstand at de har en funksjonalitet i forhold til varsling, slokking samt rømning av personer. Noen typiske aktive tiltak er f.eks. brannalarmanlegg, sprinkleranlegg, håndslukkere og røykventilasjon. Aktive branntiltak aktiveres ved brann, mens passive tiltak er uendret ved brann, men kan sies å være aktive hele tiden.

Menneskers oppførsel i en evakueringssituasjon kan simuleres ved hjelp av forskjellige verktøy. I kapittel 3.8 beskrives simuleringsprogrammet Pathfinder.

3.8 Pathfinder

Pathfinder er en evakueringssimulator som, i motsetning til flytbaserte- og cellebaserte modeller, bruker teknikker fra moderne datateknologi for å modellere bevegelsen til personer [14]. Programmet bygger på teknologi brukt i spill- og datagrafikkindustrien. Programmet består av tre deler: et grafisk brukergrensesnitt, en simuleringsmodell og en visningsmodell i 3D [56]. Navnet Pathfinder ble tidligere benyttet om en 2D evakueringsmodell. Nåværende Pathfinder er inspirert av den originale utgaven, men er ikke basert på den opprinnelige kildekoden. Pathfinder er utviklet av Thunderhead Engineering, og er mulig å prøve gratis i 30 dager. Etter dette må programvaren kjøpes. På programutviklerens hjemmeside finnes det lenker til flere manualer og eksempler på bruk av programmet [14]. Det finnes også en lenke til et forum der en kan stille spørsmål rundt bruk av Pathfinder.

I manualen til Pathfinder beskrives fire kjente begrensninger ved programmet [56]. Disse er:

- Pathfinder integrerer ikke resultater fra brannmodeller (f.eks. resultater fra en FDS-simulering).
- Muligheten for å definere kompleks oppførsel er ikke til stede (f.eks. hvordan en familie vil opptre ved brann).
- Dynamisk geometri er kun delvis støttet (heis er inkludert, men åpning/lukking av dører og rulletrapper er ikke inkludert).
- Heis kan kun brukes i evakueringssammenheng og er ikke modellert for generell bruk.

I Pathfinder kan individene styres ved bruk av to ulike modus [56]:

- SFPE-modus
- styringsmodus

SFPE-modus er basert på prinsipper beskrevet i SFPEs *Handbook of Fire Protection Engineering* [53]. Dette er en strømningsmodell der ganghastigheten er bestemt av individtettheten i hvert rom, og gjennomstrømningen gjennom dørene er bestemt av dørbredden [56]. Styringsmodus er basert på invers styringsoppførsel. Denne modusen åpner opp for mer kompleks og situasjonsavhengig oppførsel. Det er fullt mulig å veksle mellom de to modusene i det grafiske brukergrensesnittet for å kunne sammenligne resultater.

I Pathfinder har hvert enkelt individ personlige, justerbare egenskaper som ganghastighet, forsinkelse, størrelse og utseende, og oppfører seg uavhengig av andre [56]. Egenskapene kan bestemmes etter egne preferanser eller baseres på uniform- eller normalfordistribusjon. Det er også mulig å velge at individer skal benytte bestemte utganger, slik at ulike kjennskap til bygningen kommer frem. Ved å justere de individuelle egenskapene kan en utføre konservative og optimistiske evakueringer, og få forventede evakueringstider. Disse tidene kan benyttes i brannteknisk prosjektering.

4 Analyse

I dette kapitlet vil det redegjøres for selve analysearbeidet som er gjennomført i denne oppgaven. Analysen er delt opp i en kvalitativ og en kvantitativ del. Den kvalitative delen er, i korte trekk, gjennomført for å fastsette de brannscenarier som skal benyttes i den kvantitative delen. Den kvantitative delen tar for seg selve simuleringen av røykventilasjon og evakuering i Alabasterhallen.

Rambøll er engasjert som komplett rådgivingsgruppe i prosjektet *Nytt Nasjonalmuseum* og innehar rollen som prosjekteringsgruppekoordinator for å prosjektere et helhetlig museumsanlegg innenfor fagene akustikk, byggeteknikk, VVS-, elektro-, geo- og brannteknikk [57]. All informasjon om Alabasterhallen som er benyttet i oppgaven er ervervet gjennom dialog med ansatte i avdeling for Brann og sikkerhet ved Rambøll i Oslo.

I litteraturstudiet er det beskrevet flere punkter som kan påvirke kvaliteten på en brannteknisk analyse. Det er i denne analysen fokusert på å prøve å sikre høy kvalitet på arbeidet. Relevante data for det spesifikke analyseobjektet og situasjonen som undersøkes i analysen er benyttet så langt det har latt seg gjøre. For å sikre gode inn-data er det gjort flere søk blant ulike brannforsøk. Der det er funnet relevante verdier fra fullskala- og laboratorieforsøk er disse foretrukket framfor gjennomsnittlige generiske verdier.

Store forenklinger er unngått der det har vært mulig. Det er imidlertid alltid nødvendig å gjøre enkelte forenklinger og antagelser for å begrense en oppgave i forhold til tilgjengelige ressurser. Der det i oppgaven er tatt slike valg er dette spesifisert. Et eksempel er forenklinger i forhold til modellens geometri for å tilpasse den til meshoppløsningen som er benyttet i simuleringsprogrammene. Forenklinger

bidrar til at oppgavens resultater er mindre oppgavespesifikke og dermed lettere å overføre til lignende prosjekter.

I oppgaven er det forsøkt å benytte en arbeidsprosess for branntekniske analyser gitt av Nystedt og Frantzich som er beskrevet i kapittel 3.2, Analytisk brannprosjektering. Analysens målsetting (steg 1) er beskrevet i kapittel 1.3 og valg av brannmodell (steg 3) ble gjort ved utforming av oppgaven og var en forutsetning for forfatterens valg av oppgave. Brannscenarioer (steg 2) er beskrevet i kapittel 4.1, Kvalitativ analyse, mens følgende steg er beskrevet i kapittel 4.2, Kvantitativ analyse: beregning av brannforløp (steg 4), vurdering og evaluering av resultater (steg 5 og 6) og utførelse av kontroll (steg 8). Selve dokumentasjonen av analysen (steg 7) har resultert i denne rapporten.

4.1 Kvalitativ analyse

4.1.1 Introduksjon

Virksomheten Nasjonalmuseet er en Informasjons- og kommunikasjonsvirksomhet [58] i henhold til Statistisk sentralbyrås *Standard for næringsgruppering* [59]. Av totalt 1695 næringsbranner i Norge i toårsperioden 2009-2010, var 14 av disse i gruppen *Informasjon og kommunikasjon* [60]. Dette er en liten andel av alle næringsbranner i denne perioden, men en kan allikevel si at 14 branner i løpet av to år er 14 for mye.

I statistisk øyemed er *bygningen* Nasjonalmuseet plassert i kategorien næringsbygg. Det kan også argumenteres for at museet, og spesielt Alabasterhallen, fungerer som et forsamlingslokale ved at mange mennesker kan oppholde seg på samme sted. Virksomheten i forsamlingslokaler er sjelden brannfarlig [61]. Dersom det allikevel oppstår brann kan det føre til store konsekvenser siden mange mennesker er samlet på et sted. Brann er, i tillegg til å være en trussel for mennesker, en trussel for kulturhistoriske og materielle verdier. En brann kan skade gjenstander gjennom forbrenning, eller ved at røyk ødelegger materialet. Dette kan føre til store opp-

rettingsarbeider, erstatningsutbetalinger eller at objekter med verdifull betydning går tapt [62].

Det finnes i dag et meget stort antall produkter som benyttes i bygninger [63]. Produktene er fordelt over selve bygningskonstruksjonen, overflater, tekniske systemer, innredninger og annet inventar. I TEK 10 stilles det krav til materialer og produkters egenskaper ved brann [2]. Det er fokus på at elementene som brukes i byggverket ikke skal gi uakseptable bidrag til brannutviklingen. I følge Hovde starter branner oftest i innredning og inventar, men egenskapene til mange av de andre brennbare og ubrennbare produktene som inngår i byggverket kan etter hvert ha betydning for brannens utvikling og forløp [63]. I tillegg er det flere andre forhold som vil ha betydning for brannen. Her kan nevnes mengde, form, plassering av produktene, rommets og byggverkets størrelse, inndeling og de termiske egenskapene til omhyllingsflater.

På nåværende tidspunkt er ikke prosjektet med nytt Nasjonalmuseum kommet tilstrekkelig langt til at bygningsmaterialer for Alabasterhallen er fastsatt. Forfatterne vet derfor lite om selve bygningskonstruksjonen og hvilke overflateprodukter som vil benyttes. Det kan derimot sies mye om inventaret som kan være aktuelt i hallen, spesielt siden hallen skal benyttes til ulike kunstutstillinger. Dette er en stor utfordring da slike utstillinger kan inneholde tilnærmet hva som helst av både brennbare og ubrennbare materialer.

Det er utført en kvalitativ analyse av hallen for å kartlegge mulige brannscenarier. Bakgrunnen for analysen er at røykventilasjonsløsningen som er vurdert i oppgaven fraviker fra preaksepterte løsninger. Historiske granskninger av næringsbranner viser at branner oftest får store konsekvenser i de tilfellene hvor bygningsloven og byggeforskriftene har blitt fraveket eller forsømt [4]. Siden den ønskede ventilasjonsløsningen er et fravik fra preaksepterte løsninger er det dermed viktig at analysen kartlegger mulige brannscenarier slik at røykventilasjonen blir korrekt dimensjonert og eventuelle branner ikke får katastrofale konsekvenser.

4.1.2 Fremgangsmåte og metoder

En risikoanalyse er en systematisk fremgangsmåte for å beskrive og beregne risiko som benyttes til å fastsette sannsynlighet for uønskede hendelser og konsekvenser av disse. Generelt gjøres dette ved kartlegging av farer og uønskede hendelser, samt beskrivelse av årsaker og konsekvenser i henhold til NS 5814 *Krav til risiko-vurderinger* [64]. Den beregnede sannsynligheten sammenlignes ofte med gitte akseptkriterier. Standarden NS 3901 *Risikoanalyse av brann i byggverk* [46] ser spesielt på risiko i forhold til brann og er benyttet som et overordnet rammeverk for denne analysen. Den kvalitative analysen i denne oppgaven er gjennomført som en forenklet risikoanalyse. Dvs. at den ikke tar for seg alle steg som inngår i en risikoanalyse. Analysen er begrenset til identifikasjon av farer og trusler i tilknytning til brann. Disse er deretter vurdert og sammen med befaringer på ulike museer danner de utgangspunkt for antakelser om aktuelle brannobjekter, og dimensjonerende brannscenarier er deretter valgt. Mulige årsaker til brann er diskutert, men konsekvenser er ikke vurdert.

4.1.3 Mål for kvalitativ analyse

Målet med den kvalitative analysen er å danne grunnlag for beslutning av hvilke brannscenarier som skal brukes ved simulering av røykventilasjon. Dette omfatter følgende:

- kartlegging av farer og trusler
- kartlegging av aktuelle brannscenarier for utstillingshaller generelt, og Alabasterhallen spesielt
- vurdering av de valgte brannscenarioene

4.1.4 Systemdefinisjon

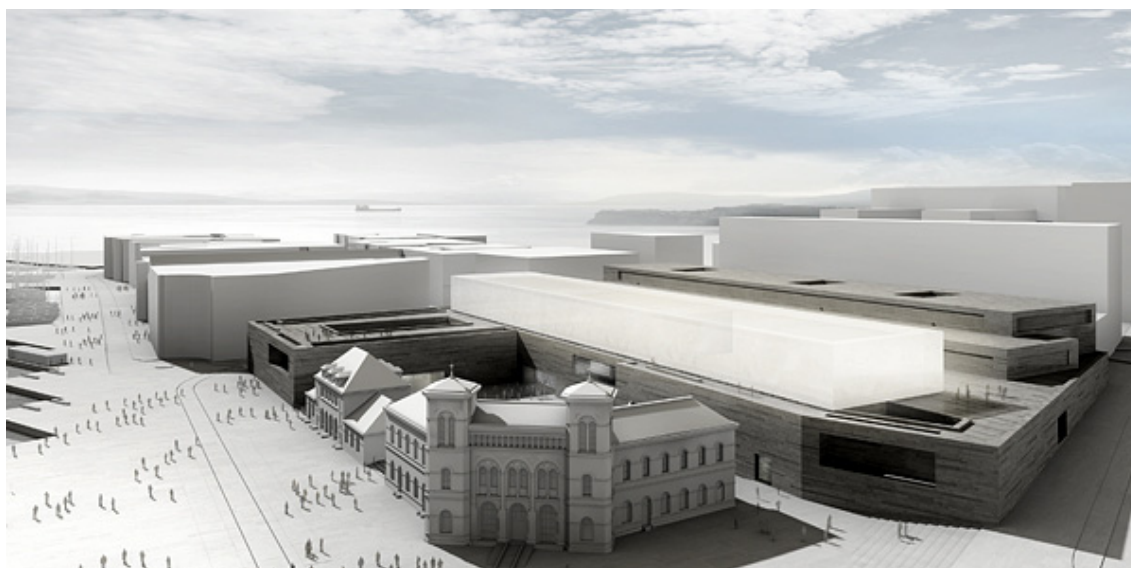
Beskrivelse av analyseobjektet

Uavhengig av om det benyttes en forenklet prosjekteringsmodell eller analytisk prosjektering er det i veiledningen til TEK 10 beskrevet hvilke forutsetninger som må bestemmes og beskrives ved brannteknisk prosjektering [18]. Disse er som følger:

- *byggverkets bruk eller virksomhet*
- *antall mennesker eller husdyr*
- *arealer og antall etasjer*
- *brannenergi og eventuelt spesiell risiko (aktiviteter eller lagring av brannfarlige varer etc.)*
- *plassering i forhold til nabobebyggelse*
- *tilgjengelighet og atkomst for brannvesenets høyderedskaper*
- *eventuelt spesielle lokale rammebetingelser [18 s. 92]*

Disse forutsetningene vil bl.a. bidra til å plassere byggverket i risiko- og brannklasse, og vil være et startgrunnlag for gjennomføring av en risikoanalyse [18]. Opplysningene vil også være beregningsunderlag for evakuering av mennesker og dyr, og for vurdering av redningsinnsats. Analyseobjektet er forsøkt beskrevet etter de ovennevnte punktene.

Analyseobjektet, Alabasterhallen, er en hall i det nye Nasjonalmuseet som er et publikumsbygg plassert på Vestbanen i Oslo sentrum. Bygget er under prosjektering og forventes å være ferdigstilt i 2017/2018. Alabasterhallen har en kapasitet på 600 publikummere.



Figur 4.1: Oversiktsbilde av Nasjonalmuseet på Vestbanen. Alabasterhallen er den lysende delen av bygget plassert midt i bildet. Foto er hentet fra [65].

Innvendige mål er 131 m x 21 m x 7,5 m (l x b x h), dvs. at volumet er ca. 20 660 m³. Hallen ligger i fjerde etasje, se Figur 4.1, og er tilknyttet plan 1, 2 og 3 gjennom to store trapperom. Det er mulig å bevege seg på taket utenfor hallen, men det vil ikke være direkte utgang fra hallen til takterrasse.

Alabasterhallen skal brukes til ulike kunstutstillinger, noe som gir få begrensninger til hvilke materialer og produkter som kan bli benyttet. Både store og små objekter, brennbare som ubrennbare kan være aktuelle i en kunstinstallasjon.

Nasjonalmuseet har flere interessenter: eiere (staten), kommunen, ansatte, forsikrings-selskap, gjester, utstillere, brannvesen, naboer og forbipasserende. Interessentene er utsatt for ulike typer risiko avhengig av eksponeringstid og kjennskap til systemet og driften. I følge TEK 10 skal byggverk plasseres i risikoklasse og brannklasse [2]. Risikoklasser beskriver den trusselen en brann vil kunne innebære for skade på liv og helse, og bestemmes ut i fra den virksomheten byggverket er planlagt for, og de forutsetningene menneskene i byggverket har for å bringe seg selv i sikkerhet ved brann [18]. Det finnes seks risikoklasser, hvorav klasse 6 stiller de høyeste kravene til sikkerhet, se Tabell 4.1. I veiledningen til TEK 10 er ulike virksomheter plassert i

risikoklasser. F.eks. er forsamlingslokale og museum, og dermed også Alabasterhallen, plassert i risikoklasse 5.

Tabell 4.1: Risikoklasser, gjengitt fra [2].

| Risiko- klasser | Byggverk kun beregnet for sporadisk personopphold | Personer i byggverk kjenner rømnings- forhold, herunder rømningsveier, og kan bringe seg selv i sikkerhet | Byggverk beregnet for overnatting | Forutsatt bruk av byggverk medfører liten brannfare |
|--------------------|--|--|---|---|
| 1 | Ja | Ja | Nei | Ja |
| 2 | Ja/nei | Ja | Nei | Nei |
| 3 | Nei | Ja | Nei | Ja |
| 4 | Nei | Ja | Ja | Ja |
| 5 | Nei | Nei | Nei | Ja |
| 6 | Nei | Nei | Ja | Ja |

For å sikre byggets bæreevne ved brann plasseres byggverket også i en brannklasse ut i fra den konsekvens en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø [2]. Brannklassene er gitt fra 1 til 4, hvorav klasse 1 innebærer liten konsekvens, og klasse 4 innebærer særlig stor konsekvens, se Tabell 4.2. Analyseobjektet, Alabasterhallen, er plassert i brannklasse 4. Denne brannklassen krever at brannsikkerheten verifiseres ved analyse [18].

Tabell 4.2: Brannklasser, gjengitt fra [2].

| Brannklasse | Konsekvens |
|-------------|-------------|
| 1 | Liten |
| 2 | Middels |
| 3 | Stor |
| 4 | Særlig stor |

Begrensninger, antakelser og forenklinger

I analysen er det kun fokusert på farer i tilknytning til brann som vil påvirke person- og verdisikkerheten.

Den kvalitative analysen fokuserer på hele hallen, inkludert trapperom, inngangspartier, samt innvendige bygningsdeler. Resten av Nasjonalmuseet og området på utsiden av hallen vil ikke tas med. Siden Alabasterhallen er et museum som vil inneholde verdier for flere millioner forutsettes det at eventuelle vinduer kommer til å være av sikkerhetsglass. Disse forutsettes også å kunne overleve en eventuell brann uten å knuse. Det tas derfor ikke hensyn til eventuelle effekter knuste vinduer kan gi for strømningsbildet og røykventilasjonen i bygget.

Det er forutsatt at Nasjonalmuseet følger de krav som gjelder for bransjen informasjons- og kommunikasjonsvirksomhet. I denne bransjen stilles det krav til bl.a. internkontroll, forurensning, brann- og eksplosjonsvern, miljø og helse samt arbeidsmiljø [58]. Krav til elektrisk utstyr og lavspenningsanlegg er noen av de viktigste krav i brann- og eksplosjonsvernloven som gjelder denne typen virksomhet. Dette stiller bl.a. krav til hvem som kan utføre og reparere elektriske anlegg, og hvordan disse skal vedlikeholdes.

4.1.5 Identifikasjon av farer og trusler

I dette kapittelet er farer og trusler identifisert. Aktuelle farer er listet opp, og farer som anses som sannsynlige bidragsyttere til brann er vurdert videre.

Utgangspunktet for identifikasjon av farer er befaringer på ulike museer. Listen over mulige farer er supplert med litteratursøk. Blant annet lister Buchanan opp en rekke mulige varmekilder som kan forårsake brann i bygninger [23]. I tillegg er Rausands liste over farer benyttet [66]. Brannstatistikk fra *Finansnæringens Fellesorganisasjon* (FNO) [67] og *Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap* (DSB) [68] er brukt for å komplettere listen over farer, samt for å undersøke om farene er realistiske kilder til brann. Utover dette er det også gjort forsøk på å finne eksempler på tidligere

risikovurderinger av museer/publikumsbygg, samt tidligere branner i museum og andre publikumsbygg.

Befaring

For å få et innblikk i hva som kan stilles ut på et museum ble det 29. februar 2012 gjennomført befaringer på Nordenfjeldske Kunstindustrimuseum og Vitensenteret i Trondheim. Befaringen ble utført for å kartlegge hvordan en “typisk utstilling” ser ut, hvilke materialer som benyttes, og hvor og hvordan disse er plassert.

På Kunstindustrimuseet ble det observert følgende typer kunst:

- veggtepper i ulike materialer i størrelse 1,5-8 m²
- malerier med ulike malingstyper, deriblant oljemalerier
- tekstiler, f.eks. klesplagg i ulike materialer som ull, silke og perler
- keramikk og glass, f.eks. pyntegjenstander og serviser
- møbler av ulike typer, f.eks. store, massive tremøbler, trestoler, stoppede møbler, plastmøbler
- diverse: bøker, pyntegjenstander, papirfigurer, smykker og leker (barbiedukker, legoklosser etc.)

Kunsten som står utstilt består for det meste av brennbare materialer, men ubrennbare materialer som keramikk og glass er også representert. Plassering av kunsten varierer med type kunst. Malerier og veggtepper er montert på vegger (inkludert løse vegger som er plassert rundt omkring i lokalet). Møbler er plassert rundt i lokalet, inntil vegger som i et vanlig hjem eller i egne glassmontre. De fleste andre installasjoner er plassert i glassmontre, på hyller, langs vegger eller rundt i lokalet. Figur 4.2 viser plassering av ulike kunstinstallasjoner.

4. Analyse



(a)



(b)

Figur 4.2: Plassering av kunstinntallasjoner (foto fra befaring på Nordenfjeldske Kunstindustrimuseum i Trondheim).

På Vitensenteret ble det observert mange store installasjoner plassert rundt omkring i lokalene. Installasjonene forklarer og viser mye av naturvitenskapens verden, innen bl.a. fysikk, biologi og kjemi. Senteret har f.eks. elektrorom, fysikk- og mekanikkrom, oppfinnerverksted, planetarium og snekkerbu. Det gjennomføres også vitenskapsshow hvor det utføres forskjellige kjemiforsøk. Installasjonene er hovedsakelig bygd opp av

metall, plast og/eller tre. Mange av installasjonene viser ulike prosesser og inneholder dermed ulike elektroniske artikler som skjermer, brytere, høyttalere, ledninger, lamper etc. Et av rommene inneholder flere ulike elementer i tre, inkludert benker, stoler, takstoler, deler av bindingsverksvegger samt laftede vegger, se Figur 4.3.



Figur 4.3: Trematerialer (foto fra befaring på Vitensenteret i Trondheim).

Andre mulige kunstinstallasjoner

Ved nettsøk er det funnet eksempler på andre utstillinger som kan være aktuelle for Alabasterhallen, spesielt utstillinger som er litt særegne, og hvor det kan tenkes at faren for og ved brann er relativt stor. Figur 4.4 viser en kunstinstallasjon med åpne flammer. Her har kunstner Claire Fontaine benyttet seg av brenning av fyrstikker for å få frem et politisk budskap [69].

4. Analyse



Figur 4.4: Claire Fontaines utstilling av et brennende Frankrike på galleriet
Air de Paris. Gjengitt fra [69].

Figur 4.5 viser en stor pappinstallasjon som strekker seg fra gulv til tak. Installasjonen er laget av Sharon Levy og er utstilt på Museum of Contemporary Art i San Diego.



Figur 4.5: Sharon Levys pappinstallasjon på Museum of Contemporary Art i San
Diego. Gjengitt fra [70].

Biler er også et aktuelt utstillingsobjekt. Nettsøk viser at det finnes flere bilmuseer i verden, og relativt mange bare i Norge. I tillegg stiller også andre typer museer tidvis ut biler. Eksempelvis har Teknisk Museum i Kjelsåsveien i Oslo Norges første bil i sin samling; en Benz Phaeton fra 1895 [71]. På Drammens museum har det i 2012 vært åpning av en utstilling kalt Dag Alveng – Racing [72] som inneholder ulike biler.

Farer og trusler

En fare er definert som noe som kan skade en verdi [66]. Det er en egenskap, situasjon eller en tilstand, og er ofte relatert til energi av noe slag. Fare er derfor ikke en hendelse, men en forutsetning for at en uønsket hendelse kan skje. Kunstutstillinger kan utgjøre en fare dersom de inneholder brennbart materiale, eller f.eks. dersom plasseringen av installasjonene kan påvirke røykens strømningsmønster. Trusler er nært relatert til farer. En trussel er noe som kan utnytte en sårbarhet, og er gjerne noe som gjøres med vilje for å gjøre skade på og/eller ødelegge verdier [66]. I Tabell 4.3 er aktuelle farer og trusler listet opp.

Tabell 4.3: Liste over aktuelle farer og trusler.

| | | |
|----------------|---|---|
| Farer | Flammende kilder | Fyrstikker Stearinlys Åpen ild |
| | Ulmende kilder | Sigaretter |
| | Elektroniske apparater / elektriske anlegg | Gnister Overoppheting Kortslutning Annen svikt |
| | Strålingskilder | Sol Varme elementer Varmeovner Varme overflater |
| | Bygningsspesifikke kilder | Kunstinstallasjoner Sveising, skjæring av stål ol. ved montering/reparasjon/vedlikehold |
| | Naturfenomen | Lynnedslag Jordskjelv |
| Trusler | | Brannstiftning/ildspåsettelse Krig og terrorisme |

4.1.6 Beskrivelse av farer og trusler.

I følge FNO har ca. 5 % av alle branner i næringsgruppen informasjon og kommunikasjon i Norge i perioden 1985-2011 *åpen ild og varme* som brannkilde [67]. Disse og flere ulike årsaker til brann i denne næringsgruppen er vist i Tabell 4.4.

4. Analyse

Brannkilden *åpen ild og varme* inkluderer fyrstikker, røyking, stearinlys og grill. Det skal ikke tilberedes mat eller serveres større måltider i Alabasterhallen. Stearinlys og grill vurderes dermed ikke som aktuelle brannkilder. Fyrstikker og røyking er aktuelle brannkilder, men utgjør trolig en liten andel av de totale brannkildene. Inne i hallen er fare i forbindelse med røyking ikke ansett som sannsynlig pga. røykeloven av 1. juni 2004 [73]. Fyrstikker og sigaretter kan allikevel utgjøre en fare dersom personer røyker i inngangspartier, og fyrstikker eller sigaretter ikke slukkes fullstendig. Kasting av sigaretter i avfallsbeholdere kan utgjøre en fare for ulmebrann. Det er mindre sannsynlig at sigaretter kastes inne i hallen, spesielt siden normal ankomst for publikum er gjennom trapperommene fra etasjene under. Flammende kilder som fyrstikker, stearinlys og åpen ild anses som en reell fare hvis de er benyttet i kunstinstallasjoner eller “visningsshow” tilsvarende vitenskapsshowene som arrangeres på Vitensenteret. Et eksempel er utstillingen av Claire Fontaine (Figur 4.4) som består av brennende fyrstikker [69]. Dersom denne type kilder inngår i en kunstinstallasjon, forutsettes det at det utøves ekstra varsomhet, f.eks. ved at installasjoner konstant overvåkes av vakter.

Tabell 4.4: Kilder til brann for næringsgruppen Informasjon og kommunikasjon i Norge i perioden 1985-2011 [67].

| Kilde | Informasjon og kommunikasjon (antall tilfeller) |
|--|---|
| Ildsted (ovn, peis, gasspeis) | 14 |
| Varme arbeider (sveising, skjæring av stål, lodding etc.) | 5 |
| Åpen ild og varme (fyrstikker, røyking, stearinlys, grill) | 12 |
| Elektroniske apparater | 77 |
| Elektriske husholdningsapparater | 12 |
| Fastmontert elektrisk utstyr | 23 |
| Annet eller ukjent | 90 |
| SUM | 233 |

Ildsted (ovn, peis, gasspeis) og elektriske husholdningsapparater utgjør i følge brannskadestatistikken til FFO til sammen ca. 11 % av de totale brannkildene (14 + 12 av 233 tilfeller totalt) [67], men er ikke aktuelle objekter i hallen.

Varme arbeider som sveising, skjæring av stål, lodding etc., er aktuelt ved montering, reparasjon eller vedlikehold av kunstinstallasjoner eller deler av bygningskroppen. Denne brannkilden utgjør i følge FNO ca. 2 % av alle brannkildene [67], noe som er en svært liten andel. Det antas at de fleste slike arbeider kun vil foregå utenfor besøkstid og at en eventuell brann vil oppdages raskt. Det forutsettes at det vil utøves ekstra varsomhet i forbindelse med slike arbeider. Disse brannkildene er ikke vurdert videre.

Elektroniske apparater utgjør en stor del av brannkildene (ca. 33 %). Elektroniske apparater eller elektriske anlegg kan utgjøre en fare dersom de eksempelvis overopphetes, kortslutter, slår gnister eller svikter grunnet menneskelige feil. Feil på elektriske anlegg kan f.eks. føre til brann i vegger eller i sjakter/kanaler. Slike branner kan være vanskelig å oppdage, og de kan spre seg raskt. I følge SINTEF-rapporten *Varmgang i elektrisk materiell og utstyr som tennkilde i bygninger* [74] er aktuelle materialer som kan bli antent pga. varmgang fra elektrisk utstyr og materiell i første rekke cellulosematerialer i bygningskonstruksjonen (tre og papp) og inventar (tekstiler og papir), samt plastprodukter. Det er ikke fastsatt hvilke materialer som skal benyttes i bygningskonstruksjonen i Alabasterhallen, og på dette stadiet er det vanskelig å si noe om hvilke konsekvenser varmgang i elektrisk utstyr vil kunne få for selve konstruksjonen. Siden hallen skal benyttes til kunstutstillinger antas det at tekstiler, papir og plast er materialer som i stor grad vil finnes i kunstinstallasjonene. På befaring ble det observert at spotbelysning utgjør en stor andel av elektriske apparater i utstillingslokaler. I tillegg til spotter som belyser kunsten er det også en mulighet for at elektriske og elektroniske artikler er en del av selve kunsten i en kunstinstallasjon. Dette ble observert på Vitensenteret i Trondheim hvor skjermer, brytere, høytalere etc. er en del av installasjonene. Varme overflater som varmeovner,

4. Analyse

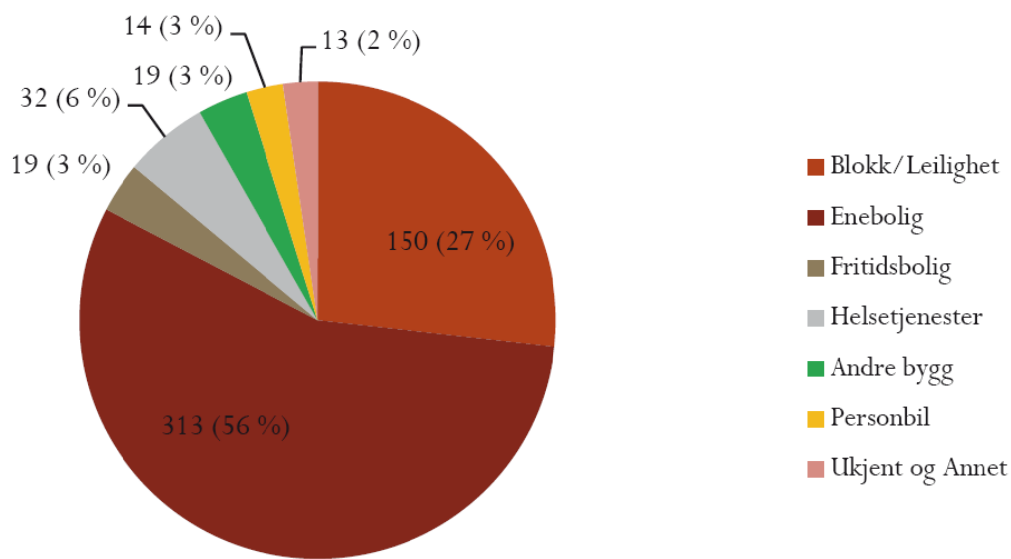
belysning og lignende kan antennes ved f.eks. uforsvarlig tildekking, eller ved kontakt med lett antannelige materialer.

Sol kan heve innetemperaturen i et bygg, spesielt dersom glass benyttes som fasademateriale, Dette kan ha utslag for hvordan røyken brer seg i rommet, og vil dermed også kunne påvirke evakueringssituasjonen. Konsekvenser som følge av naturfenomener som lynnedslag og jordskjelv er vanskelige å forutsi. I Norge er lynnedslag mer aktuelle enn jordskjelv, og det ble registrert totalt 8437 skader på bygninger grunnet lynnedslag i 2011 [67]. Siden museet er plassert i Oslo sentrum med høye omliggende bygg, anses faren for lynnedslag som liten. Brann grunnet lynnedslag eller jordskjelv er derfor ikke vurdert i oppgaven.

Krig og terrorisme er trusler som det også er svært vanskelig å forutsi både sannsynlighet og omfang av, og disse er ikke vurdert videre.

I følge FNO utgjør påsatte branner omtrent 3 % av totalt antall branner i informasjons- og kommunikasjonsbygg i Norge i perioden 1985-2011 [67]. *Annet eller ukjent* utgjør en vesentlig kilde til brann i samme type bygg og over samme periode, omtrent 39 %. Det er rimelig å anta at noen av disse brannene også er påsatt.

I følge DSB utgjør påsatte branner 10 % av alle dødsbranner i Norge i perioden 1997-2008 [75]. Dødsbranner med ukjent brannårsak i samme periode utgjør 23 %, og det antas som sannsynlig å tro at noen av disse brannene er påsatte. Av dødsbrannene i perioden 1999-2008 fant 3 % sted i kategorien *andre bygg* (se Figur 4.6), som museum faller inn under. 2 % av brannene fant sted i kategorien *ukjent og annet*, og det er mulig at enkelte av disse brannene kan ha funnet sted på et museum. Det anses derfor som sannsynlig at påsatt brann er en reell trussel i Alabasterhallen.



Figur 4.6: Antall dødsbranner i Norge (1999-2008) etter brannsted. Gjengitt fra [75].

Som statistikken viser utgjør museumsbranner relativt liten fare for liv, men en brann vil uansett kunne skade både kulturhistoriske- og andre materielle verdier.

I tillegg til generelle farer og trusler, er kunstinstallasjoner vurdert. Kunstinstallasjoner kan inkludere brennbare materialer og ulike prosesser som utgjør fare for brann. Ulike installasjoner kan i kombinasjon forsterke faren de utgjør alene, f.eks. dersom en utstilling inkluderer svært brennbart materiale, og en annen inkluderer en prosess som kan ta fyr, eventuelt åpen flamme. Et annet moment ved kunstinstallasjoner er at det vil være stor utskiftning av materialer og objekter i hallen siden utstillingene som oftest er temporære. Dette kan føre til at det er vanskelig å holde oversikt over hva som står utstilt til enhver tid, og om det er brannteknisk forsvarlig. I en utstillingshall er det vanskelig å begrense brennbart materiale uten å samtidig begrense utstillingsmulighetene. Det er ønskelig å ha færrest mulige begrensninger knyttet til utstillingsmateriale. Ved utførelse/utstilling av spesielt risikofylte installasjoner / brennbare materialer, forutsettes det at det utøves spesiell varsomhet.

4.1.7 Brannforløp

For å kunne beskrive brannscenarier som kan være aktuelle for Alabasterhallen er det i dette kapitlet gjort rede for hvordan en brann forløper samt ulike begreper knyttet til brannforløp og brannscenarier som benyttes i analyser.

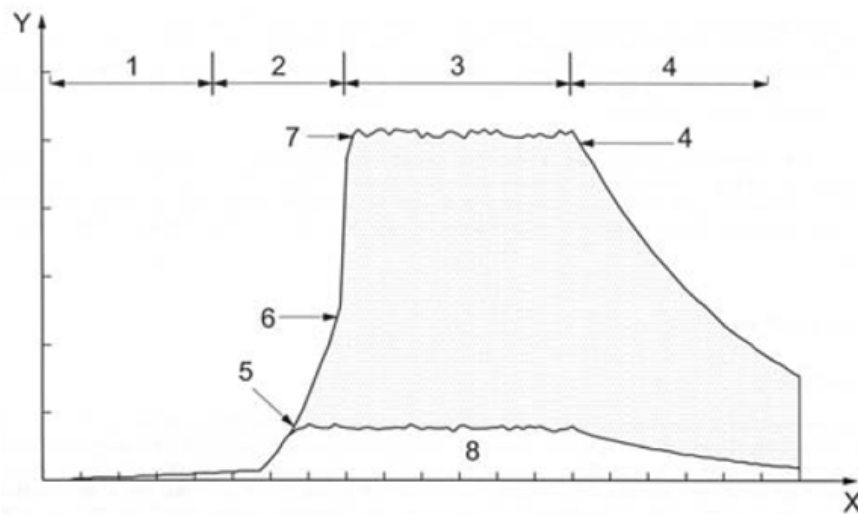
Dimensjonerende branner

En dimensjonerende brann er det brannforløpet som blir valgt til dimensjoneringsformål, vanligvis det verst tenkelige, men sannsynlige tilfellet [76]. En dimensjonerende brann er en kvantitativ beskrivelse av hvordan ulike parametre som beskriver en brann varierer over tid [22]. Slike parametre er bl.a. hastighet for varmeavgivelse (HRR), flammespredningshastighet, hastighet for røykproduksjon, utslipp av giftgasser og temperatur [77].

I rapporten *ISO/TS 16733 Fire safety engineering - Selection of design fire* er det gitt en fullstendig spesifisering av hvilke faser en dimensjonerende brann kan inkludere [22]. Disse er som følger:

- *Tidligfase (begynnende fase): karakterisert av et utvalg av kilder, som kan være glør, flammer eller stråling*
- *Vekstfase: innebærer brannens forplantningsperiode opp til overtenning eller fullstendig brenselsinvolvering*
- *Fullt utviklet fase: karakterisert av vesentlig jevn forbrenningshastighet som kan oppstå i ventilasjons- eller brenselskontrollerte branner*
- *Avkjølingsfase: omfatter perioden hvor brannens alvorlighet synker*
- *Utryddelse: når det ikke produseres mer energi [22 s. 11] (oversatt til norsk)*

Figur 4.7 viser en illustrasjon av et brannforløp:



Figur 4.7: Illustrasjon av et brannforløp. X: tid, Y: varmeavgivelse, 1: begynnelsen fase, 2: vekstfase, 3: fullt utviklet fase, 4: nedbryttings-/avkjølingsfase, 5: aktivering av sprinkler, 6: overtenning, 7: ventilasjonskontrollert, 8: sprinklerkontrollert. Gjengitt fra [22].

Plassering av brannscenarioer

Det skal i følge *ISO/TS 16377* velges spesifikke plasseringer for brannscenarioene [22]. De mest utfordrende plasseringene er der hvor spesielle forhold negativt påvirker ytelsen til sikkerhetstiltakene. F.eks. ved:

- *plassering veldig nært personer i rommet, spesielt sårbare verdier eller eksponerte bygningselementer, slik at det er utilstrekkelig tid og rom til at brannsikkerhetstiltakene kan fungere effektivt*
- *plassering i hjørner eller andre steder der delvis innlukking fører til rask brannvekst*
- *plassering som er skjermet fra systemer for brannsikring*
- *plassering nær døråpninger eller andre åpninger som binder sammen arealer og som tillater brann å spre seg til mange rom før skillende konstruksjon kan virke effektivt [22 s. 15] (oversatt til norsk)*

Den dimensjonerende brannen benyttes i det dimensjonerende brannscenarioet som er et spesifikt scenario som analysen blir utført etter.

En dimensjonerende brann bestemmes gjennom ulike forsøk, eller via gjennomgang av tidligere rapporter og innsamlede data [78]. Da det er svært kostnads- og tidskrevende å gjennomføre forsøk er denne oppgaven basert på tidligere forsøk og tilgjengelige data. Det dimensjonerende brannscenarioet karakteriseres derfor gjennom en HRR-kurve og tilsvarende verdier.

Det tidlige brannforløpet

Det totale brannforløpet beskriver en brann fra antennelse til den er sluknet, mens det tidlige brannforløpet beskriver brannen fram til overtenning. Forløpet fra antennelse til overtenning, dvs. brannens vekst, kan beskrives ved hjelp av ” $\alpha \times t^2$ ”-metoden som beskrives i bl.a. NFPAs *Standard for Smoke and Heat Venting* [79]. Metoden går ut på at HRR, Q [kW], i en brann øker med en faktor, α_g [kW/s²], og kvadratet av tiden, t [s], som følger:

$$Q = \alpha_g \times t^2 \text{ [kW]} \quad (4.1)$$

Klassifisering av t^2 -branner er gitt i standardens Annex F [79], og det er gitt standardiserte α -verdier for hver klasse. Klassene er beskrevet i forhold til hvor lang tid i sekunder det tar brannen å nå 1000 kW.

I følge Klason et al. er det tvilsomt hvorvidt denne metoden kan benyttes for større branner [78]. De foreslår derfor å bruke HRR-kurver og virkelige forbrenningsegenskaper fra forsøk dersom det brennende materialet er kjent.

Brensel- og ventilasjonsstyrt brann

En brann hvor tilgangen på luft er bestemmende for brannens videre utvikling kalles en ventilasjonskontrollert eller ventilasjonsstyrt brann [77]. En ventilasjonsstyrt brann har tilstrekkelig tilgang på brensel og høy nok temperatur.

En brann hvor tilgangen på brensel og brenselets egenskaper er bestemmende for brannens videre utvikling kalles en brenselskontrollert eller brenselstyrt brann [77]. En brenselstyrt brann har tilstrekkelig tilgang på luft og høy nok temperatur. Slike branner oppstår sjeldnere enn ventilasjonsstyrte branner og kan bare forventes i bestemte situasjoner, som f.eks. i lagerbygninger med høyt ventilasjonsnivå [22].

Det vil altså kunne være stor forskjell mellom brannforløpet i et fritt brennende objekt og brannforløpet i et rom. I et fritt brennende objekt vil ikke overtenning kunne skje fordi brannen vil være brenselstyrt. En brann i et rom vil kunne medføre at brannforløpet går raskere, og at HRR kan bli større pga. blant annet stråling fra det varme gasslaget som dannes. Overtenning vil kunne skje og deretter føre til en fullt utviklet brann [78]. Siden oksygentilførselen er begrenset er det denne som styrer forbrenningshastigheten, dvs. at den maksimale branneffekten styres av massestrømmen av luft som kommer inn i rommet.

Overtenning

Overtenning kan karakteriseres både kvalitativt og kvantitativt. En av de vanligste kvalitative karakteristikker for overtenning er samtidig antenning av alle brennbare overflater i en branncelle [76]. Overtenning kan også beskrives som det tidspunktet flammene slår ut gjennom åpninger i rommet, eller som overgangen fra brenselstyrt til ventilasjonsstyrt brann. Kvantitative karakteristikker for overtenning er funnet i flere studier. Noen av disse er listet opp av Drysdale i boka *Introduction to Fire Dynamics* [48]. En kvantifisering av overtenning er f.eks. når temperaturen i taket når ca. 600 °C eller når varmestrålingen fra røyksjiktet til lavt nivå i rommet overstiger 20 kW/m², sistnevnte kjent som Watermans kriterium.

Fullt utviklet brann

Etter overtenning utvikler ofte en brann seg hurtig til å være i en fullt utviklet brannfase der forbrenningshastigheten er begrenset av brensel eller tilgjengelig ventilasjon [22]. En fullt utviklet brann er altså tilstanden der alle brennbare overflater deltar i en brann innenfor et angitt område [76]. For å beskrive en fullt

utviklet brann i et rom kan en benytte flere metoder [78]. I Eurokode 1 er det definert flere temperatur/tid-kurver som brukes for å fremstille en modell for fullt utviklet brann i en branncelle [76]. Disse kurvene beskriver temperaturen i løpet av et helt brannforløp, og beregnes med informasjon om ventilasjonsåpninger. Ulike begrensninger er tilknyttet de ulike metodene. Parametriske temperatur/tid-kurver begrenses ved at de kun gjelder for brannceller med gulvareal opp til 500 m² uten åpninger i taket, og med en største branncellehøyde på fire meter. Det forutsetter også at branncellens brannenergi forbrennes fullstendig. Denne metoden vil dermed være uaktuell for tilfellet vurdert i denne oppgaven.

4.1.8 Brann i Alabasterhallen

Alabasterhallen er tenkt i en “ren” stil, slik at kunsten kommer til sin rett. Det vil hovedsakelig være kunst som fyller lokalet, og det er derfor naturlig at kunstinstallasjoner er i fokus ved valg av brannscenarier.

Aktuelle brannobjekter

Det er mest hensiktsmessig å anta brann i materialer og objekter som betraktes som vanlige utstillingsobjekter, da det er høy sannsynlighet for at disse gjenstandene kommer til å bli utstilt i Alabasterhallen. Etter befaring på museum og relevante litteratursøk, samt vurderinger av farer og trusler, er det rimelig å anta at følgende objekter kan være inkludert i en brann:

- møbler
- skulpturer
- utstillingsdukker med klær
- veggtepper
- malerier
- elektriske artikler
- biler

Plassering

For montering og plassering av kunstinstallasjonene er det naturlig å anta at det blir brukt løse lettvegger og glassmontre (frittstående og vegghengte). Lettvegg og montre kan, avhengig av størrelse og plassering, skape ulike strømningsmønstre som kan påvirke brannforløpet. Objektene kan være plassert på forskjellige steder i lokalet, inntil yttervegg, inntil eller mellom frittstående vegger, midt på gulvet, i hjørner eller opphengt på vegg.

Brannobjektene plassering i forhold til vegger eller hjørner påvirker brannforløpet. En plassering tett inntil vegg eller i et hjørne fører til mindre luftinntrengning i brann- og røyksøylen, og røykgasstemperaturen vil bli høyere, noe som igjen vil føre til en høyere middelflammehøyde [11].

Nødutgangene i hallen er plassert i trapperommene. Verst tenkte branntilfelle er derfor i nærheten av disse, siden dette vil hindre evakuering. En brann mellom yttervegg og trapperom vil være kritisk fordi det kan hindre gjennomgang forbi trapperommene da passasjen bare er omtrent 3,6 meter bred. Det vil være mulig å passere trapperommet på den andre siden da det er lite sannsynlig at det vil være brann på begge sider samtidig, men evakueringstiden vil uansett kunne øke.

På museumsbefaringene ble det observert at sofaer og skap som oftest er plassert inntil yttervegg eller frittstående vegg. Den mest naturlige plasseringen for skulpturer er midt på gulvet og ikke inntil hverken yttervegger eller frittstående vegger. Skulpturer er gjerne plassert på en liten forhøyning i gulvet alt etter hvilken høyde selve skulpturen har, slik at publikum skal ha anledning til å se skulpturen fra alle sider. Veggtepper og malerier er, ganske åpenbart, plassert på vegger. Høydeplassering er bl.a. avhengig av størrelse på veggteppe/maleri. Elektriske artikler plasseres gjerne i montre, på bord og hyller inntil vegger eller midt på gulvet. Utstillingsdukker ble observert stående inntil vegg eller fritt i rom. Biler kan antas plassert både inntil vegger og midt på gulvet.

4.1.9 Brannscenarier

Det er valgt å gå videre med to brannscenarier, en liten- og en stor flammebrann. To ulike størrelser er valgt fordi det er ønskelig å observere de ulikheter effektene dette vil gi. Det er ikke gitt at en stor brann er mer kritisk enn en liten brann med tanke på avgivelse og spredning av røyk og sot. Da det er mest reelt å anta brann i gjenstander som er sannsynlige utstillingsobjekter er det valgt å se på brann i utstillingsdukker. Flere utstillingsdukker ble observert ved befaring på Kunstindustrimuseet i Trondheim, og brann i utstillingsdukker er derfor valgt som liten brann.

I tillegg er det, som nevnt, ønskelig å se på effekten av en stor brann. Det er ved befaring observert flere store veggtepper. Den store brannen kunne dermed vært brann i et slikt teppe. Siden disse ofte produseres i lignende materialer som klærne utstillingsdukker stiller ut, var det ønskelig å finne et helt annen type scenario for den store brannen. På bakgrunn av dette, inspirasjon fra befaring på Vitensenteret der flere store maskiner ble utstilt, samt søk på nettet, falt valget på brann i en bil.

Det er valgt å plassere brannene sentralt i den ene delen av hallen, men noe nærmere nødutgangen enn midten av rommet. Stedet anses som et aktuelt utstillingssted, både for utstillingsdukker og bil, og er i tilknytning til rømningsveiene og dermed ugunstig med tanke på rømning. Et mer kritisk utstillingssted er området ved inngangen eller i selve trapperommet, noe som vil hindre rømning gjennom aktuelt trapperom. Disse stedene er vurdert som lite trolige utstillingssteder fordi det er her besøkende vil gå for å komme inn og ut av hallen.

Siden det er sannsynlig at frittstående vegger eller utstillingsmontre vil benyttes er det valgt å se på ulike planløsninger, både en helt åpen løsning og løsning med frittstående vegger. Dette for å kunne vurdere effekten eventuelle frittstående vegger kan ha på en eventuell brann og strømminger i tilknytning til brannen.

Uavhengig av brannens plassering er det ikke forventet at overtenning vil inntreffe. Dette pga. Alabasterhallens store volum, og dermed høye tilgang på oksygen.

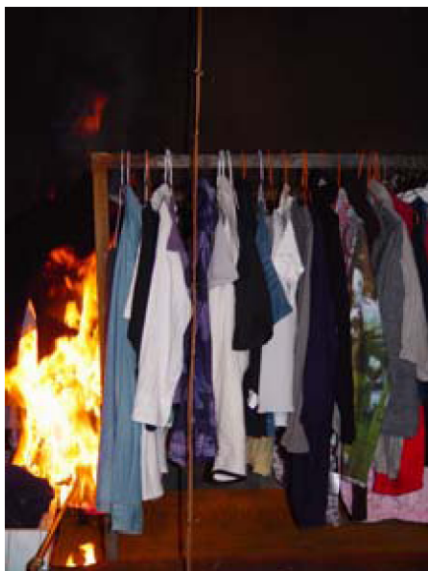
Utstillingsdukker med klær

Utstillingsdukker med klær kan være sammensatt av mange forskjellige materialer. Klærne som ble observert under befaringen var cellulosebaserte tekstiler og klær laget av plastmaterialer. Selve utstillingsdukkene kan bestå av forskjellige typer plast, tre eller tekstiler. Utstillingsdukkene på Kunstindustrimuseet var skredderbyster med fot i tremateriale. Selve bysten var dekket med et stoff i lycra. En eventuell brann i utstillingsdukker vil kunne være dekkende også for veggtepper i tekstiler eller plastmaterialer, og muligens også enkelte typer skulpturer av plast eller lignende materialer.

En studie utført i Canada gir parameterverdier for ulike brennende klesstativ fylt med klær [80]. I oppgaven har forfatterne valgt et brannscenario med brann i utstillingsdukker, se Figur 4.8. Selv om disse to scenarioene ikke er identiske, antas det at de brennende klesstativene er representative for utstillingsdukker med klær. Det er derfor valgt å benytte verdier fra det canadiske studiet. Det canadiske studiet er utført på tre ulike klesbutikker. Testene er utført i et 2,4 m x 3,6 m x 2,4 m stort ISO-9705-kompatibelt rom. Klesstativene ble antent av en 75 kW propanbrenner som brant i fire minutter, se Figur 4.9. Dette skulle simulere brann i en søppelkasse. Verdier for varmeavgivelseshastighet, masseavgivelse, gasstemperatur og varmefluks ble målt. Brannbelastningen var 661 MJ/m² for alle de tre testene.



Figur 4.8: Utstillingsdukker med klær (foto fra befarings på Nordenfjeldske Kunstindustrimuseum i Trondheim).



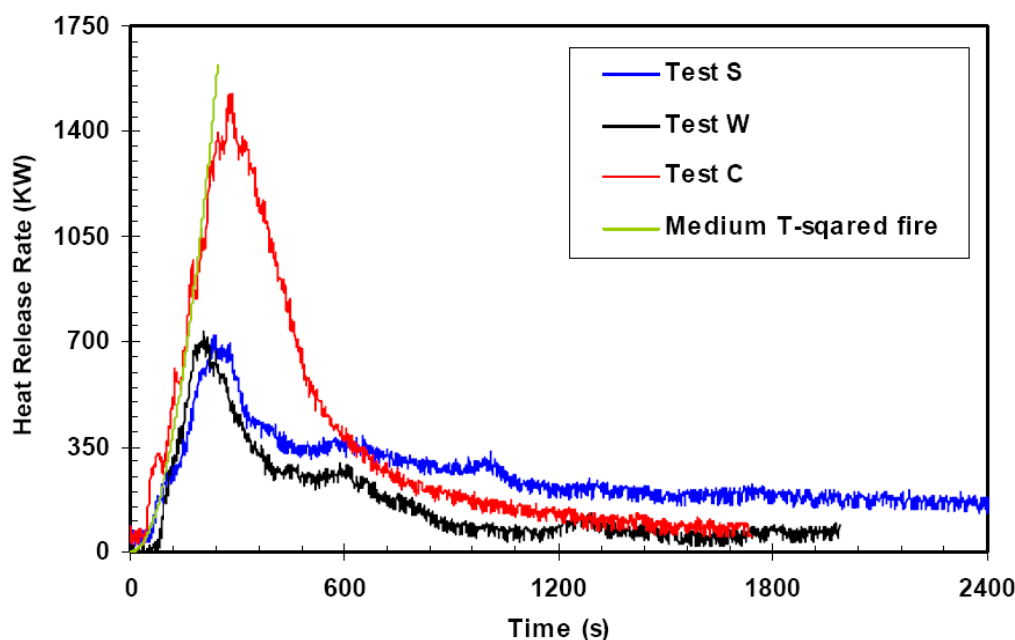
Figur 4.9: Fotografier som viser testprosedyren for test C. Gjengitt fra [80].

Materialprosentene for Test C (se Tabell 4.5) virker overensstemmende med utstillingsdukker med klær. De brennbare materialene som ble benyttet i testene var tre, klær, kleshengere av plast, plastposer, papirposer og diverse andre materialer som gummi og lær.

Tabell 4.5: Brannlaster (MJ/m^2) og bidrag fra brennbare materialer til spesifikk brannbelastning for klesbutikker. Gjengitt fra [80].

| Test ID | Test Title | Fire load density (MJ/m^2) | Textiles (%) | Plastics (%) | Wood/paper (%) | Rubber/leather (%) | Total Mass (kg) | Remaining Mass (kg) & (% Mass Loss) |
|---------|----------------------------------|---|--------------|--------------|----------------|--------------------|-----------------|--|
| S | Clothing Store (small store) | 661.0 | 55.0 | 6.0 | 37.0 | 2.0 | 34.65 | 7.48 (78 %) |
| W | Clothing Store (mostly wood) | 661.0 | 23.0 | 1.0 | 76.0 | 0.0 | 36.28 | 12.47 (66 %) |
| C | Clothing Store (mostly cloth) | 661.0 | 86.0 | 2.0 | 12.0 | 0.0 | 35.44 | 3.8 (89 %) |

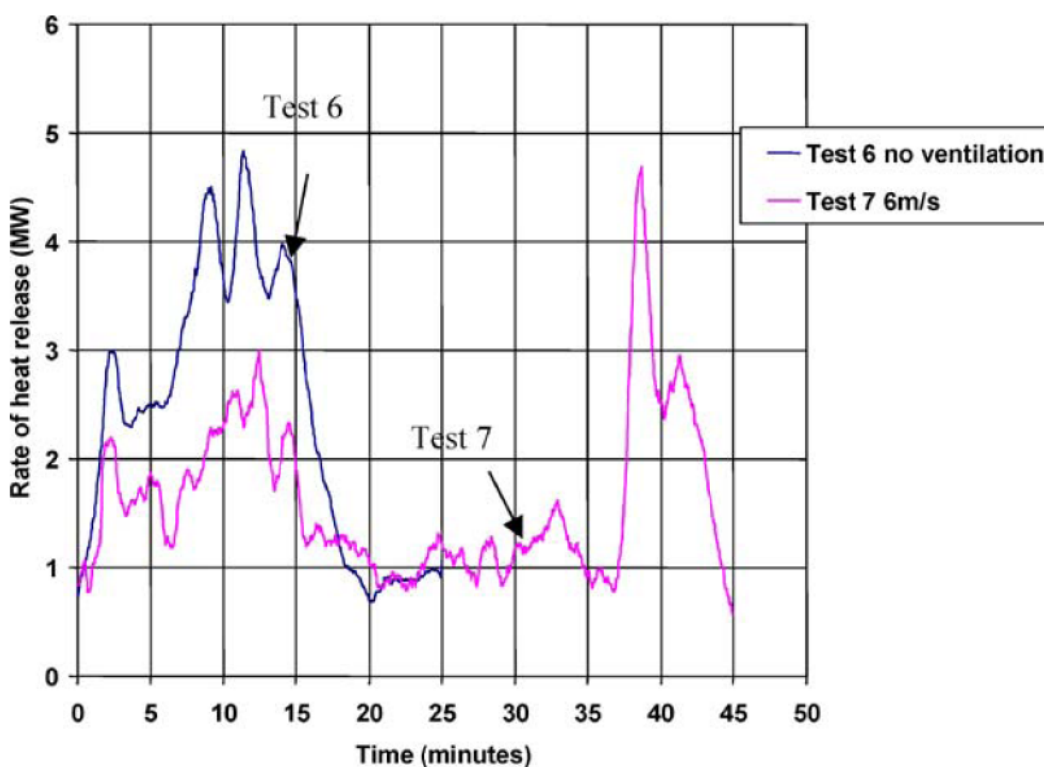
HRR i Test C nådde en maksimumsverdi på 1,528 MW etter fem minutter, se Figur 4.10. Etter 12 minutter var verdien sunket til 0,2 MW. Brannen fulgte en medium t^2 -brann.



Figur 4.10: HRR (kW). Gjengitt fra [80].

Biler

Det er funnet flere studier hvor det er utført branntester på biler [81] [82] [83]. En finsk kalorimeterstudie av tre brennende stasjonsvogner viser at HRR nådde 1,5-2 MW etter 15 minutter [81]. Etter 80 minutter hadde brannen sunket til en effekt på mellom 100-300 kW. Under et prosjekt kalt EUREKA ble det i perioden 1990-1992 utført fullskalaforsøk med brennende kjøretøy i Repparfjordtunnelen i Finnmark. Prosjektets overordnede mål var å øke brannsikkerheten i underjordiske tunneler. Tester av brennende passasjerbiler ga maksimale HRR-verdier i området 3-5 MW [82]. I Nederland ble 14 fullskalaforsøk av brennende kjøretøy utført i en tunnel i 2000/2001 [83]. Hensikten med forsøkene var å undersøke motoristenes evakueringsforhold ved en eventuell tunnelbrann. Tunnelen som forsøkene ble utført i er underjordisk og har et rektangulært tverrsnitt med følgende mål: 840 m x 9,8 m x 5,1 m (l x b x h). Det er valgt å se på HRR-verdiene til en brennende bil av typen Opel Kadett, 1990-modell, fra dette forsøket. Bilen har målene 4,0 m x 1,6 m x 1,4 m (l x b x h) [84]. Testen som forfatterne har valgt å fokusere på i denne oppgaven er Test 6, der HRR_{maks} er 4,9 MW etter 11 minutter (se Figur 4.11).



Figur 4.11: Brannutvikling for en bil, uten ventilasjon (Test 6) og med 6 m/s langsgående ventilasjon (Test 7). Gjengitt fra [83].

I tilknytning til fullskalaforsøkene ble det også utført laboratorieforsøk som skulle simulere en typisk bilbrann [83]. I disse forsøkene ble en blanding av 60 % heptan og 40 % toluen benyttet. Denne blandingen ble valgt fordi den produserer tilsvarende varme- og røykmengde som en gjennomsnittlig bilbrann.

4.1.10 Oppsummering og videre analyse

I den kvalitative analysen er det kommet frem til at følgende scenarioer er aktuelle for videre kvantitativ analyse:

- Brannscenario 1: brann i utstillingsdukke med HRR_{maks} lik 1,528 MW
- Brannscenario 2: brann i bil med HRR_{maks} lik 4,9 MW

Begge scenarioene er aktuelle med både åpen planløsning og bruk av frittstående vegger, dvs. fire scenarioer totalt.

4.2 Kvantitativ analyse

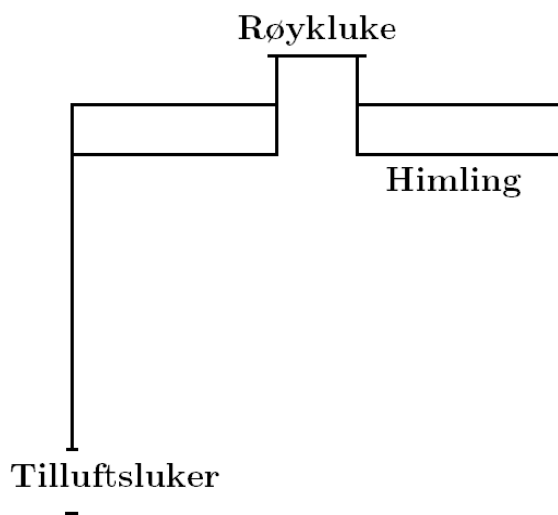
4.2.1 Generelt

I oppgaven skal en alternativ røykventilasjonsløsning med slisser vurderes og sammenlignes med tradisjonell røykventilasjon dimensjonert etter HO-meldingen.

Det er først gjennomført innledende simuleringer fordelt over fem grupper. Resultatene fra simuleringene i gruppe 1 til 5 er sammenlignet og brukt som beslutningsgrunnlag for valg av meshoppløsning, brannscenario, grensebetingelser og avtrekksmengde for hovedsimuleringene i oppgaven. Hovedsimuleringene er fordelt over gruppe 6 og 7 og tar for seg henholdsvis tradisjonell røykventilasjon og alternativ røykventilasjon med slisser. Løsningene som er testet i hovedsimuleringene er beskrevet nedenfor.

Tradisjonell røykventilasjon

Ved simulering av tradisjonell røykventilasjon etter HO-meldingen er det valgt å se på kun termisk ventilasjon bestående av røykluker i tak og tilluftsluker i fasade. Prinsippet for denne løsningen er vist i Figur 4.12.



Figur 4.12: Tradisjonell røykventilasjonsløsning.

Alternativ røykventilasjon med slisser

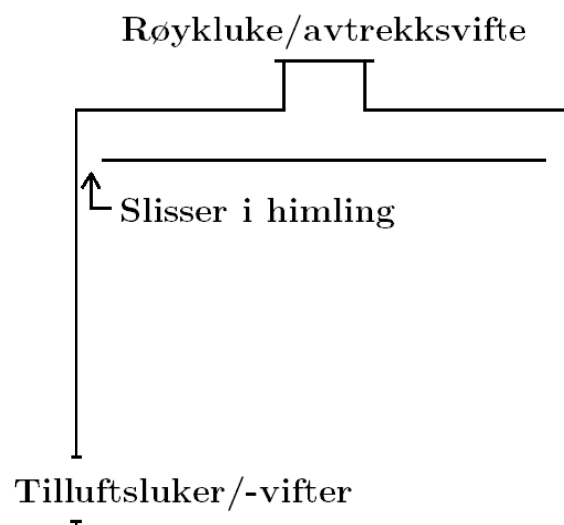
I den alternative røykventilasjonsløsningen er det valgt å se på både termisk og mekanisk ventilasjon. Løsningen består av 20 cm brede, gjennomgående slisser i himlingen langs yttervegger, der røyken skal trekkes opp over himlingen og ut av røykluker eller avtrekksvifter i taket. Det er valgt ulike tilluftsløsninger med enten luker eller vifter i fasade, eller vifter i trapperom. Løsningene er listet opp under og er vist i Figur 4.13 og Figur 4.14.

Termisk ventilasjon:

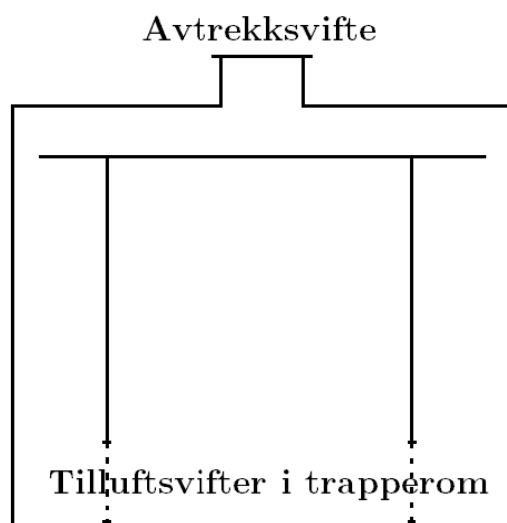
- røykluker i tak og tilluftsluker i fasade

Mekanisk ventilasjon:

- avtrekksvifter i tak og tilluftsluker i fasade
- avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter i fasade
- avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter i trapperom



Figur 4.13: Røykventilasjonsløsning med slisser, røykluker eller avtrekksvifter i tak og tilluftsluker eller -vifter i fasade.



Figur 4.14: Røykventilasjonsløsning med slisser, avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter i trapperom.

4.2.2 Røykventilasjon etter HO-melding

Røykventilasjonen i hallen er dimensjonert etter HO-meldingen. I dette kapitlet beskrives beregningene som er utført og de forutsetninger som er valgt. Alle tabeller som er benyttet for beregning er gjengitt i Vedlegg C.

I HO-meldingen neglisjeres røykens avkjøling mot tak og veggflater. For store arealer kan avkjøling av røyken være betydelig, men neglisjeres vanligvis så lenge takarealet deles opp i seksjoner som er mindre enn $64 \times H \times H$ (H er rommets høyde i meter). Hvor mye røyken avkjøles avhenger av overflatematerialer og deres varmeledningsevne. I Alabasterhallen vil avkjølingen kunne neglisjeres så lenge arealet er mindre enn: $64 \times 7,2 \text{ m} \times 7,2 \text{ m} = 3318 \text{ m}^2$. Arealet av hallen er ca. 2755 m^2 ($130,925 \text{ m} \times 21,04 \text{ m}$), og røykens avkjøling mot tak og veggflater er dermed neglisjerbart.

Dimensjonering av røykventilasjon er knyttet til brannens utviklingsfase [1 s. 23]. Dimensjonerende brannstørrelse og brannareal angir hvor stor brannen er på det dimensjonerende tidspunkt, dvs. det tidspunktet rømning er utført og brannmann-

skapene starter slokkingen, eller sprinkleranlegget utløses. En må derfor bestemme hvor fort brannen vokser og hvilket tidspunkt en ønsker å dimensjonere for.

Karakteristisk brannareal

Først fastsettes karakteristisk brannareal (A_b) som angir størrelsen på et horisontalt areal av en mulig brann. Det karakteristiske brannarealet avhenger av lokalets plassering, mengde og type inventar, samt hvor lenge en røykfri sone skal opprettholdes. Deretter fastsettes taklukenes åpningsareal (A_v) som en funksjon av lokalets høyde og ønsket høyde på røykfri sone i henhold til HO-meldingens *Tabell A1: Termisk røykventilasjon* (Vedlegg C). Ved bruk av termisk ventilasjon beregnes areal for røykluker (avtrekk) og tilluftsluker. Ved mekanisk ventilasjon kan den nødvendige luftmengden avtrekksviftene må ventilere ut hentes fra HO-meldingens *Tabell A2: Mekanisk ventilasjon*, og er en funksjon av brannareal og ønsket høyde på røykfri sone.

Etter HO-meldingen er det valgt å kategorisere utstillingshallen som et mekanisk verksted/kontor da det er usikkert hva som kommer til å bli utstilt i hallen. Brannbelastningen settes dermed til 50-200 MJ/m² omhylningsflate i henhold til *Tabell 7-1*. Dette gir i følge tabellen en brannveksttid på 225 sekunder. Brannveksttiden angir tiden til brannens effekt når 1000 kW.

Siden utstillingshallen ligger i Oslo, som er et bystrøk, settes brannvesenets innsatstid til 15 minutter i henhold til veiledningens kapittel 7.7.4. Når brannvekst- og innsatstid er kjent, kan brannarealet bestemmes etter *Tabell 7-2*. Brannarealet i Alabasterhallen blir dermed 32 m² etter 15 minutter.

Frisiktshøyde

I følge veiledningen benyttes en frisiktshøyde på tre meter dersom rommet har stor takhøyde. Minstekravet til frisikt kan beregnes etter følgende formel [1 s. 32]:

$$1,6 \text{ m} + (0,1 \times H) \tag{4.2}$$

Dette gir et krav til frisiktshøyde på 2,32 meter for Alabasterhallen ($H = 7,2$ m). Siden lokalet som betraktes har stor takhøyde vil kravet om tre meter frisiktshøyde benyttes.

Nødvendig åpningsareal for avtrekk og tilluft

Ved tre meter frisikthøyde og et brannareal på 32 m^2 kan nødvendig åpningsareal bestemmes ved bruk av *Tabell A1: Termisk røykventilasjon*. I tilfellet med termisk røykventilasjon (Figur 4.12) gir dette et nødvendig åpningsareal, A_v , på $7,1 \text{ m}^2$. For å finne dette arealet er det nødvendig å interpolere verdiene i tabellen.

For mekanisk ventilasjon er den nødvendige avtrekksmengden bestemt. Himlingen er plassert 7,2 meter over gulvet, mens den fulle takhøyden i rommet er satt til åtte meter. Valg av himlings- og takhøyde er beskrevet nærmere i kapittel 4.2.4, Simuleringsmodell. Siden røyken i dette tilfellet kan stige til den fulle takhøyden (gjennom slissene) er en takhøyde på åtte meter benyttet. Dette gir et nødvendig åpningsareal, A_v , på $6,93 \text{ m}^2$, dvs. tilnærmet 7 m^2 .

I den videre utregningen er det benyttet likt nødvendig åpningsareal for både termisk og mekanisk avtrekk, dvs. 7 m^2 .

Areal av tillufts- og avtrekksluker settes likt i tilfellene med termisk ventilasjon, 7 m^2 . Med mekanisk ventilasjon bestemmes nødvendig tilluftsareal spesielt for de ulike tilfellene.

Plassering av avtrekk og tilluft

I følge veiledningen til TEK 10 forutsettes det at røykventilasjonen til en branncelle som skal ventileres ligger mot yttertak slik at røykluker kan aktiveres/åpnes for rask utlufting av branngasser [18]. Et alternativ er mekanisk røykventilasjon med kanaler med store tverrsnitt for å sikre rask utlufting.

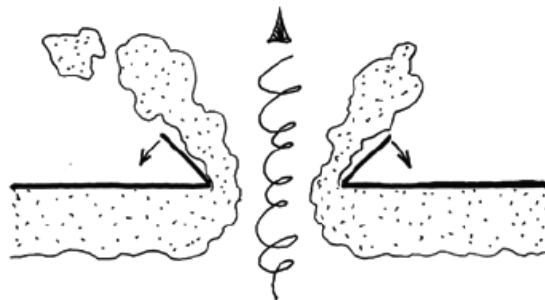
Siden risikoen for brann antas lik over hele hallen kan avtrekkslukene fordeles jevnt ut over taket. En jevn fordeling reduserer røykspredningen.

Plasseringen av avtrekksluker og -vifter er hovedsakelig gjort med tanke på å ventilere røyken bort fra rømningsveiene (trappehusene).

Tilluftslukene plasseres lavt og er jevnt fordelt utover hallen for å sikre sirkulasjon og oppdrift av branngassene. Ved mekanisk tilluft er det også forsøkt å plassere viftene jevnt fordelt i lokalet. I tilfellet med tilluftsvifter i trapperom vil det ikke være en like jevn plassering. Dette er forsøkt kompensert med økt tilluftshastighet ved denne plasseringen av viftene.

Avtrekks- og tilluftsmengde (vifter)

Dragsugeffekten legger begrensninger på maksimal avtrekksmengde. For å hindre at ren luft som ligger under røyksjiktet dras ut som vist i Figur 4.15, begrenses avtrekkshastigheten til 15 m/s.



Figur 4.15: Dragsugeffekten medfører at friskluft trekkes opp og delvis blokkerer røykavsuet. Figur gjengitt fra [1].

Verdier for avtrekksmengde for et brannareal på 32 m² og en frisiktshøyde på tre meter er ikke fylt ut i *Tabell A2: Mekanisk røykventilasjon*. Grunnen til at disse verdiene ikke er inkludert er ukjent, og fastsettelse av dem er dermed utført med en viss usikkerhet. For å fastsette verdiene er lineær ekstrapolasjon benyttet, se Vedlegg D. Stigningstallet i grafene for nødvendig luftmengde konvergerer for verdiene i *Tabell A2*. Nødvendig luftmengde i avtrekkene er dermed funnet til å være omtrent 52 m³/s. Nødvendig luftmengde dividert med åpningsareal (7 m²) gir en nødvendig avtrekkshastighet på omtrent 7,4 m/s. Denne verdien gir god margin til den

4. Analyse

maksimal avtrekkshastigheten på 15 m/s. Dersom det ved en senere anledning skulle være nødvendig, kan viftekapasiteten dermed økes.

Det stilles ikke temperaturkrav til tilluftsviftene fordi tilluften ikke er oppvarmet og derfor ikke ekspanderer [1]. Dette fører til at den dimensjonerende volumstrømmen kan reduseres med 20-50 % av den dimensjonerende volumstrømmen for avtrekksviftene. Hvis forskjellen mellom tillufts- og avtrekksmengde i viftene er stor er det større fare for overtrykk i rommet og økt risiko for røykinnmengning i trapperom, men dette avhenger av strømningsbildet i rommet. Det er mest konservativt å redusere volumstrømmen med 20 %, og denne reduksjonen er derfor valgt. Avtrekksviftene er dimensjonert for en volumstrøm på 52 m³/s. 20 % reduksjon gir dermed en nødvendig viftekapasitet på 41,6 m³/s for tilluftsviftene.

Lufthastigheten ved røyksjiktet bør ikke overstige 1,0 m/s da dette kan forstyrre brannen og forverre røykforholdene, og dermed føre til dårligere sikt [51]. For tilluftsvifter i fasaden settes tilluftshastigheten til 1,5 m/s. Dette fører til at nødvendig åpningsareal blir omtrent 28 m² (41,6 m³/s dividert på 1,5 m/s) for denne løsningen. Arealet fordeles på alle ytterveggene i hallen, og plasseres nede ved gulv.

Der tilluften er plassert i trapperommene er tilluftshastigheten satt til 5,2 m/s. Denne hastigheten er høyere enn tilluftshastigheten for fasaden, og høyere enn det som anbefales i den danske bransjenormen, *CFD Best Practice* [11], som er 5 m/s. Anbefalingen for maks tilluftshastighet skal hindre ukomfortabel motvind for personene i bygget. Verdien er valgt for å kunne redusere åpningsarealet, da det er den totale volumstrømmen som er dimensjonerende. Tilluftshastigheten tillates å settes høyere enn 5 m/s fordi det antas at luftens hastighet vil reduseres når den blåses ut og møter ytterveggene som er omtrent 3,6 meter fra viftene. Med tilluftshastighet på 5,2 m/s blir det nødvendige arealet for tilluft 8 m² (41,6 m³/s dividert på 5,2 m/s).

For å unngå at høy strømningshastighet fører til brannspredning er det anbefalt at den mekaniske røykventilasjonen økes i to trinn [51]. Først med f.eks. halv luftmengde, før luftmengden gradvis økes til full effekt etter 30 sekunder eller mer.

4.2.3 Brannsimulering

Verktøyet som er brukt i analysen for å modellere Alabasterhallen er Pyrosim 2011 og 2012. Ved å bruke Pyrosim slipper en å skrive FDS-koden manuelt, noe som gjør modelleringen ved større komplekse systemer mer effektivt. Det er allikevel viktig å være godt kjent med koder i FDS for å kunne kontrollere eventuelle feil under modellering. Begrunnelse for valg av programvaren FDS er gitt i avsnitt 2.2.2.

4.2.4 Simuleringsmodell

I dette kapittelet er modellens oppbygning og egenskaper beskrevet. Det er redegjort for valgte inndataparametre samt referanser til aktuell FDS-teori som er gjennomgått og beskrevet i litteraturstudiet.

Planløsning og geometri

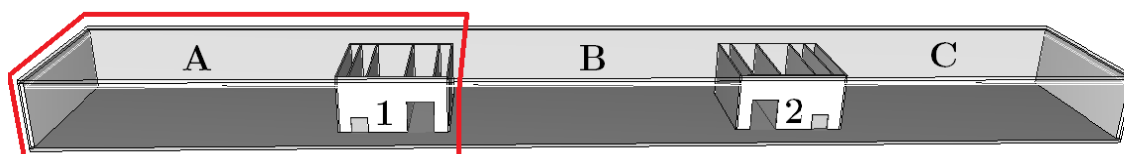
Alabasterhallen ligger i Nasjonalmuseets fjerde etasje og måler i utgangspunktet 130,925 m x 21,04 m x 7,5 m (l x b x h, innvendige mål). Det er planlagt såkalte servicerom med flere etasjer i ytterveggene. For å forenkle simuleringene og for tilpasning til meshets cellestørrelse er hallen konstruert med følgende mål: 130 m x 20 m x 8 m (innvendige mål). Omhyllingsflatene er også forenklet, og servicerom i yttervegg ses bort i fra. Alle yttervegger, samt tak og gulv, er satt til en tykkelse på 0,4 meter, mens alle innervegger (vegger i trapperom) og himlingen er valgt til 0,2 meter.

Alle mål på rom, vegger og inventar i hallen er satt til å gå opp i heltall dersom de divideres på cellestørrelsen i meshet som er benyttet på ethvert sted i modellen, dvs. at hvis cellestørrelsen er 0,2 meter i en mesh, må alle målene på objektene som omsluttet av dette meshet kunne divideres på 0,2.

4. Analyse

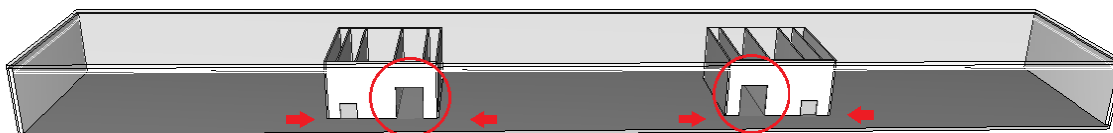
Hallen er delt inn i tre deler (A, B og C) og trapperommene er nummerert (1 og 2) for å gjøre beskrivelsen av løsningen mer forståelig, se Figur 4.16.

For de innledende simuleringene er det av tidsbesparende og kapasitetsbesparende årsaker valgt å simulere kun en del av hallen (del A, markert med rødt i Figur 4.16). Denne delen måler 48 m x 20 m x 8 m (l x b x h, innvendige mål), og utgjør ca. en tredjedel av det totale arealet. Det er vurdert slik at modellstørrelsen på de innledende simuleringene er tilstrekkelig til å ta beslutninger for de ulike parametrene som er benyttet i hovedsimuleringene. Hovedsimuleringene er utført på hele hallen.



Figur 4.16: Inndeling av soner i modellen.

Trapperommene måler i utgangspunktet 13,05 m x 13,75 m og 13,035 m x 13,75 m, men er i modellen forenklet til 13,2 m x 12,8 m. Trapperommene er ført nedover i bygget og inneholder heissjakter og trapper. Trappene fungerer som rømningsvei, se Figur 4.17. Bredden og høyden på åpningen til trapperommene i Alabasterhallen er henholdsvis tre og fire meter. I modellen er åpningene satt til en bredde på 3,2 meter og en høyde på fire meter for å tilpasse målene til de ulike meshoppløsningene. Rømningsveier skal i følge veiledningen til TEK 10 ha en minimumsbredde på 1,2 meter for byggverk i risikoklasse 3, 5 og 6 [18]. I tillegg skal samlet fri bredde være minimum 1 cm per person. I Alabasterhallen tilsvarer dette en bredde på totalt seks meter (600 personer x 1 cm), noe som vil tilfredsstilles med en dørbredde på tre meter i begge trapperommene.



Figur 4.17: Rømningsvei i trapperom merket med rød ring.

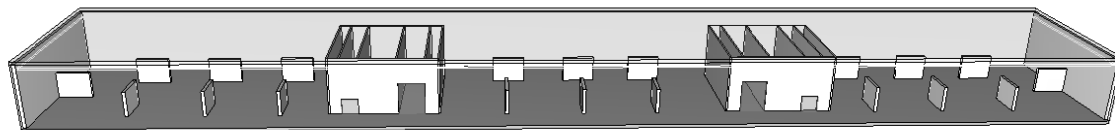
Det er valgt å lukke åpningen mellom hallens plan og de underliggende etasjene i trapperommene i simuleringsmodellen da dette antas å gi minst gunstige forhold. Med åpning vil det være et større luftvolum disponibelt for brannen, noe som vil gi urealistisk gode tilluftsforhold.

Frittstående vegger / åpen løsning

Planløsningen i Alabasterhallen er rimelig enkel, og består av et åpent areal som kun deles opp av to trapperom med passasje på sidene. Det antas derimot at det vil kunne benyttes frittstående vegger plassert på flere steder i hallen for å dele opp lokalet slik at utstillingene blir adskilt, samtidig som det skaper større veggareal å montere kunst på. I de innledende simuleringene er det valgt å benytte en løsning med frittstående vegger, og en åpen løsning uten vegger. Siden det er et uendelig antall mulige konfigurasjoner (materialer, geometri og plasseringer) av eventuelle frittstående vegger som kan benyttes i hallen, vil det være en stor usikkerhet knyttet til dette valget. Valgte løsninger er beskrevet nedenfor.

1. Veggløsning:

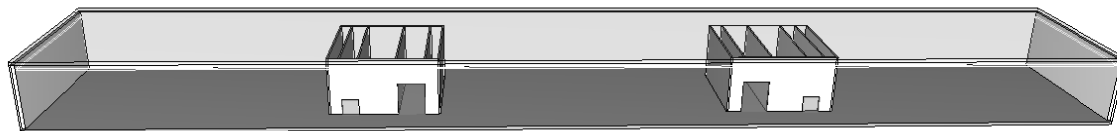
På venstre side av trapperom 1, mellom trapperommene og på høyre side av trapperom 2 plasseres det tre vegger etter hverandre i lengderetning, og tre vegger ved siden av hverandre på tvers av lengderetningen, se Figur 4.18. En vegg plasseres normalt på hver av ytterveggene på kortsidene av hallen. Dette utgjør sju vegger i del A og C, og seks vegger i del B, noe som gir totalt 20 vegger i hele hallen. Veggens dimensjoner er satt til 6 m x 0,4 m x 3,2 m (l x b x h).



Figur 4.18: Løsning med frittstående vegger.

2. Åpen løsning:

Her benyttes det ingen frittstående vegger. Sett bort fra trapperommene gir dette en helt åpen planløsning, se Figur 4.19.

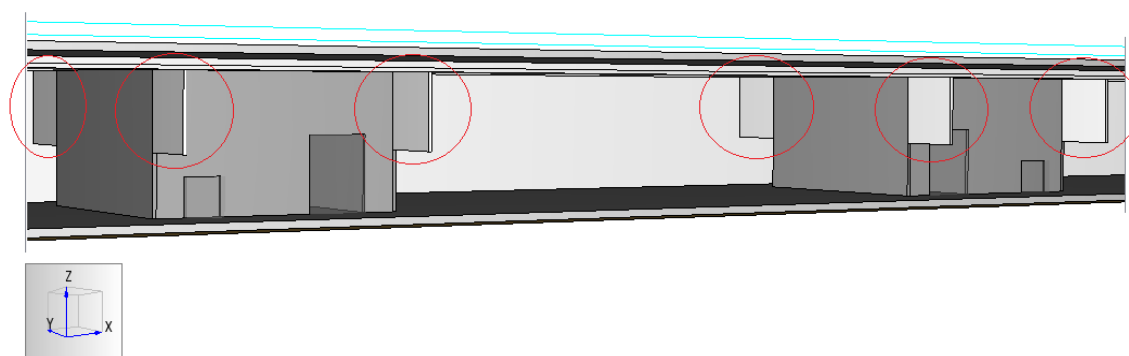


Figur 4.19: Åpen løsning.

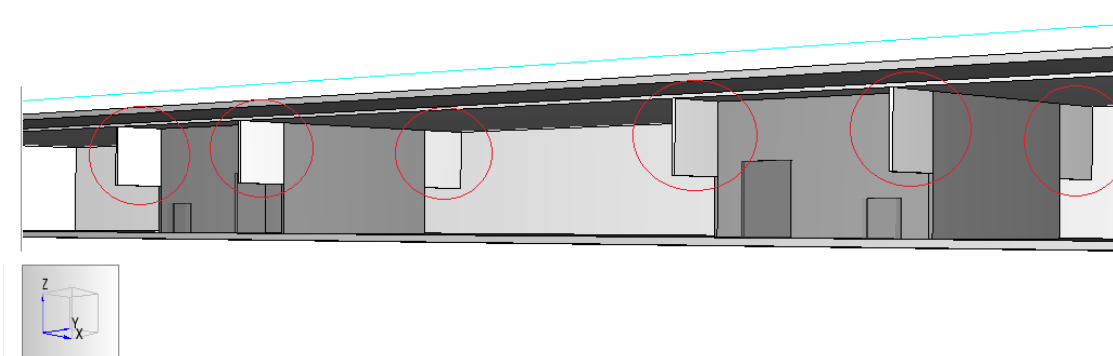
Røykseksjonering

Røykskjerner deler hallen inn i flere mindre røykseksjoner og er kun benyttet i hovedsimuleringene. Røykskjermenes avstand fra hverandre må, som nevnt i kapittel 3.6, ikke overstige åtte ganger romhøyden [51], som i Alabasterhallen er 57,6 meter (7,2 meter romhøyde). Hallen måler omtrent 130 meter og tenkes delt i fem røykseksjoner. Røykskjermene har en avstand på maksimalt 35,4 meter og tilfredsstillende dermed dette kravet.

Røykskjermene er plassert på tvers av lokalet i tilknytning til trapperommene, som vist i Figur 4.20. Det er tenkt benyttet røykskjerner som er festet på skinner inne i eller utenpå trapperomsveggene og som ved utløsning av røykvarslingsanlegg automatisk kjøres ut mellom trapperom og yttervegg. Det er plassert totalt åtte røykskjerner i hallen med dimensjoner på 3,6 m x 0,2 m x 4 m (l x b x h). Røykskjermene strekker seg fra trapperom til yttervegg og vil i virkeligheten ikke være 0,2 meter tykke, men er modellert slik i simuleringene for å tilpasse objektene til meshet.



(a)



(b)

Figur 4.20: Røykskjermenes plassering i tilknytning til trapperommene.

I henhold til HO-meldingen er ventilasjonssystemet beregnet med et krav til frisikts- høyde på tre meter. Røykskjermenes høyde på fire meter (fra himling og ned) er valgt for å oppfylle dette kravet.

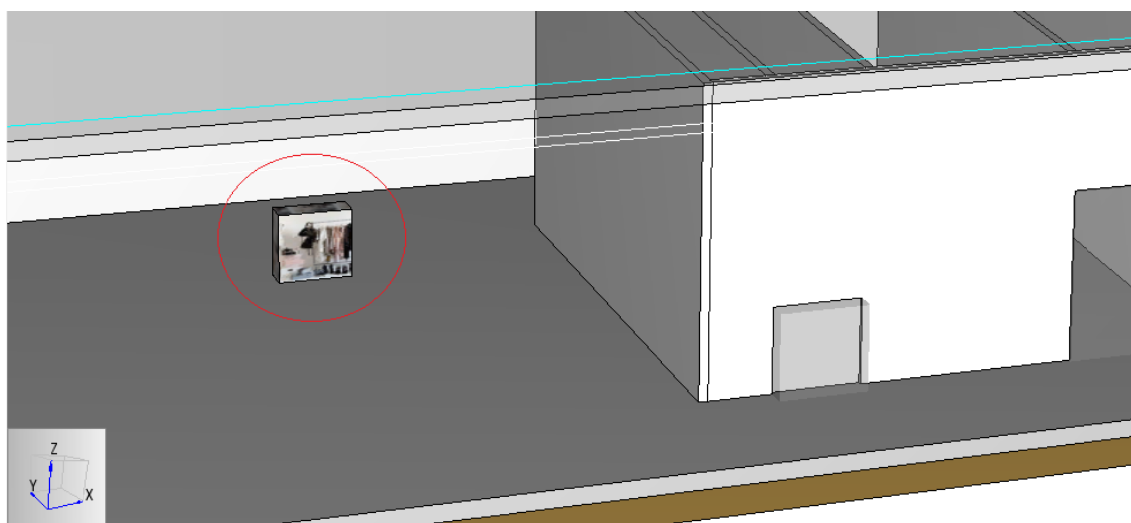
Forbrenningsreaksjoner

For å definere forbrenningsreaksjonen i modellen er HRRPUA-metoden benyttet fordi denne metoden er mindre tidkrevende enn "Heat of reaction"-metoden (beskrevet i kapittel 3.5).

I de innledende simuleringene er det benyttet to forskjellige forbrenningsreaksjoner, en for brannscenario 1 og en for brannscenario 2, henholdsvis brann i utstillings- dukker og brann i bil (det vises til kapittel 4.1.9 for forklaring av brannscenarioene).

Brannscenario 1

Data fra Test C i den canadiske studien er valgt som grunnlag for brann i utstillingsdukker. Testen er omtalt i kapittel 4.1, Kvalitativ analyse, og er utført på ulike klesstativer. Brenneren er modellert som en blokk med målene 1,6 m x 0,6 m x 1,6 m (l x b x h) og skal forestille et klesstativ (utstillingsdukker), se Figur 4.21. Det er valgt å sette blokkens toppflate som brennende overflate. Overflatearealet, A , er 1,6 m x 0,6 m, dvs. 0,96 m²



Figur 4.21: Brenneren i brannscenario 1. Bildet er hentet fra Smokeview.

HRRPUA beregnes på følgende måte:

$$HRRPUA = \frac{HRR_{maks}}{A} \quad (4.3)$$

HRR_{maks} er 1528 kW og HRRPUA blir dermed som følger:

$$HRRPUA = \frac{1528 \text{ kW}}{0,96 \text{ m}^2} \approx 1590 \text{ kW/m}^2$$

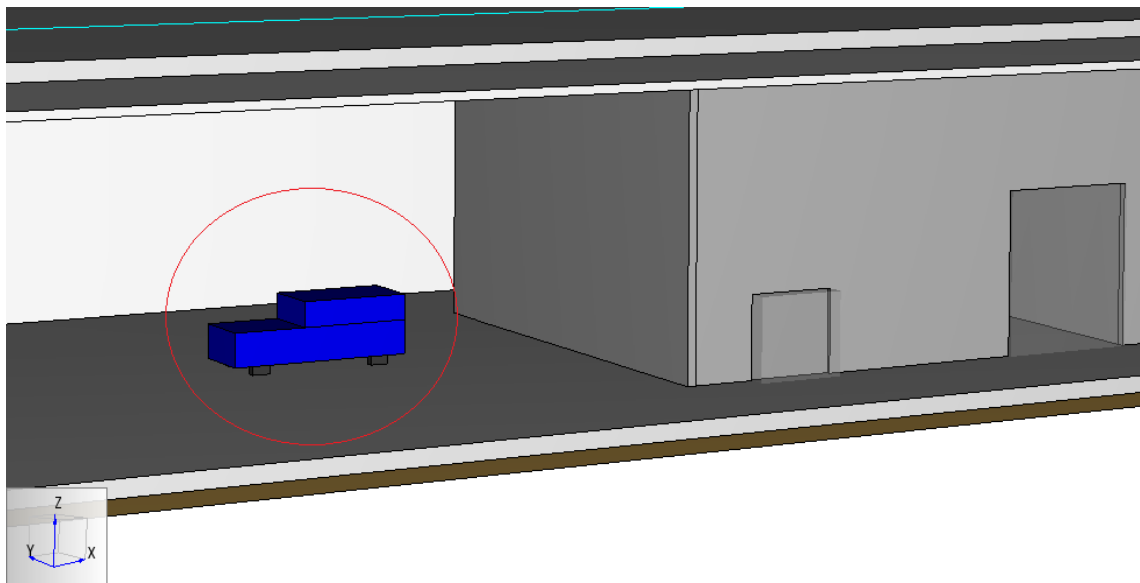
Klesstativet i den canadiske testen inneholdt 86 % tekstiler [85]. I oppgaven er det valgt å bruke bomull som brensel. Bomull består av 94 % cellulose [86], og den kjemiske formelen for cellulose er $(C_6H_{10}O_5)_n$ [87]. 12 % av brenselet i testen er

tre/papir, og cellulose er derfor benyttet også her. Totalt gir dette et celluloseinnhold på 98 %, mens de resterende 2 % er plast. Som plastmateriale er polyuretan benyttet, da dette materialet avgir store mengder røyk når det brenner [54]. Den kjemiske formelen for polyuretan er $C_{6,3}H_{7,1}NO_{2,1}$ [87] [Appendix C, Table C.3]. For å kunne måle omtrentlige konsentrasjoner av CO og CO₂ defineres brenselet med en kjemisk formel sammensatt av cellulose og polyuretan.

Bomull er praktisk talt ren cellulose og kan antas å ha samme forbrenningsvarme [88]. Den endelige forbrenningsvarmen er sammensatt av verdier funnet for cellulose (98 %) og polyuretan (2 %), henholdsvis 16 090 kJ/kg [88] og 9600 kJ/kg [89], noe som tilsvarer 15 960,2 kJ/kg totalt.

Brannscenario 2

Data fra fullskalaforsøket i Nederland er valgt som grunnlag for brann i bil. Forsøket er omtalt i kapittel 4.1, Kvalitativ analyse. Brenneren er modellert med seks rektangulære objekter, hvorav en nedre del, en øvre del og fire dekk, se Figur 4.22. Den øvre delen med takflate er satt til å være brennerens overflate, og har følgende mål: 2,4 m x 1,6 m (l x b).



Figur 4.22: Brenneren i brannscenario 2. Bildet er hentet fra Smokeview.

HRR_{maks} er 4900 kW og ved bruk av likning (4.3) blir HRR_{PUA} som følger:

$$HRR_{PUA} = \frac{4900 \text{ kW}}{3,84 \text{ m}^2} \approx 1276 \text{ kW/m}^2$$

En blanding av 60 % heptan og 40 % toluen er benyttet som forbrenningsreaksjon. De kjemiske formlene for heptan og toluen er henholdsvis C_7H_{16} og C_7H_8 [87].

Forbrenningsvarmen for blandingen er satt sammen av verdier fra SFPEs *Handbook of Fire Protection Engineering* [87] [Appendix C, Table C.1]. Heptan og toluen har en forbrenningsvarme på henholdsvis 44 400 kJ/kg og 40 900 kJ/kg, og blandingen får dermed en total forbrenningsvarme på 43 000 kJ/kg.

Varmeavgivelseshastighet og brannvekst

Varmeavgivelseshastigheten for begge brannene i modellen er hentet fra det canadiske og det nederlandske forsøket, og begge når en maksimal effekt etter en gitt tid.

Brannscenario 1

Ved brann i utstillingsdukker er det benyttet en forsinkelse på fem minutter før full effekt er nådd og $HRR_{maks} = 1,528$ MW. Brannutviklingen følger en t^2 -brann, og etter at HRR_{maks} er nådd fortsetter brannen å brenne med denne effekten ut simuleringen. I FDS er det også mulig å legge inn HRR-verdier for hele brannforløpet, slik at antennelses- og nedkjølingsfasen bestemmes manuelt i henhold til ønskede forsøk. Dersom HRR er kjent, er resultatene fra FDS minimum 80 % kompatible med eksperimenter [27]. Dersom HRR ikke er kjent, men forventede verdier er benyttet, er usikkerheten større. Selv om det innebærer en større usikkerhet, er det valgt å sette $HRR = HRR_{maks}$ etter at maks effekt er oppnådd fordi det er sannsynlig å anta at andre objekter tar fyr før utstillingsdukkene har brent opp.

Brannscenario 2

Bilbrannen når full effekt etter 11 minutter. HRR_{maks} er i den nederlandske testen oppgitt til å være 4,9 MW. Brannutviklingen for brannscenario 2 er noe forenklet og

er satt til å følge en t^2 -brann. Som i brannscenario 1 er det også valgt å sette $HRR = HRR_{maks}$ etter at maksimal effekt er oppnådd.

Produksjon av CO og sot

CO-produksjonen i den tidlige brannfasen er sterkt avhengig av hvilket materiale som brenner [90]. Dersom det brenner i et stort rom er det forventet at brannen er brenselskontrollert [91]. Rimelige sotverdier for velventilerte branner er 0,05-0,10 g/g dersom brenselet som brenner avgir sot, mens lavere verdier er hensiktsmessig dersom et renere brennende brensel eller treprodukter brenner.

Brannscenario 1

Det viste seg å være vanskelig å finne verdier for CO- og sotproduksjon for den valgte blandingen av cellulose og polyuretan. En studie av polyuretanskum og bomulls-materialer utført i konkalorimeter ga maksimale CO-verdier på 0,0513 g/g [92]. SFPEs *Handbook of Fire Protection Engineering* angir CO-verdier for fleksibelt polyuretanskum på mellom 0,010-0,042 g/g og fast skum på mellom 0,031-0,051 g/g [93]. Det er også angitt sotverdier på mellom 0,131-0,227 g/g for fleksibelt polyuretanskum, og 0,104-0,130 g/g for fast skum. CO-verdier for ren cellulose er ikke funnet.

Grunnet manglende opplysninger om CO-produksjon for et blandingsmateriale av polyuretan og cellulose er det valgt å benytte generiske verdier anbefalt i *Boverkets Författningssamling* [94]. Samlingen er utgitt av den svenske byggforvaltningsmyndigheten, og inneholder Boverkets allmenne råd for bygningers brannsikkerhet. Verdiene som er valgt er 0,10 g/g for både CO- og sotproduksjon.

Brannscenario 2

Som tidligere nevnt er CO-produksjonen i den tidlige brannfasen sterkt avhengig av materialet som brenner. I dette scenarioet er det derfor valgt å benytte verdier for CO-produksjon for materialene som brannen starter i. For bilbrannen er verdier for CO- og sotproduksjon for heptan- og toluenblanding satt til henholdsvis 0,114 g/g og 0,042 g/g. Begge verdiene er gjennomsnittlige verdier fra tester på hydrokarbon-

branner utført av NIST [95]. Forsøkene er gjort i "open environment" (ute i åpent landskap) og på branner i størrelsesorden 1-3 MW. Ulikheten mellom omgivelsene forsøkene er utført i, og tilfellet som oppgaven vurderer, gir grunnlag for usikkerhet. Siden Alabasterhallen rommer et stort volum, er tilgangen på oksygen høy, og antakeligvis ikke så ulik omgivelsene forsøkene er utført i.

Simuleringer

Oversikt over alle simuleringer som er gjennomført i oppgaven er listet i Tabell 4.6. Det første tallet i simuleringens navn plasserer simuleringen i en gruppe. Gruppe 1 til 5 er innledende simuleringer, mens gruppe 6 og 7 er hovedsimuleringer. En kort forklaring til alle simuleringegruppene gjennomgås under. FDS-koder for, og utdata fra, alle de gjennomførte simuleringene finnes i Vedlegg E og Vedlegg F.

Tabell 4.6: Oversikt over alle simuleringer ("br.sc." står for brannscenario).

| Navn | Tid (s) | Beskrivelse |
|---|-----------|--|
| 1_20-20-20_grovsimulering | 1614 | Grov prinsippsimulering, 4 MW brann |
| 2_40-20-20 | 1800 | Sensitivitetsanalyse, 1/3 av hallen, br.sc. 1, åpen planløsning |
| 2_40-10-10 | 900 | " |
| 2_40-10-05 | 900 (520) | " |
| 2_20-20-20 | 900 | " |
| 2_20-20-10 | 900 | " |
| 2_20-10-10 | 900 | " |
| 2_20-10-05 | 900 (516) | " |
| 3_40-20-20_small_w | 1800 | 1/3 av hallen, br.sc. 1, frittstående vegger |
| 3_40-20-20_large | 1800 | 1/3 av hallen, br.sc. 2, åpen planløsning |
| 3_40-20-20_large_w | 1800 | 1/3 av hallen, br.sc. 2, frittstående vegger |
| 3_40-20-20_large_w_adiabatic_lightweightwalls | 1800 | 1/3 av hallen, br.sc. 2, frittstående vegger (adiabatisk) |
| 4_40-20-20_small_adiabatic | 1800 | 1/3 av hallen, br.sc. 1, adiabatisk vegger |
| 5_40-20-20_smokelid+ | 1800 | 1/3 av hallen, br.sc. 1, åpen løsning, større røyklukeareal |
| 6_ho | 1800 | Hele hallen, br.sc. 2, termisk røykventilasjon etter HO-meldingen, røykluker i tak/himling og tilluftsluker i fasade |
| 7_slots | 1800 | Hele hallen, br.sc. 2, termisk røykventilasjon med slisser i himling, røykluker i tak og tilluftsluker i fasade |
| 7_7.4out | 1800 | Hele hallen, br.sc. 2, mekanisk/termisk røykventilasjon med slisser i himling, røykvifter i tak og tilluftsluker i fasade |
| 7_7.4out_1.5in | 1800 | Hele hallen, br.sc. 2, mekanisk røykventilasjon med slisser i himling, røykvifter i tak og tilluftsvifter i fasade |
| 7_7.4out_5.2in | 1800 | Hele hallen, br.sc. 2, mekanisk røykventilasjon med slisser i himling, røykvifter i tak og tilluftsvifter i trapperomsvegg |

Gruppe 1

Simulering *1_20-20-20_grovsimulering* ble kjørt svært tidlig i arbeidet med oppgaven. Røykventilasjonen i denne simuleringen består av en rekke med 20 cm høye slisser gjennom langveggene nært tak hvor røyken kan bevege seg direkte ut i friluft. Tilluft ble løst på tilsvarende måte med 20 cm brede slisser, plassert i rekke nede langs gulvet i langveggene. Med et totalt røyklukeareal på 48 m² og et tilluftsareal på 47 m² er røykventilasjonen svært overdimensjonert. I denne simuleringen er det valgt en 2 m x 2 m polyuretanbrann med HRR på 4 MW og ingen tidsforsinkelse, dvs. at brannen ”eksploderer” i full effekt ved simuleringsstart. Brannen vokser ikke naturlig, men når maksimal HRR umiddelbart.

Simuleringen har lav detaljeringsgrad og selve modellen og dens egenskaper er i stor grad endret i de senere simuleringene. Det er f.eks. ingen røykskjermer som deler hallen opp i røykseksjoner.

Hensikten med simuleringen er å undersøke om prinsippet med 20 cm slisser fungerer som røykventilasjon og i det hele tatt er gjennomførbart, samt muligheten for å simulere en stor modell med tanke på meshoppløsning og simuleringstid. Det er brukt et mesh for hele hallen med cellestørrelse 20 cm x 20 cm x 20 cm.

Gruppe 2

Simuleringene i gruppe 2 er gjennomført for å bestemme hvilken meshoppløsning som er mest ideell å benytte for brannsimulering i Alabasterhallen. Dette er en sensitivitetsanalyse, og simuleringene er gjort på en tredjedel av hallen. Røykventilasjonen består av en 20 cm bred, gjennomgående slisse i himling langs begge langveggene og røykluker i tak plassert omtrent midt i del A. Tilluftsluker er plassert nede ved gulv i langveggene i nærheten av trapperom, og måler totalt 7 m² for hele hallen.

Den valgte brannen for disse simuleringene er brannscenario 1 med maksimal HRR = 1,528 MW etter fem minutter. Det ble kjørt sju simuleringer med ulike

meshoppsett med en blanding av 40, 20, 10 og 5 cm store celler. Simuleringene i gruppe 2 har høyere detaljeringsgrad enn simuleringen i gruppe 1.

Gruppe 3

Simuleringene i gruppe 3 er gjennomført for å vurdere hvilket brannscenario som er det dimensjonerende. Det er kjørt fire simuleringer som alle har samme meshoppsett som simulering 2_40-20-20 fra gruppe 2 for å kunne sammenligne simuleringene i gruppe 3 med denne. 2_40-20-20 er kjørt med brannscenario 1 og åpen planløsning, dvs. ingen frittstående vegger. Simuleringene som er kjørt i gruppe 3 er brannscenario 1 med inerte frittstående vegger, brannscenario 2 med inerte frittstående vegger, brannscenario 2 med åpen planløsning, og brannscenario 2 med adiabatisk frittstående vegger. Simuleringene har samme røykventilasjonsløsning og detaljeringsgrad som gruppe 2.

Gruppe 4

Simuleringen i gruppe 4 er gjennomført for å vurdere hvilke grensebetingelser som skal velges for ytterveggene i hallen. Det er kjørt en simulering i denne gruppen hvor alle yttervegger er satt til adiabatisk. Denne simuleringen er sammenlignet med simulering 2_40-20-20 fra gruppe 2 hvor det er benyttet yttervegger med inerte grensebetingelser. Foruten grensebetingelsene på veggene er simuleringen identisk med oppsettet i gruppe 2 og 3.

Gruppe 5

Simuleringen i gruppe 5 er gjennomført for å teste røykventilasjonen med et større røyklukeareal enn først benyttet. HO-meldingen tar ikke hensyn til rommets lengde og bredde (kun takhøyde) når lukeareal beregnes, og det er derfor kjørt simuleringer hvor det beregnede røyklukearealet for hele hallen er lagt inn på hver del av hallen (A, B og C). Dvs. at det totale røyklukearealet for hele hallen er $3 \times 7 \text{ m}^2 = 21 \text{ m}^2$. Tilluftsarealet er tilnærmet likt som røyklukearealet. Simuleringen har ellers samme oppsett som simuleringene i gruppe 2 til 4, og kjøres også her på kun en tredjedel av hallen. Røyk- og tillufts-lukearealet er dermed begge 7 m^2 .

Gruppe 6

Simuleringen i gruppe 6 er gjennomført for å teste tradisjonell termisk røykventilasjonsløsning dimensjonert etter HO-melding. Denne simuleringen er kjørt over hallens totale størrelse, og detaljeringsgraden er høyere enn i de innledende simuleringene (gruppe 1 til 5). Avtrekks- og tilluftslukers størrelse og plassering er beskrevet nærmere i avsnittet Ventilasjonsforhold senere i dette kapittelet. I korte trekk løses røykavtrekket ved bruk av røykluke i tak med sjakt ned til åpning i himling.

Lukearealet som er benyttet i denne simuleringen er likt som i gruppe 5.

Brannscenarioet som er valgt for simuleringen i gruppe 6 er brannscenario 2 (bil) og åpen planløsning, dvs. ingen frittstående vegger. Grensebetingelser på yttervegger er satt til INERT.

Gruppe 7

Simuleringer i gruppe 7 tar for seg ulike alternative røykventilasjonsløsninger med 20 cm brede slisser i himlingen langs alle ytterveggene. Det er foretatt simuleringer med både termisk og mekanisk ventilasjon. Disse simuleringene er i likhet med simuleringen i gruppe 6 kjørt over hallens totale størrelse, og har en høyere detaljeringsgrad enn de innledende simuleringene (gruppe 1 til 5).

Brannscenarioet som er valgt for simuleringene i gruppe 7 er brannscenario 2 med åpen planløsning, dvs. ingen frittstående vegger. Grensebetingelser på yttervegger er satt til INERT.

FDS-koden for en av simuleringene i gruppe 7 er vist i Vedlegg G.

Sensorer og måleinstrumenter

En utfordring ved bruk av FDS er at detaljnivået på resultatene praktisk talt er ubegrenset. Dette stiller krav til brukeren både når det gjelder valg av utdata og plassering av måleinstrumenter. Det er satt opp ulike sensorer og måleinstrumenter i simuleringsmodellen. Det er gjort flere målinger enn det som kanskje er nødvendig,

men dette er valgt bevisst da det ikke er mulig å hente frem resultater i etterkant av at simuleringene er kjørt, så fremt det ikke er spesifisert på forhånd. I hovedsak er det forsøkt å foreta målinger i områder av interesse, f.eks. i brannområdet, i nærheten av rømningsvei, i ventilasjonsslisser, i avtrekks- og tilluftsluker og -vifter. Sensorer og måleinstrumenter er brukt for å gi svar på om røykventilasjonsløsningene fungerer slik de er ment, og om evakueringsforholdene er tilstrekkelige i henhold til krav og anbefalinger gitt i regelverket. Målingene er også brukt til å vurdere de ulike løsningene opp mot hverandre.

Følgende måleinstrumenter er definert i modellen:

- termperaturmålere (Thermocouples)
- hastighetsmålere (Gas-phase Devices)
- målere for varmekraft fra stråling (Gas-phase Devices og Solid-phase Devices)
- instrumenter som måler røyksjiktets høyde (Layer Zoning Devices)
- sensorer som måler røykformørkelse (Beam Detector Devices)
- CO₂-sensorer (Gas-phase Devices)
- CO-sensorer (Gas-phase Devices)
- O₂-sensorer (Gas-phase Devices)
- varmestrålingssensorer (Solid-phase Devices)

Sensorer som måler røykformørkelse, Beam Detector Devices, er beskrevet nærmere i avsnittet Siktforhold nedenfor.

I tillegg til disse sensorene og måleinstrumentene er det lagt inn flere ulike "slice"-filer (SLCF) for å visualisere ulike strømningsmønstre i modellen over et større område. Følgende parametre måles ved hjelp av SLCF:

- temperatur
- hastighet
- turbulensoppløsning (MTR)

For nøyaktig plassering av sensorer og måleinstrumenter henvises det til FDS-koder (merket DEVC og SLCF) i Vedlegg E.

Siktforhold

Røykformørkelsen er målt ved hjelp av Beam Detector Device, og er målt i områder som anses som kritiske med tanke på rømning, bl.a. midt i del A, B og C og i og ved rømningsveier. Det er også lagt inn en Beam Detector i høyde 6,9 meter like under himling som brukes til å aktivere røykskjermer.

Målepunktene midt i del A, B, C og i/ved rømningsvei er plassert to og tre meter over gulvet. Plasseringene er valgt for å vurdere sikt i menneskehøyde (to meter), og sjekke om kravet til røykfritt sjikt på tre meter overholdes.

Resultater fra "Beam Detector"-målingene er gitt i prosent røykformørkelse per meter målelengde. For å vurdere om personsikkerheten er ivaretatt er røykformørkelsen regnet om til sikt, gitt i meter, slik at krav til rømningsforhold kan kontrolleres. For å gjøre dette er det først funnet en sammenheng mellom sikt og optisk tetthet.

Optisk tetthet bestemmes ved å måle svekkelsen av en lysstråle som sendes gjennom røyk [48]. Den optiske tettheten måles i *optisk tetthet per meter røyk*. Følgende likning gir en korrelasjon mellom sikt og optisk tetthet per meter røyk [48 s. 381]. Parametrene som er brukt i formel (4.4) til (4.7) nedenfor er beskrevet i Tabell 4.7.

$$V = \frac{10}{\frac{D_{10}}{L}} \text{ [m]} \quad (4.4)$$

Sikten øker når den optiske tettheten minker. Denne sammenhengen ble påvist av Rabash og beskrives i boka *Introduction to Fire Dynamics* [48]. Sammenhengen gjelder for generelle røykforhold, og ikke for belyste skilt der andre sammenhenger gjelder.

Følgende likninger viser henholdsvis optisk tetthet (4.5) og prosent formørkelse (4.6) [48 s. 380]:

$$D_{10} = -10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) [\text{dB}] \quad (4.5)$$

$$\text{Prosent formørkelse} = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100 \% \quad (4.6)$$

Det er ønskelig å finne tillatt formørkelse i prosent ut i fra ulike siktkrav, typisk tre meter og ti meter. Likning (4.7) som er utledet fra likningene (4.4), (4.5) og (4.6) gir prosent tillatt formørkelse avhengig av ønsket siktkrav:

$$\text{Prosent tillatt formørkelse} = (1 - 10^{-\frac{L}{V}}) \times 100 \% \quad (4.7)$$

Tabell 4.7: Parametre for beregning av sikt.

| | |
|-------|--|
| I_0 | Lysintensitet som treffer sensoren dersom det ikke er røyk til stede |
| I | Lysintensitet som treffer sensoren (ved tilstedeværelse av røyk) |
| D | Optisk tetthet [dB] |
| L | Målt lengde [m] |
| V | Sikt (visibility) [m] |

Siktkrav gitt i HO-melding er som følger [1]:

- røyktetthet i brannrommet kan være maksimalt 3,3 dB/m (dvs. minimum tre meter sikt)
- røyktetthet i rømningsveier kan være maksimalt 1,0 dB/m (dvs. minimum ti meter sikt)

I Tabell 4.8 vises tillatt røykformørkelse ved disse siktkravene for ulike målelengder.

Tabell 4.8: Tillatt formørkelse ved ulike siktkrav og for ulike målelengder (L).

| Siktkrav [m] | Formørkelse | | Formørkelse | | Formørkelse | | Formørkelse | |
|--------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| | L [m] | Formørkelse [%] | L [m] | Formørkelse [%] | L [m] | Formørkelse [%] | L [m] | Formørkelse [%] |
| 3 | 1 | 53,36 | 3,2 | 91,42 | 10 | 99,95 | 20 | 99,99 |
| 10 | 1 | 20,57 | 3,2 | 47,86 | 10 | 90,00 | 20 | 99 |

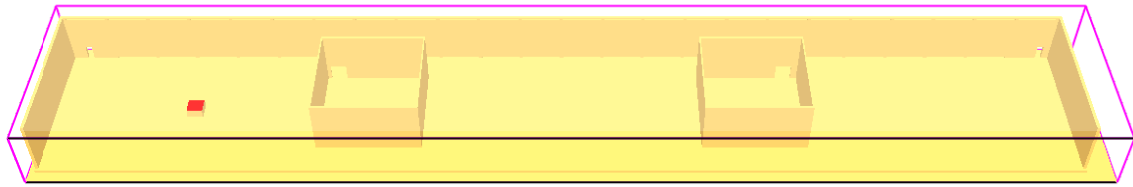
Som Tabell 4.8 viser, lønner det seg å ha måleavstander (L) og siktkrav i harmonerende størrelse. Dersom måleavstanden (L) er mye større enn siktkravet, vil formørkelsen være vanskeligere å måle. Et eksempel på dette er måleavstand på 20 meter. Av tabellen ser en da at tillatt formørkelse er meget høy. Dette er fordi måleavstanden er stor, slik at variasjoner i mengden lys som må trenge igjennom eventuell røyk blir meget liten. Det blir dermed vanskelig å måle endringer i formørkelsen, og en liten målefeil kan få meget store utslag. Dersom målelengden og siktkravet er noenlunde likt, f.eks. tre meter, vil variasjonene i tillatt formørkelse komme tydeligere frem, og det er lettere å måle tillatte verdier. Det er benyttet ulike målelengder på ulike steder i hallen, og kravet til prosent tillatt formørkelse vil dermed variere.

4.2.5 Vurdering av innledende simuleringer

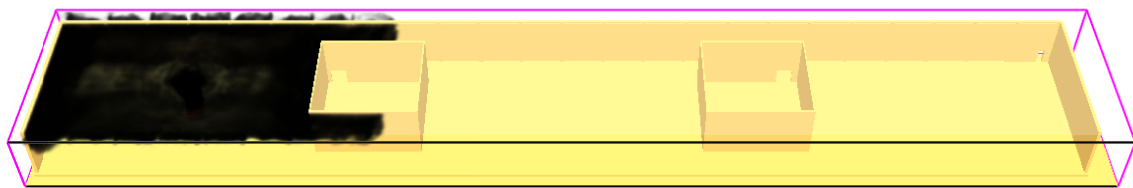
Potensiale for alternativ røykventilasjon (gruppe 1)

Simulering 1_20-20-20 i gruppe 1 viser at det finnes potensiale i den alternative måten å røykventilere på (med slisser). Simuleringen viser at HRR holdes konstant på 4 MW gjennom hele simuleringstiden. Røyken oppfører seg som forventet på bakgrunn av litteratur gitt i kapittel 3.6, Røyk og røykventilasjon. I Figur 4.23 kan en se hvordan røyken utvikler seg og beveger seg ut av avtrekksslissene langs langveggene

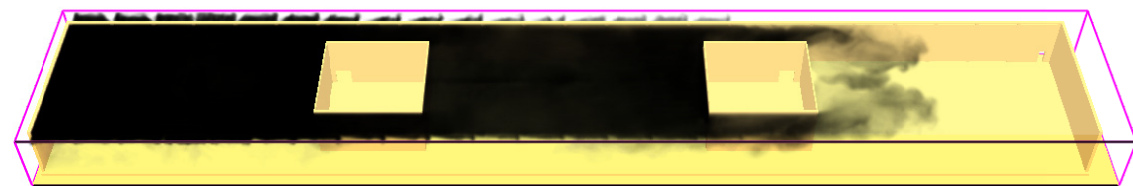
ved tak. Tilluft er utformet på tilsvarende måte som avtrekksslissene, men er plassert i langveggene nede langs gulv (dette er ikke så lett å se i figuren).



(a) 0 sekunder



(b) 21,6 sekunder



(c) 201,6 sekunder

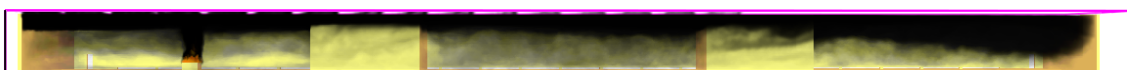
Figur 4.23: Røykutvikling i simulering 1_20-20-20_grovsimulering ved (a) 0 sekunder, (b) 21,6 sekunder og (c) 201,6 sekunder. Utviklingen er sett på skrå ovenfra, hvor en i (b) og (c) kan se avtrekksslissene i langvegger ved tak. Bilder er hentet fra Smokeview.

Som vist i Figur 4.24 stiger røyken til den møter taket, deretter spres røyken lateralt inntil den møter vegger, for så å vokse nedover. Siden det ikke er noen seksjonering i form av røykskjærmer i hallen, vil ikke røyken samles opp, men spres ut i hele hallen. Røyken siger samtidig ut av de høyt plasserte slissene på langveggene i hallen. Som figuren viser, synker røyken mer jo lenger bort fra brannen den beveger seg. Dette kommer av at røykens temperatur avtar med avstand fra brannen, som følge av

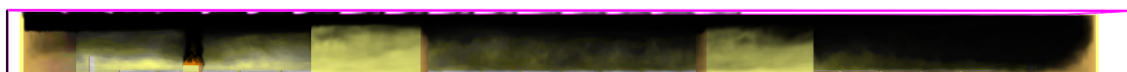
varmetransport og utblanding med omliggende luft, noe som igjen fører til mindre oppdrift.



(a) 201,6 sekunder



(b) 900 sekunder



(c) 1614,6 sekunder

Figur 4.24: Røykutvikling i simulering 1_20-20-20_grovsimulering ved (a) 201,6 sekunder, (b) 900 sekunder og (c) 1614,6 sekunder. Utviklingen er sett fra siden.

Bilder hentet fra Smokeview.

Simuleringen har et mesh med samme cellestørrelse over hele hallen (20 cm). Denne cellestørrelsen er den største meshoppløsningen som kan benyttes i ventilasjonsområdet siden slissenes bredde er 20 cm. For å unngå at FDS opp- eller nedjusterer slissenes størrelse når geometrien ikke samsvarer med meshet er et grovere mesh uaktuelt. Det ble ikke gjort noen inngående beregninger for å velge den gunstigste meshoppløsningen for denne simuleringen.

Mesh

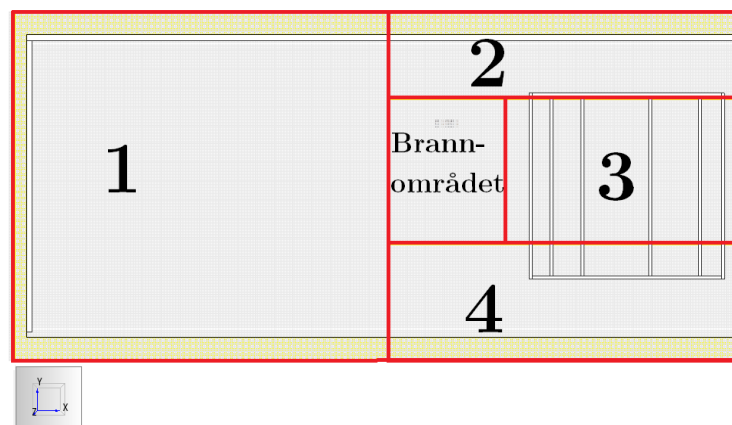
Det anses som svært viktig å tilpasse cellestørrelsen til det problemet en søker å løse. Det kan være nødvendig å benytte en grovere eller finere mesh i bestemte regioner i beregningsdomenet for å sikre en tilstrekkelig oppløsning av strømmingen [11]. Når strømning overføres fra et fint til et grovere mesh mistes noe av informasjonen om

strømningens detaljering, f.eks. temperatur, hastighet og turbulens. Hvis meshet er grovere lengre unna brannen er det ikke hensiktsmessig å forfine meshet igjen for å prøve å gjenskape detaljeringsgraden slik den var før det grove meshet.

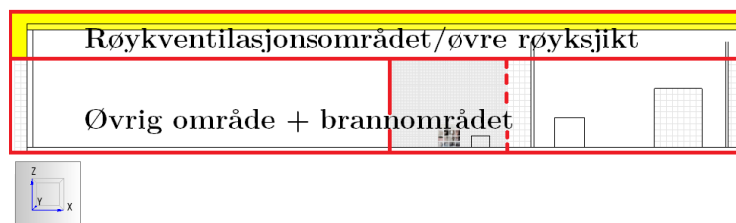
I gruppe 2 er det kjørt sju simuleringer med forskjellige meshoppløsninger for å kontrollere simuleringens sensitivitet i forhold til cellestørrelsen. Det ble startet med en relativt grov oppløsning før oppløsningen gradvis ble forfinet.

Grunnet kapasitetsbesparende årsaker er det ønskelig å velge grovest mulig mesh-oppløsning. Samtidig er det ønskelig at resultatene skal være så virkelighetsnære og nøyaktige som mulig. Derfor må en velge den groveste oppløsningen der en ikke lenger kan se vesentlige forskjeller i resultatene mellom simuleringene.

Meshoppsettet for modellen i de innledende simuleringene (gruppe 2 til 5) er vist i Figur 4.25 og Figur 4.26. Figur 4.25 viser et horisontalsnitt av meshoppsettet for den nedre delen av hallen, dvs. den delen som ligger under røykventilasjonsjiktet/ øvre røyksjikt. Mesh 1, 2, 3 og 4 representerer området lengst bort fra selve brannen. Inndeling av meshene i hallens høyde vises i Figur 4.26 der det øvre og de nedre meshenes plassering er vist. Tabell 4.9 lister opp cellestørrelsen for meshene i de ulike simuleringene i gruppe 2, samt forholdet D^*/dx for brannområdet som gir en indikasjon på finheten av områdets meshoppløsning.



Figur 4.25: Horisontalsnitt av meshoppsettet for nedre del av hallen (under øvre sjikt) for de innledende simuleringene (gruppe 2 til 5).



Figur 4.26: Vertikalsnitt av meshoppsettet for hele modellens høyde i de innledende simuleringene (gruppe 2 til 5).

Tabell 4.9: Meshoppsett for sensitivitetsanalyse.

| Simulerings-ID | Cellestørrelse [cm] | | | D^*/dx i brannområdet | Beskrivelse av oppløsning |
|----------------|--|---|--------------|----------------------------|---------------------------|
| | Lengst unna brannen, øvrige deler av hallen (1, 2, 3 og 4) | Røykventilasjonsområdet/ øvre røyksjikt | Brannområdet | | |
| 2_40-20-20 | 40 | 20 | 20 | 5,7 | Grov |
| 2_40-10-10 | 40 | 10 | 10 | 11,4 | Medium |
| 2_40-10-05 | 40 | 10 | 5 | 22,8 | Fin |
| 2_20-20-20 | 20 | 20 | 20 | 5,7 | Grov |
| 2_20-20-10 | 20 | 20 | 10 | 11,4 | Medium |
| 2_20-10-10 | 20 | 10 | 10 | 11,4 | Medium |
| 2_20-10-05 | 20 | 10 | 5 | 22,8 | Fin |

Simulering 2_40-10-05 avsluttet uventet etter ca. 520 sekunder. Dvs. at kun resultater (både visuelle og kvantitative) frem til denne tiden er lagret. Resultatene vil allikevel sammenlignes med resultatene fra de andre simuleringene i gruppe 2.

Årsaker til at simulering 2_40-10-05 avsluttet uventet kan skyldes f.eks. strøbrudd, at PC-en blir skrudd av ved et uhell, at PC-en går over i strømsparemodus (feil oppsett av pc-en), at PC-en krasjer, automatisk oppdatering av Windows (feil oppsett av PC-en) eller numerisk instabilitet som ofte betyr at noe i modellen er feil. Dette kan eksempelvis være pga. feilplassering av meshgrenser.

Fordi simuleringer kan avslutte uventet er det viktig å kunne starte simuleringene om igjen dersom noe skjer. Dette kan gjøres ved å justere restart-verdien i FDS. Standardverdien for restart i FDS er 300 sekunder. Det vil da lagres en oppstartsfil hvert 300. sekund. Det kan være mer hensiktsmessig å sette restart til f.eks. 60 sekunder (`&DUMP DT_RESTART=60/`). Dette betyr at om simuleringen avsluttes kan den startes opp igjen, slik at maksimalt 60 sekunder av simuleringen har gått tapt.

Forfatterne valgte å avbryte simulering 2_20-10-05 etter 516 av 900 sekunder. Den hadde da kjørt i over to uker. Grunnen til at simuleringen ble avsluttet var dens høye tidsforbruk. Grunnet tidsforbruket ville det vært vanskelig å gjennomføre en simulering over hallens totale størrelse med denne meshoppøsningen. Resultatene fra denne simuleringen sammenlignes med de andre resultatene i gruppe 2, i likhet med 2_40-10-05 som også ble avsluttet før tiden.

For simuleringene i gruppe 3, 4 og 5 er det groveste meshoppsettet fra sensitivitetsanalysen benyttet, dvs. likt meshoppsett som for simulering 2_40-20-20. Simuleringene i gruppe 3 til 5 er kjørt i 1800 sekunder. Meshoppøsningen og simuleringstiden er valgt for å kunne sammenligne resultatene med simulering 2_40-20-20, og for å spare tid.

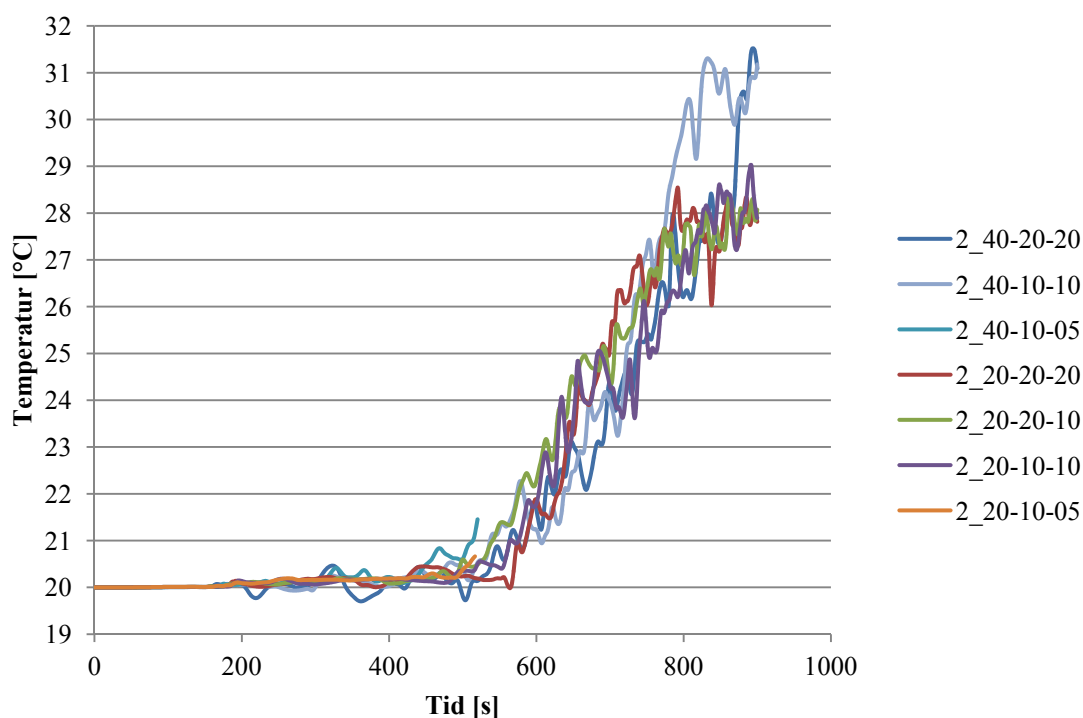
Sensitivitetsanalyse (gruppe 2)

Som tidligere nevnt er det satt opp mange måleinstrumenter i modellen som registrerer ulike parametre. For å vurdere meshsensitivitet er det valgt å kun se på noen av disse. Det er valgt å fokusere på parametre som er essensielle for person-sikkerhet og målepunkter som er sentralt plassert i forhold til brannen og rømningsveier.

4. Analyse

Følgende måleparametre og tilhørende plasseringer er valgt for å vurdere mesh-sensitiviteten:

- temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter
- CO-konsentrasjon i åpning til trapperom 1 i høyde to meter
- CO₂-konsentrasjon i åpning til trapperom 1 i høyde to meter
- røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1

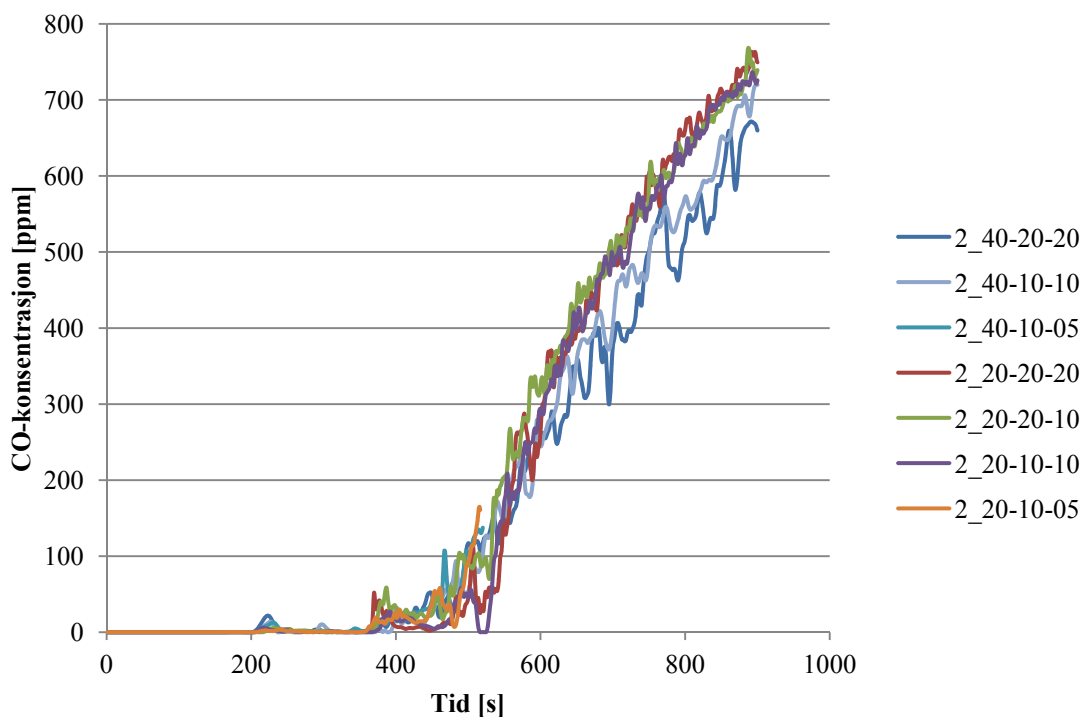


Figur 4.27: Meshsensitivitet - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter.

Figur 4.27 viser temperaturen som er målt utenfor trapperom 1 i høyde to meter. Denne målingen befinner seg i mesh 4 i henhold til Figur 4.25.

Temperaturen utenfor trapperommet når maksimalt 31,5 °C innenfor simuleringstiden. Simulering 2_40-20-20, 2_40-10-10 og 2_40-10-05 er de simuleringene som avviker mest fra de andre simuleringene, og er også de simuleringene med grovest cellestørrelse (40 cm) i måleområdet. At simulering 2_40-10-10 viser noe avvikende resultater i forhold til resten av simuleringene kan komme av store ulikheter mellom

cellestørrelsen i de ulike meshene. Både 2_40-20-20 og 2_40-10-10 har jevnt over lavere temperaturer enn de andre simuleringene før de mot slutten av simuleringstiden opplever en større temperaturøkning enn de andre. Begge simuleringene øker med omtrent 4 °C ved 850 (2_40-20-20) og 760 (2_40-10-10) sekunder. Simulering 2_40-20-20 og 2_40-10-10 kan dermed sies å ha noe høye variasjoner mellom høyeste og laveste målte temperatur, og temperaturen i disse simuleringene sammenfaller ikke like godt med de andre simuleringene. Grunnen til dette kan være at de har en grovere cellestørrelse enn de andre simuleringene i målepunktet, og at tilstrekkelig turbulens ikke inkluderes. Resultatet blir dermed varierende temperaturmålinger i forhold til de andre simuleringene, og simuleringer med cellestørrelse 40 cm i målt område kan antas for grov.

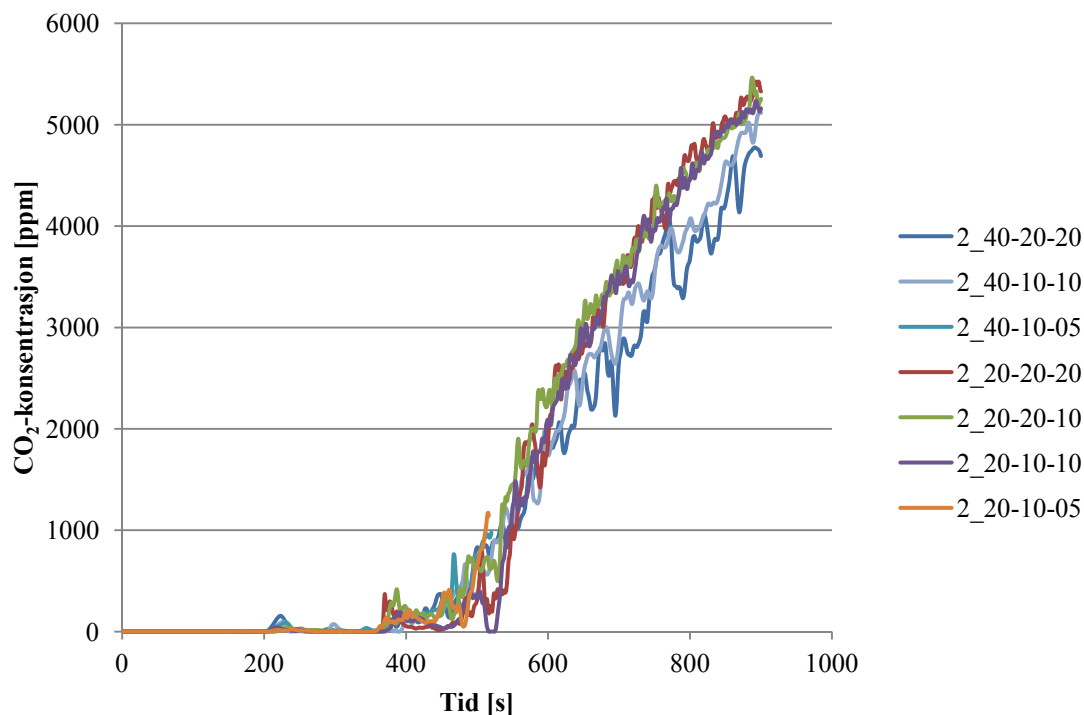


Figur 4.28: Meshsensitivitet - CO-konsentrasjonen i åpningen til trapperom 1 i høyde to meter.

Figur 4.28 viser CO-konsentrasjonen i åpningen til trapperom 1 i høyde to meter. Denne målingen befinner seg i mesh 4 i henhold til Figur 4.25.

4. Analyse

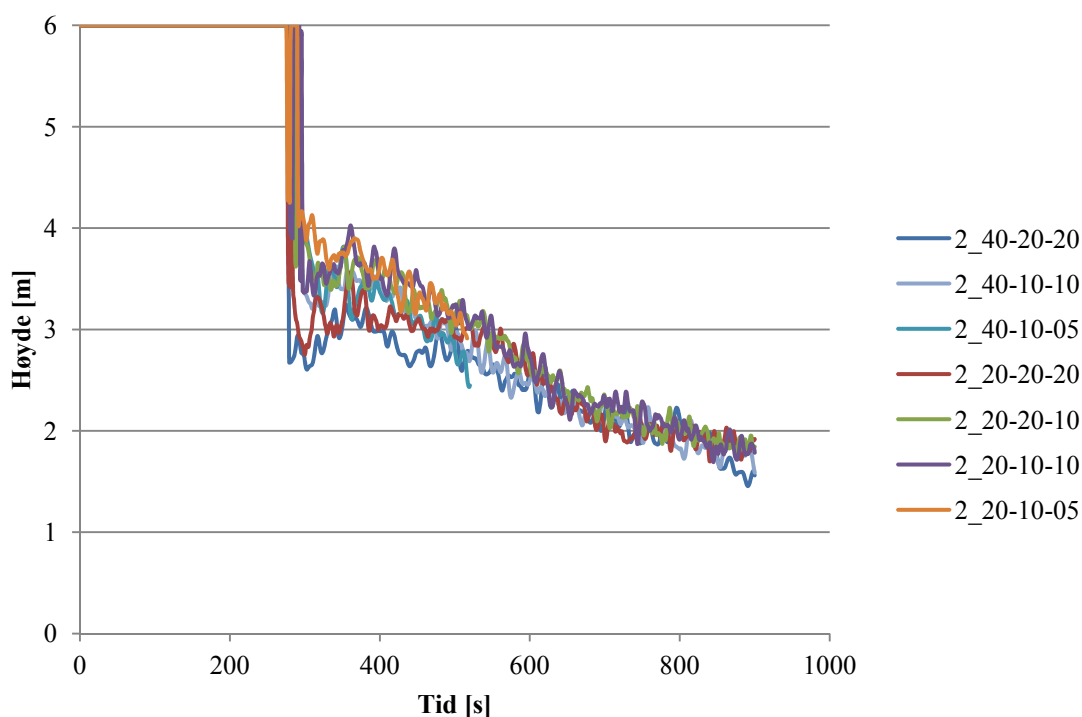
Simulering 2_40-20-20 og 2_40-10-10 har, fra og med 600 sekunder, generelt lavere CO-verdier enn resten av simuleringene. Det kan dermed virke som verdiene i disse simuleringene avviker for mye fra de andre simuleringene, slik at meshoppløsningen kan antas å være for grov.



Figur 4.29: Meshsensitivitet - CO₂-konsentrasjonen i åpningen til trapperom 1 i høyde to meter.

Figur 4.29 viser CO₂-konsentrasjonen i åpningen til trapperom 1 i høyde to meter. Denne målingen befinner seg i mesh 4 i henhold til Figur 4.25.

CO₂-konsentrasjonen i åpningen til trapperommet oppnår høyeste verdi på 5500 ppm etter 900 sekunder. Verdiene for simulering 2_40-20-20 og 2_40-10-10 er i likhet med verdiene for CO-konsentrasjonen i åpningen til trapperommet generelt lavere enn resten av simuleringene. Derfor egner simuleringene med grovest meshoppløsning i målepunktet seg ikke ved vurdering av CO₂-konsentrasjon.



Figur 4.30: Meshsensitivitet - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1.

Figur 4.30 viser røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1. Denne målingen befinner seg i mesh 4 i henhold til Figur 4.25. Målingen er foretatt fra gulv og opp til seks meters høyde, til grensen mellom mesh 4 og mesh i øvre røyksjikt, se Figur 4.26.

I tiden frem til 500 sekunder viser simulering 2_40-20-20 og 2_20-20-20 et lavere røyksjikt enn de andre simuleringene. Etter dette viser disse simuleringene sammenfallende resultater med resten av simuleringene. På bakgrunn av resultatene fra dette målepunktet vil det være naturlig å velge en simulering med resultater som sammenfaller godt med de andre simuleringene som f.eks. 2_40-10-10 eller 2_20-20-10. Det vil på den annen side være mest konservativt å velge meshoppløsningene representert i simulering 2_40-20-20 eller 2_20-20-20.

Valg av meshoppløsning

2_40-10-05 og 2_20-10-05 er, som tidligere nevnt, kun simulert til ca. 500 sekunder. Siden vi ikke har resultater etter 500 sekunder og pga. høyt tidsforbruk vil disse meshoppløsningene være uaktuelle for hovedsimuleringene.

Simuleringen med den grovste meshoppløsningen, 2_40-20-20, viser i flere av målepunktene avvikende resultater fra de andre simuleringene, noe som i en viss grad også gjelder simulering 2_40-10-10. Dette kommer best frem av målingene av temperatur utenfor trapperom (Figur 4.27) og CO- og CO₂-konsentrasjonen i åpningen til trapperom (Figur 4.28 og Figur 4.29).

De simuleringene som har hatt mest konvergerende resultater i følge meshsensitivitetsanalysen er 2_20-20-20, 2_20-20-10 og 2_20-10-10. Av disse er det simulering 2_20-20-20 som har grovest oppløsning. Det er hensiktsmessig å velge den grovest mulige meshoppløsningen for å spare tid og kapasitet.

Meshoppsett for hovedsimuleringer

Ut fra resultatene i meshsensitivitetsanalysen er det valgt å benytte en meshoppløsning på 20 cm x 20 cm x 20 cm celler over hele modellen i hovedsimuleringene (gruppe 6 og 7). Siden det er valgt samme størrelse for cellene over hele modellen er det mulig å bruke kun et mesh over hele hallen, og kjøre dette på en enkelt PC. Det er også mulig å dele beregningsområdet inn i flere mesh og fordele simuleringen på flere prosessorer eller flere PC-er koblet sammen, såkalt parallellsimulering [27]. Parallellsimulering gjøres ved hjelp av MPI (en språkuavhengig kommunikasjonsprotokoll) som fordeler meshene over flere prosesser (MPI_PROCESS).

I simuleringene med termisk ventilasjon (6_ho og 7_slots) er det valgt å dele modellen i sju mindre mesh og å kjøre disse som parallellsimuleringer. For at parallellsimulering skal fungere er det en stor fordel at det er et sammenlignbart antall celler i hvert mesh [27]. Hvis ikke vil de minst tidkrevende meshene stå inaktive og vente på beregningen av de mest tidkrevende meshene. Det er derfor

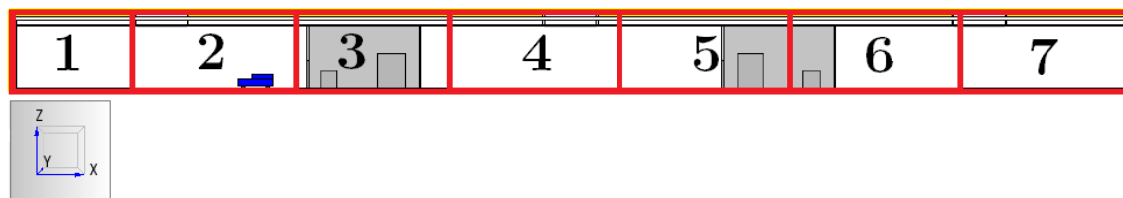
forsøkt å fordele det totale antallet celler noenlunde likt mellom de sju meshene for å redusere simuleringstiden. Totalt antall celler i modellen er 3 790 080. En oversikt over celleantall i de forskjellige meshene for simulering 6_ho og 7_slots er gitt i Tabell 4.10.

Tabell 4.10: Oversikt over antall celler i hvert mesh i simulering 6_ho og 7_slots.

| Mesh-id | Antall celler |
|-----------------------|------------------|
| Mesh 1 | 414 720 |
| Mesh 2 (brannområdet) | 552 960 |
| Mesh 3 | 518 400 |
| Mesh 4 | 576 000 |
| Mesh 5 | 576 000 |
| Mesh 6 | 576 000 |
| Mesh 7 | 576 000 |
| Sum | 3 790 080 |

Det er forsøkt unngått å plassere meshgrenser der kritiske hendelser kan forekomme, spesielt i nærheten av brannen og i vifter. For å få til dette har mesh 1, 2 og 3 et ulikt antall celler enn de andre meshene. Det er allikevel ikke snakk om store forskjeller og det antas at tidsbruket for simuleringene ikke påvirkes nevneverdig.

Meshoppsettet for simulering 6_ho og 7_slots er vist i Figur 4.31.



Figur 4.31: Meshoppsett for simulering 6_ho og 7_slots.

Simuleringene med mekanisk røykventilasjon (7_7.4out, 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in) avsluttet flere ganger pga. numerisk instabilitet. Forfatterne valgte

4. Analyse

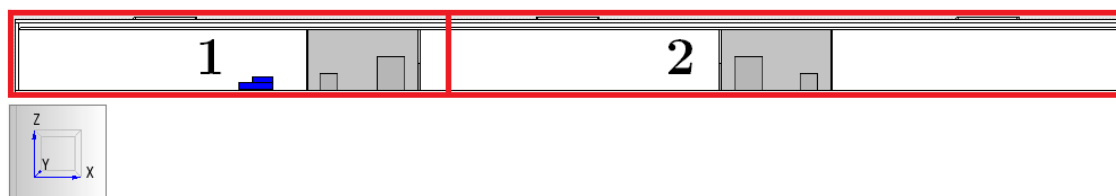
derfor å slå sammen de sju meshene til kun to mesh (1-3 og 4-7) for å prøve å løse problemet. Meshsammenslåingen førte til et mindre ideelt celleantall i meshene, men påvirket i hovedsak bare simuleringstiden.

En oversikt over celleantall i simuleringene med mekanisk røykventilasjon er gitt i Tabell 4.11.

Tabell 4.11: Oversikt over antall celler i hver mesh i simulering 7_7.4out, 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in.

| Mesh-id | Antall celler |
|------------|------------------|
| Mesh 1 | 1 486 080 |
| Mesh 2 | 2 304 000 |
| Sum | 3 790 080 |

Meshoppsettet for simulering 7_7.4out, 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in er vist i Figur 4.32.



Figur 4.32: Meshoppsett for simulering 7_7.4out, 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in.

Brannscenario (gruppe 3)

I den kvalitative analysen ble det valgt to aktuelle brannscenarioer:

- Brannscenario 1: brann i utstillingsdukker med HRR_{maks} lik 1,528 MW
- Brannscenario 2: brann i bil med HRR_{maks} lik 4,9 MW

Begge scenarioene er aktuelle med både åpen planløsning og bruk av frittstående vegger, dvs. fire scenarioer totalt.

- brannscenario 1 med åpen løsning
- brannscenario 1 med frittstående vegger
- brannscenario 2 med åpen løsning
- brannscenario 2 med frittstående vegger

Simulering 2_40-20-20 i gruppe 2 tar for seg det første scenarioet, mens de resterende er simulert i gruppe 3. Simuleringene er markert med "small" og "large" for henholdsvis brannscenario 1 og 2 (liten og stor brann). For simuleringene med frittstående vegger er det inkludert en "w" i simuleringsnavnet. 3_40-20-20_small_w indikerer dermed at simuleringen er kjørt med brannscenario 1 og frittstående vegger. Som nevnt er alle disse simuleringene kjørt med samme meshoppløsning som simulering 2_40-20-20, dvs. 40 cm i området lengst unna brannen, 20 cm i det øvre sjiktet og 20 cm i brannområdet.

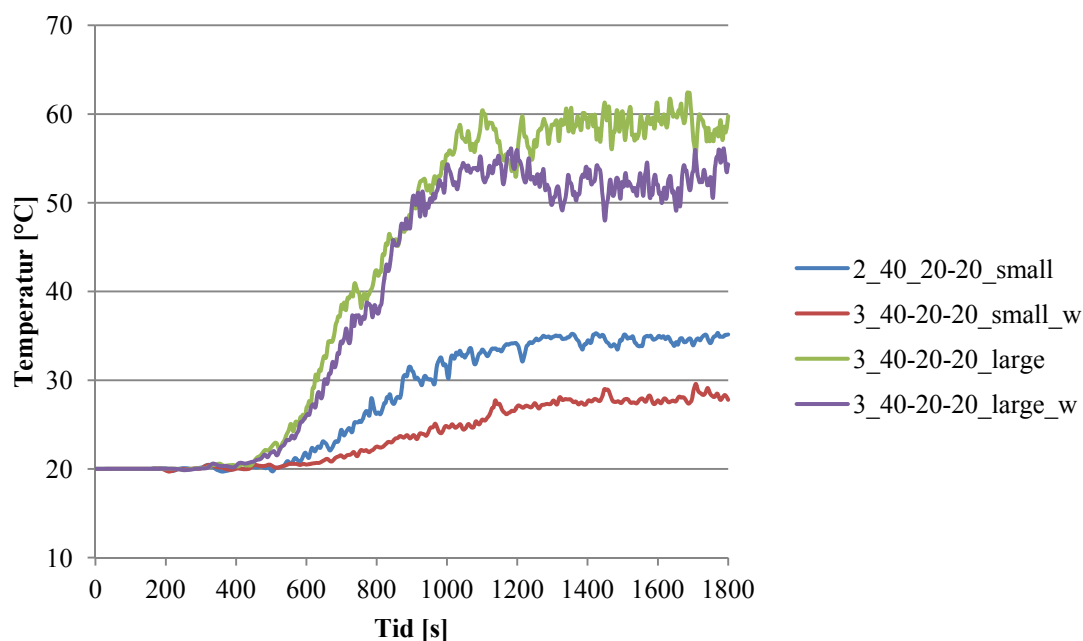
Måleparametre og plasseringer

For å avgjøre hvilket av brannscenarioene som er det dimensjonerende i dette tilfellet er følgende måleparametre og tilhørende plasseringer valgt:

- temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter
- CO-konsentrasjon utenfor trapperom 1 i høyde to meter
- CO₂-konsentrasjoner utenfor trapperom 1 i høyde to meter
- røykformørkelse inne i trapperom 1 i høyde to meter
- røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1

Vurdering av registrerte målinger

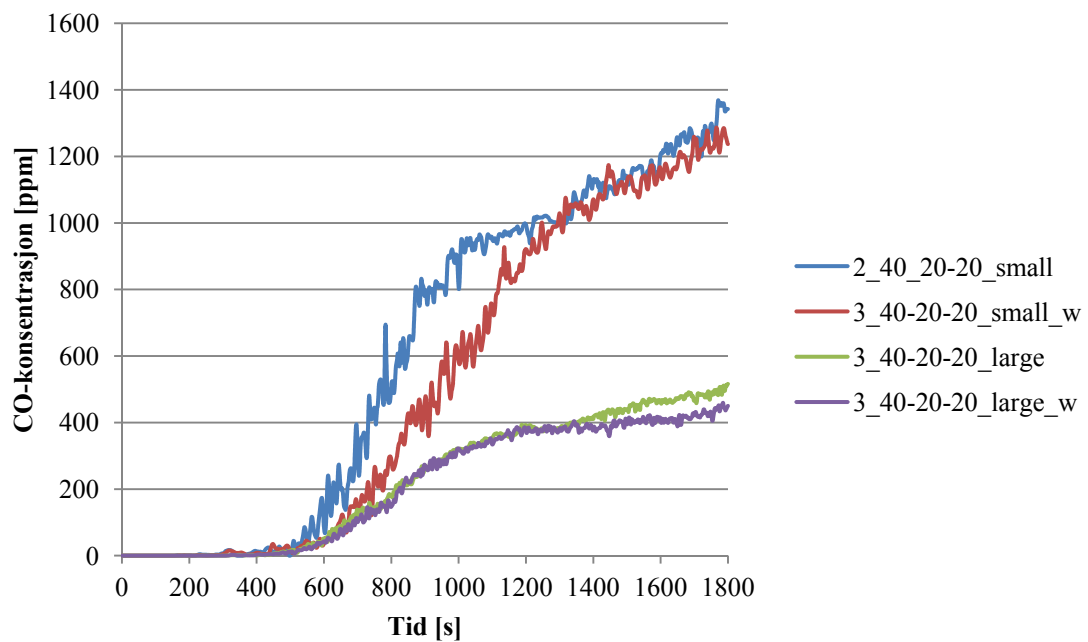
Simuleringene i denne gruppen er utført for å velge dimensjonerende brannscenario til bruk i hovedsimuleringer. Det er forventet at simuleringene med brannscenario 2 ($\text{HRR}_{\text{maks}}=4,9$ MW) skal generere høyere temperaturer enn simuleringene med brannscenario 1 ($\text{HRR}_{\text{maks}}=1,528$ MW), og som Figur 4.33 viser, er dette tilfelle.



Figur 4.33: Valg av brannscenario - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter.

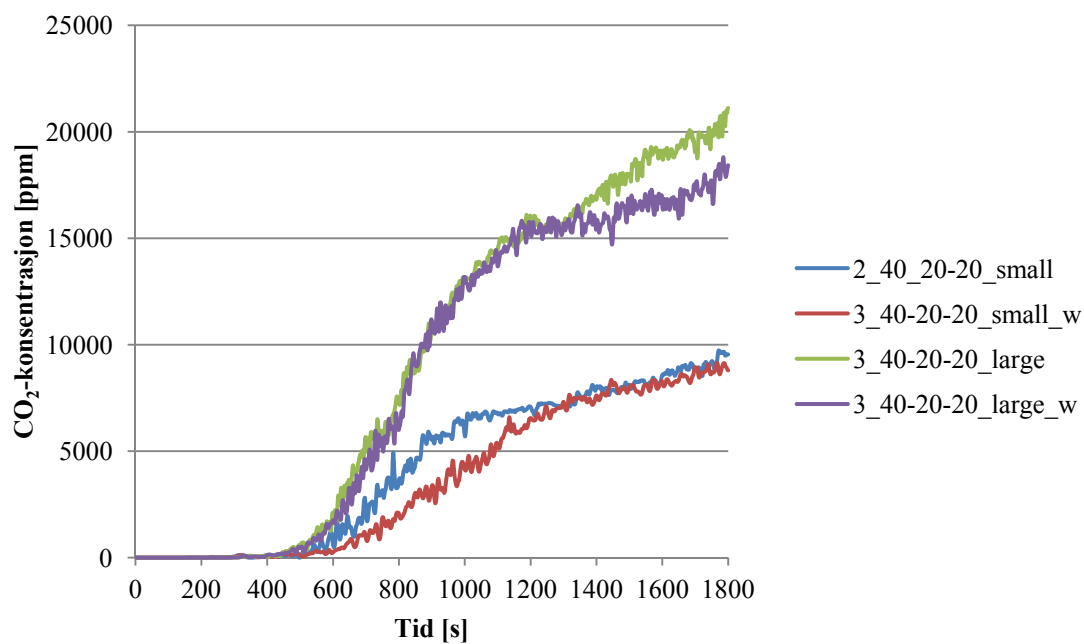
Ved 1800 sekunder er det omtrent 25 °C i forskjell mellom simuleringene med brannscenario 1 og brannscenario 2 og åpen planløsning. Det samme gjelder for simuleringene med frittstående vegger.

Simuleringen med brannscenario 2 uten vegger har en noe høyere temperatur enn simuleringene med frittstående vegger. Her får luften strømme fritt og blir hverken separert eller avkjølt av de frittstående veggene som har inerte grensebetingelser. Det samme er tilfellet for simuleringene med brannscenario 1.



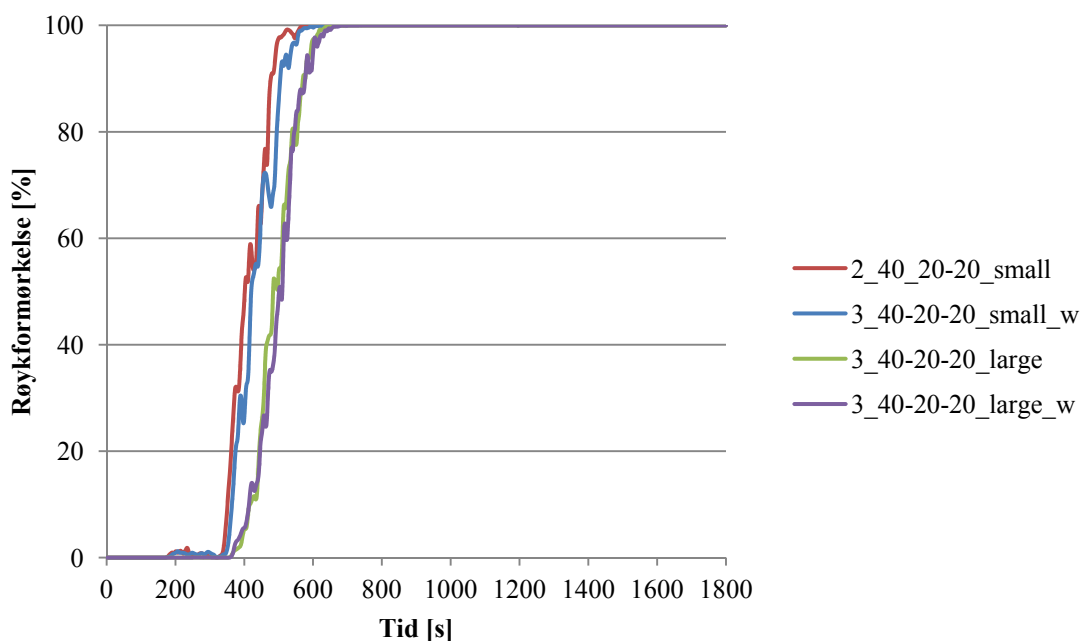
Figur 4.34: Valg av brannscenario - CO-konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter.

Figur 4.34 viser at CO-konsentrasjonen er betydelig høyere i simuleringene med brannscenario 1. Dette er som forventet siden CO-produksjonen i simuleringene med brannscenario 1 er satt vesentlig høyere enn i simuleringene med brannscenario 2, til henholdsvis 0,1 og 0,042 g/g. Konsentrasjonene i simuleringene uten vegger er jevnt over noe høyere enn i simuleringene med vegger, men dette er ikke utslagsgivende for valg av scenario.



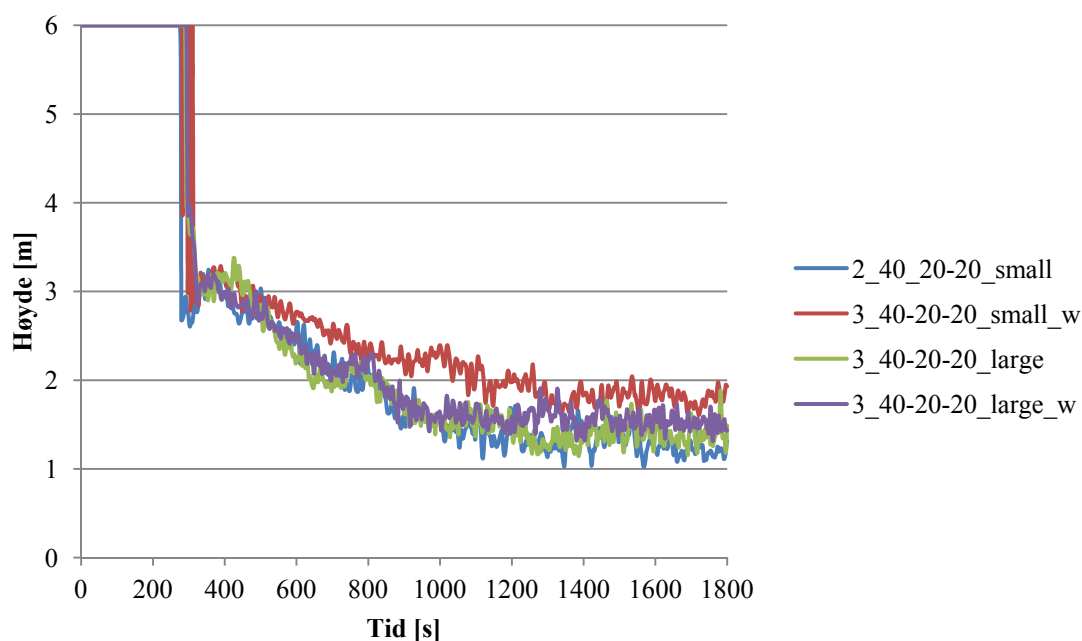
Figur 4.35: Valg av brannscenario - CO₂-konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter.

CO₂-konsentrasjonene er i følge Figur 4.35 betydelig høyere i simuleringene med brannscenario 2. Forskjellen mellom simuleringene med og uten vegger er ikke utslagsgivende for valg av scenario, men konsentrasjonen er jevnt over noe høyere i simuleringene uten vegger.



Figur 4.36: Valg av brannscenario - røykformørkelse inne i trapperom i høyde to meter.

Røykformørkelsen starter omtrent samtidig for simuleringene med brannscenario 1 og 2, som vist i Figur 4.36. Formørkelsen med brannscenario 1 skjer imidlertid raskere. Maks tillatt formørkelse for sikt på ti meter ved målelengde 3,2 meter er 47,86 % (som vist i Tabell 4.8 i avsnittet Siktforhold). I simuleringen med brannscenario 1 uten frittstående vegger, som er det verste tilfellet, holdes kravet i omtrent 400 sekunder. I simuleringen med brannscenario 2 uten frittstående vegger opprettholdes en sikt på ti meter i omtrent 480 sekunder.



Figur 4.37: Valg av brannscenario - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1.

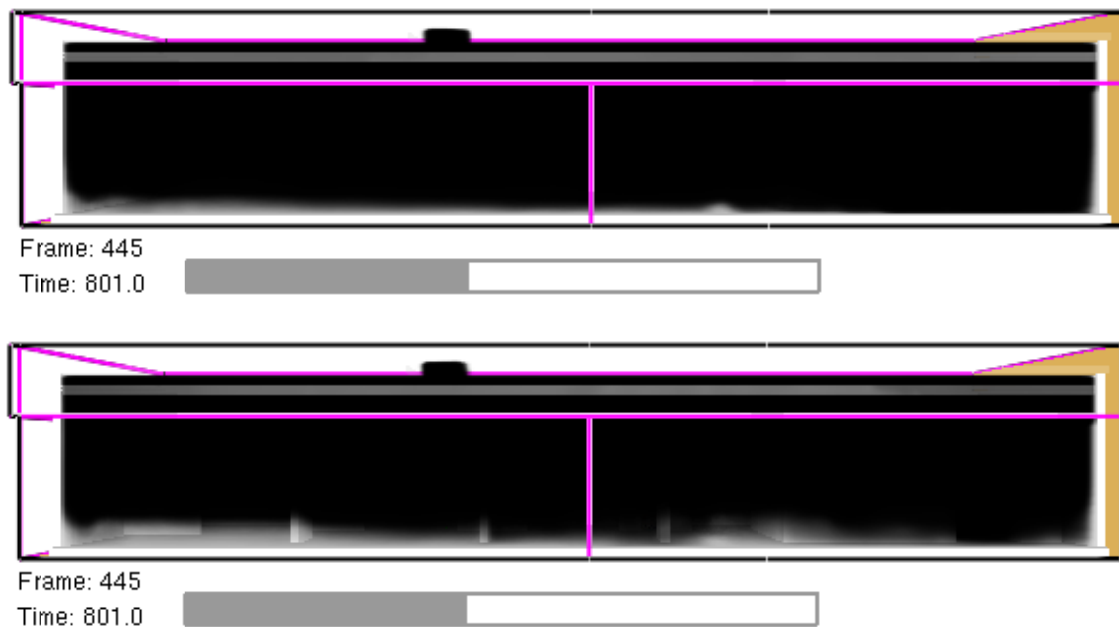
Som Figur 4.37 viser, synker røyksjiktets høyde til under to meter innen 800 sekunder for samtlige simuleringer, med unntak av simulering med brannscenario 1 og frittstående vegger (3_40-20-20_small_w), som generelt holder seg noe høyere gjennom hele simuleringen.

Valg av brannscenario

Temperaturen er generelt høyere i simuleringene med brannscenario 2. CO-konsentrasjonen er betydelig høyere i simuleringen med brannscenario 1, mens CO₂-konsentrasjonene er betydelig høyere i simuleringene med brannscenario 2. Ulikhetene i røykformørkelse og røyksjiktets høyde er ikke avgjørende. På bakgrunn av dette, velges brannscenario 2 som dimensjonerende brannscenario. Hovedsakelig pga. høyere temperaturer.

I teorien er det slik at en brann som er plassert inntil en vegg eller i et hjørne vil få mindre luftinntrengning til brann- og røyksøylen, noe som vil gi høyere temperaturer i røykgassen [11]. Siden de frittstående veggene ble definert med inerte grensebetingelser forventet forfatterne at dette kunne føre til det motsatte, dvs. en

nedkjøling av brannen og den røykgassen som utvikles. Dette fordi vegger med grensebetingelsen inert ikke varmes opp, men derimot kan bidra til å kjøle ned røykgassene. Det kunne i så fall forventes at røyken kunne miste en del av oppdriftskraften sin, og at røyksjiktet derfor ville synke lengre ned og skape mer ugunstige rømningsforhold. Som vist i Figur 4.37 skjedde ikke dette. Røyksjiktet i simuleringen uten vegger sank raskere enn simuleringen med inerte vegger. Dette er også vist i Figur 4.38. Etter 801 sekunder har røyksjiktet i simulering 2_40-20-20 nådd gulvnivå over nesten hele hallen. Ved samme tidspunkt har røyksjiktet i simulering med frittstående vegger, 3_40-20-20_small_w, ikke nådd gulv.

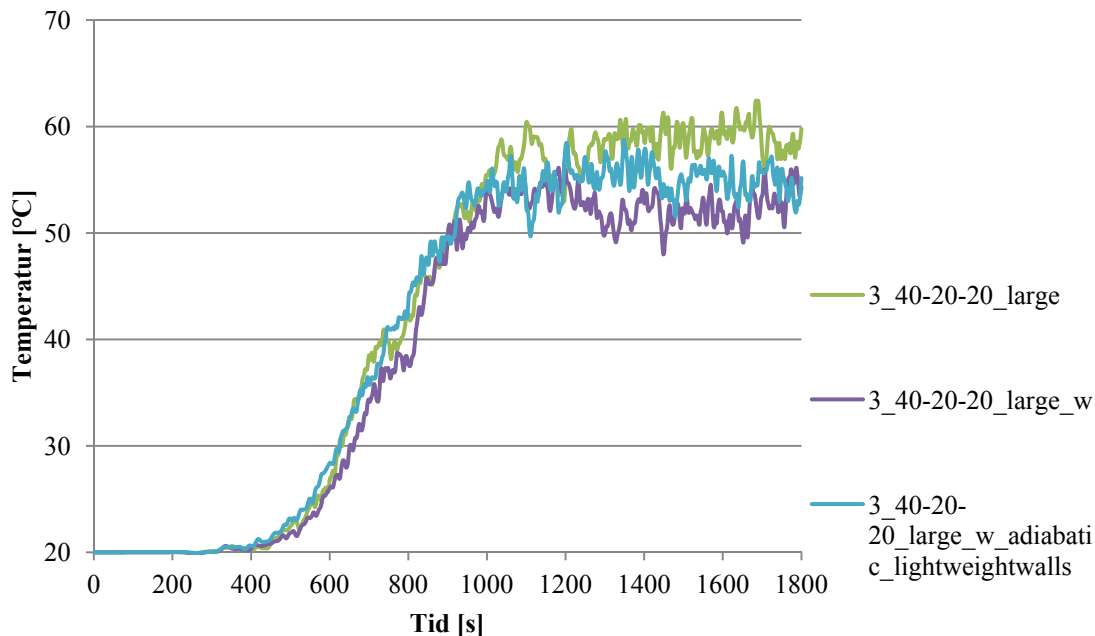


Figur 4.38: Sammenligning av simulering 2_40-20-20 uten frittstående vegger og simulering 3_40-20-20_small_w med frittstående vegger. Bildet er hentet fra Smokeview.

For å kontrollere om bruk av en annen grensebetingelse på de frittstående veggene ville ha noen stor betydning for resultatene, ble det gjennomført en tilleggssimulering i gruppe 3. Denne simuleringen hadde brannscenario 2 og frittstående vegger med *adiabatiske* grensebetingelser. Det var ønskelig å undersøke om adiabatiske grensebetingelser på veggene kunne føre til at scenarioet med vegger ble mer ugunstig enn

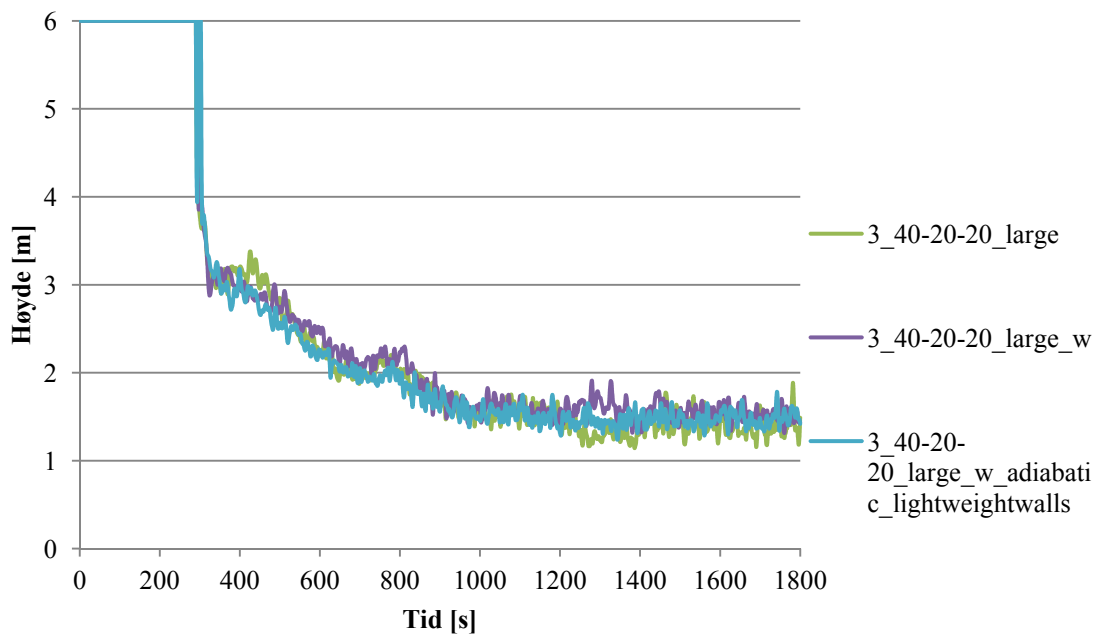
4. Analyse

scenarioet uten. Mens vegger med inerte grensebetingelser ikke varmes opp, fungerer vegger med adiabatisk grensebetingelser som ideelle isolatorer.



Figur 4.39: Valg av brannscenario - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter.

Figur 4.39 viser sammenligning av temperaturen utenfor trapperom 1 i høyde to meter for de ulike simuleringene med brannscenario 2. Simuleringen uten frittstående vegger har høyest temperatur. Her får luften strømme fritt og blir hverken separert eller avkjølt av veggene slik som i simuleringene med inerte grensebetingelser. Simuleringen med adiabatisk grensebetingelser har høyere temperatur enn simuleringen med inerte grensebetingelser, der lufttemperaturen avkjøles av veggene.



Figur 4.40: Valg av brannscenario - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1.

Som Figur 4.40 viser synker røyksjiktet omtrent like raskt i alle simuleringene, noe som er uventet. Det var, som tidligere nevnt, forventet at røyklaget som dannes skulle synke raskere med inerte frittstående vegger i forhold til de andre simuleringene. Som vist er temperaturen i Alabasterhallen ikke veldig høy. Det kan tenkes at den lille reduksjonen i temperatur som vil følge pga. de inerte veggene ikke vil skape store nok temperaturforskjeller til at røyken mister sin oppdriftskraft.

Registrerte verdier for CO- og CO₂-konsentrasjonen i og rundt trapperommet er omtrent lik for simuleringene med vegger, og noe høyere for simuleringen uten vegger.

Ut fra resultatene er det tydelig at det dimensjonerende brannscenarioet er scenarioet uten frittstående vegger (3_40-20-20_large). Både temperatur og CO- og CO₂-konsentrasjon er høyere med åpen planløsning, og siden røyksjiktet ikke sank merkbart raskere i simuleringen med inerte vegger, er derfor brannscenario 2 med åpen planløsning valgt som dimensjonerende brannscenario.

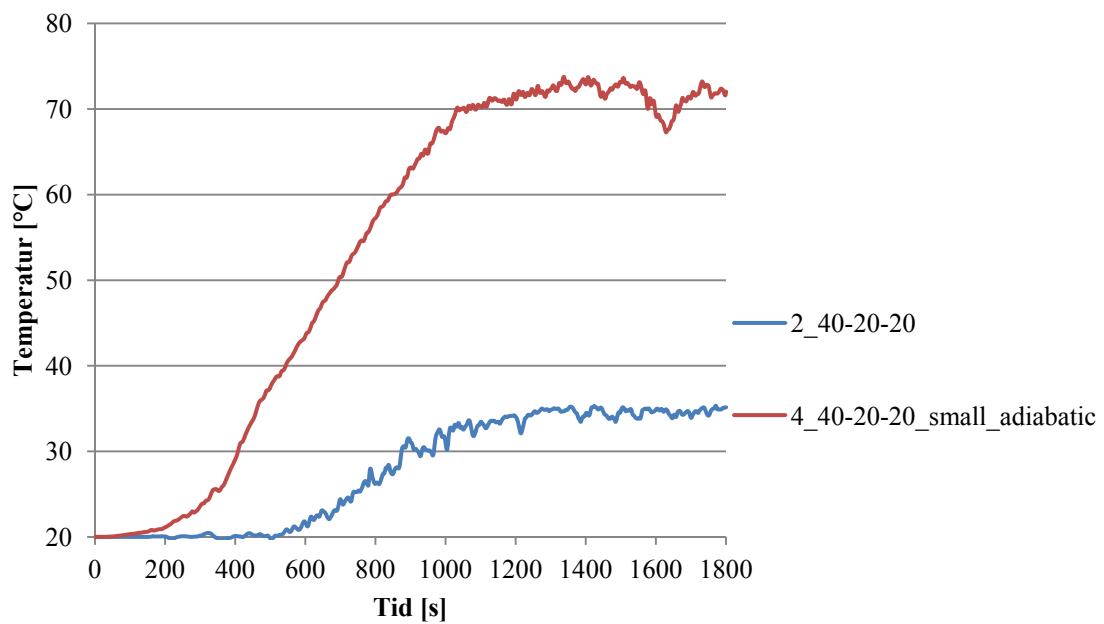
Grensebetingelser (gruppe 4)

Det benyttes, som nevnt, ikke materialspesifikke grensebetingelser på overflatene på yttervegger, vegger i trapperom og gulv og tak. Selv om det ikke er fastsatt noen materialegenskaper for ytterveggene er det blitt foreslått at disse skal utføres med glass. Dette kan føre til store forskjeller mellom inne- og utetemperatur som følge av soloppvarming, noe som igjen kan føre til en lagdeling av røyken pga. store temperaturforskjeller mellom luften ved gulv (der tilluft trekkes inn) og luften ved tak. Dersom omliggende luft er varmere enn røyken, vil ikke røyken stige, men kunne legge seg som et lag under den varmere luften. Dette kan føre til en forsinket aktivering av røykventilasjonsanlegg dersom detektorer er plassert høyt. Dette kan løses ved å plassere røykdetektorer i ulike høyder i rommet.

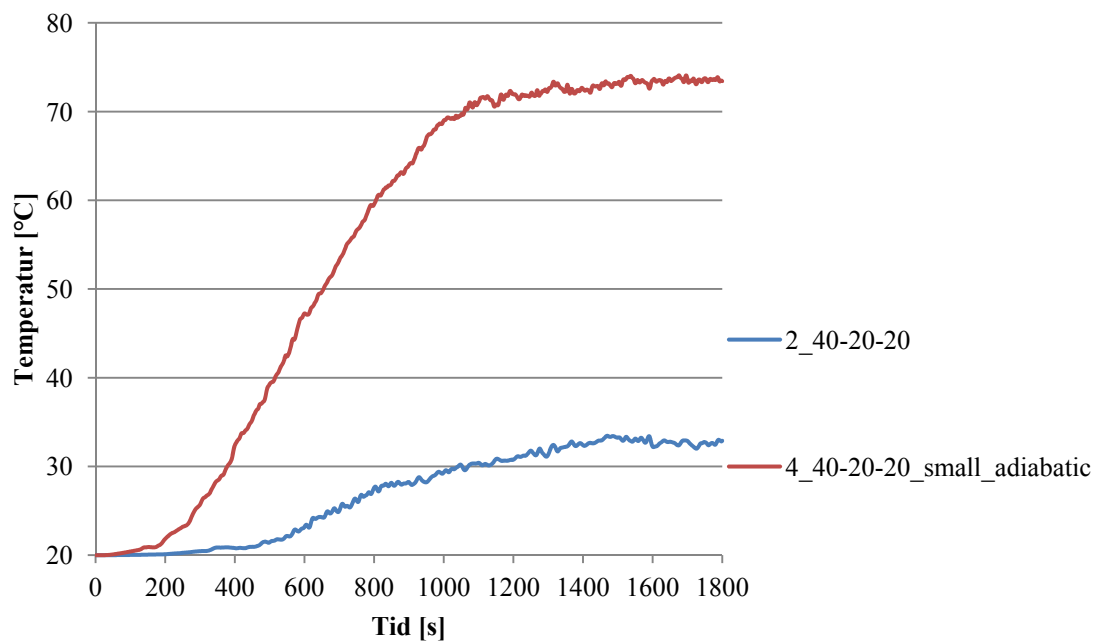
Selv om det mest nøyaktige ville vært å spesifisere de eksakte materialene kan det også skape større usikkerhet og større avhengighet av materialvalgene. Siden materialer på overflatene i hallen ikke defineres, vil dette kunne bidra til at prinsippet i oppgaven kan overføres til andre lignende prosjekter.

Det er gjennomført simuleringer med både inerte og adiabatisk grensebetingelser for å undersøke hva som er konservativt i forhold til dimensjonering av røykventilasjon. Simulering 2_40-20-20 i gruppe 2 tar for seg hallens overflater med inerte grensebetingelser, mens simulering 4_40-20-20_small_adiabatic i gruppe 4 er kjørt med adiabatisk grenser. Som tidligere nevnt er simuleringen i gruppe 4 kjørt med samme meshoppløsning som simulering 2_40-20-20, dvs. 40 cm i området lengst unna brannen, 20 cm i det øvre sjiktet og 20 cm i brannområdet.

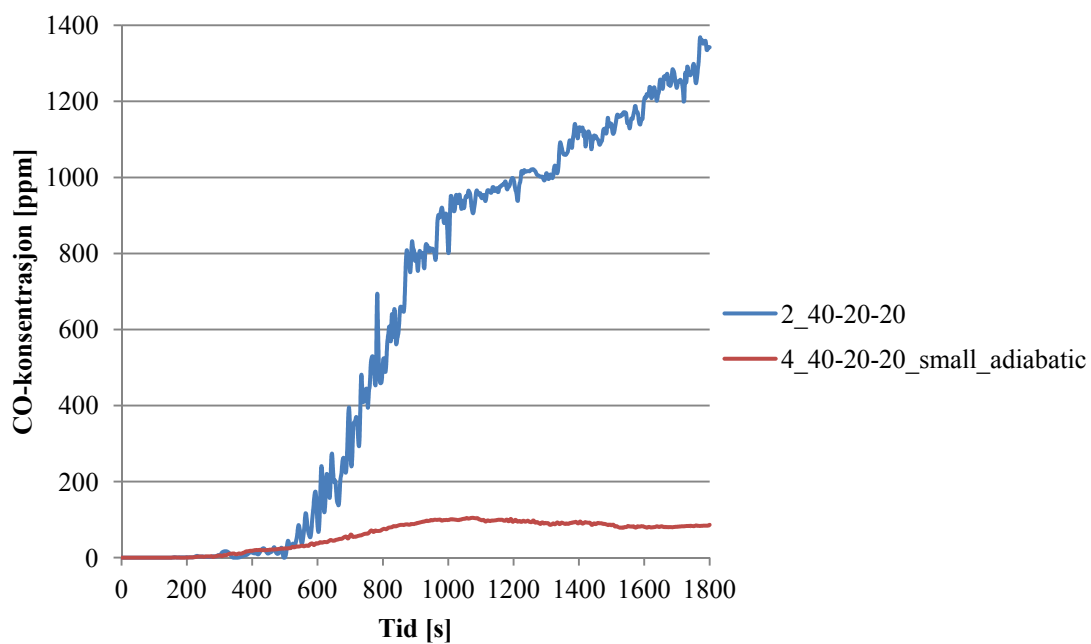
Figurene som følger viser henholdsvis temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter (Figur 4.41), temperatur midt i del A i høyde to meter (Figur 4.42), CO- og CO₂-konsentrasjon og røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1 (Figur 4.43, Figur 4.44 og Figur 4.45)



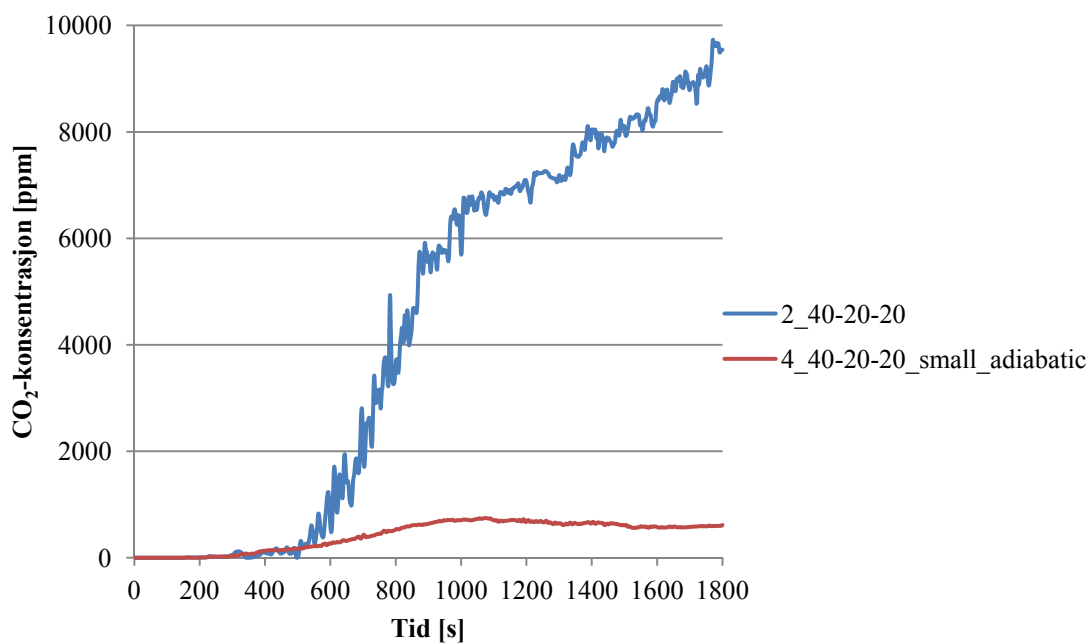
Figur 4.41: Materialegenskaper - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter.



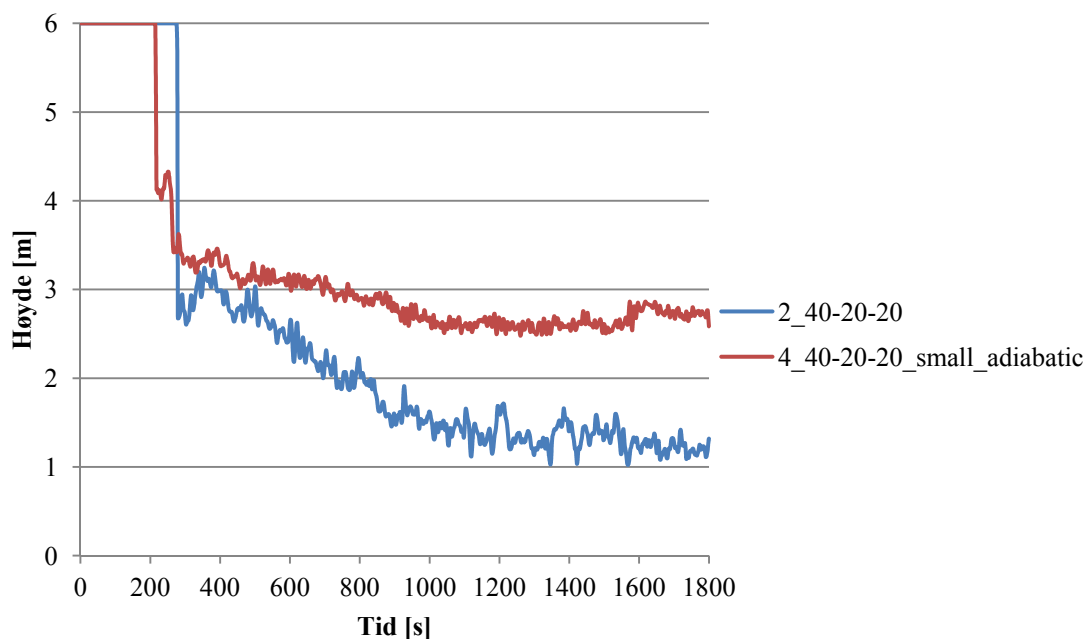
Figur 4.42: Materialegenskaper - temperatur midt i del A i høyde to meter.



Figur 4.43: Materialegenskaper - CO-konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter.



Figur 4.44: Materialegenskaper - CO₂-konsentrasjonen utenfor trapperom 1 i høyde to meter.



Figur 4.45: Materialelegenskaper - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1.

I Figur 4.41 til Figur 4.45 kan en se følgende tendenser:

- Temperaturen er vesentlig høyere for adiabatisk grensebetingelser. Ved 1800 sekunder er temperaturforskjellen mellom simulering med inerte og adiabatisk grensebetingelser over 45 °C utenfor trapperom 1 (Figur 4.41), og omtrent 40 °C i midten av hallens del A (Figur 4.42). Dette er som forventet siden adiabatisk vegger fungerer som ideelle isolatorer. Høye temperaturer er negativt med tanke på økt varme- og strålingsbidrag fra brannen og røyksjiktet, men samtidig vil et varmt røyksjikt ha bedre oppdrift og dermed lettere kunne sive ut gjennom ventilasjonsåpninger.
- CO- og CO₂-konsentrasjonene er vesentlig høyere med inerte grensebetingelser enn adiabatisk (Figur 4.43 og Figur 4.44).
- Røyksjiktets høyde synker raskere med inerte grensebetingelser på veggene (Figur 4.45).

På grunnlag av de ovennevnte punkter er det valgt å benytte inerte grensebetingelser på de omsluttende veggene, hovedsakelig grunnet et raskere synkende røyksjikt. I og

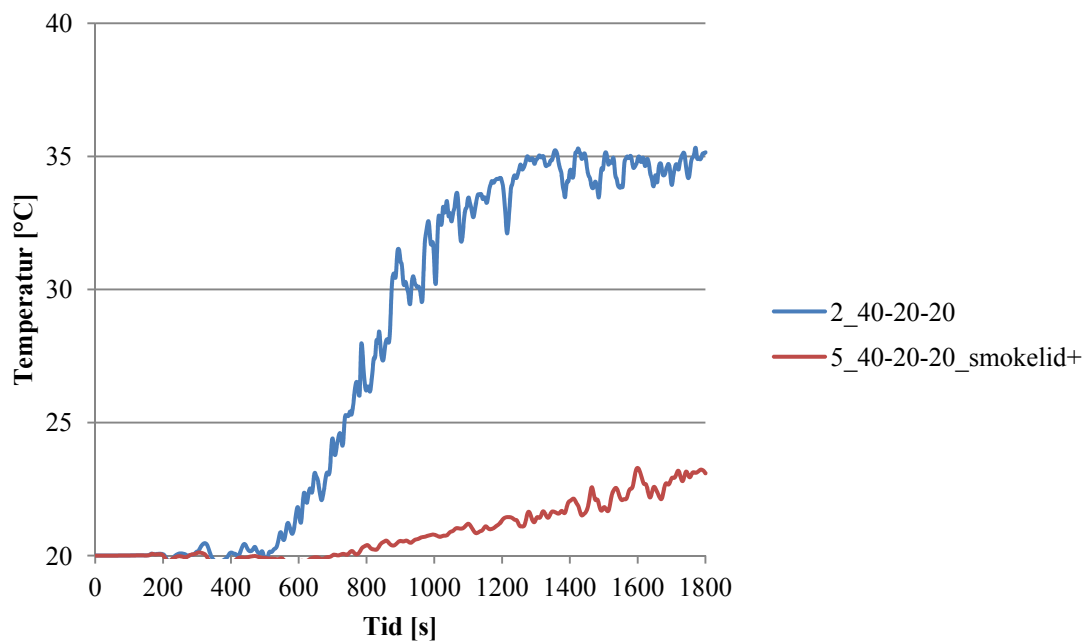
med at oppgaven skal undersøke en alternativ måte å røykventilere på er det satt fokus på verst tenkelige røykforhold, som det kan se ut til at de inerte grensebetingelsene representerer.

Ventilasjonsforhold (gruppe 5)

Økt lukeareal

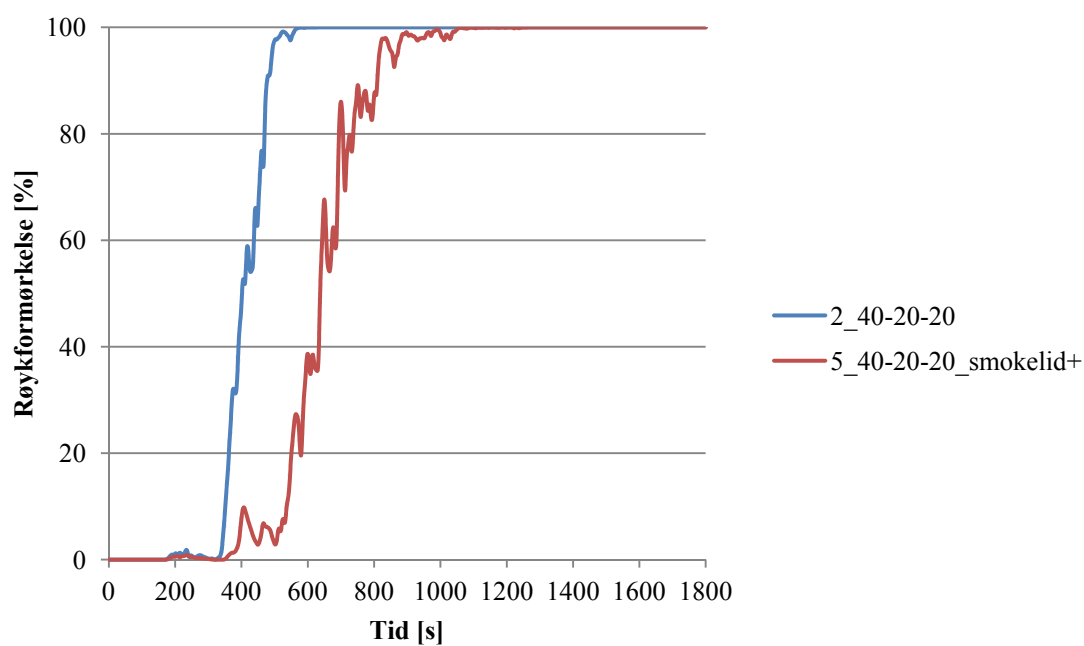
Alabasterhallen er en stor hall og HO-meldingen tar, som tidligere nevnt, ikke hensyn til lengde og bredde av rommet når røykventilasjon dimensjoneres. I simulering 2_40-20-20 er røykventilasjonen simulert med slisser i himling langs langvegger og røykluker i tak. Siden bare 1/3 av hallen er simulert er røykluken også tilsvarende, dvs. 1/3 av det dimensjonerte røyklukearealet. Lukearealet er dimensjonert for å opprettholde en frisktshøyde på tre meter i hallen i nødvendig rømningstid, noe som ikke opprettholdes siden røyken faller under tre meter midt i hallen etter kun 290 sekunder (simulering 2_40-20-20). Dette kan skyldes at røyken må passere de smale slissene før den kommer til røyklukene, mens det i HO-meldingen sannsynligvis er tenkt at røyken når røyklukene uten hindring. Hadde det ikke blitt simulert med himling og slisser ville kanskje en frisktshøyde på tre meter blitt opprettholdt over et lengre tidsrom. Dette er uvisst siden det ikke er gjennomført noen slike simuleringer. Ved bruk av løsningen med slisser virker det beregnede røyklukearealet å være for lite. Det er derfor valgt å kjøre en simulering med et tilnærmet tredoblet røyklukeareal for å vurdere effekten dette vil gi. Dette betyr at hallen er delt i tre deler hvor anbefalt røyklukeareal fra HO-meldingen er brukt på hver del.

Et tilnærmet tredoblet røyklukeareal er benyttet i gruppe 5 i simulering 5_40-20-20_smokelid+, og røyklukearealet i denne delen av hallen tilsvarer altså det arealet som opprinnelig ble beregnet for hele hallen.



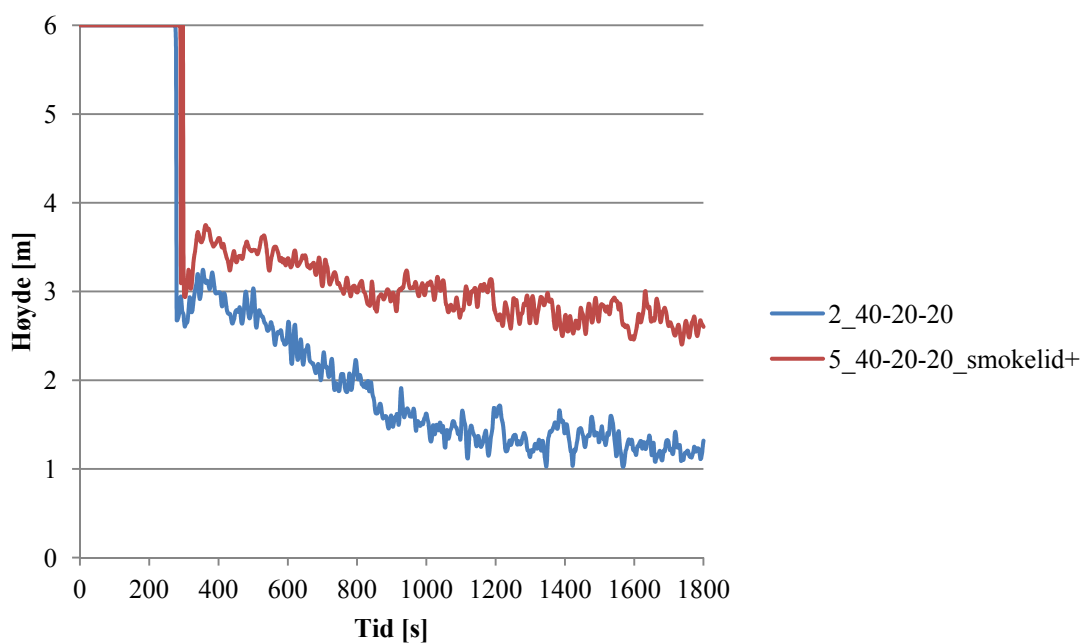
Figur 4.46: Ventilasjonsforhold - temperatur utenfor trapperom 1 i høyde to meter.

Som Figur 4.46 viser holdes temperaturen vesentlig lavere med økt lukeareal (5_40-20-20_smokelid+). Det er viktig å påpeke at disse simuleringene er kjørt med brannscenario 1, og at temperaturen vil være høyere med brannscenario 2, som er det dimensjonerende scenarioet.



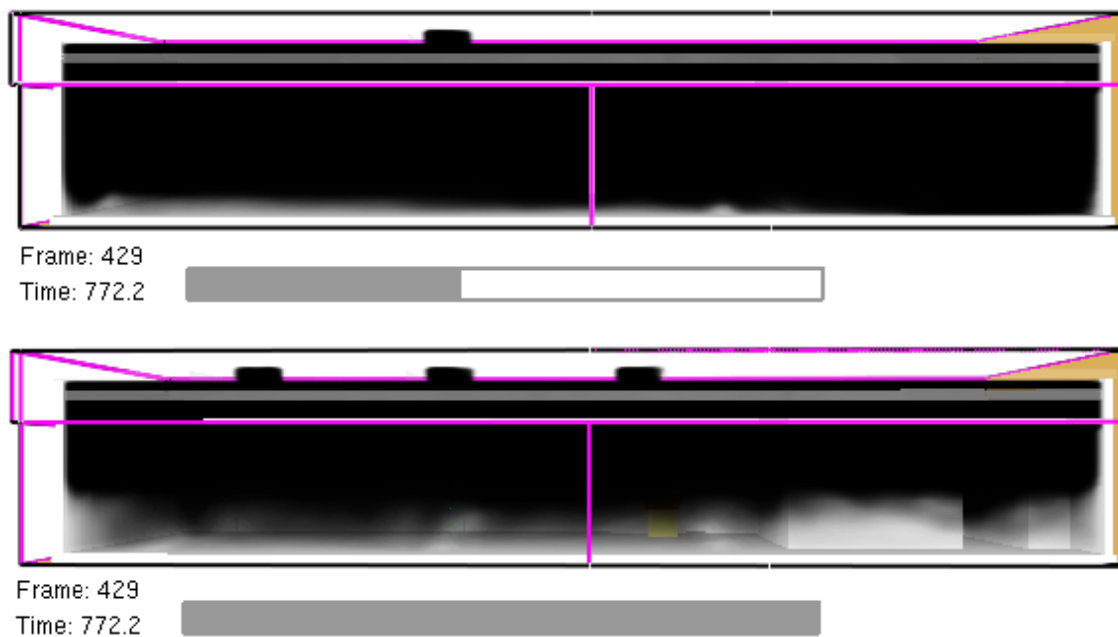
Figur 4.47: Ventilasjonsforhold - røykformørkelse inne i trapperom i høyde to meter.

Som vist i Figur 4.47 skjer røykformørkelsen vesentlig saktere med økt lukeareal. Beam Detector med 3,2 meters målelengde gir en maksimal røykformørkelse på 47,86 % for ti meters sikt. En sikt på ti meter opprettholdes i ca. 640 sekunder med økt lukeareal, mot omtrent 400 sekunder med opprinnelig areal.



Figur 4.48: Ventilasjonsforhold - røyksjiktets høyde utenfor trapperom 1.

Figur 4.48 viser at røyklaget utenfor trapperom 1 synker til under to meter etter omtrent 720 sekunder, og fortsetter å synke til det ender på omtrent en meter ved slutten av simuleringen. I Figur 4.49 vises forskjellen i røyksjiktets høyde ved 772,2 sekunder. Simulering 5_40-20-20_smokelid+ viser en tydelig forbedring i forhold til simulering 2_40-20-20.



Figur 4.49: Sammenligning av simulering 2_40-20-20 og simulering 5_40-20-20_smokelid+ med tredoblet røyklukeareal. Bildet er hentet fra Smokeview.

Simuleringen i gruppe 5 viser at kravet til tre meter frisisiktsone blir opprettholdt midt i hallen i ca. 1250 sekunder med et lukeareal som er tre ganger større enn kravet i HO-meldingen.

Registrerte verdier for CO- og CO₂-konsentrasjonen i hallen holdes vesentlig lavere med økt lukeareal.

Siden forholdene generelt forbedres med økt lukeareal er det valgt å benytte beregningene for luke- og vifteareal, samt viftekapasiteter fra HO-meldingen, på hver enkelt del av hallen (A, B og C) i hovedsimuleringene. Dette gir et luke- og vifteareal samt viftekapasitet som multipliseres med en faktor på tilnærmet tre. Med beregnet nødvendig avtrekksmengde på 52 m³/s og tilluftsmengde på 41,6 m³/s for ca. 1/3 av hallen tilsvarer dette henholdsvis 156 m³/s og 124,8 m³/s for hele hallen.

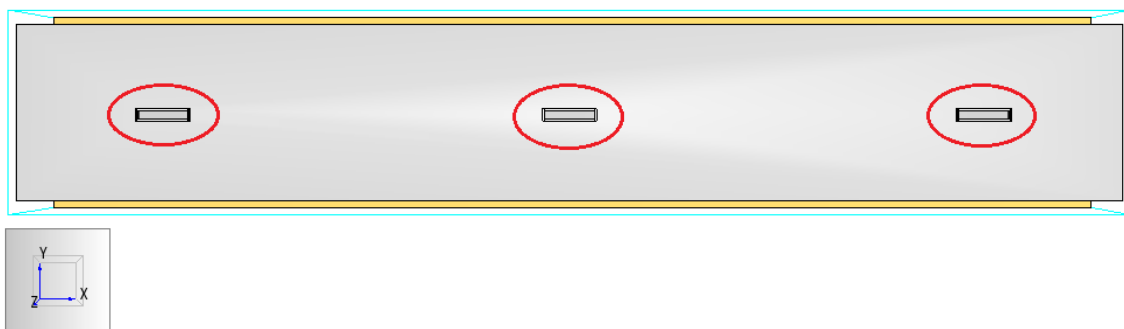
Vindkrefter

Vindkrefter vil, avhengig av vindretning, virke som et hinder eller som et hjelpemiddel til å drive røyken ut av hallen. Det er i oppgaven valgt å se bort fra

virkningene av vind. Dette fordi arbeidet med å bestemme vindretning og krefter vil bli for omfattende i forhold den tiden og de ressurser som er tilgjengelige for oppgaven.

Fordeling og plassering av luker og vifter

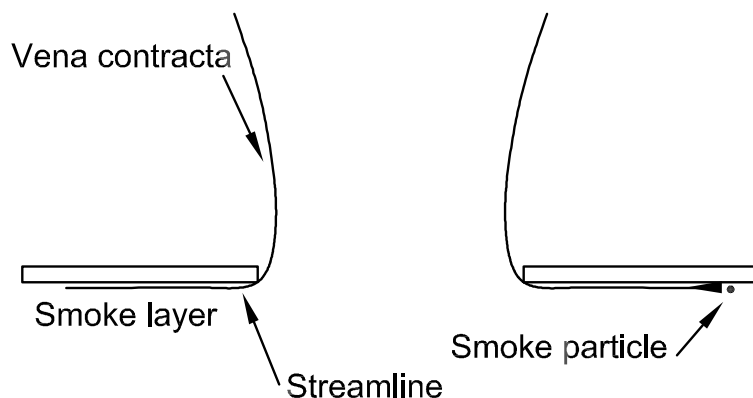
Fordeling og plassering av avtrekkluker og -vifter i tak er vist i Figur 4.50. Avtrekklukene og -viftene er plassert jevnt over taket siden risikoen for brann antas lik over hele hallen. Kravet til lukeareal ble beregnet til 7 m^2 (se avsnitt 4.2.2), og to luker/vifter på $7 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ er plassert i hver av hallens tre deler. Avstanden mellom lukene som er plassert i del A, B og C er ca. 42 meter.



Figur 4.50: Avtrekkluker/vifter i tak, sett ovenfra. Avtrekkluker/-vifter er markert med rødt.

Korrigerings av lukeareal

Naturlige ventilasjonsåpninger er styrt av oppdrift og kompresjon av strømmingen som går gjennom åpningen [11]. Når en luftstrøm passerer gjennom ventilasjonsåpningen vil den derfor presses sammen. Denne sammenpressingen reduserer det effektive ventilasjonsarealet med dannelse av såkalt "vena contracta" [96], se Figur 4.51.



Figur 4.51: Dannelse av "vena contracta" utenfor en oppdriftsdrevet ventilasjonsåpning. Gjengitt fra [96].

Vena contracta vil ikke opptre i FDS, og det er derfor viktig å kompensere for dette ved brannsimulering for å unngå redusert ytelse på den virkelige ventilasjonen sammenlignet med den modellerte ventilasjonen. I de simuleringene hvor det er benyttet termisk ventilasjon er lukearealet i FDS redusert med en faktor på 0,85 for å korrigere for vena contracta, som anbefalt av Valkvist [96].

Viftekapasitet og oppstart av vifter

Kapasitet på avtrekks- og tilluftsvifter er beregnet etter HO-meldingen, se avsnitt 4.2.2. HO-meldingens *Tabell 7-3* (Vedlegg C) angir deteksjonstiden til en røykdetektor for en brann med brannveksttid på 225 sekunder og en takhøyde på seks meter til å være 1,5 minutter [1]. Alabasterhallen har en høyde under himling på 7,2 meter. Mekanisk røykventilasjon bør, i følge HO-meldingen, ha en tidsforsinkelse på 0,5 minutter fra start til full viftekapasitet er nådd [1]. Dette gjøres for å unngå for høy ventilasjonshastighet for tidlig, og en eventuell økt brannspredning som følge av turbulens i røyksøylen. Alle avtrekksvifter i hovedsimuleringene er valgt til å starte opp etter 120 sekunder for deretter og økes gradvis i effekt over tid. 120 sekunder til oppstart er valgt siden takhøyden i hallen er større enn høyden som anbefalingen i HO-meldingen er gitt for. Tilluftsviftene i simuleringene med mekanisk røykventilasjon startes etter 60 sekunder.

Effektøkningen for viftene er gjort ved å benytte en TAU_V-funksjon i FDS hvor det velges en t^2 -kurve for effektøkningen, dvs. at hastigheten øker eksponentielt til den når sin referanseverdi [28]. Når denne økningen følger en t^2 -kurve vil den holde seg konstant etter at TAU_V sekunder er nådd. TAU_V er satt lik 30 sekunder, dvs. at viftene når maks effekt 30 sekunder etter at de er startet. Dette gjelder for både avtrekks- og tilluftsvifter.

Alle vifter er laget ved hjelp av funksjonen VENT. En VENT er plassert på overflaten til tak og vegger der viftene skal være. VENT-ene er tilknyttet en overflate (SURF) som definerer strømningshastigheten (VEL) i m/s ut eller inn i hallen. For avtrekk er hastigheten satt med en positiv verdi, f.eks. VEL=7,4, og for tilluft er hastigheten satt med negativ verdi, f.eks. VEL=-1,5.

Åpning av avtrekk- og tilluftsluker

Tillufts- og avtrekkslukene i simuleringene med termisk ventilasjon (6_ho og 7_slots) starter opp etter 120 sekunder. Dvs. at lukene åpnes 120 sekunder inn i simuleringen. Dette er gjort ved å lage hull (HOLE) i tak og vegg der lukene er plassert. Hullene ”dukker opp” ved definert oppstart, 120 sekunder.

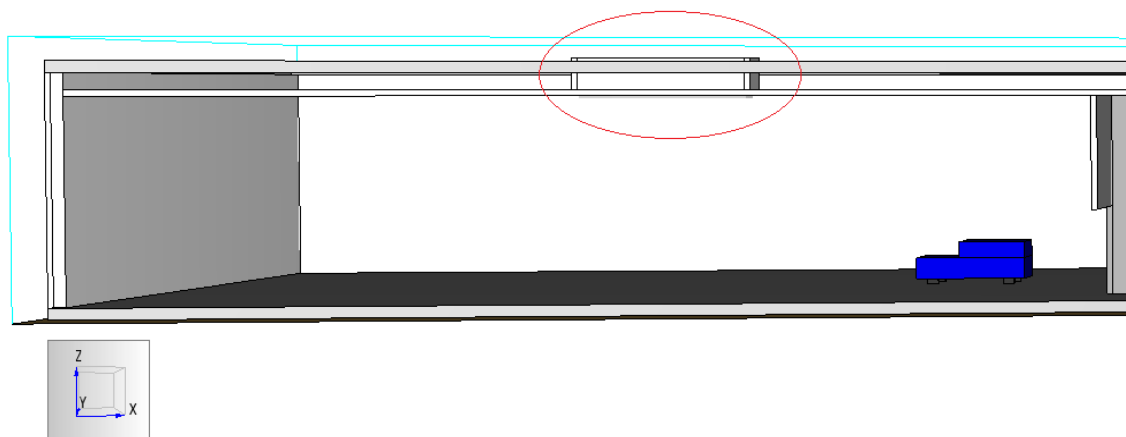
Aktivering av røykskjermer

Røykskjermene i simuleringene med termisk røykventilasjon (6_ho og 7_slots) ”dukker opp” med 20 sekunders forsinkelse etter aktivering av Beam Detector Device (som måler røykformørkelse). Instrumentet aktiveres ved 0,33 % røykformørkelse, som er standardverdien i FDS, og er plassert under himlingen i midten av hallens del A, B og C.

I simuleringene med mekanisk røykventilasjon (7_7.4out, 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in) er røykskjermene til stede fra start. Disse simuleringene avsluttet, som nevnt, pga. numerisk instabilitet flere ganger før forfatterne klarte å endre på modellen slik at den fungerte som den skulle. Å la røykskjermene være med fra start var en av endringene som ble gjort.

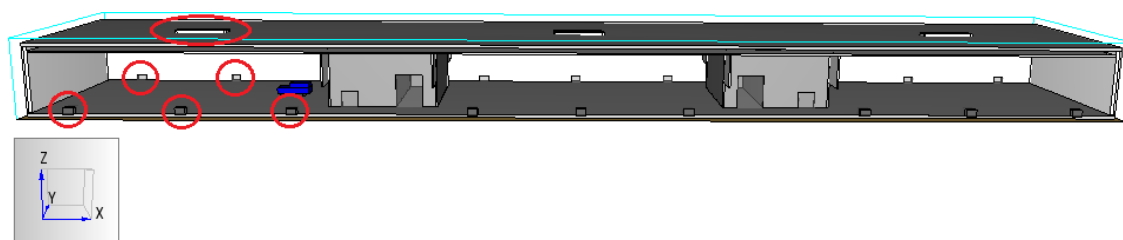
Røykventilasjon i gruppe 6

I Figur 4.52 vises himling og avtrekkslukeløsning som er benyttet i simulering 6_ho. Himlingen går helt inntil ytterveggene, og den termiske ventilasjonsløsningen fungerer slik at røyken kan bevege seg opp i en sjakt som føres gjennom tak og himling (prinsippet for løsningen er vist i Figur 4.12 tidligere i kapittelet).



Figur 4.52: Himling og avtrekksløsning for simulering i gruppe 6. Avtrekksluke er markert med rødt.

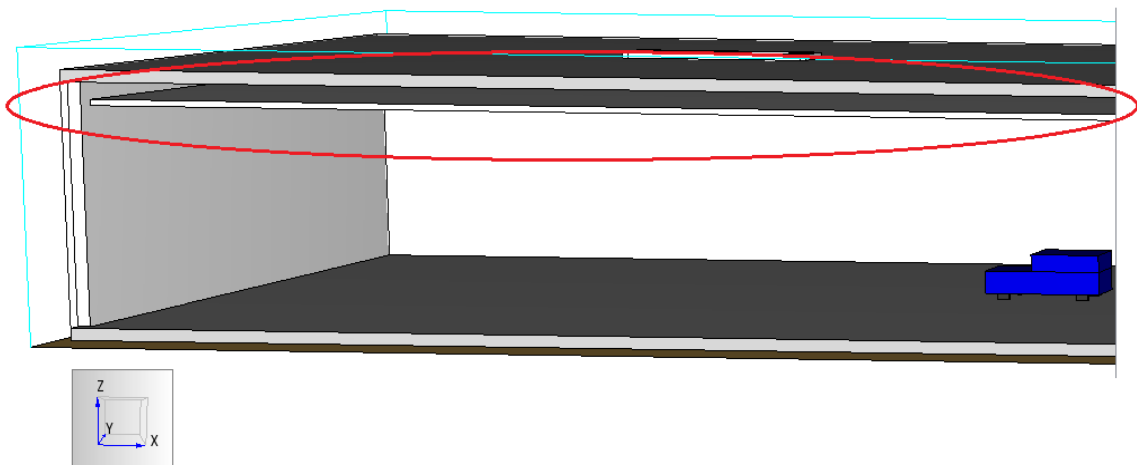
Det er benyttet avtrekks- og tilluftsluker på henholdsvis 18 og 17,28 m², som i praksis tilsvarer et areal på ca. 21 m² for både avtrekk og tilluft (korrigert for vena contracta). Plassering av lukene er vist i Figur 4.53.



Figur 4.53: Plassering av avtrekksluker i tak og tilluftsluker i fasade i simulering 6_ho. Luker i del A er markert med rødt.

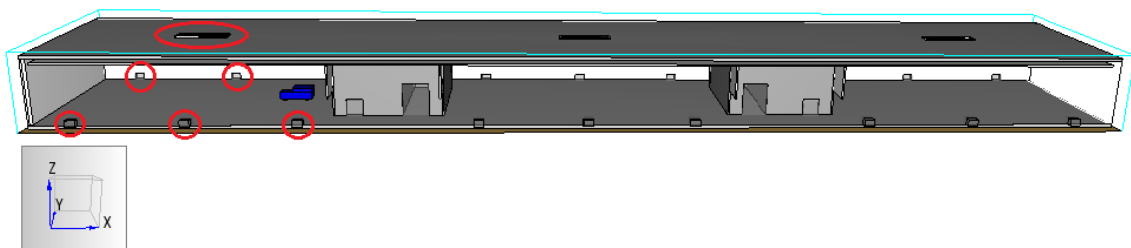
Gruppe 7

I Figur 4.54 vises slisseløsningen som er benyttet for alle simuleringene i gruppe 7. Ved alle ytterveggene i hallen er det en 20 cm bred slisse i himlingen hvor røyken skal kunne bevege seg opp over himling for deretter å trekkes videre ut gjennom avtrekksluker eller -vifter (prinsippet for slisseløsningen er vist i Figur 4.13 og Figur 4.14 tidligere i kapittelet).



Figur 4.54: Slisseløsning i himling for simuleringer i gruppe 7. Himlingen går ikke helt inntil yttervegger.

I simulering *7_slots* er det benyttet termisk ventilasjon. Også her er størrelsen på avtrekks- og tilluftslukene henholdsvis 18 og 17,28 m² inkludert korrigering for vena contracta. Plassering av lukene er vist i Figur 4.55.

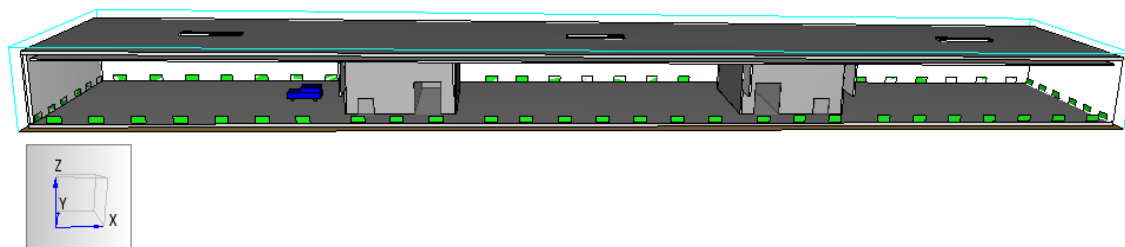


Figur 4.55: Plassering av avtrekks- og tilluftsluker i simulering *7_slots* og plassering av avtrekksvifter og tilluftsluker i simulering *7_7.4out*. Luker/vifter i del A er markert med rødt.

4. Analyse

Simulering *7_7.4out* baseres på mekanisk ventilasjon hvor avtrekk er løst ved bruk av 21 m² vifter med kapasitet på 7,4 m/s, noe som tilsvarer en avtrekksmengde på 155,4 m³/s (tilnærmet tre ganger avtrekksmengde beregnet etter HO-meldingen). Tilluft er løst ved hjelp av 17,28 m² luker (inkludert korrigerende vena contracta). Plasseringen av avtrekksviftene og tilluftslukene er lik som for simulering *7_slots*, bortsett fra at avtrekkslukene er byttet ut med vifter, se Figur 4.55.

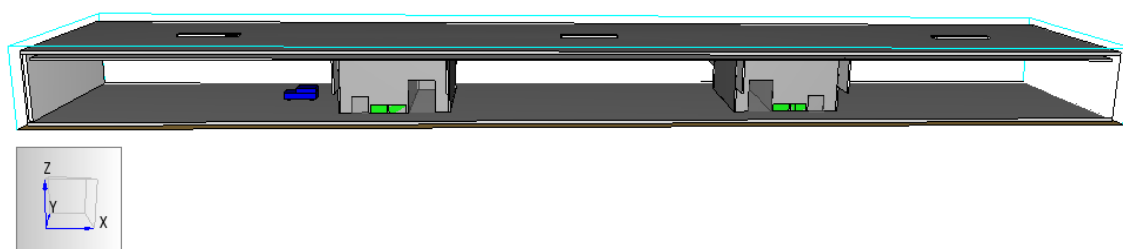
I simulering *7_7.4out_1.5in* er det benyttet mekanisk ventilasjon med 21 m² avtrekksvifter med kapasitet på 7,4 m/s og 84,48 m² tilluftsvifter med kapasitet på 1,5 m/s, som tilsvarer en avtrekks- og tilluftsmengde på henholdsvis 155,4 m³/s og 126,7 m³/s (tilnærmet tre ganger avtrekksmengde beregnet etter HO-meldingen). Plassering av avtrekks- og tilluftsviftene er vist i Figur 4.56.



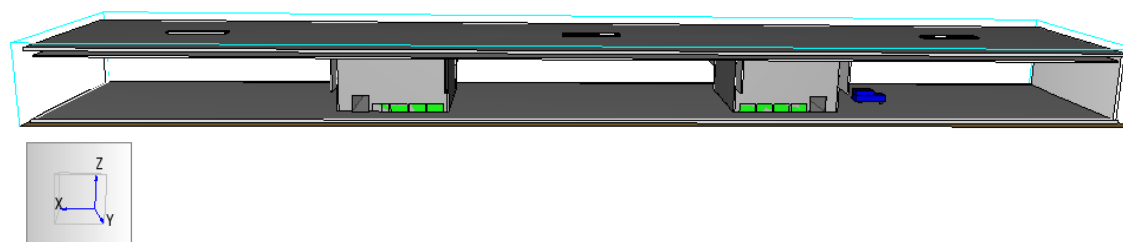
Figur 4.56: Plassering av avtrekk- og tilluftsvifter i simulering *7_7.4out_1.5in*.

Tilluftsvifter er markert med grønt.

I simulering *7_7.4out_5.2in* er det benyttet mekanisk ventilasjon i form av 21 m² avtrekksvifter i tak og 24 m² tilluftsvifter på to vegger i begge trapperom, som tilsvarer en avtrekks- og tilluftsmengde på henholdsvis 155,4 m³/s og 124,8 m³/s (tilnærmet tre ganger avtrekksmengde beregnet etter HO-meldingen). Plasseringen av viftene er vist i Figur 4.57 a) og b).



(a)



(b)

Figur 4.57: Plassering av avtrekkvifter i tak og tilluftsvifter i trapperom i simulering 7_7.4out_5.2in. Tilluftsvifter er markert med grønt.

4.2.6 Kontroll av modell for hovedsimuleringer

Dette kapittelet beskriver kontroll av hovedsimuleringene i gruppe 6 og 7 i henhold til kapittel 3.5.10, Kontroll av modellen, i litteraturstudiet. Håndberegninger gjort i dette kapittelet finnes i Vedlegg H.

Ved bruk av likning (3.2) (kapittel 3.5.10) er det kontrollert at den dimensjonsløse effektutviklingen, Q^* , er innenfor intervallet 0,3 til 2,5. $Q^* = 0,61$ for brannscenario 2.

D^* er beregnet til å være 0,16 etter likning (3.1). Forholdet D^*/H er mindre enn 0,5, noe som betyr at D^*/dx bør være større eller lik 15 [20]. For meshopløsningen og brannscenarioet som er valgt for hovedsimuleringene er $D^*/dx = 9,1$ over hele modellen. Dette ligger innenfor kravet gitt i *FDS User's Guide* som angir at forholdet bør være i intervallet 4-16 [28], men ligger under anbefalingen om at verdien skal

være over 10 i nærheten av brannen [20] [11]. Skulle forholdet vært over 10 i dette området burde det blitt brukt en cellestørrelse som var under 20 cm. 10 cm cellestørrelse gir et D^*/dx -forhold på 18,2. Celler på ca. 18 cm ville derfor oppfylt anbefalingen. Siden forholdet er innenfor kravet gitt i brukermanualen til FDS anser forfatterne kravet som oppfylt. Det velges allikevel å se på dette som en potensiell feilkilde, da et høyere forholdstall er anbefalt enkelte steder i litteraturen.

Det ble kontrollert at meshene var riktig koblet sammen og at alle objektene var synlige i alle meshene de var beskrevet i. Tilluftsvifter og avtrekksvifter ble først feilplassert i forhold til meshgrensene, noe som førte til at numerisk instabilitet oppsto i en av hovedsimuleringene. Dette ble endret før simuleringene ble startet på nytt.

Modellens forbrennings- og materialeegenskaper ble hentet fra ulike forsøk og fra generiske tabeller. Disse ble kontrollert opp mot andre kilder, og i tillegg ble det gjennomført egenkontroll for å sikre at verdiene var riktig skrevet inn i Pyrosim.

I oppgaven har det ikke vært fokus på stråling og det er derfor ikke satt noen spesifikasjoner for strålingsmodellen. Som standard er strålingsmodellen i FDS aktiv (RADIATION=.TRUE.) [28], dvs. at strålingstransport beregnes uten at en trenger å spesifisere dette eksplisitt. Dette betyr at alle standardverdier for strålingsmodellen i FDS er benyttet i beregningen og strålingsmodellens finhet er ikke kontrollert.

Strømningshastigheter i modellen er kontrollert for å påse at de ikke overstiger 10 m/s [20], noe de ikke gjør. Strømningshastigheter målt ved hjelp av SLFC-fil for enkelte områder i hallen for simulering 7_7.4out_1.5in vises i Vedlegg I.

Flammehøyden er beregnet ved hjelp av Heskestads røyksøylemodell og er funnet til å være 4,78 meter for brannscenario 2. Visuell observasjon i Smokeview viser at flammehøyden er i størrelsesorden 4-4,5 meter. Dette ligger litt under beregnet høyde, men antas som realistisk.

Temperaturen i senter av brannen er på omtrent 1000 °C, noe som er innefor anbefalte verdier på 700-1200 °C. Toppen av flammen er i følge håndberegningene

4,78 meter over brenneren, dvs. 6,38 meter over gulvet (brenneren er 1,6 meter over gulv). Temperaturen i dette punktet varierer fra ca. 100-500 °C avhengig av røyk-ventilasjonsløsningen som er benyttet, noe som ligger litt i underkant av anbefalt verdi på 500-600 °C.

Den simulerte HRR er kontrollert for alle simuleringer, og resultatene viser at den samsvarer med angitt HRR.

Modellen er kontrollert med tanke på turbulensoppløsning ved bruk av "slice"-funksjonen MTR. Resultater fra MTR-registreringer for simulering 7_7.4out_1.5in er vist i Vedlegg J. Den kinetiske energien med mindre enn 80 % oppløsning er markert med sort, og tilsvarer en MTR-verdi $< 0,2$. Det er ønskelig at det markerte området skal være så lite som mulig. MTR er kontrollert visuelt og turbulensen ser ut til å ha god oppløsning.

4.2.7 Simuleringsresultater fra FDS

I dette kapitlet presenteres simuleringsresultater fra hovedsimuleringene i gruppe 6 og 7. De ulike simuleringene med tilhørende røykventilasjonsløsninger er oppsummert i Tabell 4.12. Det er hovedsakelig vurdert måleverdier registrert i del A. Dersom mer kritiske verdier er registrert andre steder i hallen er dette spesifisert.

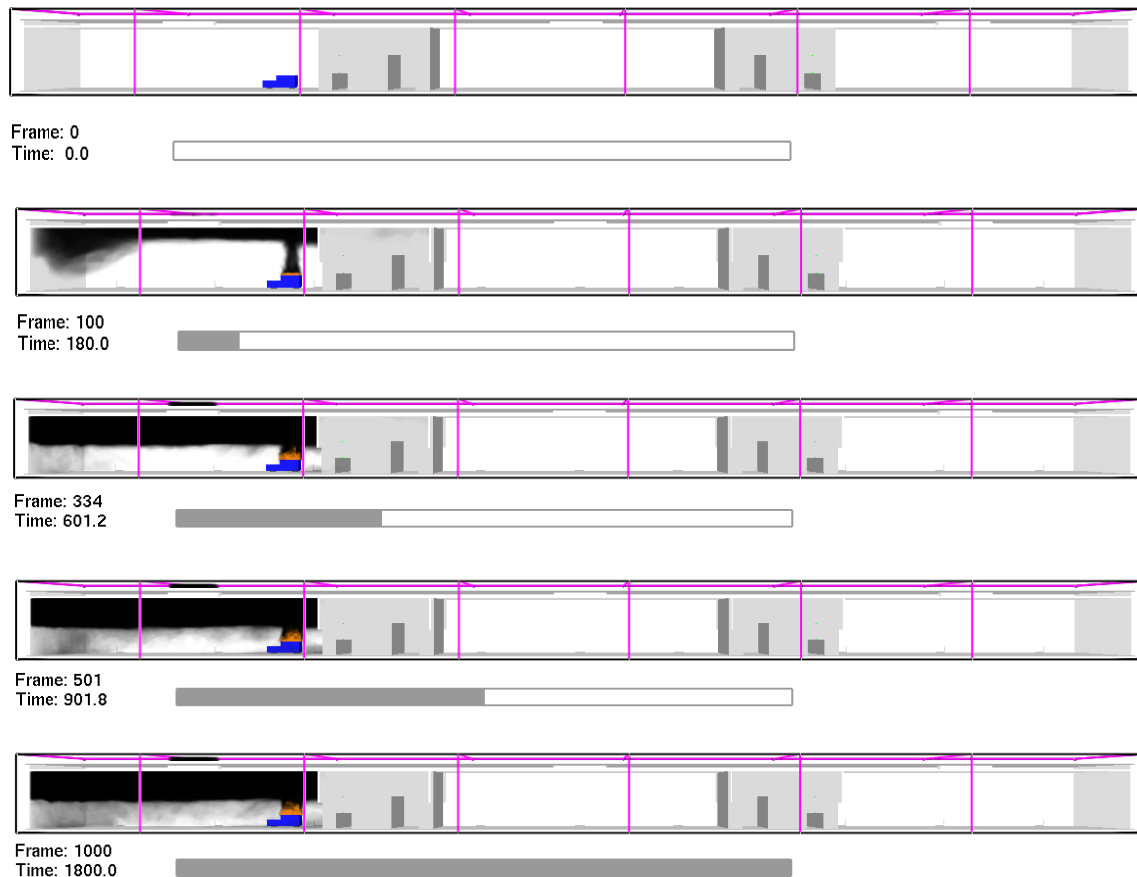
Tabell 4.12: Oversikt over simuleringer i gruppe 6 og 7 med tilhørende ventilasjonsløsninger, luke¹- og avtrekksareal samt viftekapasiteter.

| Simulering | Ventilasjonsløsning | Avtrekk | Tilluft |
|----------------|---|-----------------------------|--------------------------------|
| 6_ho | Termisk, røykluker i tak, tilluftsluker i fasade | 21 m ² | 21 m ² |
| 7_slots | Termisk, slisser, røykluker i tak, tilluftsluker i fasade | 21 m ² | 21 m ² |
| 7_7.4out | Mekanisk, slisser, avtrekksvifter i tak, tilluftsluker i fasade | 21 m ² , 7,4 m/s | 21 m ² |
| 7_7.4out_1.5in | Mekanisk, slisser, avtrekksvifter i tak, tilluftsvifter i fasade | 21 m ² , 7,4 m/s | 84,48 m ² , 1,5 m/s |
| 7_7.4out_5.2in | Mekanisk, slisser, avtrekksvifter i tak, tilluftsvifter i trapperom | 21 m ² , 7,4 m/s | 24 m ² , 5,2 m/s |

- 1) Arealer for termisk ventilasjon er i FDS korrigert for vena contracta og tilsvarer 0,85 prosent av virkelig lukeareal.

6_ho: termisk ventilasjon med avtrekks- og tilluftsluker

Figur 4.58 viser bilder av røykutviklingen i Alabasterhallen i simulering 6_ho ved ulike tidspunkt i simuleringen.



Figur 4.58: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 6_ho ved 0, 180, 601,2, 901,8 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview.

I løpet av simuleringstiden holder røyken seg innenfor røykskjermene i del A. Dette viser at røykskjermene fungerer etter sin hensikt, nemlig å kontrollere røyken og hindre den fra å spre seg til de andre delene av hallen. Røyklaget er relativt stabilt fra ca. 300 sekunder, og synker deretter sakte, men jevnt.

Alle parameterverdiene observert i del A er de høyeste målte verdiene i hallen i denne simuleringen.

4. Analyse

Sikt

Den registrerte verdien for røyksjiktets høyde samsvarer med visuell observasjon i Smokeview, og røyksjiktet holder seg godt over tre meter gjennom hele simuleringen.

Den registrerte røykformørkelsen tre meter over gulv tilsvarer en sikt på mer enn ti meter, og opprettholdes gjennom hele simuleringen.

Varmepåkjennning

Følgende verdier er registrert i to meters høyde midt i del A:

- temperatur < 23 °C
- strålingsfluks < 1 kW/m²

Gasskonsentrasjoner

Følgende verdier er registrert i to meters høyde midt i del A:

- CO-konsentrasjon $< 1,4$ ppm
- CO₂-konsentrasjon < 50 ppm (tilsvarer 0,005 %)
- O₂-konsentrasjonen ligger stabilt på verdier rundt 209 000 ppm (ca. 20,9 %)

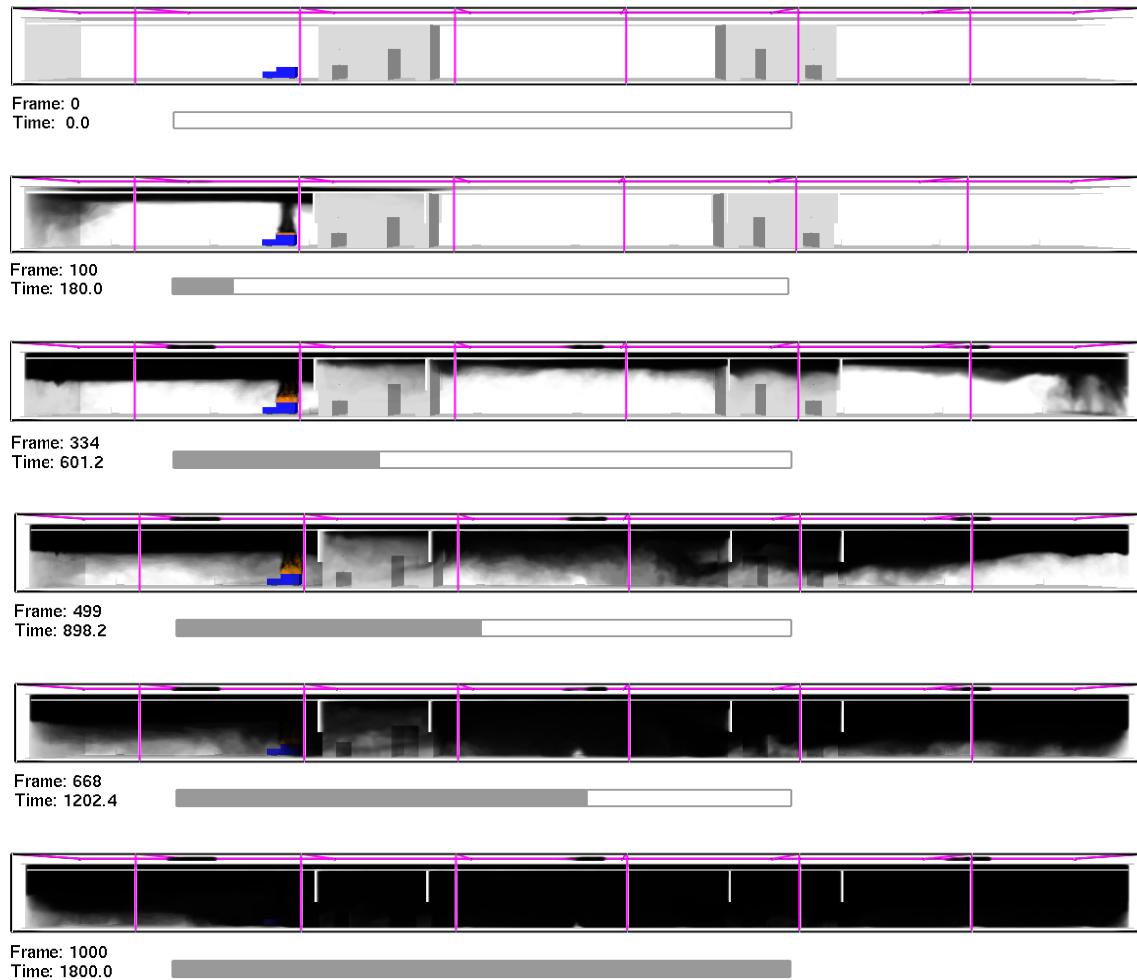
Lufthastighet

Målinger for lufthastighet i del A er listet opp nedenfor:

- i nærheten av tilluftsluker: ca. 1 m/s
- i senter av rommet i høyde to meter: ca. 0,1-0,6 m/s
- i nærheten av avtrekksluke: ca. 4 m/s

7_slots: termisk ventilasjon med slisser og avtrekks- og tilluftsluker

Figur 4.59 viser bilder av røykutviklingen i Alabasterhallen i simulering 7_slots ved ulike tidspunkt i simuleringen.



Figur 4.59: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_slots ved 0, 100, 180, 601,2, 898,2, 1202,4 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview.

I løpet av simuleringstiden sprer røyken seg fra del A til de andre delene av hallen. Røykskjermene fungerer etter sin hensikt, men røyken spres allikevel via slissene i himling. Røyken trekker opp gjennom slissene i nærheten av brannen, føres over himling og horisontalt bortover i hallen, før den synker ned i del B og C. I del B og C fungerer dermed slissene mot sin hensikt.

Sikt

Den registrerte verdien for røyksjiktets høyde samsvarer ikke med visuell observasjon i Smokeview. Som vist i Figur 4.59 ser det ut til at hallen røyklegges totalt innenfor simuleringstiden. I følge de registrerte verdiene holdes røyksjiktet over fire meter i del A, mens forholdene er enda bedre i del B og C. Røyksjiktet i del B ligger over sju meters høyde, mens det i del C ikke er registrert noe røyksjikt i det hele tatt.

Registrerte verdier for røykformørkelse samsvarer bedre med visuell observasjon i Smokeview, og viser at formørkelsen øker med avstand fra brannen. I del A i tre meters høyde opprettholdes ti meter sikt i ca. 1360 sekunder, mens tre meter sikt opprettholdes gjennom hele simuleringstiden. I samme høyde i del B opprettholdes ti meter sikt i ca. 1330 sekunder og tre meter sikt i ca. 1550 sekunder. I del C opprettholdes ti meter sikt i ca. 850 sekunder og tre meter sikt i ca. 1120 sekunder.

Varmepåkjønning

Følgende verdier er registrert i to meters høyde midt i del A:

- temperatur < 25 °C
- strålingsfluks < 1 kW/m²

Gasskonsentrasjoner

Høy røykformørkelse i del B og C gir tilsvarende høyere verdier for CO- og CO₂-konsentrasjon i disse delene av hallen.

Følgende verdier er registrert i to meters høyde midt i del C:

- CO-konsentrasjon < 80 ppm
- CO₂-konsentrasjon < 3000 ppm (tilsvarer 0,3 %)
- O₂-konsentrasjonen $> 204\ 000$ ppm (ca. 20,4 %)

Lufthastighet

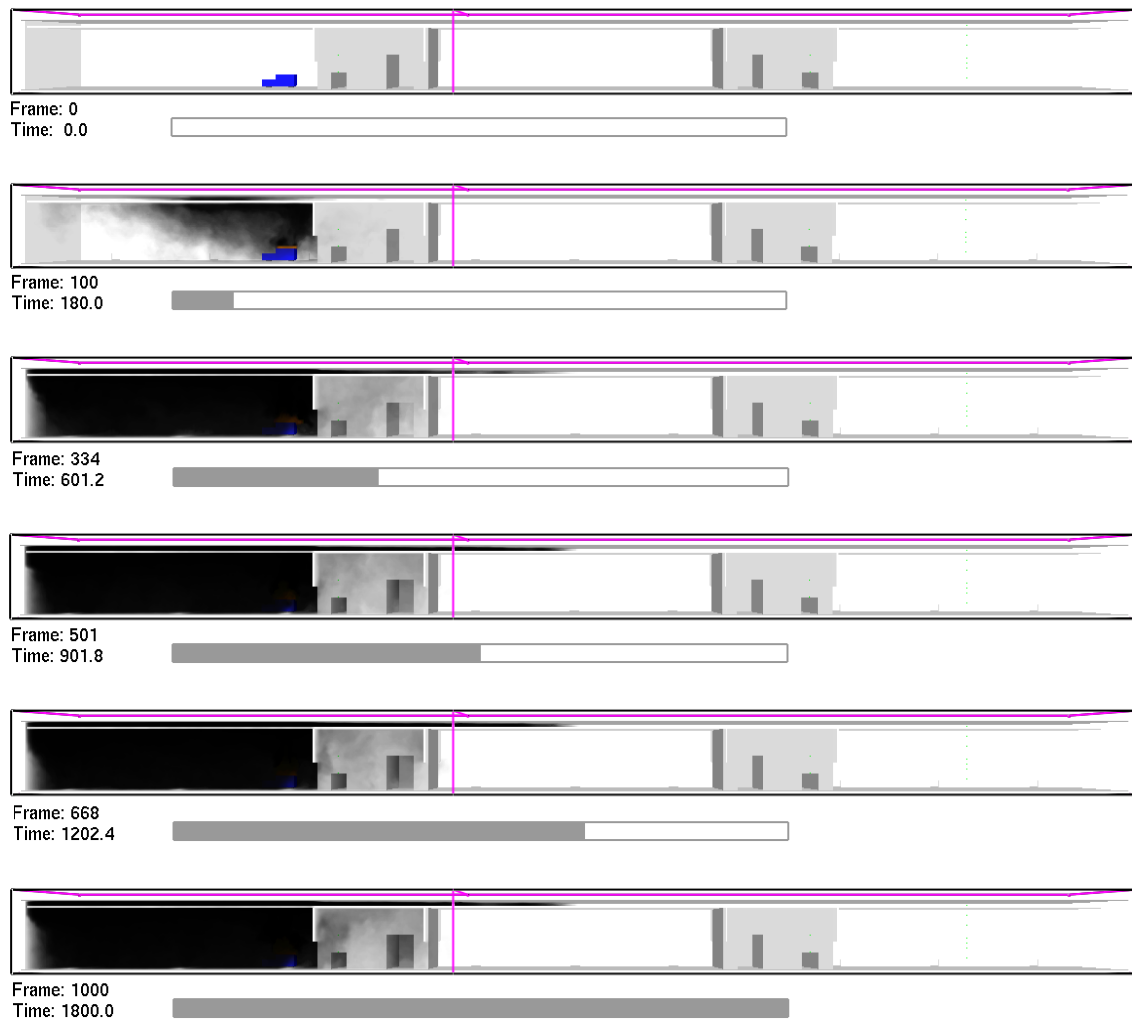
Målinger for lufthastighet i del A er listet opp nedenfor:

- i nærheten av tilluftsluker: ca. 0,5-1 m/s

- i senter av rommet i høyde to meter: ca. 0,1-0,5 m/s
- i nærheten av avtrekksluke: ca. 2,5 m/s

7_7.4out: mekanisk ventilasjon med slisser, avtrekksvifte i tak og tilluftsluker i fasade

Figur 4.60 viser bilder av røykutviklingen i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out ved ulike tidspunkt i simuleringen.



Figur 4.60: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out ved 0, 180, 601,2, 901,8, 1202,4 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview.

I løpet av simuleringstiden holder røyken seg i stor grad innenfor røykskjermene i del A. Prinsippet med røykskjermene fungerer etter sin hensikt, men røyksjiktet synker

4. Analyse

imidlertid så langt ned at røyken beveger seg på undersiden av røykskjermene slik at noe av røyken samles mellom skjermene utenfor trapperom 1. Røyken spres ikke videre herfra. På oversiden av himlingen spres imidlertid røyken fra del A mot del B og C. Røykmengden er ikke så stor at den trekkes ned i disse delene, men føres ut gjennom avtrekksvifter i tak.

Ved oppstart av tilluft genereres en del turbulens som har innvirkning på røykens strømningsmønster. Det ser ut til at røyklaget er veldig ustabil gjennom hele simuleringstiden.

Alle parameterverdiene observert i del A er de høyeste målte verdiene i hallen i denne simuleringen.

Sikt

Den registrerte verdien for røyksjiktets høyde i del A samsvarer ikke med visuell observasjon. I Smokeview ser det ut som røyklaget går ned til gulv, mens målinger viser at røyksjiktet holder seg over tre meter gjennom hele simuleringen. For del B og C samsvarer visuell observasjon med registrerte verdier.

Røykformørkelsen i høyde tre meter tilsvarer en sikt på ca. ti meter i løpet av de første 550 sekundene, mens tre meters sikt opprettholdes gjennom hele simuleringstiden.

Varmepåkjønning

Følgende verdier er registrert i to meters høyde i del A:

- temperatur < 30 °C
- strålingsfluks < 1 kW/m²

Gasskonsentrasjoner

Følgende verdier er registrert i to meters høyde i del A:

- CO-konsentrasjon < 25 ppm
- CO₂-konsentrasjon < 1000 ppm (tilsvarer 0,1 %)

- O₂-konsentrasjonen ligger stabilt på verdier rundt 209 000 ppm (ca. 20,9 %)

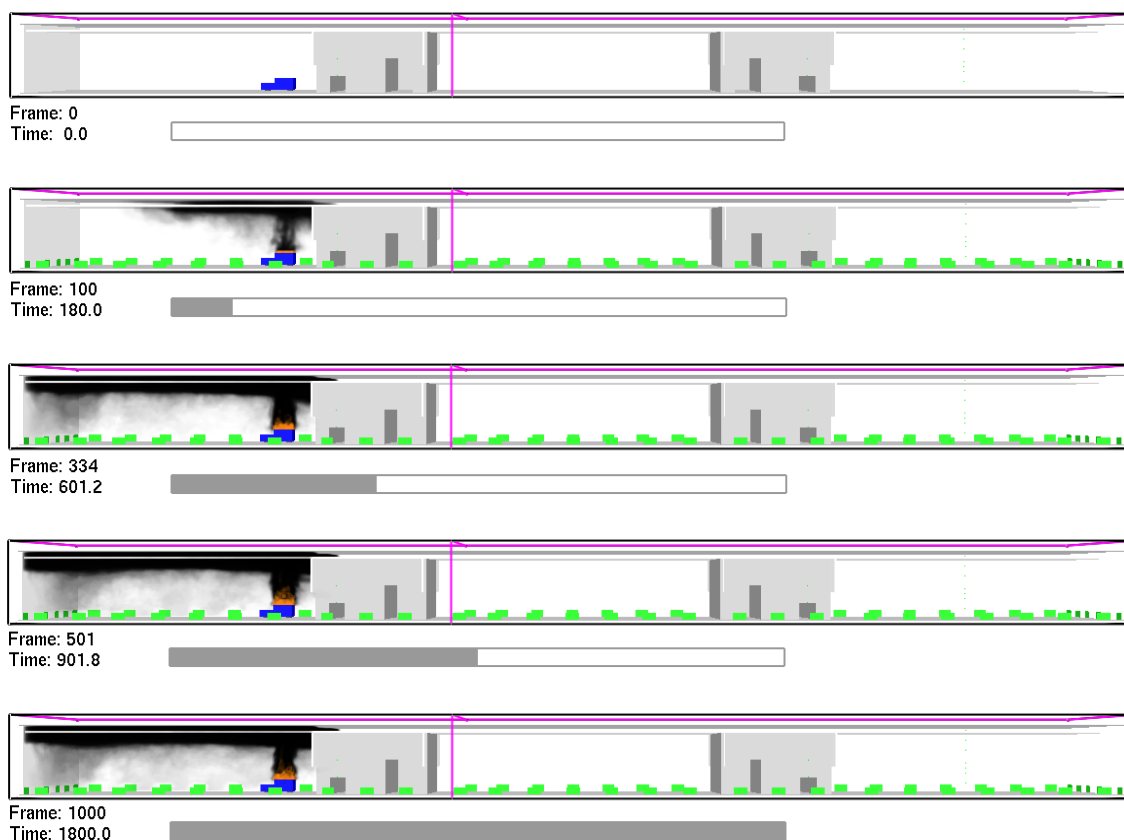
Lufthastighet

Målinger for lufthastighet i del A er listet opp nedenfor:

- i nærheten av tilluftsluker: ca. 3 m/s
- i senter av rommet i høyde 2 meter: ca. 1-4 m/s
- i nærheten av avtrekksluke: ca. 6 m/s

7_7.4out_1.5in: mekanisk ventilasjon med slisser, avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter fasade

Figur 4.61 viser bilder av røykutviklingen i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out_1.5in ved ulike tidspunkt i simuleringen.



Figur 4.61: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out_1.5in ved 0, 180, 601,2, 901,8 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview.

4. Analyse

I løpet av simuleringstiden holder røyken seg innenfor røykskjermene i del A. Dette viser at røykskjermene fungerer etter sin hensikt, og røyklaget stabiliserer seg etter omtrent 450 sekunder på ca. seks meters høyde.

Alle parameterverdiene observert i del A er de høyeste målte verdiene i hallen i denne simuleringen.

Sikt

Den registrerte verdien for røyksjiktets høyde samsvarer med visuell observasjon i Smokeview, og røyksjiktet holder seg over seks meter gjennom hele simuleringen.

Registrerte verdier for røykformørkelse viser at ti meters sikt opprettholdes gjennom hele simuleringstiden.

Varmepåkjønning

Følgende verdier er registrert i to meters høyde i del A:

- temperatur < 22 °C
- strålingsfluks < 1 kW/m²

Gasskonsentrasjoner

Følgende verdier er registrert i to meters høyde i del A:

- CO-konsentrasjon < 1 ppm
- CO₂-konsentrasjon < 25 ppm (tilsvarer 0,0025 %)
- O₂-konsentrasjonen ligger stabilt på verdier rundt 209 000 ppm (ca. 20,9 %)

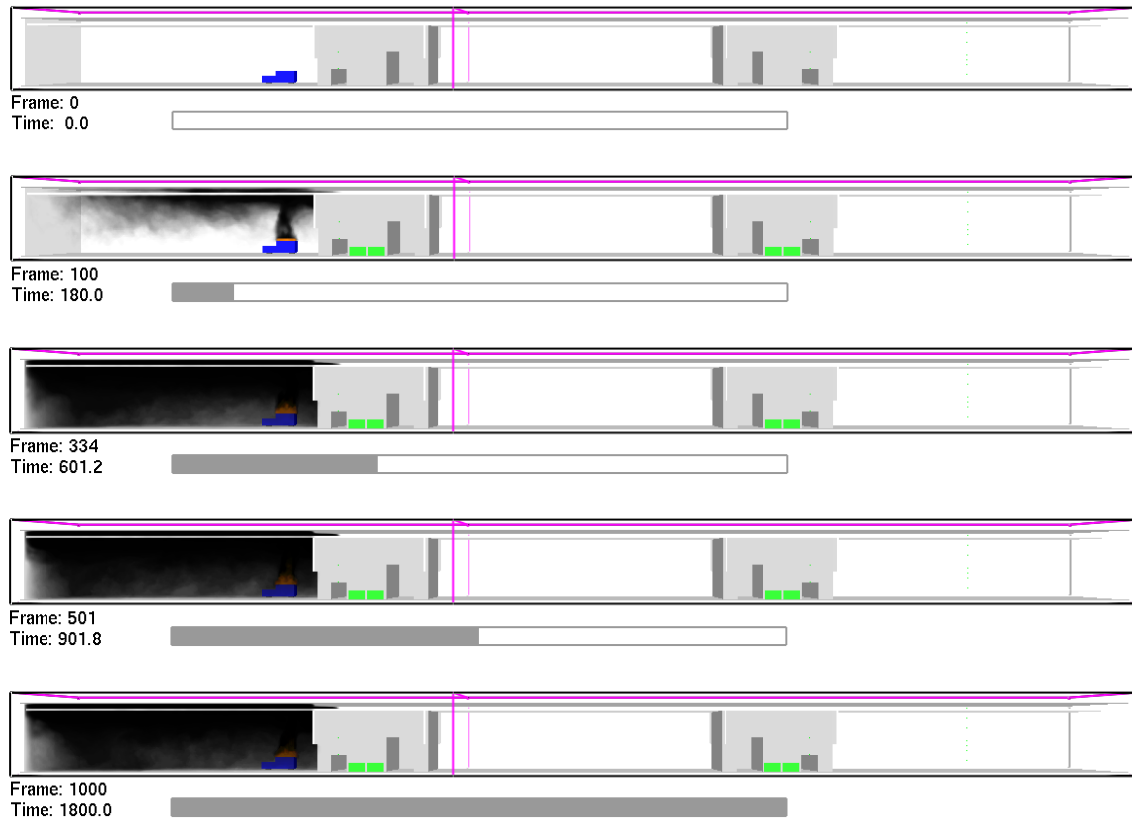
Lufthastighet

Målinger for lufthastighet i del A er listet opp nedenfor:

- i nærheten av tilluftsluker: ca. 1,5 m/s
- i senter av rommet i høyde 2 meter: ca. 0,5-1 m/s
- i nærheten av avtrekksluke: ca. 5,5 m/s

7_7.4out_5.2in: mekanisk ventilasjon med slisser, avtrekksvifte i tak og tilluftsluker i trapperom

Figur 4.62 viser bilder av røykutviklingen i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out_5.2in ved ulike tidspunkt i simuleringen.



Figur 4.62: Røykutvikling i Alabasterhallen i simulering 7_7.4out_5.2in ved 0, 180, 601,2, 901,8 og 1800 sekunder. Bilder er hentet fra Smokeview.

I løpet av simuleringstiden holder røyken seg innenfor røykskjermene i del A, noe som viser at røykskjermene fungerer etter sin hensikt. Røyklaget stabiliserer seg etter omtrent 450 sekunder på ca. seks meters høyde.

Ved oppstart av tilluft genereres en del turbulens som fører til at røyklaget blir veldig ustabil gjennom hele simuleringstiden. Røyksjiktet synker raskest ved kortveggen i del A som befinner seg lengst unna trapperommet hvor tilluftsviftene er plassert.

4. Analyse

Alle parameterverdiene observert midt i del A er de høyeste målte verdiene i hallen i denne simuleringen.

Sikt

Den registrerte verdien for røyksjiktets høyde i del A samsvarer ikke med visuell observasjon. I Smokeview ser det ut som røyklaget går ned til gulv, mens målinger viser at røyksjiktet holder seg over fem meter gjennom hele simuleringen.

Registrerte verdier for røykformørkelse viser at ti meter sikt opprettholdes i høyde tre meter gjennom hele simuleringstiden.

Varmepåkjønning

Følgende verdier er registrert i to meters høyde i del A:

- temperatur < 26 °C
- strålingsfluks < 1 kW/m²

Gasskonsentrasjoner

Følgende verdier er registrert i to meters høyde i del A:

- CO-konsentrasjon < 10 ppm
- CO₂-konsentrasjon < 400 ppm (tilsvarer 0,04 %)
- O₂-konsentrasjonen ligger stabilt på verdier rundt 209 000 ppm (ca. 20,9 %)

Lufthastighet

Målinger for lufthastighet i del A er listet opp nedenfor:

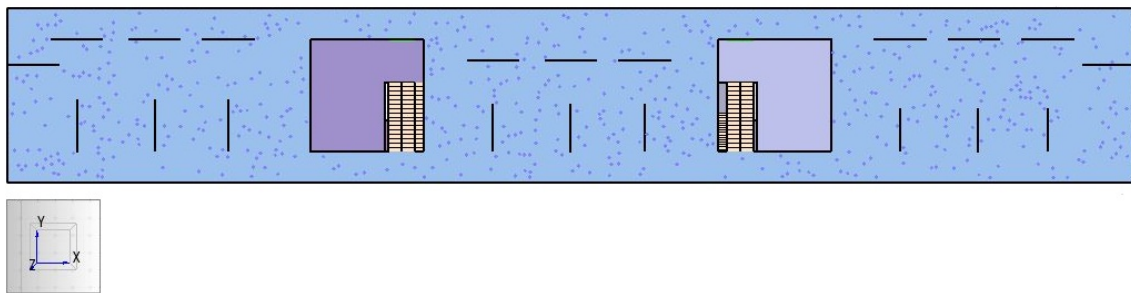
- i nærheten av tilluftsluker: ca. 5-6,5 m/s
- i senter av rommet i høyde 2 meter: ca. 0,5-1,5 m/s
- i nærheten av avtrekksluke: ca. 5,5 m/s

Resultatene fra hovedsimuleringene er sammenlignet og drøftet i kapittel 5.

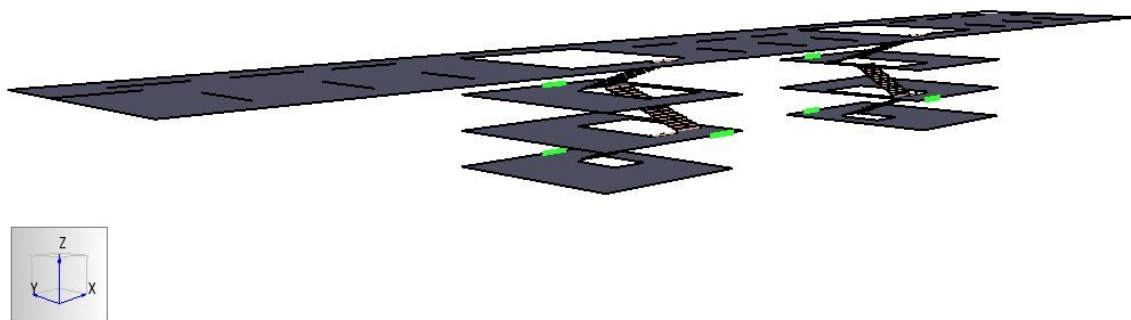
4.2.8 Evakueringssimulering i Pathfinder

Geometri

Hallens geometri er, i likhet med i FDS, forenklet til 130 m x 20 m. I FDS er det gjennomført simuleringer både med og uten frittstående vegger. I simuleringene i Pathfinder er det derimot kun utført simuleringer med frittstående vegger. Veggene vil fungere som hindringer, både fordi det vil kunne ta lengre tid for personer å orientere seg, samt øke gangavstander til trapperommene. Bruk av frittstående vegger er dermed en konservativ avgjørelse. Planløsningen slik den er modellert i Pathfinder er vist i Figur 4.63. Rømningsvei fra Alabasterhallen går via trapperommene og er vist i Figur 4.64. Åpningen til trapperommene og selve trappene er satt til tre meter.



Figur 4.63: Planløsning benyttet i evakueringssimulering i Pathfinder.



Figur 4.64: Rømningsvei fra Alabasterhallen via trapperom slik hallen er modellert i Pathfinder.

Antall mennesker

Maksimal besøksbelastning i Alabasterhallen er 600 personer. Det vil derfor være konservativt å benytte denne verdien.

Forsinkelse (initial delay)

Det vil ta tid fra en brann blir oppdaget til mennesker begynner å evakuere. Denne tiden kalles forsinkelse (initial delay), og er satt lik standardverdien i programmet, dvs. 60 sekunder [56]. Alle mennesker vil ikke starte evakueringen på samme tidspunkt, gjennomsnittlig evakueringsstart er satt til 90 sekunder (etter at brannen er oppdaget). Det er definert et standardavvik på ± 30 sekunder, noe som betyr at noen vil starte evakueringen umiddelbart etter at brannen er oppdaget, ved 60 sekunder, mens andre venter opptil 120 sekunder. Studier på uanmeldte brannøvelser i store handlesentre har vist at tiden før personer starter evakuering er maksimalt 60 sekunder dersom ansatte ber folk om å evakuere [54]. Forfatterne forutsetter at det i Alabasterhallen alltid vil være vakter til stede som har gjennomgått brannøvelser, og som dermed vil be folk om å evakuere dersom brannalarmen går. Det er derfor valgt å benytte en maksimal verdi på 60 sekunder fra brannen oppdages og til alle har startet evakuering.

Personprofil

Hver person får tildelt en profil med følgende parametre: ganghastighet, forsinkelse, størrelse og utseende. Disse parametrene kan settes til en konstant verdi, ved uniform fordeling mellom to verdier eller ved normalfordeling (med minimums- og maksimumsverdier, standardavvik og middelvei) [56]. I denne oppgaven er det valgt å benytte normalfordeling.

Ganghastighet

Ganghastighet avhenger av persontettheten [54]. Dersom persontettheten er mindre enn 0,5 personer/m², har det tradisjonelt blitt antatt at personer klarer å holde en ganghastighet langs gangveier på omtrent 1,25 m/s. Denne farten minker ettersom tettheten øker. I Alabasterhallen er tettheten beregnet etter følgende likning:

$$\text{Persontetthet} = \frac{\text{Personantall}}{\text{Areal av hall} - \text{Areal av trappehus}} \quad (4.8)$$

Persontettheten i hallen blir dermed:

$$\text{Persontetthet} = \frac{600 \text{ personer}}{(130 \text{ m} \times 20 \text{ m}) - (13 \text{ m} \times 13 \text{ m} \times 2)} = 0,27 \text{ personer/m}^2$$

En persontetthet på 0,27 personer/m² er mindre enn 0,5 personer/m², og ganghastigheten settes dermed til 1,25 m/s. I trapper reguleres ganghastigheten automatisk i Pathfinder avhengig av trappens helning.

Heis

Det er planlagt heis i trapperommene. I følge TEK 10 stilles det følgende krav til heis i offentlige bygninger:

(1) Byggverk for publikum og arbeidsbygning med to etasjer eller flere skal ha heis. Byggverk med inntil tre etasjer og liten persontrafikk kan ha løfteplattform. Løfteplattform og heis skal være allment tilgjengelig [2] [§ 12-3].

Per dags dato er det ikke lov å benytte heis etter at brannalarm har gått. Utdrag fra TEK 10:

(7) Heis og rulletrapp kan ikke være del av fluktvei eller rømningsvei. Slike innretninger skal stoppe på en sikker måte ved brannalarm. Rullende fortau som

er særlig tilrettlagt for sikker bruk kan være del av fluktvei eller rømningsvei [2] (§ 11-14).

Det er antatt at personer med nedsatt funksjonsevne får hjelp til å evakuere av vakter, andre ansatte, publikum eller brannvesen.

Simuleringer

Følgende evakueringsalternativer er simulert i Pathfinder:

- A. utgang i 1. etasje, to rømningsveier (begge trapperom)
- B. utgang i 1. etasje, en rømningsvei (kun ett trapperom)
- C. utgang i alle etasjer, to rømningsveier (begge trapperom)
- D. utgang i alle etasjer, en rømningsvei (kun ett trapperom)

Alle personer i Alabasterhallen evakuerer via trapperommene. I de to første evakueringsalternativene (A og B) er det bestemt at de må benytte utgang i 1. etasje. Det er sett bort fra kødannelse til og fra de andre etasjene. Det er konservativt å anta at personer som oppholder seg i Alabasterhallen må benytte utgang i 1. etasje, dersom en ser bort fra tilstrømmende personer fra de andre etasjene. På den annen side kan det hende at kødannelsen fra de andre etasjene blir så stor at å ikke inkludere denne faktoren blir for optimistisk med tanke på nødvendig rømningstid. Dette er en usikkerhet i simuleringene, og en mulig feilkilde.

I alternativ C og D er evakuering via alle etasjene tillatt. Da bruk og tillatt personbelastning i etasje 1-3 er ukjent, vil det innebære for høy usikkerhet å tallfeste mulig kødannelse i disse etasjene. I alternativ C og D vil alle personene fra Alabasterhallen kunne evakuere via alle underetasjene. I virkeligheten kan det, som nevnt, hende at dette ikke lar seg gjøre fordi det kommer evakuerende også fra disse etasjene. De to siste alternativene er dermed inkludert for å vise minimal evakueringstid.

4.2.9 Simuleringsresultater fra Pathfinder

Tabell 4.13 viser evakueringstid for de ulike evakueringsalternativene som er simulert. Personprofilene er tilfeldig fordelt på de 600 personene i hallen, og skal gjenspeile mangfoldet som finnes blant mennesker. Det er utført fem simuleringer for hvert alternativ for å undersøke ulike evakueringstider ved bruk av en funksjon kalt ”randomize”. Denne funksjonen innebærer at personene får utdelt personprofilene på nytt, tilfeldig, ved hver simulering [56]. Dette kan føre til at en som står langt unna en rømningsvei får tildelt ulike ganghastigheter for hver gang, og at den totale evakueringstiden dermed kan variere som følge av dette.

Tabell 4.13: Evakueringstider for ulike evakueringsalternativer samt gjennomsnittsverdier for evakuering.

| Simulerings- nummer og valgt styringsmodus for individene | 1 (styring/SFPE) | 2 (styring) | 3 (styring) | 4 (styring) | 5 (styring) | Gjennomsnitt |
|--|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | Evakueringstid (i sekunder) | | | | | |
| A | 417/416 | 390 | 438 | 419 | 370 | 407 |
| B | 601/600 | 558 | 579 | 566 | 555 | 572 |
| C | 316/315 | 277 | 311 | 332 | 289 | 305 |
| D | 512/511 | 444 | 466 | 461 | 405 | 458 |

De første simuleringene for hvert evakueringsalternativ ble utført med både SFPE- og styringsmodus for å avdekke eventuelle tidsforskjeller. Som Tabell 4.13 viser var tidsforskjellen mellom de to modusene svært liten. I alle simuleringene som ble kjørt med begge modusene krevde styringsmodusen mest tid. Denne modusen er i disse

4. Analyse

simuleringene mest konservativ, og er dermed benyttet videre. En oppsummering av alle simuleringresultatene fra Pathfinder finnes i Vedlegg K.

Ikke uventet gir evakueringsalternativ B, med evakuering kun ut fra 1. etasje og bare én rømningsvei tilgjengelig, lengst evakueringstid. I gjennomsnitt 572 sekunder, dvs. nesten 9,5 minutter. Deretter følger alternativ D, A og til sist C. De to alternativene med kun én rømningsvei (B og D) har de lengste evakueringstidene, og evakueringstiden er 114 sekunder lengre ved utgang i 1. etasje (B). Tidsforskjellen mellom alternativ A og D er imidlertid ikke så stor, bare 51 sekunder. Dette viser at dersom ett av trapperommene blir utilgjengelig som følge av brann, kan et alternativ for å redusere rømningstiden være å tillate evakuering via alle etasjer. Evakueringsalternativ C, med evakuering i begge trapperommene og med utgang i alle etasjer, krever minst evakueringstid. Dvs. 102 sekunder mindre enn alternativ A og hele 267 sekunder mindre enn alternativ B.

Tabell 4.14: Forskjeller i evakueringstid mellom de ulike evakueringsalternativene.

| Sammenligning av ulike evakueringsalternativer | Evakueringsalternativ 1 trapperom | Evakueringsalternativ 2 trapperom | Evakueringsalternativ Utgang i 1. etasje | Evakueringsalternativ Utgang i alle etasjer |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| | B Utgang i 1. etasje | A Utgang i 1. etasje | A To trappe-rom | C To trappe-rom |
| D Utgang i alle etasjer | C Utgang i alle etasjer | B Et trappe-rom | D Et trappe-rom | |
| Tidsforskjeller (i sekunder) | 114 | 102 | 165 | 153 |

I Tabell 4.14 vises forskjeller i evakueringstid mellom de ulike evakueringsalternativene. Forskjell i variasjonen mellom alternativ B og D (114 sekunder), og A og C (102 sekunder) er ikke stor, kun 12 sekunder. Dette viser at forskjellen i evakueringstid ved å benytte utgangen i 1. eller 3. etasje ikke økes nevneverdig selv om det kun er ett trapperom tilgjengelig.

Antall tilgjengelige trapperom har en noe større påvirkning på evakueringstiden, noe differansen i evakueringstid for alternativ A og B (165 sekunder) og C og D (153 sekunder) viser. Forskjell i variasjonen mellom disse alternativene er også 12 sekunder. Dette viser at forskjellen i evakueringstid ved å benytte ett eller to trapperom ikke økes nevneverdig selv om det er utgangen i 1. etasje som benyttes.

Evakueringstiden er, i tillegg til antall rømningsveier og plassering av utgang, avhengig av hallens interiør. Kunstutstillinger og løsvegger kan føre til redusert orienteringsevne og lengre evakueringstid.

Som Tabell 4.13 viser gir evakueringsalternativ B, med evakuering kun ut fra 1. etasje og med bare en rømningsvei tilgjengelig, lengst evakueringstid. Gjennomsnittlig evakueringstid er 572 sekunder, mens den høyeste registrerte evakueringstiden er 601 sekunder. Denne tiden er mest konservativ og regnes derfor som *nødvendig rømningstid*.

4.2.10 Feilkilder

Alle forenklinger, forutsetninger og antagelser som er gjort i analysen er med på å påvirke kvaliteten på resultatene. I dette kapitlet er ulike feilkilder beskrevet.

Inndata kan være skrevet feil inn i simuleringsprogrammene. Dette gjelder både FDS og Pathfinder, men spesielt FDS da det er benyttet mange ulike parametre og det kan være vanskelig å oppdage feil ved kontroll av FDS-koden. Valgte inndata kan også være feil i forhold til problemet som simuleres. Dette gjelder spesielt i forhold til verdier valgt for forbrenningsreaksjonen, hvor det er benyttet både generiske verdier

4. Analyse

og verdier fra ulike forsøk. Et annet eksempel på inndata som kan ha påvirket resultatene er cellestørrelsen i meshet. Cellestørrelsen i hovedsimuleringene er 20 cm og dekker dermed hele slissenes bredde. Dette kan gi et feil bilde av hvor mye røyk som beveger seg gjennom slissene. Ideelt sett burde slissenes bredde vært dekket av flere celler for å sikre at røyken beveger seg på en mest mulig realistisk måte. Valg av brannscenario kan utgjøre en usikkerhet, både fordi aktuelle farer og trusler samt aktuelle brannobjekter kan ha blitt utelatt.

I FDS må ønsket utdata spesifiseres før simuleringen kjøres. Det kan ha blitt gjort feil ved valg av disse utdataene. Det er også mulig å velge feil utdata for analyse, ved f.eks. å vurdere temperaturer i et lite kritisk område når hensikten er å vurdere de mest kritiske verdiene. Å undersøke alle målepunkter i hele hallen er ikke mulig, dvs. at valg av målepunkter er viktig og avgjørende for å få riktig resultat.

Ulike forenklinger er gjort, både fordi det er utført en simulering som skal etterligne virkeligheten og for å gjøre resultatene overførbare til andre prosjekter. Forenklingene fører til at resultatene er gjeldene for de forholdene oppgaven er begrenset til. Det kan derfor være at resultatene ikke gjelder ved andre forhold, men dette er ikke gitt. Det er dermed viktig å studere resultatene i lys av utførte forenklinger.

Det er satt ulike forutsetninger og gjort ulike antagelser i løpet av arbeidet med oppgaven. Dette er en feilkilde dersom disse forutsetningene og antagelsene ikke stemmer med virkeligheten.

I FDS er usikkerhet knyttet til resultater, som nevnt, ca. 20 % når HRR er kjent. I Alabasterhallen er både brannobjekt og brannens utvikling ukjent og det er derfor rimelig å anta at høyere usikkerhet kan forekomme. Det er ikke tatt hensyn til resultatusikkerhet ved vurdering av registrerte verdier fra simuleringene.

I tillegg er det en viss sannsynlighet for at det er gjort ulike feil som forfatterne ikke er klar over. Dette kan f.eks. være skrivefeil ved inntasting av data, regnefeil eller avrundingsfeil. Forutsetninger og antagelser kan også være gjort uten tilstrekkelig

kunnskap innenfor det aktuelle temaet. Dette kan også ha påvirket tolkning av resultatene, og er en generell usikkerhet som vil gjelde alle studier i større eller mindre grad.

5 Vurdering av løsninger

5.1 Oppsummering av hovedsimuleringer

To prinsipper for røykkontroll er beskrevet i litteraturstudiet: oppsamling av røyk og utlufting av røyk, og begge prinsippene er benyttet i hovedsimuleringene. Det er brukt en kombinasjon av røykskjermer som samler opp og seksjonerer røyken, og røykventilasjon som lufter ut røyken enten termisk eller mekanisk.

Hensikten med røykventilasjonen, som er å hindre og forsinke røykspredning, fungerer i varierende grad i de ulike simuleringene. En fungerende løsning skal holde røyksjiktet så høyt som nødvendig i tilstrekkelig tid til å gjennomføre evakuering. Selv etter rømning er det ønskelig å holde røyksjiktet høyt og innenfor et begrenset område for å redusere skader på materielle- og kulturhistoriske verdier. Disse verdiene vil trolig være spesielt høye i Alabasterhallen.

I simuleringene er det observert at røyken stiger opp mot tak og sprer seg raskt utover i hallen. Siden det ikke er definert noen objekter i hallen møter ikke røyken andre hindringer enn yttervegger og vegger i trapperom. Røykens spredningsmønster er som forventet i henhold til litteraturstudiet og anses derfor som troverdig. Når røyken spres blandes den ut med kaldere omliggende luft og temperaturen i røyken avtar. Som en følge av avtagende temperatur avtar også oppdriftskraften, og røyken synker dermed. Når røyken møter ytterveggene synker både temperaturen og røyken ytterligere. For den alternative røykventilasjonsløsningen var det i de innledende simuleringene (gruppe 2 til 5) kun benyttet slisser i himlingen ved langveggene. Etter å ha observert hvordan røyken synker når den treffer ytterveggene ble det valgt å ha slisser også langs kortsidene av bygget i simuleringsgruppe 7. Mer av røyken trekkes da opp gjennom slissene og mindre synker ned langs veggene.

Når røyken beveger seg lenger unna brannen synker røyken hurtigere og til et lavere nivå i rommet. Dette er fordi lufttemperaturen er lavere i områdene lengst unna brannen. Røyken kan i utgangspunktet spres gjennom hele hallen, men hindres i stor grad av røykskjermene som er plassert på hver side av begge trapperommene. I tillegg til å hindre røykspredning sikrer røykskjermene oppdrift av røyk fordi arealet deles opp og røyken dermed ikke blandes med, eller kjøles ned av, omliggende luft. I simuleringen 7_slots, med slisser og termisk røykventilasjon, spres røyken over hele hallen ved at den stiger opp gjennom slissene i del A, og ned igjen gjennom slissene i del B og C, for deretter å spres videre i disse delene. I dette tilfellet er det ikke tilstrekkelig med røykskjermer plassert kun under himling.

Brannens plassering har innvirkning på røykskjermenes ytelse. Hvis brannen er plassert i del A eller C, og røyksjiktet synker under røykskjermene, vil røyken kunne samle seg mellom røykskjermene som er plassert på hver side av trapperommene. Skjermene inn mot midten av hallen (del B) vil i disse tilfellene kunne forverre forholdene i selve rømningsveien, og dermed føre til raskere røyklegging av trapperom 1 eller 2. Ved brann i del B er røykskjermer på denne siden av trapperommene nødvendig, mens røykskjermene mot del A og C vil kunne gi samme effekt hvis røyksjiktet synker for lavt.

Ulike typer mekanisk ventilasjon er benyttet i simuleringsgruppe 7, både en kombinasjon av avtrekksvifter og tilluftsåpninger, og balansert ventilasjon med tilluftsvifter og avtrekksvifter. Mekanisk ventilasjon kan også utføres med tilluftsvifter og avtrekksluker. Denne kombinasjonen er ikke vurdert da det antas at røyken møter størst mekanisk motstand ved slissene og dermed er avhengig av viftekraft for å føres ut gjennom disse og videre ut gjennom taket. En slik løsning vil trolig kreve så høye tilluftshastigheter at forholdene inne i hallen blir lite gunstige, både med tanke på røykforhold og ubehag for mennesker.

En fordel med mekanisk ventilasjon er at den gir god ventilasjon selv ved små branner. Mekanisk ventilasjon er ikke testet med brannscenario 1 (liten brann), men

siden den mekaniske løsningen fungerer for brannscenario 2 antas det at den sannsynligvis også vil fungere for brannscenario 1.

I hovedsimuleringene er det benyttet et luke- og vifteareal som er omtrent tre ganger større enn anbefalingene i HO-meldingen. Disse arealene ser ut til å fungere godt, men det kan diskuteres om løsningene er for konservative og kan fungere med et mindre areal.

I simuleringene er det observert generelt lave CO- og CO₂-konsentrasjoner, noe som innebærer lav personrisiko. Oksygennivåene holdes høye og det vil derfor ikke være noen fare for surstoffmangel.

Røyk kan som nevnt utgjøre en fare i hele hallen, mens varmpåkjenning fra lufttemperatur og stråling utgjør en mer lokal fare. Det er registrert generelt lave temperaturer og strålingsflukser i hallen, men i nærheten av brannen er temperaturen målt til å være svært høy. Strålingsintensiteten er ikke målt i dette området, men antas også å være høy. Selv om verdiene i brannområdet kan være kritiske antas det at mennesker vil raskt bevege seg bort herfra.

Sikt er i seg selv ikke en dødelig faktor, men kan hindre og utsette evakuering, og dermed føre til at andre faktorer som f.eks. varmpåkjenning fra stråling, høy lufttemperatur og giftige gasser forsterkes og får større betydning. Litteraturen viser at nedsatt sikt ofte er den parameteren som først blir kritisk ved brann, og dette er også tilfelle i hovedsimuleringene. Det er registrert generelt lave gasskonsentrasjoner, temperaturer og strålingsverdier, og selv om sikten er relativt god gjennom hele simuleringstiden, er det allikevel denne faktoren som først overstiger tålegrensene.

Det forutsettes i oppgaven at alt teknisk utstyr fungerer etter sin hensikt og slik de er spesifisert i oppgaven, f.eks. at alle vifter, luker, røykskjermer og lignende aktiveres ved gitte tidspunkt.

5.2 Sammenligning av løsninger

I dette kapitlet er resultater fra samtlige hovedsimuleringer, gruppe 6 og 7, sammenlignet og vurdert mot tålegrenser gitt i NS 3901 og HO-meldingen [46] [1]. Dette er gjort for å vurdere de ulike alternativenes funksjonsdyktighet. De alternative røykventilasjonsløsningene (gruppe 7) er sammenlignet og vurdert opp mot tradisjonell termisk røykventilasjonsløsning (gruppe 6). De alternative løsningene er også vurdert opp mot hverandre.

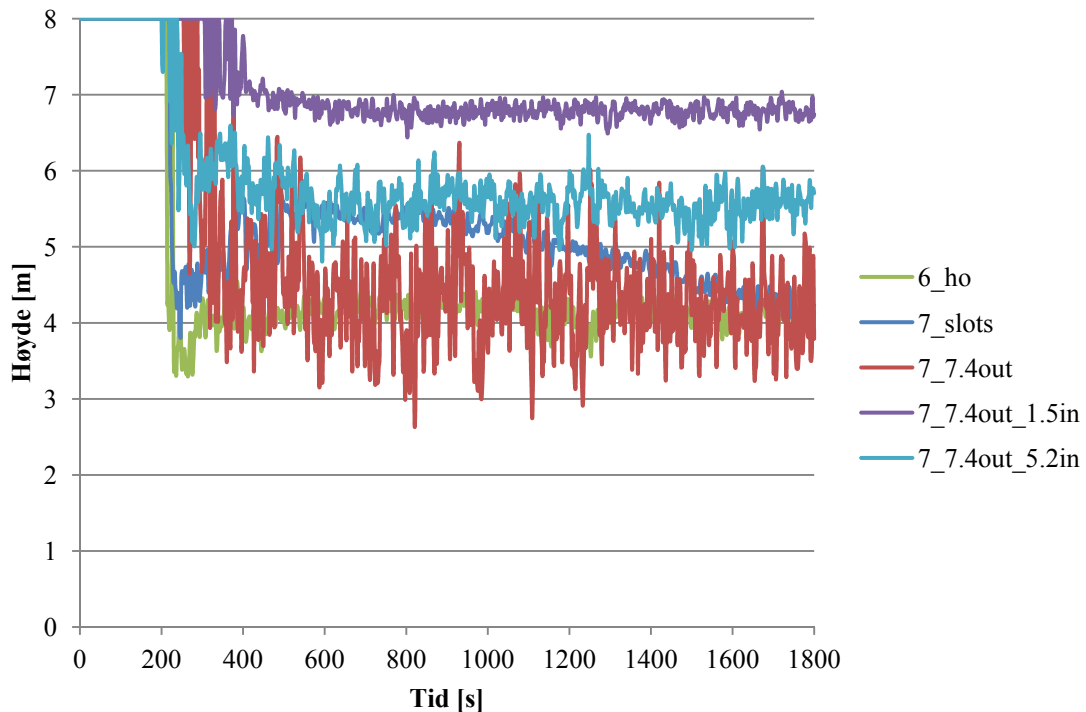
Tålegrenser er oppsummert i Tabell 5.1.

Tabell 5.1: Tålegrenser for personer under rømning. Gjengitt fra [46].

| | |
|-----------------------------|--|
| Varmestråling: | |
| Intensitet under 6 sekunder | 10 kW/m ² |
| Samlet strålingsenergi: | 60 kJ/m ² +energi fra 1 kW/m ² |
| Gasstemperatur: | 60 °C |
| Innhold av gasser: | |
| CO | maks. 2000 ppm |
| CO ₂ | maks. 5 % |
| O ₂ | min. 15 % |
| Sikt i to meters høyde: | |
| I startbranncelle | min. 3 m |
| I rømningsvei | min. 10 m |

5.2.1 Sikt

I startbranncelle



Figur 5.1: Røyksjiktets høyde midt i del A.

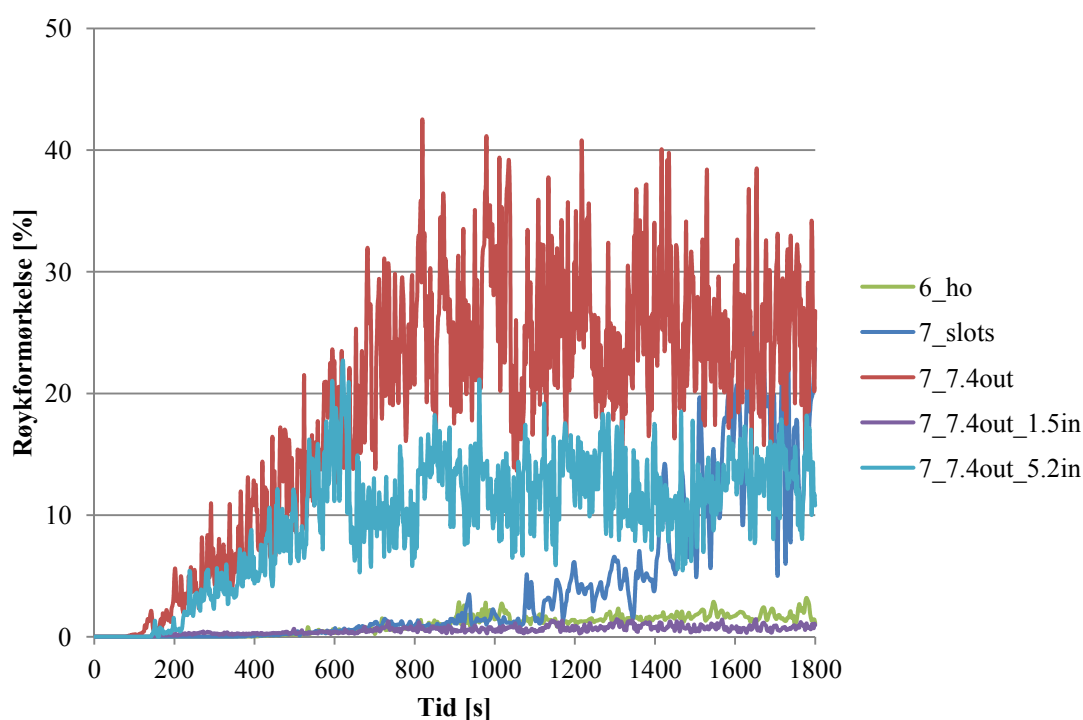
Figur 5.1 viser at kravet til tre meter friskt fastsatt i henhold til HO-meldingen opprettholdes i alle simuleringene, og at kun 7_7.4out viser et lavere røyksjikt enn simulering 6_ho. I simulering 7_7.4out er det mye turbulens i røyksjiktet og de registrerte verdiene fluktuierer derfor mer enn i de andre simuleringene.

Forfatterne forventet at simulering 7_slots skulle gi lavest frisktshøyde da luften må trenge gjennom slissene uten hjelp fra vifter. Ved måling av røyksjiktets høyde ser imidlertid løsningen ut til å fungere bra, men røyksjiktet varierer en del i høyde.

Røyksjiktet i 6_ho og 7_7.4out_1.5in holder seg stabilt i én høyde med bare små fluktuasjoner, mens de registrerte verdiene for simulering 7_7.4out og 7_7.4out_5.2in er mer varierende. I simulering 7_7.4out reguleres luftinntaket automatisk etter forholdene i hallen siden det ikke er benyttet vifter med fastsatt

lufthastighet. Høye tilluftshastigheter er registrert i disse lukene, noe som produserer turbulens og dermed fluktuerende verdier. I simulering 7_7.4out_5.2in er det benyttet en høyere tilluftshastighet og viftene er ikke like jevnt plassert som i de andre simuleringene, noe som kan være en årsak til økt turbulens i denne simuleringen.

Som vist i Tabell 5.1 er siktkravet i startbranncelle tre meter, noe som tilsvarer en maksimal røykformørkelse på ca. 53 % med én meters målelengde.

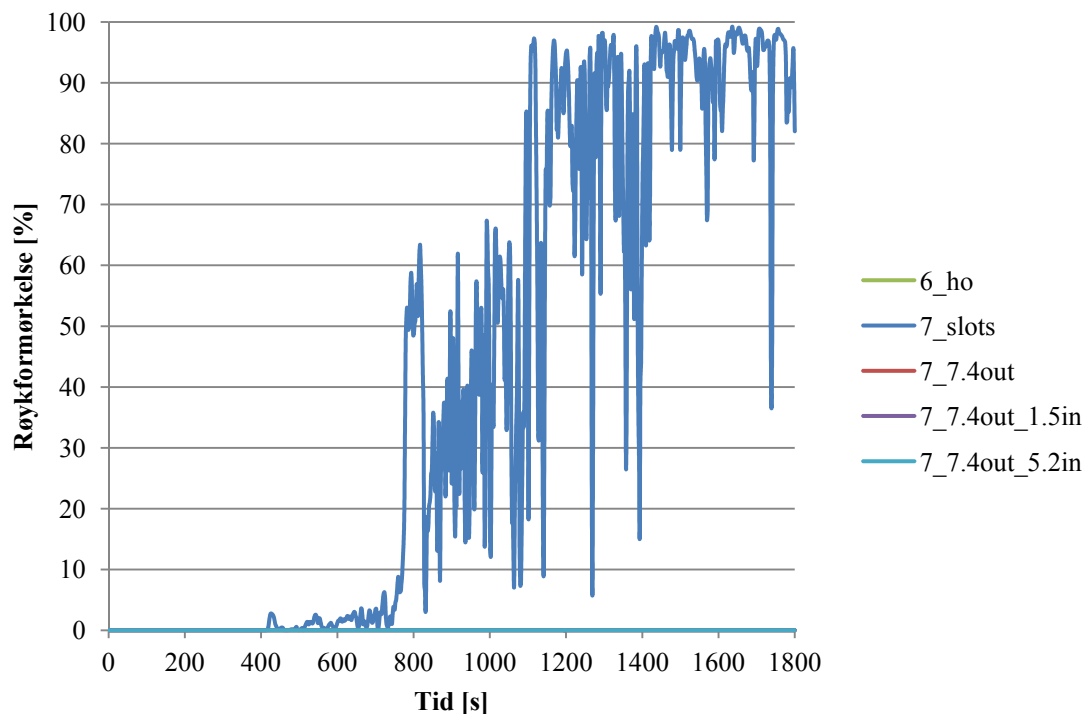


Figur 5.2: Røykformørkelse midt i del A i høyde to meter.

Figur 5.2 viser røykformørkelse midt i del A i høyde to meter. Som vist i figuren er det ingen av simuleringene som overstiger 53 % og kravet til tre meter sikt opprettholdes dermed gjennom hele simuleringstiden.

Røykformørkelsen i alle simuleringene stabiliserer seg ved omtrent 600-800 sekunder, med unntak av simulering 7_slots der røykformørkelsen øker gjennom hele

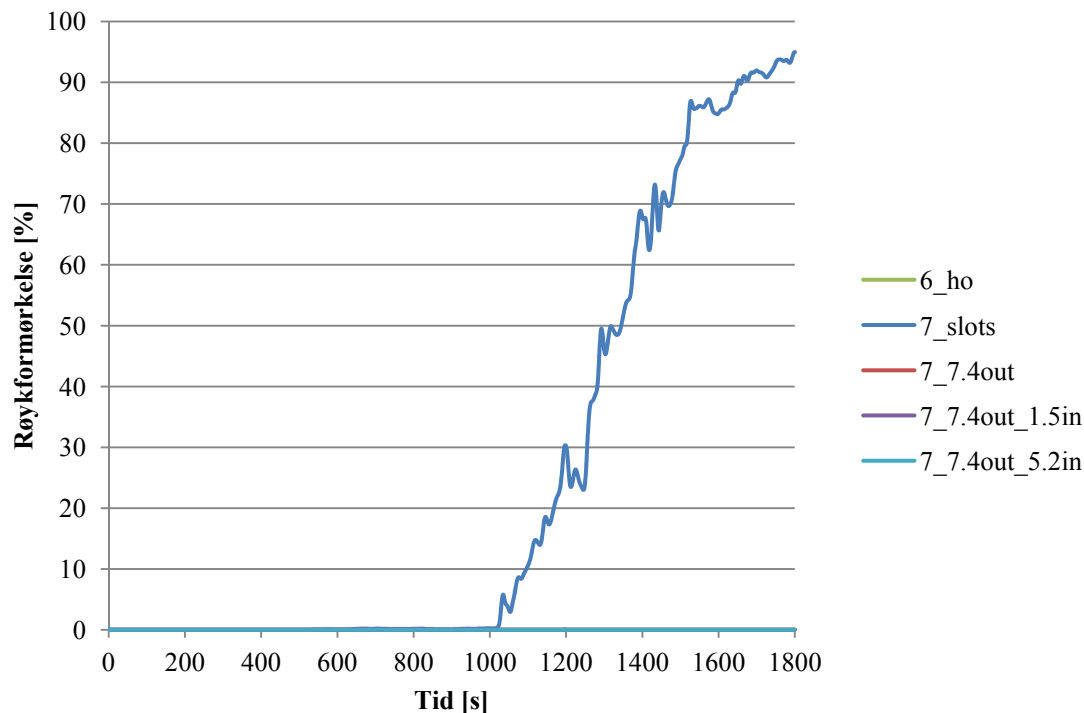
simuleringstiden. I dette målepunktet er det kun simulering 7_7.4out_1.5in som har mer gunstige forhold enn simulering 6_ho.



Figur 5.3: Røykformørkelse utenfor trapperom 2 i høyde to meter.

Figur 5.3 viser røykformørkelse utenfor trapperom 2 i høyde to meter. Ingen av simuleringene viser røykformørkelse ved trapperom 2 eller andre steder i del B og C, med unntak av 7_slots der kravet til tre meter sikt ikke overholdes etter 780 sekunder.

I rømningsvei

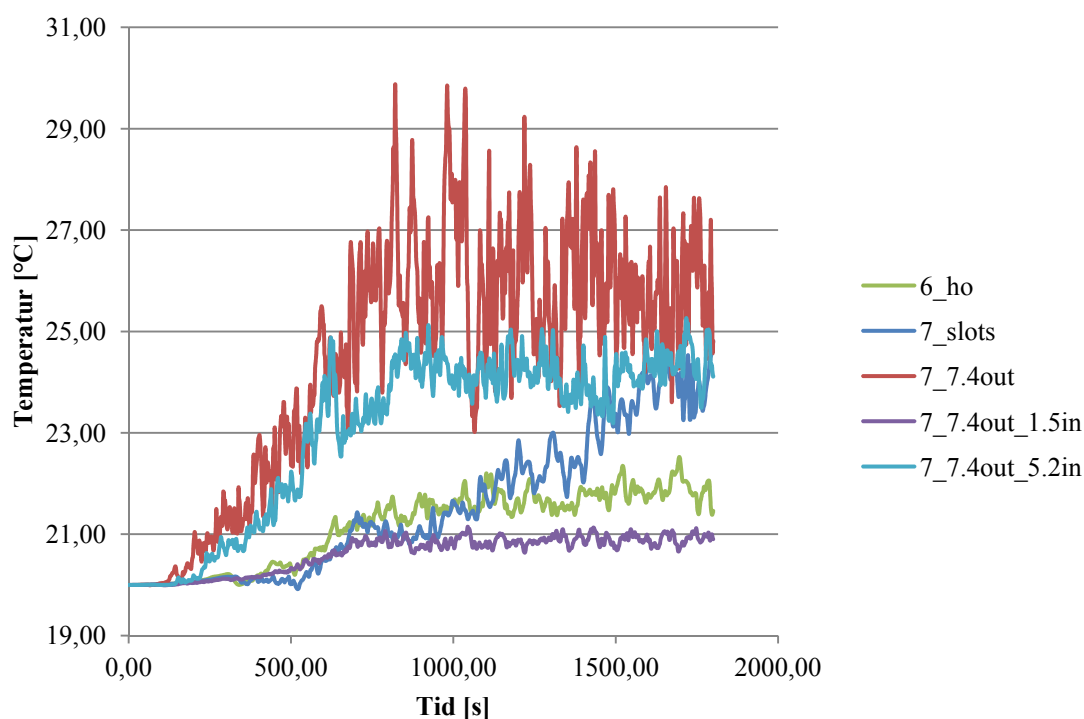


Figur 5.4: Røykformørkelse inne i trapperom 2 i høyde to meter.

Kravet til sikt i rømningsvei er ti meter, noe som tilsvarer en maksimal røykformørkelse på ca. 20 %. Ved omtrent 1170 sekunder overstiges dette kravet av 7_slots i trapperom 2 i høyde to meter, se Figur 5.4.

5.2.2 Varmepåkjening

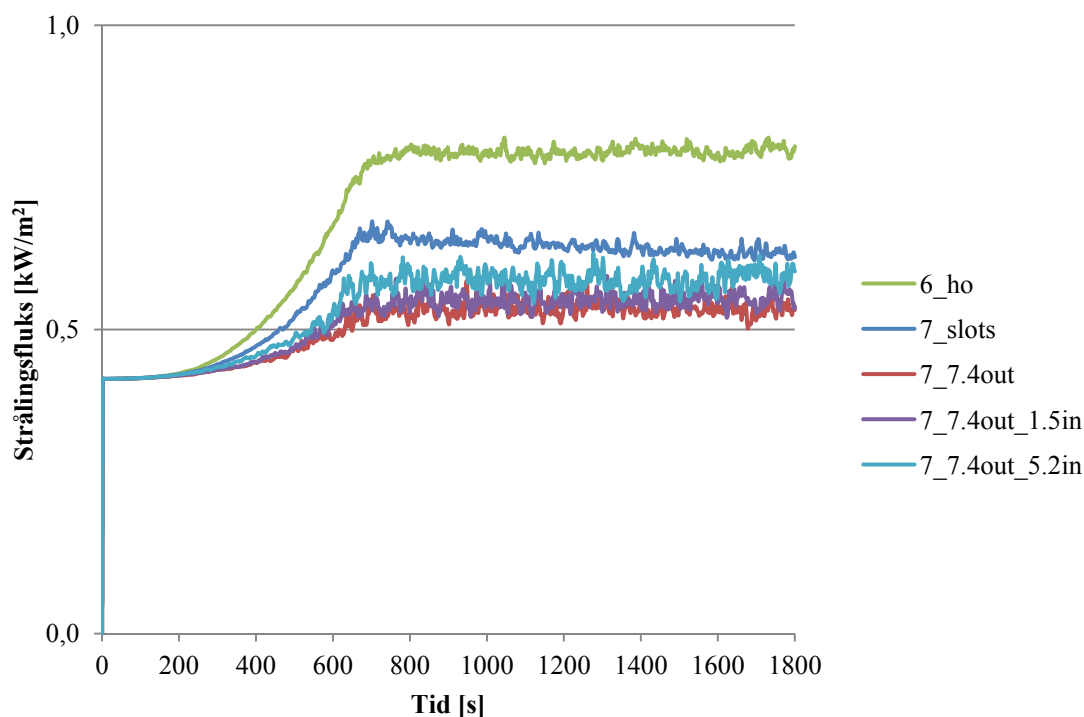
Det er benyttet kvantifiserbare verdier fra Drysdale for å undersøke om det vil bli overtenning i Alabasterhallen. Verdiene som er kontrollert viser at temperaturen i taket ikke overstiger 600 °C, og at varmestraling fra røyksjikt til gulv ikke overstiger 20 kW/m² [48]. Ingen av simuleringene når verdier i nærheten av disse, og det konkluderes derfor med at overtenning ikke inntreffer.



Figur 5.5: Temperatur midt i del A i høyde to meter.

Figur 5.5 viser temperatur midt i del A i høyde to meter og er de høyeste registrerte verdiene i hallen. Temperaturen overstiger aldri 31 °C, med unntak av i selve brannområdet, og holder seg derfor innenfor tålegrensen for maksimal gasstemperatur på 60 °C.

Verdiene for varmepåkjenning i simulering 7_7.4out fluktuerer mer enn for de andre simuleringene. Alle simuleringene stabiliserer seg ved ca. 650 sekunder, med unntak av 7_slots som stiger jevnt gjennom hele simuleringstiden. I dette målepunktet er det kun 7_7.4out_1.5in som gir mer gunstige forhold enn 6_ho.



Figur 5.6: Stråling midt i del A i høyde to meter.

Figur 5.6 viser at strålingsintensiteten i alle simuleringene holder seg stabil og holder seg godt innenfor tålegrensene gitt i Tabell 5.1.

Alle simuleringene med alternativ røykventilasjonsløsning viser lavere verdier enn simulering 6_ho.

5.2.3 Gasskonsentrasjoner

Registrert CO-konsentrasjon overstiger ikke 80 ppm noen steder i hallen i noen av simuleringene. Dvs. at CO-konsentrasjonen er godt innenfor tålegrensen på 2000 ppm.

Registrert CO₂-konsentrasjon overstiger ikke 0,3 % noen steder i hallen i noen av simuleringene. Dvs. at CO₂-konsentrasjonen er godt innenfor tålegrensen på 5 %.

Registrert O₂-konsentrasjon når aldri verdier under 20,4 % noen steder i hallen i noen av simuleringene. Dvs. at O₂-konsentrasjonen er godt innenfor tålegrensen som krever minimum 15 %.

I simulering 7_slots og 7_7.4out er det registrert noe høyere verdier enn i de andre simuleringene, men alle er likevel godt innenfor tålegrensene.

5.2.4 Valg av endelig røykventilasjonsløsning

Løsninger beskrevet i HO-meldingen er minimumsløsninger for røykventilasjonsanlegg i byggverk. Røykventilasjonsløsningene som er testet i denne oppgaven viser at prinsippet med slisser fungerer. Løsningene viser gode resultater og tilfredsstillende gjeldende krav til tålegrenser gitt i NS 3901 og HO-meldingen i varierende tidsutstrekning. Simulering 7_slots er den eneste som ikke tilfredsstillende alle krav gjennom hele simuleringsperioden.

I simuleringen med tradisjonell termisk røykventilasjonsløsning, 6_ho, og simuleringene 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in, med alternativ røykventilasjonsløsning, holder røyken seg innenfor del A både under og over himlingen. I de to resterende simuleringene, 7_slots og 7_7.4, spres røyken videre fra del A til de andre delene av hallen (observert i Smokeview). I simulering 7_slots spres røyken over himling til del B og C og skaper dårlige siktforhold og økt fare for at materielle verdier går tapt. Denne løsningen anses derfor som den minst gunstige av alle løsningene som er simulert. I 7_7.4out spres røyken kun over himling i løpet av simuleringstiden. Personforholdene blir ikke kritiske og det antas at de heller ikke vil forverres ved økt simuleringstid. Det kan imidlertid antas at spredning over himling vil føre til materielle skader. Resultater fra simuleringen viser også at turbulens genereres ved bruk av denne løsningen, noe som kan gi en usikkerhet knyttet til forholdene i hallen. Denne løsningen anbefales heller ikke.

Både 7_7.4out_1.5in og 7_7.4out_5.2in viser svært gode resultater. Røykskjermene virker fullstendig etter sin hensikt og røyken spres ikke videre fra del A. Røyksjiktet i

simulering 7_7.4out_5.2in ser ut til å være ganske turbulent, noe som kan komme av den høye tilluftshastigheten på viftene, og at disse heller ikke er jevnt fordelt ut over hallen. I simulering 7_7.4out_1.5in er tilluftsarealet veldig stort og jevnt fordelt, noe som gir gunstige forhold. En utfordring med denne løsningen er hvordan det store tilluftsarealet skal løses i praksis. En mulig løsning er å plassere tilluftsvifter i service-rom i ytterveggene og la luften strømme inn i hallen via en langsgående slisse ved gulvet, tilsvarende slissene i himlingen. Denne løsningen er ikke undersøkt nærmere i oppgaven.

På bakgrunn av de vurderte verdier velges 7_7.4out_1.5in som den beste løsningen. FDS-kode for denne simuleringen finnes i Vedlegg G.

5.2.5 Nødvendig og tilgjengelig rømningstid

Nødvendig rømningstid er, i følge veiledningen til TEK 10, den tiden det tar å rømme et byggverk [18]. I følge HO-meldingen er tilgjengelig rømningstid den tiden det tar fra brannen starter til forholdene i rømningsvei har blitt kritiske [1]. Med kritiske forhold menes at tålegrensene for varmepåkjening (stråling og lufttemperatur), giftighet, røykirritasjon eller oksygenmangel er oversteget.

Sammenhengen mellom nødvendig rømningstid og tilgjengelig rømningstid er vist i kapittel 3.7.1. For å sikre rømning er det forutsatt at tilgjengelig rømningstid er vesentlig lengre enn nødvendig rømningstid [18]. I denne oppgaven vil det si at den tilgjengelige rømningstiden funnet ved brannsimuleringer må være høyere enn den nødvendige rømningstiden funnet ved evakueringssimulering. Differansen mellom disse, sikkerhetsmarginen, er et uttrykk for sikkerhetsnivået i Alabasterhallen.

Fra evakueringssimuleringene i Pathfinder ble det funnet en nødvendig rømningstid på 601 sekunder.

Røykventilasjonsalternativene i gruppe 6 og 7 er vurdert opp mot tålegrensene for varmepåkjening (stråling og lufttemperatur), giftighet, røykirritasjon og oksygen-

mangel, samt nødvendig sikt i to meters høyde. Den valgte røykventilasjonsløsningen, 7_7.4out_1.5in, opprettholder krav til tålegrenser gjennom hele simuleringstiden. Tilgjengelig rømningstid er dermed hele simuleringstiden, dvs. minimum 1800 sekunder. Den minst gunstige simuleringen, 7_slots, gir en tilgjengelig rømningstid på 780 sekunder.

En tilgjengelig rømningstid på 1800 sekunder (30 minutter) ved bruk av anbefalt løsning gir en sikkerhetsmargin på 1199 sekunder (nesten 20 minutter), noe som er dobbelt så mye som den nødvendige evakueringstiden. Dette anses som tilstrekkelig.

6 Konklusjon

Fire alternative røykventilasjonsløsninger med 20 cm brede slisser i himling er simulert i FDS og resultatene er vurdert opp mot simulering av tradisjonell termisk røykventilasjon dimensjonert etter HO-meldingen. Det er funnet at prinsippet for den alternative røykventilasjonsløsningen fungerer, og at slissene i himling kan slippe ut nødvendig mengde røyk dersom nødvendig viftekapasitet benyttes.

På bakgrunn av en sammenligning av røykventilasjonsløsningene er den alternative løsningen simulert i 7_7.4out_1.5in anbefalt å benyttes i Alabasterhallen da denne gir svært stabile og gode evakueringsforhold. Løsningen består av slisser i himling, mekanisk ventilasjon med avtrekksvifter i tak (21 m²) med en avtrekkshastighet på 7,4 m/s, og tilluftsvifter i fasade (ca. 85 m²) med en tilluftshastighet på 1,5 m/s.

Den valgte løsningen, 7_7.4out_1.5in, overstiger ingen av tålegrensene gitt i NS 3901:2008 og HO-meldingen i løpet av simuleringstiden og gir derfor en tilgjengelig rømningstid på 1800 sekunder. Nødvendig rømningstid er ved hjelp av Pathfinder funnet til å være 601 sekunder. Dette gir en sikkerhetsmargin på ca. 1200 sekunder, noe som anses som tilstrekkelig både med tanke på evakuering og eventuelle feil som er blitt gjort i simuleringene.

I tillegg til tekniske tiltak som røykventilasjon og røykskjermer er også organisatoriske tiltak viktig i en evakueringssituasjon selv om dette ikke er et fokusområde i oppgaven. Den samlede brannsikkerheten må ses under ett gjennom å vurdere de tekniske løsningene som er gitt i oppgaven sammen med organisatoriske tiltak.

6.1 Anbefalinger

- Alternativ røykventilasjonsløsning med slisser, avtrekksvifter i tak og tilluftsvifter i fasade bør benyttes i Alabasterhallen.
- Det bør benyttes røykskjermer som er dimensjonert for å hindre at røyken synker og spres på undersiden av skjermene, og som kan aktiveres avhengig av brannens plassering.
- Det bør benyttes røykseksjonering over himling for å unngå at røyken sprer seg på oversiden og trekker ned i de andre delene av hallen. Dette vil også kunne hindre sotlegging av hele himlingen.

7 Videre arbeid

På bakgrunn av at det i denne rapporten er anbefalt en alternativ røykventilasjonsløsning bør neste steg være å finne ut om denne løsningen er mulig å gjennomføre med tanke på materialbruk, montering og kostnader. Når det gjelder kostnader er det viktig å vurdere både kostnader til utvikling, materialer, montering og vedlikehold. Det er også viktig å inkludere økt arbeidsmengde og krav til dokumentasjon ved bruk av CFD.

Oppgaven viser at prinsippet med røykventilasjon gjennom slisser i himling fungerer. Siden resultatene var svært gode kan det være interessant å vurdere om tålegrensene vil tilfredsstilles ved en reduksjon av f.eks. viftekapasitet.

Det bør undersøkes hvordan utførelsen av tilluft skal løses på et mer detaljert nivå enn undersøkt i oppgaven. Arkitekten har ytret et ønske om at hallen skal utføres i en ”ren” og enkel stil. En sammenhengende slisse i yttervegg, i stedet for mange luker, kan være med på å oppnå dette uttrykket. En mulig utforming kan være tilførsel av tilluft via serviceroommene i ytterveggene gjennom en slisse plassert nede i veggen.

I oppgaven er det antatt at mennesker med behov for hjelp til evakuering får assistanse av f.eks. ansatte, besøkende eller brannvesen. Evakueringsforholdene for mennesker med nedsatt funksjonsevne kan derfor være et aktuelt tema å undersøke, spesielt siden den eneste rømningsveien går via trapperom og siden det ikke er lov å benytte heis i en evakueringssituasjon.

Referanseliste

1. **Statens bygningstekniske etat.** *Melding HO-3/2000 Røykventilasjon Temaveiledning.* 2000.
2. **Direktoratet for byggkvalitet.** Forskrift om tekniske krav til byggverk. *Byggteknisk forskrift - TEK 10.* 2010.
3. **Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB).** www.dsb.no. [Internett] [Sisert: 02. 03. 12.] <http://dsb.no/no/Statistikk/Statistikk1/Branner/Utvikling-av-antall-brannomkomne/>.
4. —. *Kjennetegn og utviklingstrekk ved næringsbranner 1986-2009.* 2011.
5. **Det kongelige justis- og politidepartement.** St.meld. nr. 35 (2008-2009) Brannsikkerhet. 2009.
6. **Thomas, D.M.** The Smoke Inhalation Problem, Symposium on Occupational Health and Hazard of the Fire Service. Indiana : Notre Dam University, 1971.
7. **Department for Communities and Local Government.** Fire Statistics Great Britain, 2010-2011. *Communities and Local Government.* [Internett] 2011. [Sisert: 12. 03. 12.] www.communities.gov.uk/documents/statistics/pdf/568234.pdf.
8. NOU 1991 1A, "Scandinavian Star"-ulykken, 7. april 1990. Hovedrapport. [Internett] 1991. [Sisert: 12. 03. 12.] <http://www.regjeringen.no/upload/kilde/odn/tmp/2002/0034/ddd/pdfv/154766-nou1991-1a.pdf>.
9. **Versteeg, H. K. og Malalasekera, W.** *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.* Glasgow : Pearson Education Limited, 2007.
10. **Petterson, N. M.** *Assessing the Feasibility of Reducing the Grid Resolution in FDS Field Modelling.* Christchurch, New Zealand : University of Canterbury, 2002.
11. **Jakobsen, A., et al.** *CFD Best Practice.* København : Best Practice Gruppen, 2009.

12. **National Institute of Standards and Technology (NIST)**. Fire Dynamics Simulator and Smokeview (FDS-SMV). *Official Website, Hosted at the National Institute of Standards and Technology (NIST)*. [Internett]
<http://fire.nist.gov/fds/index.html>.
13. **Thunderhead Engineering Consultants, Inc.** Thunderhead Engineering. *Pyrosim*. [Internett] 2011. <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>.
14. —. Thunderhead Engineering. *Pathfinder, Agent-Based Emergency Egress Simulation*. [Internett] 2011. <http://www.thunderheadeng.com/pathfinder/>.
15. **Colt**. *CPD hour - The General Principles of Smoke Control - from the experts at Colt*. Webinar - Technical Seminar : s.n., 09. 03. 12.
16. **McGrattan, K. og Mills, S.** Modelling Enclosures Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD). [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 3, ss. 229-246.
17. **Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB)**. *DSBs oppslagsverk*. [Internett] [Sisert: 07. 02. 12.] <http://oppslagsverket.dsb.no/content/>.
18. **Direktoratet for byggkvalitet**. Veiledning om tekniske krav til byggverk. 2011.
19. **Statens bygningstekniske etat**. *Melding H-1/88 «Jonathan» Veiledning for brannvern av bygninger med overbygde gårder eller gater*. Oslo : Norsk Byggtjeneste, 1988.
20. **Nystedt, F. og Frantzich, H.** *Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*. Lund : Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Sweden, 2011.
21. **Kruppa, J., et al.** *Fire Safety Engineering Approach to Fire Resistance of Buildings*. s.l. : International council for research and innovation in building and construction (CIB), 2001.
22. **ISO (the International Organization for Standardization)**. *ISO/TS 16733 Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires*. 2006.
23. **Buchanan, A. H.** *Structural Design for Fire Safety*. Chichester, England : John Wiley & Sons, 2002.

24. **The National Institute of Standards and Technology (NIST)**. NIST Engineering Laboratory. *Fire Growth and Smoke Transport Modeling with CFAST*. [Internett] [Sisert: 26. 04. 12.] http://www.nist.gov/el/fire_research/cfast.cfm.
25. **Carlsson, J.** *Computational strategies in flame-spread modelling involving wooden surfaces - An evaluation study*. Lund : Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 2003.
26. **McGrattan, K., et al.** *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical reference Guide*. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2007.
27. **Gissi, E.** *An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview*. 2010.
28. **McGrattan, K, et al.** *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2010.
29. **Rubini, P.** *The CFD Analysis Process*. Lund : Presentasjon i kurset "Simulation of Fires in Enclosures", 2012.
30. **Store Norske Leksikon.** *Hydrodynamikk*. [Internett] [Sisert: 22. 02. 12.] <http://snl.no/hydrodynamikk>.
31. —. *Machtall*. [Internett] [Sisert: 24. 02. 12.] <http://snl.no/machtall>.
32. **Thunderhead Engineering Consultants, Inc.** Pyrosim. *Pyrosim User Manual*. [Internett] 2010. <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>.
33. **Rubini, P.** *Turbulence – Phenomena and Simulation*. Lund : Presentasjon i kurset "Simulation of Fires in Enclosures", 2012.
34. —. *Credible CFD*. Lund : Presentasjon i kurset "Simulation of Fires in Enclosures", 2012.
35. **Thunderhead Engineering Consultants, Inc.** Pyrosim. *Product Sheet, Pyrosim Handout*. [Internett] 2011. <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/>.
36. **Liebe, G.** *Brannfysikk - fra teori til praksis, Brannutvikling, brannspredning, sløkking og utlufting*. Oslo : Norsk Brannvern Forening og Norges brannskole, 1995.
37. **Mulholland, G. W.** Smoke Production and Properties. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*.

Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 2, ss. 291-301.

38. **Store Norske Leksikon.** *Polystyren*. [Internett] [Sisert: 18. 04. 12.] <http://snl.no/polystyren>.

39. —. *Polypropylen*. [Internett] [Sisert: 18. 04. 12.] <http://snl.no/polypropylen>.

40. **Faith, N.** *Blaze, The Forensic of Fire*. New York : St. Martin's Press, 2000.

41. **Klote, J. H.** Smoke Control. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 4, ss. 367-386.

42. **Purser, D. A.** Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 2, ss. 96-193.

43. **U.S. Environmental Protection Agency.** *Integrated Risk Information System (IRIS)*. [Internett] 26. 07. 11. [Sisert: 05. 07. 12.] http://www.epa.gov/iris/help_gloss.htm#a.

44. **Opstad, K., Stensaas, J. P.** *Håndbok i Branntekniske Analyser og -Beregninger*. Trondheim : SINTEF NBL, Bygg og Miljøteknikk, 1998.

45. **Stensaas, J. P.** *Toxicity, visibility and heat stresses of fire effluents - human tenability limits*. Trondheim : SINTEF NBL, 1991.

46. **Norsk Standard.** *NS 3901 Risikoanalyse av brann i byggverk*. 1998.

47. **Bryan, J. L.** Behavioral Response to Fire and Smoke. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 3, ss. 320-354.

48. **Drysdale, D.** *An Introduction to Fire Dynamics, Second Edition*. Chichester : John Wiley & Sons, 1998.

49. **Milke, J. A.** Smoke Management by Mechanical Exhaust or Natural Venting. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering,*

Fourth Edition. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 4, ss. 387-412.

50. **Mostue, B. A.** *En innføring i bruk av branntekniske beregninger og analyser: muligheter og begrensninger*. Trondheim : SINTEF NBL, 2002.

51. **Norges byggforskningsinstitutt.** *Byggforskserien byggetaljer 520.380 Røykkontroll i bygninger*. 2006.

52. **Storm, B. M.** E-post-korrespondanse med brannteknisk rådgiver ved avdeling for Brann og Sikkerhet. Oslo : Rambøll, 03.05.12.

53. **DiNenno, P. J., et al.** *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008.

54. **Proulx, G.** Evacuation Time. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 3, ss. 355-372.

55. **Brann- og redningsetaten, Oslo Kommune.** [Internett] 19. 02. 09. [Sitert: 17. 03. 12.] http://www.brann-og-redningsetaten.oslo.kommune.no/brannvern_i_virksomhet/krav_tiltak_og_utstyr/branntekniske_tiltak/.

56. **Thunderhead Engineering Consultants, Inc.** *User Manual Pathfinder*. 2011.

57. Rambøll Norge. *Prosjekter*. [Internett] <http://www.ramboll.no/projects>.

58. **Regelhjelp.no.** *Veiviser til regelverk for virksomheter*. [Internett] [Sitert: 22. 03. 12.] <http://regelhjelp.no/no/Finn-HMS-krav-til-din-bransje/Informasjons--og-kommunikasjonsvirksomhet/>.

59. **Statistisk Sentralbyrå (SSB).** *Standard for næringsgruppering*. Oslo : Statistisk Sentralbyrå, 2008.

60. **Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB).** www.dsb.no. [Internett] [Sitert: 02. 03. 12.] <http://dsb.no/no/Statistikk/Statistikk1/Branner/Bygningsbranner/>.

61. —. www.dsb.no. [Internett] [Sitert: 06. 03. 12.] <http://dsb.no/no/Ansvarsomrader/Brannvern/Andre-bygninger/Forsamlingslokaler/>.

62. **Costain, C.** Canadian Conservation Institute. [Internett] 01. 09. 94. [Sitert: 07. 03. 12.] <http://www.cci-icc.gc.ca/cci-icc/about-apropos/action/15-eng.aspx>.
63. **Hovde, P. J.** *Produkter til byggverk - prøving og klassifisering av egenskaper ved brannpåvirkning*. Trondheim : Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU, 2012.
64. **Norsk Standard.** *NS 5814 Krav til risikovurderinger*. 2008.
65. Statsbygg. *Foto: forum artis*. [Internett] [Sitert: 22. 04. 12.] <http://www.statsbygg.no/en/Utviklingsprosjekter/Nasjonalmuseet/Nasjonalmuseet-pa-Vestbanen/Foto-forum-artis/>.
66. **Rausand, M.** *Risk Assessment - Theory, Methods, and Applications*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2011.
67. **Finansnæringens Fellesorganisasjon.** BRASK - Brannskadestatistikk. [Internett] 31. 12. 11. [Sitert: 19. 03. 12.] <http://www.fno.no/no/Hoved/Statistikk/skadeforsikring/Brannstatistikk/>.
68. **Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB).** www.dsb.no. [Internett] <http://dsb.no/no/Statistikk/Statistikk1/Branner/>.
69. **Wiegmann, J. P.** My Modern Met. [Internett] 15. 12. 11. [Sitert: 23. 02. 12.] <http://www.mymodernmet.com/profiles/blogs/flammable-matchstick-art>.
70. **Levy, S.** www.sharonlevy.com. [Internett] 2005. [Sitert: 23. 02. 12.] http://www.sharonlevy.com/artpages/art_stacks7.html.
71. **Norsk Teknisk Museum.** [Internett] [Sitert: 24. 02. 12.] <http://www.tekniskmuseum.no/siste-nytt/norges-forste-bil-i-ny-prakt>.
72. **Drammens Museum.** [Internett] [Sitert: 24. 02. 12.] <http://www.drammens.museum.no/dm/UTSTILLINGER/SKIFTENDE-UTSTILLINGER/2012/Dag-Alveng-RACING/Bilder-fra-aapningen>.
73. **Store Norske Leksikon.** *Røykeloven*. [Internett] 04. 11. 11. [Sitert: 22. 02. 12.] <http://snl.no/røykeloven>.
74. **Stensaas, J. P.** *Varmgang i elektrisk materiell og utstyr som tennkilde i bygninger*. Trondheim : SINTEF NBL, 2007.
75. **Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB).** *Kjennetegn og utviklingstrekk ved dødsbranner og omkomne i brann*. 2010.

76. **Standard Norge.** *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-2: Allmenne laster, Laster på konstruksjoner ved brann.* 2002.
77. **Kollegiet for brannfaglig terminologi.** KBT. [Internett] [Sisert: 07. 03. 12.] <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp>.
78. **Klason, L. G., Johansson, N. og Andersson, P.** *Dimensionerende brand: anlagda skolbränder.* Borås : SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2010.
79. **Technical Committee on Smoke Management Systems.** *NFPA 204: Standard for Smoke and Heat Venting.* Quincy : National Fire Protection Association (NFPA), 2012.
80. **Zalok, E. og Hadjisophocleous, G.** *Characterizing of Design Fires For Clothing Stores.* Ottawa : Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, 2007.
81. **Särdqvist, S.** *Initial fires - RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests.* Lund : Swedish Fire Research Board (BRANDFORSK), 1993.
82. **Haack, A.** *Fire Protection in Traffic Tunnels: General Aspects and Results of the EUREKA Project, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 13.* Cologne : Elsevier Science, 1998.
83. **Lemaire, T. og Kenyon, Y.** *Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel.* s.l. : Springer Science + Business Media, 2006.
84. **carinf.com.** carinf. [Internett] [Sisert: 26. 03. 12.] <http://www.carinf.com/en/dd2048161.html>.
85. **Gottuk, D. T. og Dinaburg, J.** *Fire Detection in Warehouse Facilities.* Baltimore : Fire Protection Research Foundation, 2012.
86. **Department of Textile and Apparel Management, The University of Missouri.** Project Cotton. *The University of Missouri.* [Internett] 2008. [Sisert: 22. 03. 12.] <http://cotton.missouri.edu/Classroom-Chemical%20Composition.html>.
87. **DiNenno, P. J., et al.** *Vedlegg til SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition.* Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008.

88. **Drysdale, D.** Thermochemistry. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 1, ss. 91-100.
89. **Prasad, K. R., et al.** *Numerical Simulation of Fire Spread on Polyurethane Foam Slabs, Annual Fire Conference*. Gaithersburg : Fire Research Division, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2009. ss. 697-708.
90. **Babrauskas, V.** The Generation of CO in Bench-scale Fire Tests and the Prediction for Real-scale Fires. *Fire and Materials*. Volume 19, 1995, ss. 205-213.
91. **Wade, C. A.** *Report on ISO TC 92 SC4 Meeting October 2008*. Porirua City : BRANZ, 2008.
92. **Price, D., et al.** Burning behaviour of foam/cotton fabric combinations in the cone calorimeter. *Polymer Degradation and Stability*. Volume 77, Issue 2, 2002, ss. 213–220.
93. **Tewarson, A.** Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fires. [bokforf.] P. J. DiNenno, et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition*. Massachusetts : Society of Fire Protection Engineering (SFPE) og the National Fire Protection Association (NFPA), 2008, Section 3, ss. 109-194.
94. **Boverket, Myndigheten för samhällsplanering, byggande och boende.** *BBRAD 1 Boverkets Författningssamling*. 2011.
95. **Hamins, A, Maranghides, A. og Mulholland, G.** *NISTIR 7013 The Global Combustion Behavior of 1 MW to 3 MW Hydrocarbon Spray Fires Burning in an Open Environment*. s.l. : National Institute of Standards and Technology (NIST), 2003.
96. **Valkvist, M. B. S.** *New Engineering Principles in Atrium Smoke Management: New Approach Flow and Spill Plume Model for Wide Openings: Guidelines on CFD Grid Quality Control and Buoyancy-driven Vent Flow Modeling*. Lyngby : Department og Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2007.
97. **Babrauskas, V. og Krasny, J.** *Fire Behaviour of Upholstered Furniture*. Gaithersburg : National Bureau of Standards, 1985.

Liste over simuleringsverktøy

Følgende simuleringsverktøy er benyttet i oppgaven:

Fire Dynamics Simulator (FDS), Versjon 5.5.3, 2010, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA

Smokeview, Versjon 5.6, 2010, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA

Pyrosim 2011, Versjon 2011.1.1409, Thunderhead Engineering Consultants, Inc., Manhattan, New York, USA

Pyrosim 2012, Versjon 2012.1.0430, Thunderhead Engineering Consultants, Inc., Manhattan, New York, USA

Pathfinder 2011, Versjon 2011.1.1128, Thunderhead Engineering Consultants, Inc., Manhattan, New York, USA

Vedleggsliste

- Vedlegg A Oppgavetekst
- Vedlegg B Kursbeskrivelse "Simulation of Fires in Enclosures 2012"
- Vedlegg C Tabeller fra Melding HO-3/2000
- Vedlegg D Verdier for avtrekksmengde funnet ved lineær ekstrapolasjon
- Vedlegg E FDS-koder
- Vedlegg F Utdata fra FDS-simuleringer
- Vedlegg G FDS-kode 7_7.4out_1.5in
- Vedlegg H Håndberegninger
- Vedlegg I Hastighet (SLCF) 7_7.4out_1.5in
- Vedlegg J MTR 7_7.4out_1.5in
- Vedlegg K Oppsummering fra simuleringer i Pathfinder

Vedlegg A

Oppgavetekst

MASTEROPPGAVE

(TBA4905 Bygnings- og materialteknikk, masteroppgave)

VÅREN 2012

for

Nina Tøndevold og Maiken Larsen

Analytisk brannprosjektering med simulering

Alternativ røykventilering i Alabasterhallen i det nye Nasjonalmuseet

BAKGRUNN

I store prosjekter, spesielt i bygninger beregnet for publikum, er det branntekniske aspektet svært viktig da store verdier kan bli utsatt for fare. Hvert år dør flere titalls personer som følge av brann i Norge. Personskader og tap av menneskeliv påfører store lidelser for de som rammes, både de som er direkte innblandet og for pårørende. Omtrent 80 % av omkomne i bygningsbranner dør som følge av inhalering av røyk. Å hindre at røyken spres, og å holde rømningsveier røykfrie, er derfor viktig. Spredning kan forhindres ved hjelp av røykventilasjon.

Funksjonsbaserte forskrifter som kom med Forskrift om krav til byggverk (TEK 97, nå erstattet med TEK 10), stiller ikke lenger spesifikke krav til løsninger, og har åpnet opp for alternative utforminger og metoder. Spenstige og nyskapende arkitektløsninger fører til at det er nødvendig å dokumentere løsninger med analyse. CFD som dokumentasjonsverktøy innen analytisk brannprosjektering er mye brukt blant rådgivende ingeniører, og bruken kan antas å være stadig økende.

OPPGAVE

Beskrivelse av oppgaven

Opgaven tar for seg en utstillingshall, kalt Alabasterhallen, som er en del av det nye Nasjonalmuseet på Vestbanen i Oslo. Arkitekten ønsker en ikke-synlig røykventilasjon og har derfor foreslått en alternativ løsning hvor røyken skal trekkes ut gjennom 20 cm gjennomgående slisser langs vegg eller himling i alle byggets yttervegger. Løsningen er utradisjonell og det settes spørsmålsteget ved slissenes størrelse og evne til å slippe ut nødvendig mengde røyk. Det er derfor ønskelig å undersøke om den foreslåtte løsningen er gjennomførbar, og eventuelt hvilke andre tiltak som må til for å tilfredsstille gjeldende krav til røykventilasjon.

Målsetting og hensikt

Resultatmål:

Innen 11. juni skal det undersøkes og vurderes om den alternative røykventilasjonsløsningen kan fungere slik den er foreslått. Dette innebærer at løsningen er like god eller bedre enn tradisjonell røykventilasjonsløsning dimensjonert direkte etter HO-meldingen. Den alternative løsningen må tilfredsstille krav til tilgjengelig rømningstid og krav til tålegrenser ved evakuering. Hvis løsningen fungerer skal det også vurderes hvilke vifte- og tillufts løsninger som vil kreves for at løsningen skal fungere best mulig. Dette skal oppnås ved å:

- avdekke faremomenter ved, og plassering av, ulike kunstinstallasjoner

- bestemme dimensjonerende brannscenarioer
- simulere den alternative røykventilasjonen ved hjelp av CFD
- sammenligne den alternative røykventilasjonen med tradisjonell termisk røykventilasjon i henhold til HO-meldingen
- simulere evakuering i Pathfinder for å estimere nødvendig rømningstid

Effektmål:

- *Generelt:* Bidra til høyere kunnskap om mulighetene ved alternative røykventilasjonsløsninger som ikke oppfyller krav gitt av preaksepterte løsninger.
- *For forfatterne spesielt:* Øke forståelsen for brannfaget og få kjennskap til relevante verktøy som benyttes innen røyk- og brannsimulering. Bli kjent med muligheter og begrensninger ved disse verktøyene, og få kunnskap om hvilke parametre som er viktige å ta hensyn til.

Deloppgaver og forskningsspørsmål

Noen sentrale spørsmål:

- Hvordan vil den alternative røykventilasjonsløsningen fungere?
- Vil røyken møte for stor mekanisk motstand?
- Vil løsningen fungere med naturlig ventilasjon eller er mekanisk ventilasjon nødvendig?
- Hvilken tilluftsløsning vil fungere best sammen med foreslått røykventilasjon?
- Hvordan vil plassering av gjenstander/utstillinger påvirke røykens strømningsmønster?

GENERELT

Opgaveteksten er ment som en ramme for kandidatens arbeid. Justeringer vil kunne skje underveis, når en ser hvordan arbeidet går. Eventuelle justeringer må skje i samråd med faglærer ved instituttet.

Ved bedømmelsen legges det vekt på grundighet i bearbeidningen og selvstendighet i vurderinger og konklusjoner, samt at framstillingen er velredigert, klar, entydig og ryddig uten å være unødig voluminøs.

Besvarelsen skal inneholde

- standard rapportforside (automatisk fra DAIM, <http://daim.idi.ntnu.no/>)
- tittelside med ekstrakt og stikkord (mal finnes på siden <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>)
- forord
- sammendrag på norsk og engelsk (studenter som skriver sin masteroppgave på et ikke-skandinavisk språk og som ikke behersker et skandinavisk språk, trenger ikke å skrive sammendrag av masteroppgaven på norsk)
- innholdsfortegnelse inklusive oversikt over figurer, tabeller og vedlegg
- om nødvendig en liste med beskrivelse av viktige betegnelser og forkortelser benyttet
- hovedteksten
- referanser til kildemateriale som ikke er av generell karakter, dette gjelder også for muntlig informasjon og opplysninger.
- oppgaveteksten (denne teksten signert av faglærer) legges ved som Vedlegg 1.
- besvarelsen skal ha komplett paginering (sidenummerering).

Besvarelsen kan evt. utformes som en vitenskapelig artikkel. Arbeidet leveres da også med rapportforside og tittelside og om nødvendig med vedlegg som dokumenterer arbeid utført i prosessen med utforming av artikkelen.

Se forøvrig «Råd og retningslinjer for rapportskrivning ved prosjektarbeid og masteroppgave ved Institutt for bygg, anlegg og transport». Finnes på <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank>

Hva skal innleveres?

Rutiner knyttet til innlevering av masteroppgaven er nærmere beskrevet på <http://daim.idi.ntnu.no/>. Trykking av masteroppgaven bestilles via DAIM direkte til Skipnes Trykkeri som leverer den trykte oppgaven til instituttkontoret 2-4 dager senere. Instituttet betaler for 3 eksemplarer, hvorav instituttet beholder 2 eksemplarer. Ekstra eksemplarer må bekostes av kandidaten/ ekstern samarbeidspartner.

Ved innlevering av oppgaven skal kandidaten levere en CD med besvarelsen i digital form i pdf- og word-versjon med underliggende materiale (for eksempel datainnsamling) i digital form (f. eks. excel). Videre skal kandidaten levere innleveringsskjemaet (fra DAIM) hvor både Ark-Bibl i SBI og Fellestjenester (Byggsikring) i SB II har signert på skjemaet. Innleveringsskjema med de aktuelle signaturene underskrives av instituttkontoret før skjemaet leveres Fakultetskontoret.

Dokumentasjon som med instituttets støtte er samlet inn under arbeidet med oppgaven skal leveres inn sammen med besvarelsen.

Besvarelsen er etter gjeldende reglement NTNUs eiendom. Eventuell benyttelse av materialet kan bare skje etter godkjenning fra NTNU (og ekstern samarbeidspartner der dette er aktuelt). Instituttet har rett til å bruke resultatene av arbeidet til undervisnings- og forskningsformål som om

det var utført av en ansatt. Ved bruk ut over dette, som utgivelse og annen økonomisk utnyttelse, må det inngås særskilt avtale mellom NTNU og kandidaten.

(Evt) Avtaler om ekstern veiledning, gjennomføring utenfor NTNU, økonomisk støtte m.v.
Beskrives her når dette er aktuelt. Se <http://www.ntnu.no/bat/skjemabank> for avtaleskjema.

Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

NTNU legger stor vekt på sikkerheten til den enkelte arbeidstaker og student. Den enkeltes sikkerhet skal komme i første rekke og ingen skal ta unødige sjanser for å få gjennomført arbeidet. Studenten skal derfor ved uttak av masteroppgaven få utdelt brosjyren "Helse, miljø og sikkerhet ved feltarbeid m.m. ved NTNU".

Dersom studenten i arbeidet med masteroppgaven skal delta i feltarbeid, tokt, befaring, feltkurs eller ekskursjoner, skal studenten sette seg inn i "Retningslinje ved feltarbeid m.m.". Dersom studenten i arbeidet med oppgaven skal delta i laboratorie- eller verkstedarbeid skal studenten sette seg inn i og følge reglene i "Laboratorie- og verkstedhåndbok". Disse dokumentene finnes på fakultetets HMS-sider på nettet, se <http://www.ntnu.no/ivt/adm/hms/>.

Studenter har ikke full forsikringsdekning gjennom sitt forhold til NTNU. Dersom en student ønsker samme forsikringsdekning som tilsatte ved universitetet, anbefales det at han/hun tegner reiseforsikring og personskadeforsikring. Mer om forsikringsordninger for studenter finnes under samme lenke som ovenfor.

Innleveringsfrist:

Arbeidet med oppgaven starter 16. januar 2012

Besvarelsen leveres senest ved registrering i DAIM innen 11. juni 2012 kl 1500.

Faglærer ved instituttet: Harald Landrø

Veileder (eller kontaktperson) hos ekstern samarbeidspartner: Barbro Maria Storm

Institutt for bygg, anlegg og transport, NTNU

Dato: 01.06.2012, (evt revidert: dd.mm.åååå)

Underskrift



Faglærer

Vedlegg B

**Kursbeskrivelse ”Simulation of Fires
in Enclosures 2012”**



2012-05-30

1

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

Lunds universitet

Fire Safety Engineering and Systems Safety
Patrick van Hees

Simulation of Fires in Enclosures 2012 - (VBR200)

During spring 2012 the department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, will organise a course in Computational Fluid Dynamics (CFD) for room fires. The course is given primarily as a distance learning course in combination with **one introductory seminar** January 26 to 27, **one intermediate seminar** March 14 to 15 and **one concluding seminar** end of May, early June.

The use of CFD to simulate fires in enclosures has increased and gained importance in recent years. CFD for enclosure fires has a wide variety of application, including fire investigation and performance based design.

The course is designed to provide knowledge of how the spread of fire and combustion gases is simulated using Computational Fluid Dynamics (CFD), in fire safety design and fire investigations. It also provides an understanding of the limitations of the numerical and physical models used, and an awareness of the most common sources of error.

Target Group

Fire Protection Engineering students, MSc students in Risk Management, consultants, PhD students, researchers, employees of private companies and rescue services who want to learn how to use CFD models for fire simulations within fire performance based design.

Recommended pre-knowledge

Fire Protection Engineer or MSc in engineering within corresponding areas.

Course content

The course includes the following:

- Different numerical models for turbulence such as RANS ($k-\epsilon$ -model) and LES (large eddy model)
- Numerical solutions, stability and convergence
- Physical models for turbulence, heat transfer, combustion inclusive production of gaseous species and soot, flame spread will be discussed together with their limitations.
- Individual calculation assignments using FDS
- Group assignments for advanced calculation of temperature, flows, etc for fires in complex geometries
- Overview of common errors when using CFD models and performing CFD calculations

Course Layout

The course gives 7,5 ECTS credits (which corresponds with 5 credit points according to the old Swedish system). The course starts with a seminar in Lund between January 26 to 27. After that the course is given as a distance course with the LUVIT tool. In the beginning of March (March 14 to 15) a repetition seminar will be organised together with an interim examination (preliminary date April 10). The course is concluded with a final seminar in Lund end of May, early June. The assessment is based on individual assignments, group assignments and the interim exam in April 2012 (which can be done at as a distance exam). The course is given in English.

Course material

The following course material is included for external students:

- CD with the CFD-model FDS (Fire Dynamics Simulator, NIST) for PC and Mac, with corresponding manuals. FDS is also freely available from the Internet.
- Binder with lecture notes and manuals.

Cost

The course is free for students at Lund University. For others the cost is **SEK 20 000:- excl. VAT.**

Teachers

PhD Philip Rubini, University of Hull, UK

Professor Patrick van Hees, Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University (Responsible for the course)

Fire Safety Engineering Jonathan Wahlqvist, PhD student at Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University (Course administrator)

Registration

The number of participants is limited. Registration is done as follows:

- For students from Lund University the registration is done through the KA-system.
- For other participants registration is done by email to patrick.van_hees@brand.lth.se. Registration is done electronically before **January 15th 2012**. Mention the following in your email:
 - Name of the course
 - Your name
 - Your employer (Address, Telephone number, E-mail and invoice information)

You will get confirmation of your participation one week after the deadline of the registration period.

Welcome!

Patrick van Hees

(Patrick.van_Hees@brand.lth.se, tel. +46 46-288 4839)

Vedlegg C

Tabeller fra Melding HO-3/2000

A1 Termisk røykventilasjon

Tabellen angir nødvendig åpningsareal A_v i m^2 for takluker som en funksjon av brannflaten A_b , lokalets høyde (H) og ønsket høyde på røykfri sone (h)

| Høyde H (m) | Røykfri sone h (m) | Nødvendig åpningsareal (A_v) | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------|----------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| | | Brannareal A_b (m^2) | | | | | | | | | |
| | | 1 | 3 | 5 | 10 | 15 | 25 | 40 | 60 | 90 | |
| 4 | 3 | 3 | 5 | 6 | 8 | 10 | 13 | 17 | 22 | 28 | |
| | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 13 | |
| 5 | 4 | 5 | 9 | 10 | 13 | 16 | 20 | 26 | 32 | 40 | |
| | 2 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 9 | 12 | 16 | 20 | |
| 6 | 5 | 5 | 13 | 15 | 20 | 23 | 29 | 36 | 44 | 54 | |
| | 4 | 4 | 9 | 7 | 9 | 11 | 14 | 18 | 23 | 28 | |
| | 3 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 9 | 10 | 12 | 16 | |
| 7 | 5 | 5 | 9 | 11 | 14 | 17 | 21 | 26 | 31 | 38 | |
| | 4 | 3 | 5 | 6 | 8 | 9 | 12 | 15 | 18 | 23 | |
| | 3 | 2 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 9 | 11 | 14 | |
| 8 | 5 | 5 | 13 | 15 | 20 | 23 | 29 | 34 | 41 | 50 | |
| | 5 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 17 | 21 | 25 | 31 | |
| | 4 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 | 10 | 13 | 16 | 20 | |
| | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 13 | |
| 9 | 7 | 13 | 18 | 21 | 28 | 30 | 37 | 45 | 53 | 64 | |
| | 5 | 7 | 11 | 13 | 16 | 19 | 23 | 28 | 34 | 41 | |
| | 5 | 4 | 9 | 6 | 10 | 12 | 15 | 18 | 22 | 27 | |
| | 4 | 3 | 4 | 4 | 6 | 7 | 9 | 12 | 14 | 18 | |
| | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 9 | 11 | |
| 10 | 7 | 19 | 4 | 17 | 22 | 25 | 30 | 37 | 43 | 52 | |
| | 5 | 9 | 9 | 11 | 14 | 16 | 20 | 24 | 29 | 36 | |
| | 5 | 4 | 9 | 7 | 9 | 10 | 13 | 16 | 20 | 24 | |
| | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 | 11 | 13 | 16 | |
| | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 | 11 | |

| | | | | | | | | | | |
|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 13 | 9 | 19 | 24 | 25 | 25 | 41 | 48 | 53 | 67 | 80 |
| | 8 | 17 | 17 | 19 | 24 | 26 | 34 | 45 | 47 | 58 |
| | 7 | 8 | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 | 28 | 34 | 40 |
| | 6 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 18 | 20 | 24 | 29 |
| | 5 | 3 | 5 | 6 | 7 | 9 | 11 | 14 | 17 | 21 |
| | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 6 | 7 | 9 |
| 14 | 11 | 29 | 38 | 42 | 53 | 61 | 72 | 84 | 95 | 114 |
| | 10 | 19 | 29 | 31 | 38 | 43 | 51 | 61 | 71 | 89 |
| | 9 | 14 | 19 | 22 | 27 | 31 | 38 | 45 | 52 | 62 |
| | 8 | 10 | 13 | 16 | 20 | 23 | 27 | 33 | 39 | 48 |
| | 7 | 7 | 9 | 11 | 14 | 16 | 20 | 24 | 28 | 34 |
| | 5 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 | 10 | 12 | 15 | 18 |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 | |
| 18 | 12 | 29 | 39 | 45 | 58 | 63 | 74 | 87 | 100 | 118 |
| | 11 | 21 | 29 | 34 | 41 | 47 | 58 | 65 | 78 | 98 |
| | 10 | 19 | 22 | 25 | 31 | 35 | 42 | 50 | 55 | 68 |
| | 9 | 12 | 19 | 19 | 23 | 27 | 32 | 38 | 44 | 52 |
| | 8 | 8 | 12 | 14 | 17 | 20 | 24 | 28 | 33 | 40 |
| | 6 | 4 | 6 | 7 | 9 | 10 | 13 | 15 | 19 | 22 |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 | |
| 19 | 14 | 41 | 55 | 62 | 77 | 82 | 101 | 115 | 135 | 155 |
| | 12 | 24 | 32 | 37 | 45 | 51 | 60 | 71 | 82 | 95 |
| | 10 | 14 | 19 | 22 | 27 | 31 | 38 | 43 | 50 | 59 |
| | 8 | 8 | 10 | 12 | 15 | 18 | 21 | 25 | 30 | 36 |
| | 6 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 | 11 | 14 | 17 | 20 |
| | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 6 | 7 |
| 21 | 15 | 52 | 110 | 126 | 152 | 171 | 199 | 225 | 259 | 295 |
| | 16 | 49 | 89 | 75 | 91 | 103 | 120 | 138 | 155 | 180 |
| | 14 | 31 | 41 | 48 | 58 | 68 | 77 | 89 | 102 | 117 |
| | 12 | 19 | 26 | 30 | 37 | 42 | 49 | 55 | 67 | 77 |
| | 10 | 12 | 19 | 19 | 23 | 28 | 31 | 37 | 43 | 50 |
| | 8 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 19 | 22 | 26 | 31 |
| | 6 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 13 | 15 | 18 |
| 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | |

A2 Mekanisk røykventilasjon

Tabellen angir nødvendige luftmengder innenfor en seksjon uttrykt i m³/s som en funksjon av brannflaten A_b og ønsket høyde på røykfri sone (h)

| Høyde røykfri sone h (m) | Nødvendig luftmengde avtrekk (m ³ /s) | | | | | | | | |
|--------------------------|--|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Brannflate A _b (m ²) | | | | | | | | |
| | 1 | 3 | 5 | 10 | 15 | 25 | 40 | 60 | 90 |
| 3 | 4 | 8 | 12 | 21 | 28 | | | | |
| 4 | 6 | 11 | 16 | 26 | 34 | 51 | 74 | | |
| 5 | 7 | 14 | 20 | 31 | 41 | 60 | 85 | 117 | |
| 6 | 9 | 18 | 24 | 37 | 49 | 70 | 98 | 132 | 181 |
| 7 | 12 | 21 | 29 | 44 | 57 | 80 | 111 | 149 | 201 |
| 8 | 14 | 25 | 34 | 52 | 66 | 92 | 126 | 167 | 223 |
| 9 | 16 | 30 | 40 | 59 | 76 | 104 | 141 | 186 | 246 |
| 10 | 19 | 34 | 45 | 67 | 86 | 117 | 158 | 206 | 271 |
| 11 | 22 | 39 | 51 | 85 | 96 | 131 | 175 | 227 | 297 |
| 12 | 24 | 44 | 58 | 85 | 107 | 145 | 193 | 249 | 324 |
| 13 | 27 | 49 | 64 | 94 | 119 | 160 | 212 | 272 | 352 |
| 14 | 30 | 54 | 71 | 104 | 131 | 175 | 231 | 296 | 381 |
| 15 | 34 | 60 | 78 | 114 | 143 | 191 | 252 | 321 | 411 |
| 16 | 37 | 66 | 86 | 125 | 156 | 208 | 272 | 346 | 443 |
| 17 | 40 | 71 | 94 | 136 | 169 | 225 | 294 | 373 | 475 |
| 18 | 44 | 78 | 101 | 147 | 183 | 242 | 316 | 400 | 509 |

Tabell 7-1 Brannbelastning, brannveksttid og typiske lokaler

| BRANNBELASTNING (Mj/m ² OMHVLN. FLATE) | BRANNVEKSTTID t _g (TID TIL 1000 kW) | EK. PÅ LOKALE |
|--|---|---|
| UNDER 50 | 300 s (5 MIN.) | KIRKE, IDRETTSHALL, KANTINE |
| 50 - 200 | 225 s (3.75 MIN.) | MEKANISK VERKSTED, TEATER, SKOLE, KONTOR, BOLIG, GARASJE |
| 200 - 400 | 150 s (2.50 MIN.) | RESTAURANT, KLESVAREBUTIKK |
| OVER 400 | 75 s - 150 s MÅ VURDERES SPESIELT | TREVAREFABRIKK |

Tabell 7-2 Brannareal (m²) utvikling over tid avhengig av brannveksttid (t_g)

| TID (MIN.) | BRANNVEKSTTID t _g (s) | | | |
|------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 75 s | 150 s | 225 s | 300 s |
| 3.0 MIN. | 12 m ² | 3 m ² | 1 m ² | 1 m ² |
| 5.0 MIN. | 32 m ² | 8 m ² | 4 m ² | 2 m ² |
| 7.5 MIN. | 72 m ² | 18 m ² | 8 m ² | 5 m ² |
| 10.0 MIN. | | 32 m ² | 14 m ² | 8 m ² |
| 15.0 MIN. | | 72 m ² | 32 m ² | 18 m ² |

Tabell 7-3 Responstid (min) for røykdetektorer og sprinklere montert i tak/himling. Sprinklerhoder av type 'hurtig respons' og 'standard'

| TAKHØYDE (M) | | BRANNVEKSTTID t _g | | | | |
|--------------|-----------------------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | RTI | 75 | 150 | 225 | 300 |
| 3 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 1,0 |
| | TEMP. 68°C (MIN.) | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| | HURTIG RESPONS (MIN.) | 50 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| | STANDARD (MIN.) | 200 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |
| 6 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 1,5 |
| | TEMP. 68°C (MIN.) | 0 | 1,5 | 3,0 | 4,5 | 5,5 |
| | HURTIG RESPONS (MIN.) | 50 | 2,0 | 3,5 | 5,0 | 6,0 |
| | STANDARD (MIN.) | 200 | 3,5 | 5,0 | 6,5 | 7,5 |
| 9 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| | TEMP. 68°C (MIN.) | 0 | 2,5 | 5,0 | 7,5 | << |
| | HURTIG RESPONS (MIN.) | 50 | 3,0 | 5,5 | 8,0 | << |
| | STANDARD (MIN.) | 200 | 4,5 | 7,0 | 9,5 | << |
| 12 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 1,0 | 2,0 | 2,5 | 3,5 |
| 15 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 1,5 | 2,5 | 3,5 | 4,5 |
| 18 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 1,5 | 3,0 | 4,5 | 5,5 |
| 21 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 2,0 | 3,5 | 5,5 | 7,0 |
| 24 | RØYKDETEKTOR (MIN.) | 0 | 2,5 | 4,0 | 6,5 | 8,5 |

Tabell 8-1 Forenklet fastsettelse av brannareal for overbygde gårder og gater

| BRUK AV GÅRDEN | USPRINKLET FLATE | SPRINKLET FLATE * |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| SOM KOMMUNIKASJONSAREAL | 15 m ² | 8 m ² |
| MED FLYTTBAR MØBLERING | 25 m ² | 13 m ² |
| MED FAST MØBLERING ** | 40 m ² | 20 m ² |

*) Er gården høyere enn 9 m anses sprinkling ikke å være effektiv såfremt sprinkleranlegget ikke monteres rett over brannflaten i eget rammeverk eller lignende, og utløsning skjer ved hjelp av effektivt plasserte røykdetektorer eller lignende.

**) verdiene på 20 m² og 40 m² brannareal gjelder som maksimal flate, selv om virksomhetsarealet kan være større. Dette gjelder når brannvesenets innsatstid er mindre enn 15 minutter. I kommuner der innsatstiden er lengre enn 15 minutter må brannflaten settes lik virksomhetsarealet.

Tabell 8-2 Brannareal som funksjon av brannbelastning og tid

| BRANNBELASTNING (MJ/m ² OMHYLN. FLATE) | TID | | | EKS. PÅ LOKALE |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|---|
| | 5 MIN. | 10 MIN. | 15 MIN. | |
| UNDER 50 | 5 m ² | 8 m ² | 15 m ² | KIRKE, IDRETTSHALL, EKKEL KANTINE |
| 50-200 | 5 m ² | 15 m ² | 25 m ² | MEKANISK VERKSTED, TEATER, SKOLE, KONTOR, BOLIG |
| 200-400 | 8 m ² | 25 m ² | 60 m ² | RESTAURANT, KLESVARE- BUTIKK |
| OVER 400 | 10 m ² | 40 m ² | 90 m ² | TREVAREFABRIKK |

Vedlegg D

Verdier for avtrekksmengde funnet
ved lineær ekstrapolasjon

A2: Mekanisk røykventilasjon, nødvendig luftmengde avtrekk (m³/s)

| Høyde røykfri sone (m) | Brannflate, Ab (m ²) | | | | | | | | | |
|------------------------|----------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|--|
| | 1 | 3 | 5 | 10 | 15 | 25 | 40 | 60 | 90 | |
| 3 | 4 | 8 | 12 | 21 | 28 | 42 | 63 | 91 | 133 | |
| 4 | 6 | 11 | 16 | 26 | 34 | 51 | 74 | 104,7 | 150,8 | |
| 5 | 7 | 14 | 20 | 31 | 41 | 60 | 85 | 117 | 165 | |
| 6 | 9 | 18 | 24 | 37 | 49 | 70 | 98 | 132 | 181 | |
| 7 | 12 | 21 | 29 | 44 | 57 | 80 | 111 | 149 | 201 | |
| 8 | 14 | 25 | 34 | 52 | 66 | 92 | 126 | 167 | 223 | |
| 9 | 16 | 30 | 40 | 59 | 76 | 104 | 141 | 186 | 246 | |
| 10 | 19 | 34 | 45 | 67 | 86 | 117 | 158 | 206 | 271 | |
| 11 | 22 | 39 | 51 | 85 | 96 | 131 | 175 | 227 | 297 | |
| 12 | 24 | 44 | 58 | 85 | 107 | 145 | 193 | 249 | 324 | |
| 13 | 27 | 49 | 64 | 94 | 119 | 160 | 212 | 272 | 352 | |
| 14 | 30 | 54 | 71 | 104 | 131 | 175 | 231 | 296 | 381 | |
| 15 | 34 | 60 | 78 | 114 | 143 | 191 | 252 | 321 | 411 | |
| 16 | 37 | 66 | 86 | 125 | 156 | 208 | 272 | 346 | 443 | |
| 17 | 40 | 71 | 94 | 136 | 169 | 225 | 294 | 373 | 475 | |
| 18 | 44 | 78 | 101 | 147 | 183 | 242 | 316 | 400 | 509 | |

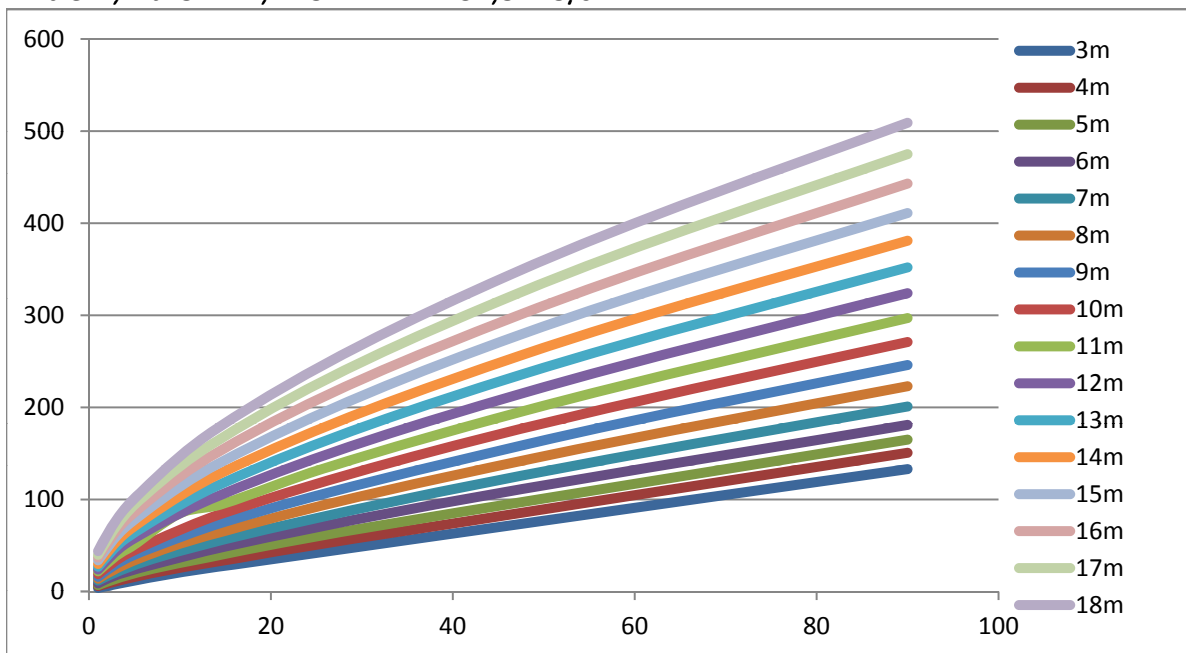
Lineær ekstrapolasjon:

$y(x)=$

| | y(25) | y(40) | y(60) | y(90) |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 3m | 42 | 63 | 91 | 133 |
| 4m | | | 104,7 | 150,8 |
| 5m | | | | 165 |

Interpolasjon

Avtrekk, Ab=32 m², h=3 m 51,8 m³/s



Vedlegg E

FDS-koder

Filene ligger på vedlagt DVD-plate under mappe med samme navn.

Vedlegg F

Utdata fra FDS-simuleringer

Filene ligger på vedlagt DVD-plate under mappe med samme navn.

Mappen inneholder alle csv-filer som er generert fra simuleringene (åpnes i Microsoft Office Excel).

Vedlegg G

FDS-kode 7_7.4out_1.5in

7_20-20-20_slots_7.4out_1.5in.fds

Generated by PyroSim - Version 2012.1.0430

26.mai.2012 08:58:17

```
&HEAD CHID='7_20-20-20_slots_7_4out_1_5in', TITLE='7_20-20-20_slots_7.4out_1.5in'/
&TIME T_END=1800.0/
&DUMP RENDER_FILE='7_20-20-20_slots_7_4out_1_5in.ge1', DT_RESTART=60.0/
&MISC CHECK_KINETIC_ENERGY=.TRUE./
```

```
&MESH ID='MESH20_1', IJK=258,120,48, XB=-0.8,50.8,-2.0,22.0,-0.4,9.2/
&TRNX CC=13.6, PC=13.6, MESH_NUMBER=1/ MESH20_1
&TRNX CC=32.8, PC=32.8, MESH_NUMBER=1/ MESH20_1
&MESH ID='MESH20_2', IJK=400,120,48, XB=50.8,130.8,-2.0,22.0,-0.4,9.2/
&TRNX CC=110.8, PC=110.8, MESH_NUMBER=2/ MESH20_2
```

```
&REAC ID='60HEPTAN_40TOLUEN',
      FYI='60 % Heptan + 40 % Toluen',
      C=7.0,
      H=12.8,
      O=0.0,
      N=0.0,
      HEAT_OF_COMBUSTION=4.3E4,
      CO_YIELD=0.042,
      SOOT_YIELD=0.114/
```

```
&DEVC ID='BEAM_Aemergexit1_2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=22.8,32.8,1.8,1.8,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Aemergexit1_3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=22.8,32.8,1.8,1.8,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Aemergexit2_2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=32.8,42.8,1.8,1.8,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Aemergexit2_3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=32.8,42.8,1.8,1.8,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Amiddle2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=17.0,17.0,9.4,10.4,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Amiddle3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=17.0,17.0,9.4,10.4,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Amiddle6.9m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=17.0,17.0,0.0,20.0,6.9,6.9, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Bmiddle2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=65.0,65.0,9.4,10.4,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Bmiddle3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=65.0,65.0,9.4,10.4,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Bmiddle6.9m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=65.0,65.0,0.0,20.0,6.9,6.9, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Cemergexit1_2m02', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=90.8,100.8,1.8,1.8,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Cemergexit1_3m02', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=90.8,100.8,1.8,1.8,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
```

&DEVC ID='BEAM_Cemergexit2_2m02', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=80.8,90.8,1.8,1.8,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Cemergexit2_3m02', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=80.8,90.8,1.8,1.8,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Cmiddle2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=114.0,114.0,9.4,10.4,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Cmiddle3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=114.0,114.0,9.4,10.4,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Cmiddle6.9m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=114.0,114.0,0.0,20.0,6.9,6.9, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Insidestairwell1_2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=43.4,44.4,7.0,7.0,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Insidestairwell1_3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=43.4,44.4,7.0,7.0,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Insidestairwell2_2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=85.4,86.4,7.0,7.0,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Insidestairwell2_3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=85.4,86.4,7.0,7.0,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Outsidestairwell1_2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=36.6,37.6,2.0,2.0,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Outsidestairwell1_3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=36.6,37.6,2.0,2.0,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Outsidestairwell2_2m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=92.4,93.4,2.0,2.0,2.0,2.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='BEAM_Outsidestairwell2_3m', QUANTITY='PATH OBSCURATION',
XB=92.4,93.4,2.0,2.0,3.0,3.0, SETPOINT=0.33/
&DEVC ID='GAS_CO2_Amiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=17.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO2_Amiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=17.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO2_Amiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=17.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO2_Bmiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=65.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO2_Bmiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=65.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO2_Bmiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=65.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO2_Cmiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=114.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO2_Cmiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=114.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO2_Cmiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
dioxide', XYZ=114.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO2_opening_stairwell1_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=44.0,3.5,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO2_opening_stairwell1_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=44.0,3.5,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO2_opening_stairwell1_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=44.0,3.5,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO2_opening_stairwell2_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=86.2,3.5,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO2_opening_stairwell2_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=86.2,3.5,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO2_opening_stairwell2_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=86.2,3.5,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO2_Outsidestairwell1_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=36.6,3.4,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO2_Outsidestairwell1_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=36.6,3.4,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO2_Outsidestairwell1_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=36.6,3.4,2.0/

&DEVC ID='GAS_CO2_Outsidestairwell2_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=93.4,3.4,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO2_Outsidestairwell2_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=93.4,3.4,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO2_Outsidestairwell2_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=93.4,3.4,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO_Amiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=17.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO_Amiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=17.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO_Amiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=17.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO_Bmiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=65.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO_Bmiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=65.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO_Bmiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=65.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO_Cmiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=114.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO_Cmiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=114.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO_Cmiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='carbon
monoxide', XYZ=114.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO_opening_stairwell1_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=44.0,3.5,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO_opening_stairwell1_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=44.0,3.5,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO_opening_stairwell1_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=44.0,3.5,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO_opening_stairwell2_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=86.2,3.5,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO_opening_stairwell2_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=86.2,3.5,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO_opening_stairwell2_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=86.2,3.5,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO_Outsidestairwell1_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=36.6,3.4,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO_Outsidestairwell1_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=36.6,3.4,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO_Outsidestairwell1_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=36.6,3.4,2.0/
&DEVC ID='GAS_CO_Outsidestairwell2_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=93.4,3.4,1.5/
&DEVC ID='GAS_CO_Outsidestairwell2_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon dioxide', XYZ=93.4,3.4,1.75/
&DEVC ID='GAS_CO_Outsidestairwell2_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='carbon monoxide', XYZ=93.4,3.4,2.0/
&DEVC ID='GAS_O2_Amiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=17.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_O2_Amiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=17.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_O2_Amiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=17.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_O2_Bmiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=65.0,10.0,1.5/
&DEVC ID='GAS_O2_Bmiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=65.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_O2_Bmiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=65.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_O2_Cmiddle_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=114.0,10.0,1.5/

```

&DEVC ID='GAS_O2_Cmiddle_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=114.0,10.0,1.75/
&DEVC ID='GAS_O2_Cmiddle_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='oxygen',
XYZ=114.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='GAS_O2_opening_stairwell1_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=44.0,3.5,1.5/
&DEVC ID='GAS_O2_opening_stairwell1_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=44.0,3.5,1.75/
&DEVC ID='GAS_O2_opening_stairwell1_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=44.0,3.5,2.0/
&DEVC ID='GAS_O2_opening_stairwell2_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=86.2,3.5,1.5/
&DEVC ID='GAS_O2_opening_stairwell2_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=86.2,3.5,1.75/
&DEVC ID='GAS_O2_opening_stairwell2_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=86.2,3.5,2.0/
&DEVC ID='GAS_O2_Outsidestairwell1_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=36.6,3.4,1.5/
&DEVC ID='GAS_O2_Outsidestairwell1_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=36.6,3.4,1.75/
&DEVC ID='GAS_O2_Outsidestairwell1_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=36.6,3.4,2.0/
&DEVC ID='GAS_O2_Outsidestairwell2_1.5m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=93.4,3.4,1.5/
&DEVC ID='GAS_O2_Outsidestairwell2_1.75m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=93.4,3.4,1.75/
&DEVC ID='GAS_O2_Outsidestairwell2_2.0m', QUANTITY='VOLUME FRACTION',
SPEC_ID='oxygen', XYZ=93.4,3.4,2.0/
&DEVC ID='LAYER_Amiddle->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=17.0,17.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Amiddle->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=17.0,17.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Amiddle->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=17.0,17.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Bmiddle->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=65.0,65.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Bmiddle->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=65.0,65.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Bmiddle->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=65.0,65.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Cmiddle->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=114.0,114.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Cmiddle->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=114.0,114.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_Cmiddle->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=114.0,114.0,10.0,10.0,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_opening_Stairwell1->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=44.0,44.0,3.5,3.5,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_opening_Stairwell1->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=44.0,44.0,3.5,3.5,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_opening_Stairwell1->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=44.0,44.0,3.5,3.5,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_opening_Stairwell2->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=86.2,86.2,3.5,3.5,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_opening_Stairwell2->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=86.2,86.2,3.5,3.5,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_opening_Stairwell2->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=86.2,86.2,3.5,3.5,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_OutsideStairwell1->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=36.6,36.6,3.4,3.4,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_OutsideStairwell1->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=36.6,36.6,3.4,3.4,0.0,8.0/

```



```

&DEVC ID='LAYER_OutsideStairwell1->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=36.6,36.6,3.4,3.4,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_OutsideStairwell2->HEIGHT', QUANTITY='LAYER HEIGHT',
XB=93.4,93.4,3.4,3.4,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_OutsideStairwell2->LTEMP', QUANTITY='LOWER TEMPERATURE',
XB=93.4,93.4,3.4,3.4,0.0,8.0/
&DEVC ID='LAYER_OutsideStairwell2->UTEMP', QUANTITY='UPPER TEMPERATURE',
XB=93.4,93.4,3.4,3.4,0.0,8.0/
&DEVC ID='Pressure_Amiddle_2m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=17.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='Pressure_Amiddle_7.5m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=17.0,10.0,7.5/
&DEVC ID='Pressure_Bmiddle_2m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=65.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='Pressure_Bmiddle_7.5m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=65.0,10.0,7.5/
&DEVC ID='Pressure_Cmiddle_2m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=114.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='Pressure_Cmiddle_7.5m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=114.0,10.0,7.5/
&DEVC ID='Pressure_OpeningStairwell1_2m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=44.0,3.5,2.0/
&DEVC ID='Pressure_OpeningStairwell2_2m', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=86.2,3.5,2.0/
&DEVC ID='PressureAirInA1', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=16.0,19.0,0.4/
&DEVC ID='PressureAirInA2', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=65.0,19.0,0.4/
&DEVC ID='PressureAirInA3', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=114.0,19.0,0.4/
&DEVC ID='PressureAirInC1', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=16.0,1.0,0.4/
&DEVC ID='PressureAirInC2', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=65.0,1.0,0.4/
&DEVC ID='PressureAirInC3', QUANTITY='PRESSURE', XYZ=114.0,1.0,0.4/
&DEVC ID='Rad_MiddleA', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', XYZ=17.0,10.0,0.0, IOR=3/
&DEVC ID='Rad_MiddleA_2m', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=17.0,10.0,2.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
&DEVC ID='Rad_MiddleB', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', XYZ=65.0,10.0,0.0, IOR=3/
&DEVC ID='Rad_MiddleB_2m', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=65.0,10.0,2.0,
ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
&DEVC ID='Rad_MiddleC', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX', XYZ=114.0,10.0,0.0,
IOR=3/
&DEVC ID='Rad_MiddleC_2m', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=114.0,10.0,2.0, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
&DEVC ID='Rad_OpeningStairwell1_2m', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=44.0,3.5,2.0, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
&DEVC ID='Rad_OpeningStairwell2_2m', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=86.2,3.5,2.0, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
&DEVC ID='Rad_OutsideStairwell1_2m', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=36.6,3.4,2.0, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
&DEVC ID='Rad_OutsideStairwell2_2m', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=93.4,3.4,2.0, ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_0.0m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,0.0/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_0.4m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,0.4/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_0.8m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,0.8/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_1.2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,1.2/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_1.6m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,1.6/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_2.0m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_2.4m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,2.4/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_2.8m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,2.8/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_3.2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,3.2/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_3.6m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,3.6/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_4.0m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,4.0/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_4.4m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,4.4/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_4.8m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,4.8/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_5.2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,5.2/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_5.6m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,5.6/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_6.0m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,6.0/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_6.4m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,6.4/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_6.8m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,6.8/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_7.2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,7.2/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_7.6m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,7.6/
&DEVC ID='THCP_Amiddle_8.0m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=17.0,10.0,8.0/
&DEVC ID='THCP_Bmiddle_0.0m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=65.0,10.0,0.0/
&DEVC ID='THCP_Bmiddle_0.4m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=65.0,10.0,0.4/

```


&DEVC ID='THCP_CornerBC_2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=129.6,0.4,2.0/
&DEVC ID='THCP_CornerCD_2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.4,0.4,2.0/
&DEVC ID='THCP_opening_stairwell1_2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=44.0,3.5,2.0/
&DEVC ID='THCP_opening_stairwell2_2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=86.2,3.5,2.0/
&DEVC ID='THCP_Outsidestairwell1_2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.6,3.4,2.0/
&DEVC ID='THCP_Outsidestairwell2_2m', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=93.4,3.4,2.0/
&DEVC ID='VEL_Amiddle_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=17.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='VEL_Amiddle_3m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=17.0,10.0,3.0/
&DEVC ID='VEL_Bmiddle_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=65.0,9.0,3.0/
&DEVC ID='VEL_Bmiddle_3m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=65.0,10.0,3.0/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_0.0m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,0.0/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_0.4m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,0.4/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_0.8m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,0.8/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_1.2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,1.2/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_1.6m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,1.6/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_2.0m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,2.0/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_2.4m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,2.4/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_2.8m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,2.8/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_3.2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,3.2/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_3.6m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,3.6/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_4.0m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,4.0/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_4.4m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,4.4/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_4.8m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,4.8/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_5.2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,5.2/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_5.6m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,5.6/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_6.0m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,6.0/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_6.4m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,6.4/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_6.8m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,6.8/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_7.2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,7.2/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_7.6m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,7.6/
&DEVC ID='VEL_BurnerLarge_8.0m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=28.8,10.8,8.0/
&DEVC ID='VEL_Cmiddle_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=114.0,10.0,2.0/
&DEVC ID='VEL_Cmiddle_3m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=114.0,10.0,3.0/
&DEVC ID='VEL_CornerAB_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=129.6,19.6,2.0/
&DEVC ID='VEL_CornerAD_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.4,19.6,2.0/
&DEVC ID='VEL_CornerBC_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=129.6,0.4,2.0/
&DEVC ID='VEL_CornerCD_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.4,0.4,2.0/
&DEVC ID='VEL_opening_stairwell1_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=44.0,3.5,2.0/
&DEVC ID='VEL_opening_stairwell2_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=86.2,3.5,2.0/
&DEVC ID='VEL_Outsidestairwell1_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=36.6,3.4,2.0/
&DEVC ID='VEL_Outsidestairwell2_2m', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=93.4,3.4,2.0/
&DEVC ID='VEL_slots_A1', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.1,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A2', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=16.325,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A3', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=32.55,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A4', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=48.775,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A5', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=65.0,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A6', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=81.225,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A7', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=97.45,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A8', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=113.675,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_A9', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=129.9,19.9,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_B1', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=129.9,10.0,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C1', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.1,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C2', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=16.325,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C3', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=32.55,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C4', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=48.775,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C5', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=65.0,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C6', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=81.225,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C7', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=97.45,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C8', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=113.675,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_C9', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=129.9,0.1,7.3/
&DEVC ID='VEL_slots_D1', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=0.1,10.0,7.3/
&DEVC ID='VEL_Smoke_lidA_middle', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=17.0,9.7,8.2/
&DEVC ID='VEL_Smoke_lidB_middle', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=65.0,9.7,8.2/

```

&DEVC ID='VEL_Smoke_lidC_middle', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=114.0,9.7,8.2/
&DEVC ID='TIMER', QUANTITY='TIME', XYZ=-0.8,-2.0,-0.4, SETPOINT=120.0/
&DEVC ID='TIMER2', QUANTITY='TIME', XYZ=-0.8,-2.0,-0.4, SETPOINT=60.0/
&SURF ID='EXHAUST_7.4',
    RGB=26,128,26,
    VEL=7.4,
    TAU_V=-30.0/
&SURF ID='SUPPLY_1.5',
    RGB=26,204,26,
    VEL=-1.5,
    TAU_V=-30.0/
&SURF ID='burner',
    FYI='car',
    COLOR='RED',
    TAU_T=-323.0,
    HRRPUA=1276.0,
    TAU_Q=-660.0/

&OBST XB=34.2,47.2,16.2,16.4,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall A
stairwell 1
&OBST XB=47.2,47.4,3.6,16.4,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall B
stairwell 1
&OBST XB=34.2,47.2,3.6,3.8,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall C
stairwell 1
&OBST XB=34.0,34.2,3.6,16.4,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall D
stairwell 1
&OBST XB=35.4,35.6,3.8,16.2,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall D2
stairwell 1
&OBST XB=37.6,37.8,3.8,16.2,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall D3
stairwell 1
&OBST XB=42.2,42.4,3.8,16.2,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall D4
stairwell 1
&OBST XB=45.6,45.8,3.8,16.2,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall D5
stairwell 1
&OBST XB=83.0,96.0,16.2,16.4,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall A
stairwell 2
&OBST XB=96.0,96.2,3.6,16.4,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall B
stairwell 2
&OBST XB=83.0,96.0,3.6,3.8,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall C
stairwell 2
&OBST XB=82.8,83.0,3.6,16.4,0.0,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/ Wall D
stairwell 2
&OBST XB=84.4,84.6,3.8,16.2,-1.98393E-15,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/
Wall D2 stairwell 2
&OBST XB=87.8,88.0,3.8,16.2,-1.98393E-15,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/
Wall D3 stairwell 2
&OBST XB=92.2,92.4,3.8,16.2,-1.98393E-15,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/
Wall D4 stairwell 2
&OBST XB=94.4,94.6,3.8,16.2,-1.98393E-15,7.2, COLOR='GRAY 60', SURF_ID='INERT'/
Wall D5 stairwell 2
&OBST XB=0.2,129.8,0.2,19.8,7.2,7.4, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ Ceiling
&OBST XB=-0.4,130.4,20.0,20.4,0.0,8.0, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ Wall A
&OBST XB=130.0,130.4,0.0,20.0,0.0,8.0, COLOR='WHITE', OUTLINE=.TRUE.,
SURF_ID='INERT'/ Wall B
&OBST XB=-0.4,130.4,-0.4,0.0,0.0,8.0, RGB=255,255,255, TRANSPARENCY=0.0,
SURF_ID='INERT'/ Wall C
&OBST XB=-0.4,0.0,0.0,20.0,0.0,8.0, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ Wall D
&OBST XB=-0.4,130.4,-0.4,20.4,8.0,8.4, COLOR='GRAY 80', SURF_ID='INERT'/ Roof
&OBST XB=-0.4,130.4,-0.4,20.4,-0.4,0.0, COLOR='GRAY 80', SURF_ID='INERT'/ Floor
&OBST XB=13.8,20.8,9.2,10.2,8.0,8.0, SURF_IDS='INERT','INERT','EXHAUST_7.4',
DEVC_ID='TIMER'/ ExhaustA
&OBST XB=61.4,68.4,9.2,10.2,8.0,8.0, SURF_IDS='INERT','INERT','EXHAUST_7.4',
DEVC_ID='TIMER'/ ExhaustB

```

```

&OBST XB=111.0,118.0,9.2,10.2,8.0,8.0, SURF_IDS='INERT','INERT','EXHAUST_7.4',
DEVC_ID='TIMER'/ ExhaustC
&OBST XB=27.6,30.0,10.0,11.6,1.0,1.6, RGB=0,0,204,
SURF_IDS='burner','INERT','INERT'/ Car_over
&OBST XB=26.0,30.0,10.0,11.6,0.2,1.0, RGB=0,0,204, SURF_ID='INERT'/ Car_under
&OBST XB=26.4,26.8,11.4,11.6,0.0,0.2, COLOR='GRAY 20', SURF_ID='INERT'/ TireA1
&OBST XB=29.2,29.6,11.4,11.6,0.0,0.2, COLOR='GRAY 20', SURF_ID='INERT'/ TireA2
&OBST XB=26.4,26.8,10.0,10.2,0.0,0.2, COLOR='GRAY 20', SURF_ID='INERT'/ TireB1
&OBST XB=29.2,29.6,10.0,10.2,0.0,0.2, COLOR='GRAY 20', SURF_ID='INERT'/ TireB2
&OBST XB=34.0,34.2,0.0,3.6,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_C1_stairwell 1
&OBST XB=47.2,47.4,0.0,3.6,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_C2_stairwell 1
&OBST XB=34.0,34.2,16.4,20.0,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_A1_stairwell 1
&OBST XB=47.2,47.4,16.4,20.0,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_A2_stairwell 1
&OBST XB=82.8,83.0,0.0,3.6,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_C1_stairwell 2
&OBST XB=96.0,96.2,0.0,3.6,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_C2_stairwell 2
&OBST XB=82.8,83.0,16.4,20.0,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_A1_stairwell 2
&OBST XB=96.0,96.2,16.4,20.0,3.2,7.2, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
Curtain_A2_stairwell 2
&OBST XB=13.8,20.8,10.2,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
ShaftA_wallA
&OBST XB=20.8,21.0,9.0,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ ShaftA_wallB
&OBST XB=13.8,20.8,9.0,9.2,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ ShaftA_wallC
&OBST XB=13.6,13.8,9.0,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ ShaftA_wallD
&OBST XB=61.4,68.4,10.2,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
ShaftB_wallA
&OBST XB=68.4,68.6,9.0,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ ShaftB_wallB
&OBST XB=61.4,68.4,9.0,9.2,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ ShaftB_wallC
&OBST XB=61.2,61.4,9.0,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/ ShaftB_wallD
&OBST XB=111.0,118.0,10.2,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
ShaftC_wallA
&OBST XB=118.0,118.2,9.0,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
ShaftC_wallB
&OBST XB=111.0,118.0,9.0,9.2,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
ShaftC_wallC
&OBST XB=110.8,111.0,9.0,10.4,8.4,8.6, COLOR='WHITE', SURF_ID='INERT'/
ShaftC_wallD

&HOLE XB=35.6,37.6,15.9,16.5,0.0,2.0/ Door A stairwell 1
&HOLE XB=35.6,37.6,3.1,3.7,0.0,2.0/ Door C stairwell 1
&HOLE XB=42.4,45.6,3.5,3.9,0.0,4.0/ Opening stair 1
&HOLE XB=92.4,94.4,15.9,16.5,0.0,2.0/ Door A stairwall 2
&HOLE XB=92.4,94.4,3.1,3.7,0.0,2.0/ Door C stairwall 2
&HOLE XB=84.6,87.8,3.5,3.9,0.0,4.0/ Opening stair 2

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.8,130.8,22.0,22.0,-0.4,9.2, OUTLINE=.TRUE./ Vent A
out
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=130.8,130.8,-2.0,22.0,-0.4,9.2, OUTLINE=.TRUE./ Vent B
out
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.8,130.8,-2.0,-2.0,-0.4,9.2, OUTLINE=.TRUE./ Vent C
out
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.8,-0.8,-2.0,22.0,-0.4,9.2, OUTLINE=.TRUE./ Vent D out
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.8,130.8,-2.0,22.0,9.2,9.2, OUTLINE=.TRUE./ Vent up
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=1.4,3.0,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA1
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=6.0,7.6,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA2

```

```

&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=10.6,12.2,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA3
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=15.2,16.8,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA4
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=19.8,21.4,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA5
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=24.4,26.0,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA6
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=29.0,30.6,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA7
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=35.2,36.8,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA8
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=39.8,41.4,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA9
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=44.4,46.0,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA10
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=50.8,52.4,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA11
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=55.0,56.6,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA12
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=59.6,61.2,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA13
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=64.2,65.8,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA14
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=68.8,70.4,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA15
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=73.4,75.0,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA16
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=78.0,79.6,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA17
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=84.0,85.6,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA18
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=88.6,90.2,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA19
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=93.2,94.8,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA20
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=99.4,101.0,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA21
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=104.0,105.6,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA22
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=108.6,110.2,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA23
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=113.2,114.8,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA24
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=117.8,119.4,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA25
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=122.4,124.0,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA26
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=127.0,128.6,20.0,20.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentA27
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=1.4,3.0,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/ VentC1
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=6.0,7.6,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/ VentC2
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=10.6,12.2,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC3
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=15.2,16.8,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC4
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=19.8,21.4,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC5
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=24.4,26.0,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC6
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=29.0,30.6,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC7

```

&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=35.2,36.8,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC8
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=39.8,41.4,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC9
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=44.4,46.0,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC10
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=50.8,52.4,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC11
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=55.0,56.6,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC12
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=59.6,61.2,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC13
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=64.2,65.8,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC14
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=68.8,70.4,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC15
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=73.4,75.0,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC16
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=78.0,79.6,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC17
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=84.0,85.6,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC18
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=88.6,90.2,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC19
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=93.2,94.8,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC20
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=99.4,101.0,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC21
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=104.0,105.6,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC22
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=108.6,110.2,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC23
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=113.2,114.8,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC24
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=117.8,119.4,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC25
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=122.4,124.0,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC26
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=127.0,128.6,0.0,0.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentC27
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=0.0,0.0,0.4,2.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/ VentD1
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=0.0,0.0,3.8,5.4,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/ VentD2
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=0.0,0.0,7.2,8.8,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/ VentD3
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=0.0,0.0,11.2,12.8,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentD4
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=0.0,0.0,14.6,16.2,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentD5
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=0.0,0.0,18.0,19.6,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentD6
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=130.0,130.0,0.4,2.0,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentB1
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=130.0,130.0,3.8,5.4,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentB2
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=130.0,130.0,7.2,8.8,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentB3
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=130.0,130.0,11.2,12.8,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentB4
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=130.0,130.0,14.6,16.2,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentB5
&VENT SURF_ID='SUPPLY_1.5', XB=130.0,130.0,18.0,19.6,0.0,0.8, DEVC_ID='TIMER2'/
VentB6

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=44.0/

```
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=86.2/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=44.0/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=86.2/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=17.0/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=65.0/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=114.0/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.1/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=19.9/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=7.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=7.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=28.8/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=10.8/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=28.8/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBZ=7.0/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=0.1/  
&SLCF QUANTITY='TURBULENCE RESOLUTION', PBX=19.9/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=7.9/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=9.7/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=9.7/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=1.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=129.0/  
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=1.8/  
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBX=10.0/
```

```
&TAIL /
```


Vedlegg H

Håndberegninger

Arealet av brenneren:

$$A_{\text{brannscenario 1}} = 1,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} = 0,96 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{brannscenario 2}} = 2,4 \text{ m} \times 1,6 \text{ m} = 3,84 \text{ m}^2$$

Brannens diameter, D:

Antar en sirkelformet brann og finner diameteren av denne.

Arealet av en sirkel:

$$A_{\text{sirkel}} = \pi \times r^2$$

$$r = \sqrt{A/\pi}$$

$$r_{\text{brannscenario 1}} = \sqrt{0,96 \text{ m}^2 / \pi} = 0,553 \text{ m}$$

$$r_{\text{brannscenario 2}} = \sqrt{3,84 \text{ m}^2 / \pi} = 1,106 \text{ m}$$

$$D = 2 \times r$$

$$D_{\text{brannscenario 1}} = 2 \times 0,553 \text{ m} = 1,106 \text{ m}$$

$$D_{\text{brannscenario 2}} = 2 \times 1,106 \text{ m} = 2,212 \text{ m}$$

Flammehøyde, L:

Heskestad:

$$L = 0,235 \times Q^{2/5} - 1,02 \times D$$

$$L_{\text{brannscenario 1}} = 0,235 \times (1528 \text{ kW})^{2/5} - 1,02 \times 1,106 \text{ m} = 3,28 \text{ m}$$

$$L_{\text{brannscenario 2}} = 0,235 \times (4900 \text{ kW})^{2/5} - 1,02 \times 2,212 \text{ m} = 4,78 \text{ m}$$

Brannens karakteristiske effektutvikling, Q*:

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

$$Q_{\text{brannscenario 1}}^* = \frac{1528 \text{ kW}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 293 \text{ K} \times \sqrt{9,81 \text{ m/s}^2} \times 1,106 \text{ m} \times (1,106 \text{ m})^2} = 1,08 \text{ (OK, bør være}$$

mellom 0,3 og 2,5)

$$Q_{\text{brannscenario 2}}^* = \frac{4900 \text{ kW}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 293 \text{ K} \times \sqrt{9,81 \text{ m/s}^2} \times 2,212 \text{ m} \times (2,212 \text{ m})^2} = 0,61 \text{ (OK, bør være}$$

mellom 0,3 og 2,5)

Brannens karakteristiske diameter, D*:

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

$$D_{\text{brannscenario 1}}^* = \left(\frac{1528 \text{ kW}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 293 \text{ K} \times \sqrt{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \right)^{2/5} = 1,14 \text{ m}$$

$$D_{\text{brannscenario 2}}^* = \left(\frac{4900 \text{ kW}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times 293 \text{ K} \times \sqrt{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \right)^{2/5} = 1,82 \text{ m}$$

Forholdet, D^*/H :

Brannscenario 1: $D^*/H = 1,14/7,2 = 0,16$

Brannscenario 2: $D^*/H = 1,82/7,2 = 0,25$

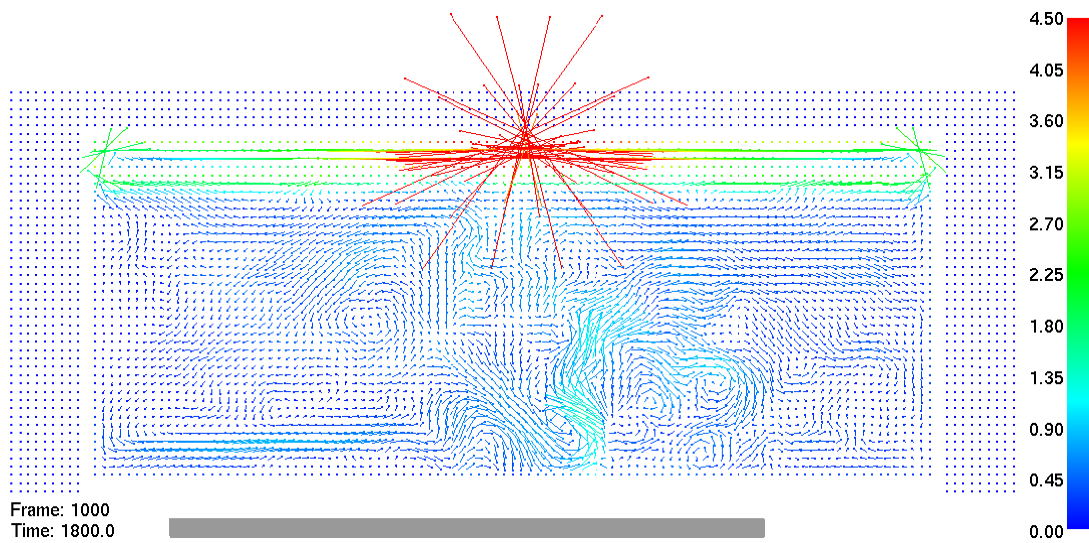
Forholdet, D^*/dx :

| | dx=0,4 m | dx=0,2 m | dx=0,1 m | dx=0,05 |
|-----------------|----------|----------|----------|---------|
| | D^*/dx | | | |
| Brannscenario 1 | 2,85 | 5,7 | 11,4 | 22,8 |
| Brannscenario 2 | 4,55 | 9,1 | 18,2 | 36,4 |

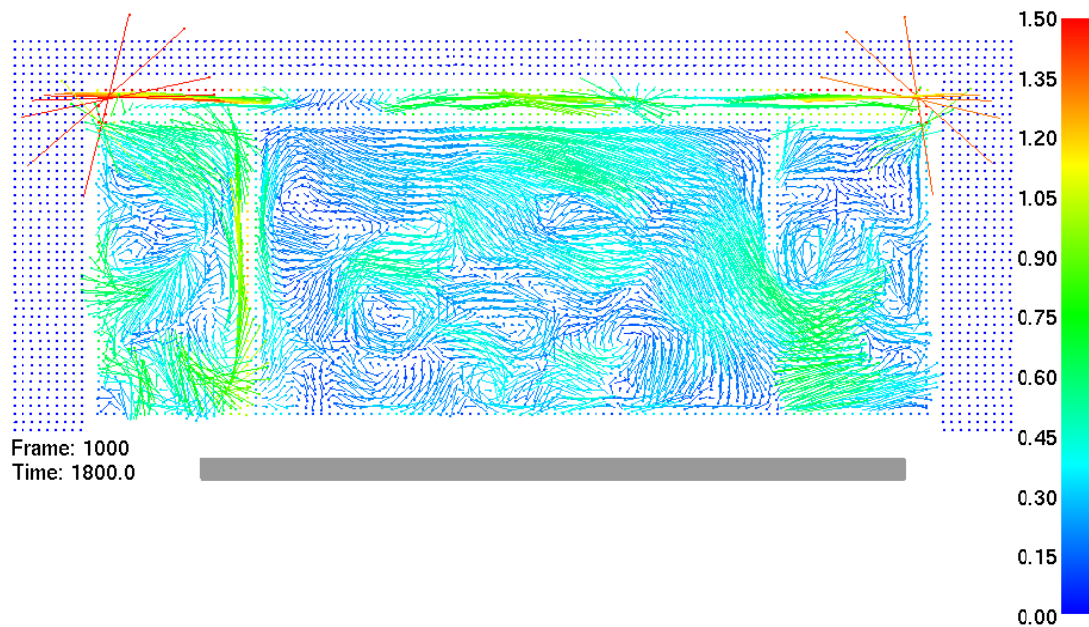
Vedlegg I

Hastighet (SLCF) 7_7.4out_1.5in

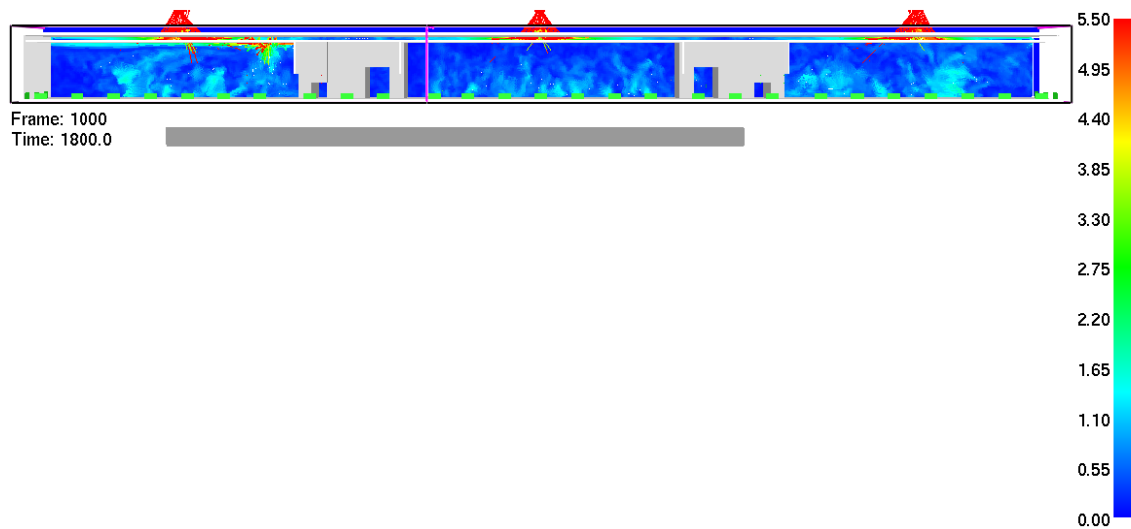
Midt i del A gjennom avtrekk (x-planet, x=17), m/s:



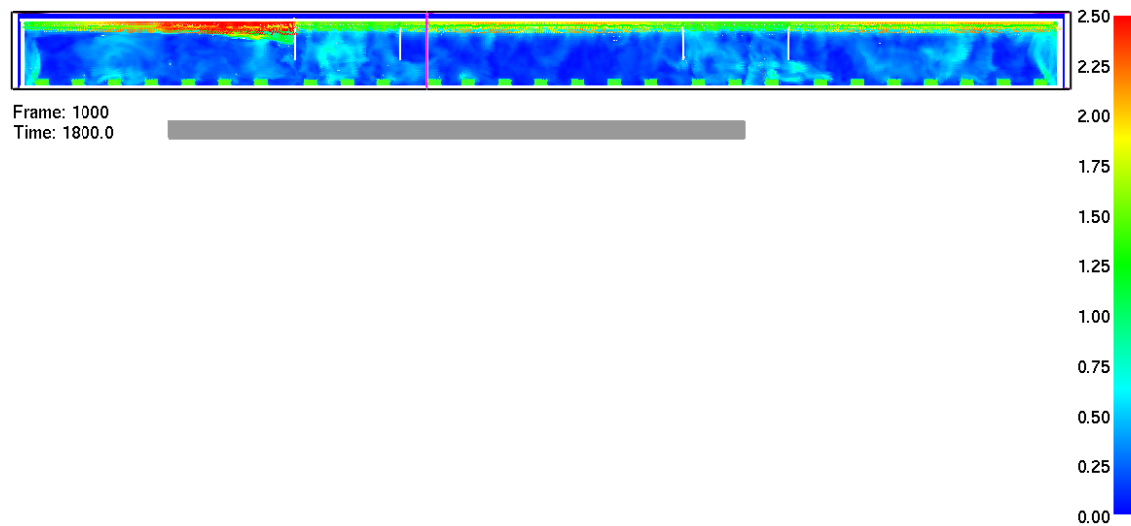
Gjennom trapperommet (x-planet, x=44), m/s:



Midt i rommet (i y-planet, $y=9,8$), m/s:



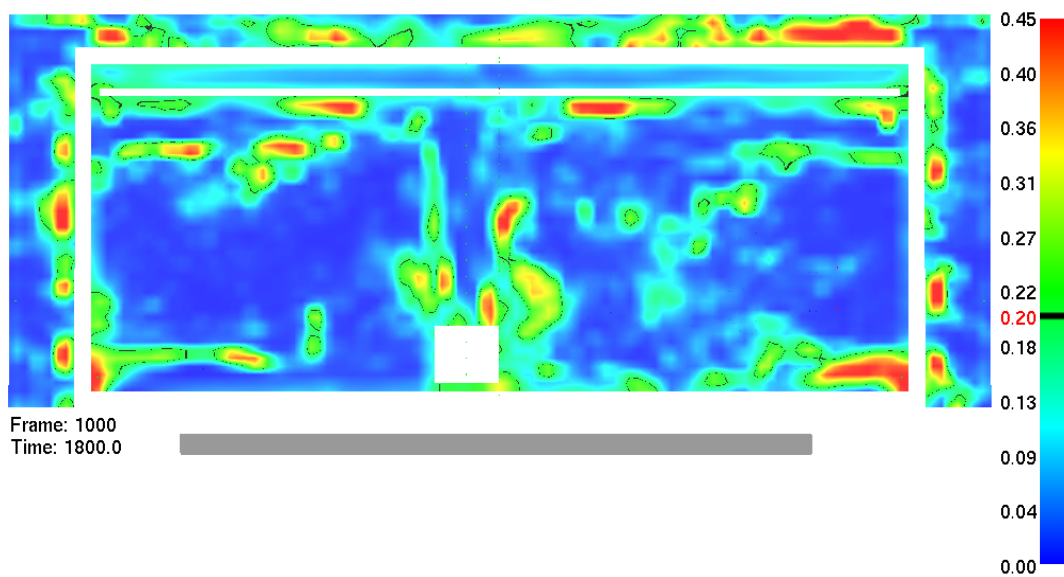
Ved yttervegg / gjennom slisser i himling (i y-planet, $y=0,2$), m/s:



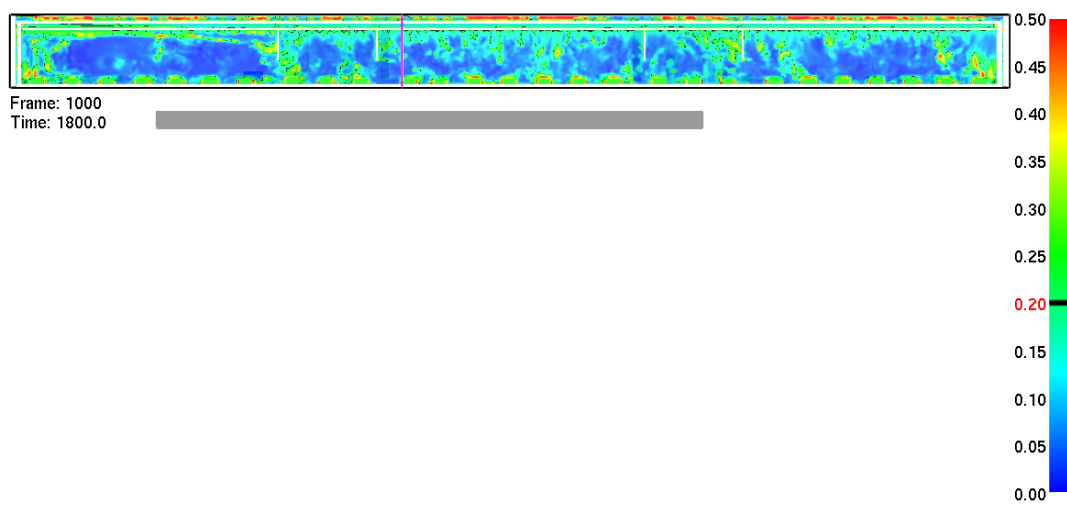
Vedlegg J

MTR 7_7.4out_1.5in

Gjennom brannen (i x-planet, x=29):



Ved yttervegg / gjennom slisser i himling (i y-planet, y=0,2):



Vedlegg K

Oppsummering fra simuleringer i Pathfinder

Filene ligger på vedlagt DVD-plate under mappe med samme navn.