



UNIVERSITETET I AGDER

En risikovurdering ved bruk av svalgang som rømningsvei

Bruk av FDS til å undersøke brannsikkerheten ved
fravikelser fra preaksepterte ytelser

Fredrik Fikse

Veileder

Gjermund Hybbestad

Masteroppgaven er gjennomført som ledd i utdanningen ved Universitetet i Agder og er godkjent som del av denne utdanningen. Denne godkjenningen innebærer ikke at universitetet inntår for de metoder som er anvendt og de konklusjoner som er trukket.

Universitet i Agder, 2016

Fakultet for Teknologi og Realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Forord

Denne masteroppgaven er den avsluttende oppgaven av det toårige masterstudiet for bygg ved Universitet i Agder. Oppgaven er utarbeidet som en besvarelse i emnet BYG500 i det fjerde og avsluttende semester og omhandler bruken av CFD til å gjennomføre en risikovurdering av en svalgang når denne benyttes som rømningsvei under brann. Oppgavens formål er å undersøke om det er mulig å fravike fra ulike preaksepterte ytelser og likevel opprettholde tilfredsstillende rømningsforhold.

Programvare benyttet i oppgaven:

- Fire Dynamics Simulator 6.3.0
- Smokeview 6.3.0
- PyroSim 2015

Jeg vil takke ÅF Reinertsen AS som har gitt meg kontorplass og nødvendig utstyr til å skrive oppgaven. En stor takk rettes til Gjermund Hybbestad som har veiledet og svart på spørsmål som har dukket opp underveis.

Fredrik Fikse

Sandefjord 17.05.2016

Sammendrag

Denne masteroppgaven har som hensikt å undersøke virkningen ved å fravike fra preaksepterte ytelser på svalgang når denne fungerer som en rømningsvei. Det har på bakgrunn av dette blitt utformet et analysebyggverk, som ved gitte scenarioer, fraviker fra ulike preaksepterte ytelser i veiledningen til TEK10 for å undersøke om brannsikkerheten likevel er på et tilfredsstillende nivå. Det har blitt gjennomført en kvantitativ, komparativ analyse ved hjelp av FDS i henhold til standarden NS 3901 *Krav til risikovurdering av brann i byggverk*, der brannsikkerheten i analysebyggverket har blitt sammenlignet med et referansebyggverk som følger alle preaksepterte ytelser gitt i veiledningen.

Forholdene som er analysert er tiden til overskridelse av tålegrenser for temperatur og varmestråling. Brannsimuleringene i FDS har gitt et tall på den tilgjengelige rømningstiden for de ulike analysebyggverkene. Denne tiden har blitt sammenlignet med den nødvendige rømningstiden og sikkerhetsmarginen har mellom disse har bestemt om analysebyggverket har en tilfredsstillende brannsikkerhet. Siktforholdene på svalgangen er kommentert i lys av hvilken vindusdimensjon som vil være den mest kritiske. Det har blitt simulert to forskjellige brannvekster for å belyse forskjellen mellom valg av designbrann i Norge og andre land og hvilken innvirkning dette har på resultatet.

Resultatene har vist at dersom byggverket fraviker fra den preaksepterte ytelsen om innstallering av sprinkleranlegg på svalgang, vil brannsikkerheten likevel være tilfredsstillende. Dersom det også fravikes fra kravet om brannklassifisering av vindu mot svalgang, vil brannsikkerheten være tilfredsstillende, gitt at sprinkleranlegget i leiligheten fungerer.

Summary

The purpose of this master thesis is to investigate the tenability limits on the egress path on an access balcony when not following all the given pre accepted solutions. The analysis construction deviates from some of the pre accepted solutions given for TEK10 to investigate if the fire safety level is satisfying. According to the standard NS 3901 *Requirements for risk assessment of fire in construction works*, a comparative qualitative analysis has been done by using FDS.

The conditions that are analyzed is the time for critical temperature and heat radiation to occur where fire simulations in FDS has given the available safe egress time for the different analysis constructions. The available safe egress time has been compared to the required safe egress time and the fire safety is commented based on whether the margin between these two are satisfying. The visibility on the access balcony has been commented based on the influence from the window dimension. It has been simulated two different fire growths based on the recommendations from different countries in order to comment on how the choose of design fire affects the results.

The results show that if the analysis construction deviate from the pre accepted solution for installation of sprinklers on the access balcony, the fire safety will still be satisfying. If it also deviates from the pre accepted solution for installation of a window with fire rating on the access balcony, the fire safety is satisfied, given a functional sprinkler in the apartment.

Innholdsfortegnelse

| | |
|--|------|
| Forord..... | i |
| Sammendrag | ii |
| Summary | iii |
| Innholdsfortegnelse | iv |
| Figurliste | viii |
| Tabelliste | x |
| 1 Innledning..... | 1 |
| 1.1 Bakgrunn for oppgaven | 1 |
| 1.2 Problemområde og forskerspørsmål..... | 1 |
| 1.3 Avgrensing | 1 |
| 1.4 Samfunnsperspektiv | 2 |
| 1.5 Terminologi | 3 |
| 2 Metode..... | 4 |
| 2.1 Litteraturstudie..... | 4 |
| 2.2 Analyse | 4 |
| 2.3 Pålitelighet..... | 5 |
| 3 Teori..... | 6 |
| 3.1 Gjennomgang av regelverket | 6 |
| 3.1.1 Regelverket knyttet til brann..... | 7 |
| 3.1.2 Byggteknisk forskrift. TEK10..... | 7 |
| 3.1.3 Forskrift om brannforebyggende tiltak og hensyn. FOBTOT..... | 8 |
| 3.2 Utviklingen av lovverket knyttet til svalganger. | 8 |
| 3.2.1 1. og 2. utgave av REN | 8 |
| 3.2.2 Endringer fra 2. til 3. utgave (2003) av REN: | 9 |
| 3.2.3 Endringer fra REN 3. utgave til VTEK (2007)..... | 9 |
| 3.2.4 Endringer fra VTEK2007 til VTEK2010 | 9 |
| 3.3 Dagens krav til svalgang | 10 |
| 3.3.1 Horisontal brannsmitte | 10 |
| 3.3.2 Lengde | 10 |
| 3.3.3 Bredde | 10 |
| 3.3.4 Tak | 10 |
| 3.3.5 Åpning mot det fri | 10 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.6 | Vegg mot boenhet..... | 10 |
| 3.3.7 | Bæreevne | 10 |
| 3.3.8 | Bygningsdelenes brannmotstand..... | 10 |
| 3.4 | Sprinkleranlegg..... | 11 |
| 3.4.1 | Vannets effekt på brannen..... | 11 |
| 3.4.2 | Funksjon | 12 |
| 3.4.3 | Statistikk for sprinkleranlegg..... | 12 |
| 3.5 | Tålegrenser for personer..... | 13 |
| 3.5.1 | Branngasser | 13 |
| 3.5.2 | Sikt..... | 14 |
| 3.5.3 | Stråling og temperatur | 15 |
| 3.6 | Brannmodellering..... | 16 |
| 3.6.1 | Sonemodeller | 16 |
| 3.6.2 | Feltmodeller | 16 |
| 3.7 | Computational Fluid Dynamics (CFD)..... | 17 |
| 3.8 | Turbulensmodeller | 17 |
| 3.9 | Fire Dynamics simulator (FDS)..... | 17 |
| 3.9.1 | Bruksområder | 18 |
| 3.9.2 | PyroSim..... | 18 |
| 3.9.3 | Visualisering..... | 18 |
| 3.9.4 | Begrensninger..... | 18 |
| 3.9.5 | Validering og verifisering..... | 19 |
| 4 | Analysemodellen | 21 |
| 4.1 | Eksisterende forskning | 21 |
| 4.2 | Komparativ analyse | 21 |
| 4.3 | Risikoaksept: referansebyggverk..... | 21 |
| 4.4 | Analysebyggverk..... | 23 |
| 4.4.1 | Brannscenario..... | 23 |
| 4.5 | Bygningsdeler | 24 |
| 4.6 | Ventilasjonskontrollert brann | 24 |
| 4.7 | Vindusbrudd | 26 |
| 4.8 | Forbrenning | 27 |
| 4.8.1 | Sotproduksjon | 28 |
| 4.8.2 | Varmeavgivelse | 28 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.9 | Brannvekst..... | 28 |
| 4.9.1 | Maksimal branneffekt | 30 |
| 4.9.2 | Simuleringstid..... | 31 |
| 4.10 | Sprinkleranlegg..... | 31 |
| 4.10.1 | Tid til sprinkleraktivering..... | 32 |
| 4.10.2 | Slokkeeffekt..... | 33 |
| 4.10.3 | Plassering av sprinklerhodene..... | 35 |
| 4.11 | Beregningsdomene..... | 35 |
| 4.12 | Sensitivitet knyttet til cellestørrelsen..... | 37 |
| 4.12.1 | Resultater fra sensitivitetsanalysen | 38 |
| 5 | Simuleringer | 42 |
| 5.1 | Rømningstid..... | 43 |
| 5.1.1 | Nødvendig rømningstid | 43 |
| 5.1.2 | Tilgjengelig rømningstid | 44 |
| 5.2 | Målepunkter..... | 45 |
| 5.3 | Oversikt over scenarioene..... | 46 |
| 5.4 | Preaksepterte ytelser for scenarioene | 47 |
| 5.5 | Vanlig brannvekst..... | 48 |
| 5.5.1 | Scenario 1-6..... | 48 |
| 5.5.2 | Scenario 7-12..... | 52 |
| 5.5.3 | Temperatur..... | 53 |
| 5.5.4 | Oppsummering av scenario 1-12..... | 54 |
| 5.6 | Rask brannvekst. Scenario 13-24 | 56 |
| 5.6.1 | Scenario 13-18..... | 56 |
| 5.6.2 | Scenario 19-24..... | 58 |
| 5.6.3 | Rømningsforhold | 59 |
| 5.6.4 | Oppsummering scenario 13-24 | 61 |
| 5.7 | Vindu åpent under hele brannforløpet..... | 61 |
| 5.7.1 | Scenario 25-26..... | 61 |
| 5.7.2 | Scenario 27-28..... | 64 |
| 5.7.3 | Oppsummering scenario 25-28 | 64 |
| 5.8 | Dør til soverommet lukket..... | 64 |
| 5.8.1 | Scenario 29 | 64 |
| 5.8.2 | Scenario 30 | 68 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.8.3 | Oppsummering..... | 69 |
| 5.9 | Tilgjengelig rømningstid for alle modellene..... | 70 |
| 5.9.1 | Fungerende sprinkleranlegg..... | 70 |
| 5.9.2 | Ikke fungerende sprinkleranlegg..... | 70 |
| 5.9.3 | Vindu åpent fra brannstart..... | 70 |
| 5.9.4 | Døren til soverommet lukket..... | 70 |
| 5.10 | Effekten av senere vindusbrudd..... | 72 |
| 5.10.1 | Oppsummering senere vindusbrudd..... | 73 |
| 6 | Diskusjon..... | 74 |
| 6.1 | Punkter til diskusjon..... | 74 |
| 6.2 | Valg av brann..... | 74 |
| 6.3 | Siktforhold..... | 74 |
| 6.4 | Sprinkleraktivering..... | 74 |
| 6.5 | Usikkerheter og videre arbeid..... | 75 |
| 7 | Konklusjon..... | 76 |
| 7.1 | Valg av brannvekst..... | 77 |
| 7.2 | Innstilling DIBK..... | 77 |
| | Referanser..... | 78 |
| | Vedlegg..... | 81 |

Figurliste

| | |
|--|----|
| Figur 2.1. Metodeoversikt | 5 |
| Figur 3.1. Oversikt over lovverket i Norge..... | 6 |
| Figur 3.2. Fasene av byggeprosessen | 7 |
| Figur 3.3. Røykforhold ved sprinkleraktivering | 14 |
| Figur 3.4. Tålegrense for varmestråling | 15 |
| Figur 4.1. Plantegning av modellen..... | 22 |
| Figur 4.2. Snitt av modellen..... | 22 |
| Figur 4.3. Tredimensjonal fremstilling av modellen..... | 24 |
| Figur 4.4. Branneffekt [kW] som funksjon av tiden [s]..... | 31 |
| Figur 4.5. Effektreduering [%] som funksjon av vanntetthet [mm/min] | 34 |
| Figur 4.6. Plassering av sprinklerhodene..... | 35 |
| Figur 4.7. Inndeling av modellen i mesh..... | 36 |
| Figur 4.8. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] over brannen | 39 |
| Figur 4.9. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] på innsiden av vinduet..... | 39 |
| Figur 4.10. Tiden [s] til sprinkleraktivering..... | 40 |
| Figur 4.11. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] på svalgangen | 41 |
| Figur 5.1. Plassering av målepunkter plan z-x | 45 |
| Figur 5.2. Plassering av målepunkter plan x-y..... | 45 |
| Figur 5.3. Temperatur [°C] med hensyn på tid [s] for scenario 1-6..... | 48 |
| Figur 5.4. Temperaturen [°C] fremstilt som trendlinjer | 49 |
| Figur 5.5. Etablering av trendlinje | 50 |
| Figur 5.6. Varmestrålingen [kW/m ²] fremstilt som trendlinjer | 50 |
| Figur 5.7. Siktforholdene på svalgangen ved "vanlig" brannvekst..... | 51 |
| Figur 5.8. Tiden [s] til sprinkleraktivering for vindu "V4" | 52 |
| Figur 5.9. Fremstilling av sprinklerkontrollert branneffekt [kW] | 53 |
| Figur 5.10. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] under sprinklerkontroll..... | 53 |
| Figur 5.11. Varmestråling [kW/m ²] med hensyn på tiden [s] ved sprinklerkontroll | 54 |
| Figur 5.12. Temperaturdistribuering ved vindu "V5" og vindu "V6" | 55 |
| Figur 5.13. Temperaturen [°C] på svalgangen med hensyn på tiden [s] | 56 |
| Figur 5.14. Temperaturen [°C] på svalgangen fremstilt som trendlinjer | 57 |
| Figur 5.15. Strålingen [kW/m ²] fremstilt som trendlinjer | 58 |
| Figur 5.16. Sprinklerkontrollert branneffekt [kW] "rask" brann | 59 |
| Figur 5.17. Temperaturen [°C] men hensyn på tiden [s] ved sprinkleraktivering..... | 60 |
| Figur 5.18. Varmestråling [kW/m ²] men hensyn på tiden [°C] ved sprinkleraktivering..... | 60 |
| Figur 5.19. Temperatur ved tiden 90 sekunder..... | 62 |
| Figur 5.20. Forskjellen i temperatur [°C] for åpent og lukket vindu fra brannstart | 63 |
| Figur 5.21. Forskjellen i varmestråling [kW/m ²] for åpent og lukket vindu fra brannstart..... | 63 |
| Figur 5.22. Branneffekt [kW] ved underventilering | 65 |
| Figur 5.23. Fremstilling av underventilert branneffekt [kW] for vindu "V6" | 65 |
| Figur 5.24. Temperaturen [°C] ved underventilering | 66 |
| Figur 5.25. Varmestråling [kW/m ²] ved underventilering..... | 67 |
| Figur 5.26. Tiden [s] til sprinkleraktivering..... | 67 |
| Figur 5.27 Fremstilling av kalkulert branneffekt [kW] for vindu "V5" | 68 |

| | |
|--|----|
| Figur 5.28. Temperaturen [$^{\circ}\text{C}$] ved underventilering | 69 |
| Figur 5.29. Varmestråling [kW/m^2] ved underventilering | 69 |
| Figur 5.30. Temperaturen på svalgangen [$^{\circ}\text{C}$] ved ulike bruddtemperaturer for glasset | 72 |
| Figur 5.31. Varmestråling på svalgangen [kW/m^2] ved ulike bruddtemperaturer for glass | 73 |

Tabelliste

| | |
|---|----|
| Tabell 3.1 Utgivelser av byggt teknisk forskrift | 8 |
| Tabell 3.2. Krav til brannmotstand til bygningsdeler | 11 |
| Tabell 3.3. Sprinkleranleggets funksjon | 12 |
| Tabell 3.4. Temperaturløseranse [°C] for personer..... | 16 |
| Tabell 4.1. Ventilasjonkontrollert branneffekt [kW] | 25 |
| Tabell 4.2. Eksempler på brannveksthastigheter | 30 |
| Tabell 4.3. Krav til sprinkleranlegg | 32 |
| Tabell 4.4. Antall celler og cellestørrelser i modellen | 36 |
| Tabell 4.5. Forholdstall [$D * / dx$] og simuleringstid på bakgrunn av cellestørrelsen [m]..... | 38 |
| Tabell 5.1. Sentral inndata benyttet i FDS..... | 42 |
| Tabell 5.2. Nødvendig rømningstid for brannveksttilfellene | 44 |
| Tabell 5.3. Oversikt over scenarioene | 46 |
| Tabell 5.4. Preaksepterte ytelseser for scenarioene | 47 |
| Tabell 5.5. Differanse i avlesningsmetode | 49 |
| Tabell 5.6. Maksimal varmestråling [kW/m ²] og tid til overskridelse [s]. "Vanlig" brannvekst | 51 |
| Tabell 5.7. Tid til sprinkleraktivering | 52 |
| Tabell 5.8. Differanse i tilgjengelig rømningstid..... | 54 |
| Tabell 5.9. Differanse i avlesningsmetode | 57 |
| Tabell 5.10. Maksimal varmestråling [kW/m ²] og tid til overskridelse [s]. "Rask" brannvekst..... | 58 |
| Tabell 5.11. Tiden [s] til sprinkleraktivering | 59 |
| Tabell 5.12. Differanse mellom tid til stråling- og temperaturoverskridelse [s] | 61 |
| Tabell 5.13. Tid til sprinkleraktivering | 62 |
| Tabell 5.14. Tilgjengelig og nødvendig rømningstid..... | 71 |

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

En svalgang er en utvendig overbygd atkomstvei langs fasaden på et byggverk og befinner seg minst én etasje over bakkeplan [1]. Svalgangen, eller deler av den, vil under en brann kunne fungere som en rømningsvei og det er derfor gitt krav i den byggtekniske forskriften for å opprettholde sikre rømningsforhold. Bakgrunnen for oppgaven er de preaksepterte ytelsene gitt i veiledningen til den byggtekniske forskriften som omhandler innstallering av automatisk slukkeanlegg og bruk av brannklassifisert vindu på svalgang, dersom svalgangen benyttes som rømningsvei og beboere må rømme forbi et vindu under en brann. Målet med oppgaven er å undersøke hvilke preaksepterte ytelser det er mulig å fravike fra og fortsatt opprettholde sikre rømningsforhold på svalgangen.

Kravet til sprinkleranlegg på svalgang ble inkludert i den reviderte veiledningen til Byggteknisk forskrift 2010, 1. april 2013. Med hensikt å øke personsikkerheten ved brann, medførte denne endringen store kostnader for utbygger uten en god begrunnelse for bakgrunnen i veiledningens revidering. Det er denne revideringen som er hovedårsaken til denne oppgavens problemstilling.

1.2 Problemområde og forskerspørsmål

Problemområdet til masteroppgaven tar for seg de preaksepterte løsningene i veiledningen til TEK10 knyttet til sprinkleranlegg og brannklassifisering av vindu mot svalgang. Det skal undersøkes om den nødvendige rømningstiden gir en tilfredsstillende sikkerhetsmargin mot den tilgjengelige rømningstiden ved å utføre simuleringer for ulike scenarier i FDS basert på fravikelser fra veiledningen til TEK10

Ut fra problemområdet blir følgende forskerspørsmål stilt:

- Vil det være forsvarlig å utforme svalgangen uten sprinkleranlegg?
- Vil det, ved å ikke benytte et brannklassifisert vindu mot rømningsvei, likevel være tilfredsstillende rømningsforhold under brann?
- Hvilken innvirkning har et sprinkleranlegg installert i leiligheten på rømningsforholdene på svalgangen?
- Hvilken effekt har vindusbrudd, ved bruk av uklassifisert vindu, under brann for rømningsforholdene på svalgangen?

1.3 Avgrensning

Opgaven er avgrenset til å ta for seg et leilighetsbygg med tilhørende preaksepterte ytelser i risikoklasse 4 med brannklasse 2 eller 3, der det er krav om heis. Byggverket følger, foruten de spesifiserte fravik for hvert scenario, alle preaksepterte ytelser som ligger til grunn i veiledningen til TEK10.

For analysedelen av masteroppgaven vil bruken av det valgte analyseprogrammet være i fokus. Det finnes flere omfattende studier som omhandler valideringen av analyseprogrammet, det har derfor i all hovedsak blitt benyttet verdier fra disse for å kunne konsentrere seg om tolkningen av resultatene.

Svalgangen i oppgaven avgrenses til å være på 1,5 meter bred uten oppholdssted, alternative balkonger eller lagringsplass.

Oppgaven er begrenset til å kun gjelde rømningsforholdene. Denne begrensningen gjøres på bakgrunn av at rømning forutsettes å være gjennomført før bæresystemet svikter. For rømningsforholdene er oppgaven avgrenset å omfatte temperatur, stråling og sikt. Det er valgt å se bort ifra giftige branngasser på grunn av svalgangens utforming som tillater en delvis utlufting.

Vind er et forhold som vil kunne ha en stor innvirkning på resultatene. Det er i denne oppgaven valgt å se bort i fra dette på grunn av at det ikke er mulig å simulere alle vindforhold som vil forekomme. For siktbarheten vil vind bidra til en bedre utlufting og bedre forhold. Sikt er på bakgrunn av dette ikke tallfestet, men drøftet på bakgrunn av forskjellen i de ulike simuleringene

1.4 Samfunnsperspektiv

Oppgaven vil være med på å belyse hvorvidt kravene i det norske regelverket er unødvendig strenge og medfører unødvendig høye byggekostnader. I et samfunnsperspektiv vil en lempelse av preaksepterte ytelser, som ikke går på bekostning av den generelle brannsikkerheten, være samfunnsøkonomisk lønnsomt på grunn av at byggekostnadene blir redusert.

1.5 Terminologi

| | |
|----------------------------|--|
| Pbl | Plan og bygningsloven |
| TEK10 | Byggteknisk forskrift 2010 |
| VTEK10 | Veiledning til byggteknisk 2010 |
| SAK10 | Byggesaksforskriften |
| Preakseptert ytelse | Ytelse oppgitt i VTEK10 som vil bidra til å oppfylle TEK10 |
| HO-meldinger | Myndighetens tolkning av TEK og VTEK |
| Standard | Standard dokument til felles bruk som er vedtatt av et anerkjent organ |
| NS | Norsk Standard |
| NS-EN | Europeisk standard fastsatt som norsk standard |
| INSTA/TS | InterNordisk Stadariseringssamarbeid/ Teknisk Spesifikasjon |
| NFPA | National Fire Protection Association. En global organisasjon som publiserer standarder og forskning for å forebygge skader relatert til brann. |
| SFPE | Society for Fire Protection Engineers |
| FEDG | Fire Engineering Design Guide |
| DSB | Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap |
| FOBTOT | Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| FDS | Fire Dynamics Simulator |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| US.NRC | United States Nuclear Regulatory Commission |
| Risiko | Sannsynlighet for uønsket hendelse og konsekvensen av hendelsen |
| Sikkerhet | Evne til å unngå tap som følge av en uønsket hendelse |
| Referansebyggverk | Et byggverk utført i henhold til ett sett preaksepterte ytelser der brannsikkerheten er tilfredsstillende |
| Analysebyggverk | Et byggverk som analyseres og der brannsikkerheten sammenlignes med et referansebyggverk |
| Brannscenario | Hendelsene som inngår i forløpet av en brann |
| Sprinkleranlegg | Stasjonert slokkeanlegg med vann som slökkemiddel |
| DIBK | Direktoratet for byggkvalitet |

2 Metode

Metoden som er benyttet for å løse oppgaven er presentert i dette kapittelet.

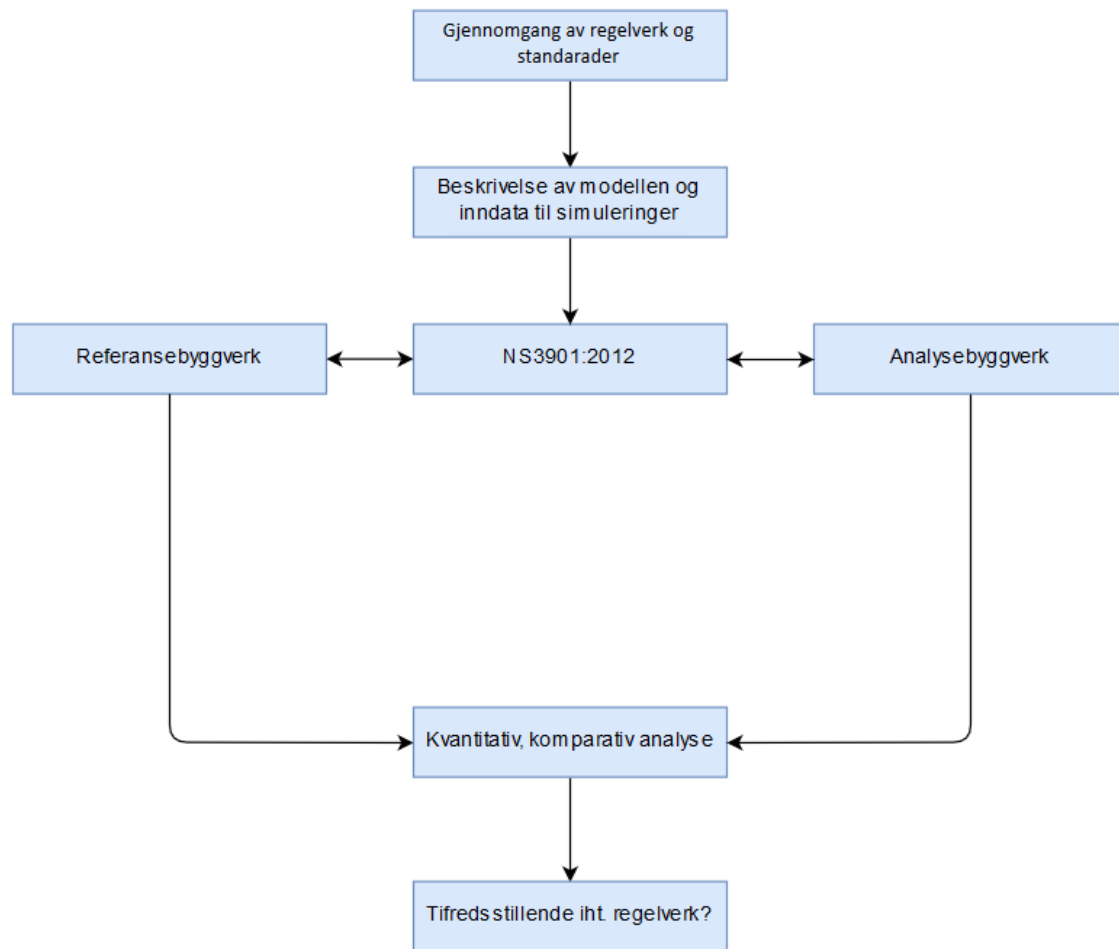
2.1 Litteraturstudie

En litteraturstudie er gjennomført for å kunne svare på problemstillingen. I oppgaven er relevant regelverk og standarder listet opp og kommentert i lys av oppgavens problemområde. For å innhente informasjon om temaet har eldre master- og ph. d.-oppgaver blitt undersøkt. Teorien bak generelle parametere og formler er hovedsakelig hentet fra bøkene *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [2] og *Fire Engineering Design Guide* [47]. Der dette ikke har vært tilstrekkelig har referansene i de nevnte publikasjonene blitt benyttet. Teorien tilknyttet analyseprogrammet og dens ulike parametere er funnet ved hjelp av håndbøker utarbeidet og utgitt av analyseprogrammets utviklere som omfatter alt fra bruken til valideringen av resultatene.

2.2 Analyse

Det er utført CFD-simuleringer for å gi fremstilling av brannforløpet der resultatene til simuleringen drøftes i lys av TEK10 og de tilhørende preaksepterte ytelsene. Det valgte simuleringsprogrammet, *Fire Dynamics Simulator 6.3.0*, drøftes med tanke på hvilke usikkerheter som ligger til grunn i resultatene.

For å verifisere brann sikkerheten, har det blitt utført en kvantitativ, komparativ analyse, der brann sikkerheten i et analysebyggverk har blitt sammenlignet med brann sikkerheten i et referansebyggverk. Analysen er gjennomført i samsvar med standarden NS 3901:2012 *Krav til risikovurdering av brann i byggverk* [3]. Analysebyggverket er ved flere scenarier utformet med fravik fra ulike preaksepterte ytelsene. Hovedhensikten med dette har vært å vise hvilken effekt dette har på brann sikkerheten i analysebyggverket. Resultatene fra analysene har blitt drøftet med tanke på om sikkerhetsmarginen for rømning er tilfredsstillende og om brann sikkerheten er på samme nivå som referansebyggverket. Figur 2.1 illustrerer en overordnet metodeoversikt av oppgaven.



Figur 2.1. Metodeoversikt

2.3 Pålitelighet

For å sikre pålitelige resultater til simuleringene har verdiene som befinner seg i det øvre sjiktet fra teoridelen av oppgaven blitt benyttet som inndata i FDS. Ved å gjøre dette vil analysen inkludere de fleste byggverk med den tilhørende brannlast som befinner seg innen oppgavens område. For tålegrensene har det for temperatur og stråling blitt benyttet verdier som befinner seg i det nedre sjiktet. Dette fører til at den tilgjengelige rømningstiden bli lavere og eventuelle sikkerhetsmarginer i oppgaven kan lettere argumenteres som tilfredsstilte. Der verdier for inndataen til simuleringene ikke er nevnt, har default-verdier blitt benyttet.

3 Teori

Dette kapitlet tar omhandler en gjennomgang av regelverket i Norge og utviklingen av regelverket som ligger til grunn for problemstillingen. Kapitlet tar også for seg en gjennomgang av teorien bak noen av de sentrale parameterne som ligger til grunn for analysen.

3.1 Gjennomgang av regelverket

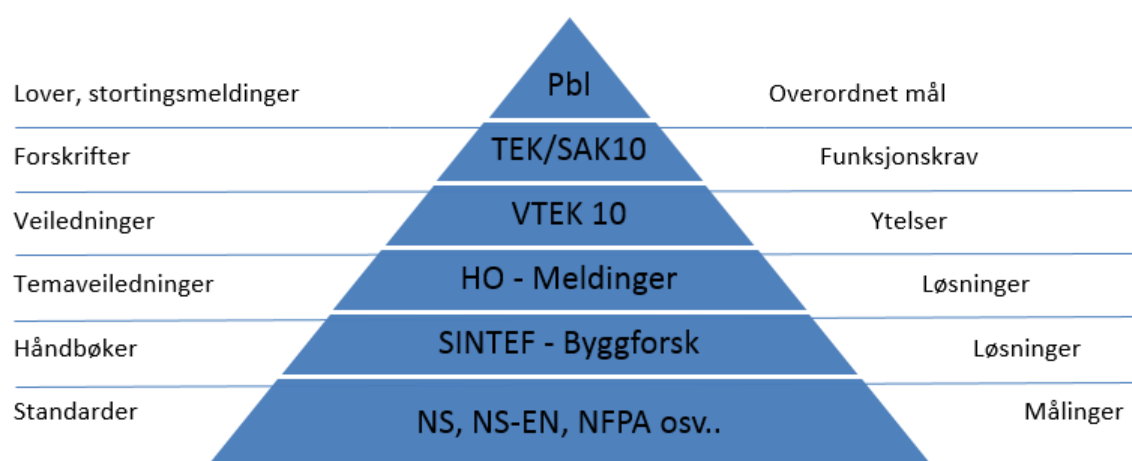
Figur 3.1 viser en oversikt over lovverket knyttet til byggverk i Norge og hvilke myndigheter som forvalter dem. Øverst i lovverkshierarkiet befinner lovene seg. Byggverk omfattes av Plan- og bygningsloven (Pbl) og er bestemt av Stortinget.

Under Pbl finnes forskriftene som er bestemt av departement og regjering. Forskriftene gir utfyllende bestemmelser til lovverket der lokale bestemmelser kan gjøres for privatpersoners eller virksomheters rettigheter innenfor et bestemt område dersom dette er nødvendig. Veiledningen til forskriftene er utarbeidet av en etat eller departement og er ment for å klargjøre bestemmelser ved hjelp av anbefalinger og preaksepterte ytelser.

En veiledning viser hvilke ytelsesnivåer som vil tilfredsstille lovverket. Rundskriv og meldinger brukes for å kunngjøre endringer i lover og forskrifter, veilede om tolkninger og bruk av bestemmelsene, eller formidle annen informasjon.

Håndbøker kan vise til praktiske anbefalinger med tanke på utførelse og detaljer på den måte at TEK10 blir tilfredsstilt. Ifølge Tek 10 § 2-2 (1) vil man ved å bruke "Norsk Standard eller likeverdig standard" oppfylle lovene som er gitt [4].

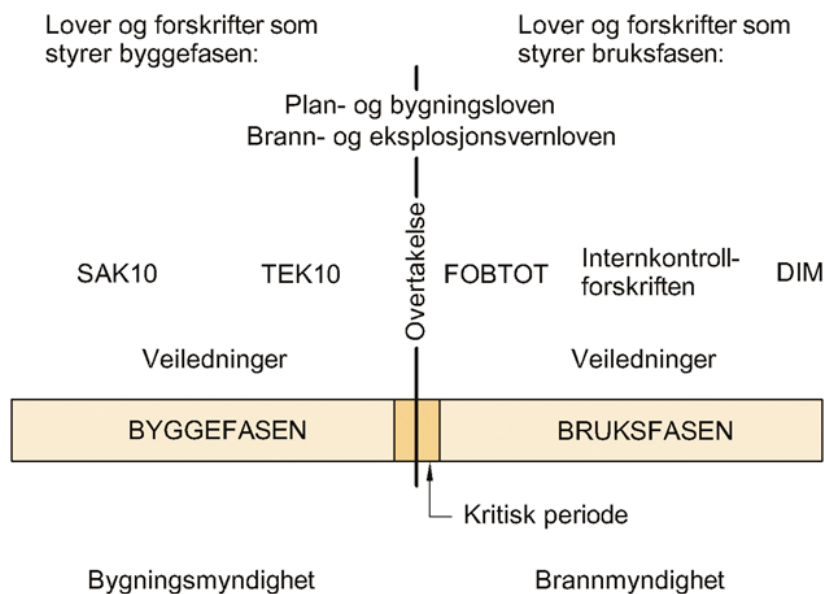
Temaveiledninger, håndbøker og standarder er likestilt i lovverket ved at løsninger og målinger som skal til for å opprettholde sikkerhetsnivået fastsatt i TEK10 er bestemt. I denne oppgaven vil det gjennom ulike standarder, håndbøker og temaveiledninger undersøkes hvilke preaksepterte ytelser gitt i VTEK 10 som kan fravikes uten å forringe sikkerhetsnivået iht. TEK10.



Figur 3.1. Oversikt over lovverket i Norge

3.1.1 Regelverket knyttet til brann

Figur 3.2 viser hvordan lovverket er delt inn i de forskjellige fasene av byggeprosessen [6]. Overordnet under hele prosessen er Plan- og bygningsloven og Brann- og eksplosjonsvernloven. Selve byggeprosessen kan deles inn i to faser: byggefasen, som omfatter alt fra prosjektering til overtakelse, og bruksfasen som tar for seg den daglige driften av bygget fra overtakelse frem til levetiden av bygget er ferdig.



Figur 3.2. Fasene av byggeprosessen

3.1.2 Byggteknisk forskrift. TEK10

Under Pbl befinner bla. den byggtekniske forskriften (TEK10) seg. TEK10 er en funksjonsbasert forskrift som innebærer at det i forskriften kun er gitt funksjoner som byggverket skal oppfylle. I veiledningen til TEK 10 (VTEK10) angis det preaksepterte ytelsesnivåer som vil føre til at kravene i TEK10 vil bli oppfylt. TEK10 er en funksjonsbasert forskrift ved at det er mulig å fravike fra ytelsesnivåene og gi byggverket en annen utforming, dersom det utarbeides en analyse som viser at løsningen er egnet for formålet. Forskriftens § 2-1 (2), verifikasjon av funksjonskrav [4]:

Der ytelser ikke er gitt i forskriften, skal oppfyllelse av forskriftens funksjonskrav verifiseres enten

- ved at byggverk prosjekteres i samsvar med preaksepterte ytelser, eller*
- ved at byggverk prosjekteres i samsvar med ytelser verifisert ved analyse som viser at forskriftens funksjonskrav er oppfylt.*

Hensikten med en funksjonsbasert forskrift er å åpne for alternative løsningsmodeller som på en bedre måte ivaretar forskriftens krav. Ved å ta i bruk dataverktøy for å utarbeide analyser av byggverkets sikkerhetsnivå vil dette fungere som en verifisering av forskriftens krav. I tillegg til dette åpner den funksjonsbaserte forskriften for en større fleksibilitet ved utformingen av byggverket.

I denne oppgaven benyttes standarden NS 3901:2012 *Krav til risikovurdering av brann i byggverk*, for å påvise om analysebyggverket oppfyller kravet i forskriftene. For å definere noen sentrale parametere har standarden SN-INSTA/TS 950:2014 *Analytisk brannteknisk prosjektering*, blitt

benyttet [7]. Disse standardene er oppgitt i innledningen til kapittel 11 i TEK10 som standarder ved en komparativ analyse vil "tilfredsstille forskriftens krav til analyse av sikkerhet ved brann" [4].

3.1.3 Forskrift om brannforebyggende tiltak og hensyn. FOBTOT

Forskrift om brannforebyggende tiltak og hensyn er underlagt Brann og eksplosjonsvernloven og forvaltes av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB). Hovedformålet i forskriften er definert i §1-1 og sier at [48]:

Forskriften skal verne liv, helse, miljø og materielle verdier gjennom krav til forebyggende tiltak mot brann og eksplosjon.

Forskriftens kapittel 2 omtaler generelle krav til eier og bruker av et brannobjekt. Det første leddet i paragrafen påpeker eierens plikt til å utstyre og vedlikeholde sitt bygg i henhold til gjeldene lover og forskrifter. Sikkerhetsnivået i byggverk settes i fjerde ledd og lyder som følger:

Sikkerhetsnivået i eldre bygninger skal oppgraderes til samme nivå som for nyere bygninger så langt dette kan gjennomføres innenfor en praktisk og økonomisk forsvarlig ramme. Oppgraderingen kan skje ved bygningstekniske tiltak, andre risikoreducerende tiltak eller ved en kombinasjon av slike.

Veiledningen til denne forskriften sier at bygg som allerede er oppgradert til byggeforskrifter av 1985 i utgangspunktet er sikre nok. Bygg som ikke er oppgradert skal oppgraderes til nivået i TEK97, som var gjeldende da forskriften kom ut, dersom dette er økonomisk og praktisk forsvarlig. FOBTOT stiller også krav til eiers og brukers ansvar og tidsintervaller for hvor ofte det skal gjøres tilsyn i byggverket.

3.2 Utviklingen av lovverket knyttet til svalganger.

Preaksepterte løsninger knyttet til svalganger ble først nevnt i 1. utgave av REN i 1997. Siden den gang har det kommet flere revideringer som har ført frem til lovverket vi har i dag. En oversikt over de ulike veiledningene som omhandler svalganger er listet opp i Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Utgivelser av byggteknisk forskrift

| Veiledning | Veiledning til: | Årstall |
|-------------------------------|---|---------|
| REN, 1. utgave | Forskrift om tekniske krav til byggverk | 1997 |
| REN, 2. utgave | Forskrift om tekniske krav til byggverk | 1999 |
| REN, 3. Utgave | Forskrift om tekniske krav til byggverk | 2003 |
| Veiledning til TEK07 (VTEK07) | Byggteknisk forskrift 2007 | 2007 |
| Veiledning til TEK10 (VTEK10) | Byggteknisk forskrift 2010 | 2010 |

3.2.1 1. og 2. utgave av REN

Svalgang blir først nevnt i lovverket i REN 1 utgave. Fra 1. til 2. utgave er det ingen endringer. Det er skrevet at [8]:

Svalgang kan være rømningsvei eller del av rømningsvei. Med mindre branncellene også har direkte utgang til sikkert sted, må svalgangen utføres slik at den tilfredsstiller forutsetningene om to uavhengige rømningsveier (...) og krav om omsluttende branncellebegrensende bygningsdeler. I ytterveggen mot svalgangen vil det som regel være vinduer som kan åpnes og som ikke har den nødvendige branntekniske klassifisering. En brann i branncellen bak vinduet vil på kort tid kunne

hindre eventuell rømning, og alternative rømningsveier må derfor etableres. Det ansees nødvendig at følgende forhold legges til rette:

- Svalgangen må være mest mulig åpen, slik at røyk- og branngasser kan unnsnippe. Om den åpne delen er 1/3 del av den totale "veggflaten", vil dette være tilfredsstillende.
- Rekkverk og øvrige konstruksjoner bør bestå av minst mulig brennbare materialer. Gulv i svalgang må være utført som branncellebegrensende konstruksjon.
- Svalgangen bør være minst 1,20 meter bred for at den skal fungere som flammeskjerm.
- Svalgangen må ha minst to trapper til terreng, en i hver ende. Avstanden mellom trappene må ikke være over 60 m. I bygninger oppført i brannklasse 1 hvor det er tilrettelagt for bruk av vindu som rømningsvei, er det tilstrekkelig med én trapp under forutsetning av at avstanden fra dørene i branncellene til trappen ikke er over 15,0 m.
- Trappene må være beskyttet mot strålevarme fra en eventuell brann i bygget. Derfor må enten de veggene som vender mot bygget utføres som branncelle- begrensende konstruksjon eller byggets yttervegg mot trappen og 5,0 m til hver side for denne, være utført i branncellebegrensende konstruksjon med tilsvarende krav til bygningsdelene (...).

3.2.2 Endringer fra 2. til 3. utgave (2003) av REN:

Kravene til svalgangens åpning mot friluft økte til 50 % av den totale veggflaten. Det ble presisert at "åpningen skulle være øverst i svalgangen" og at "rekkverket ikke var å medregne som del av åpningen". Det ble også stilt krav til at kledning skulle "ha brannklasse tilsvarende som for rømningsvei". I tillegg ble det presisert at "tak over svalgang var svært uheldig og burde unngås med mindre tak og overflater hadde gode branntekniske egenskaper". Det ble heller ikke tillatt med rømning forbi et vindu uten brannklassifisering [9].

3.2.3 Endringer fra REN 3. utgave til VTEK (2007)

Innledningsteksten, "I ytterveggen mot svalgangen vil det som regel være vinduer som kan åpnes og som ikke har den nødvendige brannmotstand. En brann i branncellen bak vinduet vil på kort tid kunne hindre eventuell rømning, og alternative rømningsveier må derfor etableres", ble fjernet. [10]

3.2.4 Endringer fra VTEK2007 til VTEK2010

Veiledningen til TEK10 presiserte ytelseskrav til brannklassifisering av gulv og kledning til B-s3,d0. I tillegg til dette blir det skrevet at "I byggverk med mer enn to etasjer må rekkverk og øvrige konstruksjoner bestå av ubrennbare eller begrenset brennbare materialer, dvs. klasse A2-s1,d0". Det ble også spesifisert at "takutstikk må utføres horisontalt og tett" for å blant annet hindre at brannen spres ved at branngassene samler seg og fører til en økning av temperatur. Det ble også lagt til at svalganger som er lenger enn 30 meter måtte utføres med branncellebegrensende konstruksjon for å begrense den horisontale brannspredningen [5].

Kravet til sprinkleranlegg ble inkludert i den reviderte veiledningen 1. april 2013. "Svalganger eller felles balkonger som er rømningsvei må dekkes av sprinkleranlegget" [5]. Som nevnt innledningsvis er det denne revideringen som er hovedårsaken til problemområdet for denne oppgaven.

3.3 Dagens krav til svalgang

3.3.1 Horisontal brannsmitte

Vinduer i innvendige hjørner i brannklasse (BKL) 2 og 3 må ha en avstand på mer enn 4 meter dersom vinduet er uklassifisert for å hindre brannsmitte. TEK10 §11-8 (2) [5]

3.3.2 Lengde

Det stilles krav i veiledningen om at dersom branncellene ikke har direkte utgang til sikkert sted, må svalgangen utføres med 2 trapper der den maksimale avstanden mellom trappene er 60 meter. Svalganger som er lenger enn 30 meter må også oppdeles med branncellebegrensede bygningsdeler for å hindre en horisontal spredning av brann og røyk.

3.3.3 Bredder

Minimumskravet på bredden i svalgangen er 1,2 meter. Dette kravet blir underbygget ved at svalgangen skal fungere som en flammeskjerm. Dersom også kravene om tilgjengelig boenhet eller universell utforming inntreffer skal bredden være 1,5 meter. Det må også, på lengre valganger, avsettes en tilstrekkelig lengde med en bredde på 1,8 meter slik at rullestolbrukere kan passere hverandre.

3.3.4 Tak

Tak over svalgang må unngås dersom materialene ikke har gode branntekniske egenskaper. Takutstikk må i tillegg utføres horisontalt og tett for å hindre en opphoping av røyk- og branngasser som igjen kan føre til brannsmitte.

3.3.5 Åpning mot det fri

Det stilles krav om at 50 % av den totale veggflatens areal skal utføres åpen. Rekkverk blir ikke regnet med og den åpne delen skal befinne seg øverst. Rekkverket må i tillegg bestå av ubrennbar eller begrenset brannbart materiale.

3.3.6 Vegg mot boenhet

Dersom svalgangen fungerer som er rømningsvei skal veggen mot boenheten være av klasse EI 60 for brannklasse 2 og 3 der brannklasse 3 i tillegg krever ubrennbare materialer. Vinduer må ha samme brannmotstand som veggen, og dører kan ha brannmotstand EI₂ 30-S_a.

3.3.7 Bæreevne

Det bærende hovedsystemet til et byggverk skal være av klasse R 60 for BKL 2 og R 90 A2,s1, d0, for BKL3. For sekundære bærende bygningsdeler skal klassen være R 60 for BKL2 og R60 A2-s1, d0, for BKL3.

3.3.8 Bygningsdelenes brannmotstand

En oppsummering over de ulike bygningsdelers brannmotstand er gitt i Tabell 3.2 og gjelder for risikoklasse 1-5. Brannmotstandene er hentet fra veiledningen til §11-8 og §11-9 i TEK10 [5].

Tabell 3.2. Krav til brannmotstand til bygningsdeler

| Bygningsdel | Brannklasse | |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | 2 | 3 |
| Vegg mot boenhet | EI 60 | EI 60 A2-s1, d0 |
| Dør til boenhet | EI ₂ 30-S _a | EI ₂ 30-S _a |
| Kledning | K210 A2-s1,d0 [K1-A] | K210 A2-s1,d0 [K1-A] |
| Overflater | B-s3,d0 [Ut 1] | B-s3,d0 [Ut 1] |
| Gulv | D _{fi} -s1 [G] | D _{fi} -s1 [G] |
| Rekkverk og konstruksjoner | A2-s1, d0 | A2-s1, d0 |
| Bærende hovedsystem | R 60 | R 90 A2-s1, d0 |

3.4 Sprinkleranlegg

Dagens krav og anbefalinger knyttet til sprinkleranlegg for denne oppgaven er oppsummert nedenfor.

Den byggtekniske forskriften TEK10

Dagens forskrifter knyttet til sprinkleranlegg på svalgang [4]:

- *Byggverk, eller del av byggverk, i risikoklasse 4 hvor det kreves heis, skal ha automatisk brannsløkkeanlegg. Deler av et byggverk med og uten automatisk sløkkeanlegg skal være ulike brannseksjoner. §11.12.*

Veiledningen til den tekniske forskriften VTEK10

Dagens preaksepterte løsninger for sprinkleranlegg [5]:

- *Brannceller med åpen forbindelse over flere plan i byggverk i risikoklasse 1, 2, 4 og 5, hvor samlet bruttoareal er større enn 800 m² for de plan som har åpen forbindelse, må ha automatisk sløkkeanlegg, jf. § 11-8 annet ledd.*
- *Areal som har åpen forbindelse inn mot overbygd gård må ha automatisk sløkkeanlegg, jf. figur 1. Unntak er små arealer som resepsjoner, altanganger etc. der brannenergien er liten.*
- *Svalganger eller felles balkonger som er rømningsvei må dekkes av sprinkleranlegget.*

Hvilken type sprinkleranlegg som skal benyttes velges utfra refererte standarder i VTEK10. For "Bygninger utformet som boliger med høyst åtte etasjer og en kjelleretasje" oppgis standarden: NS-INSTA 900 *Boligsprinkler - Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold* [11]. En utdypende forklaring på sprinkleranleggets ytelser omtales under kapittel 4.10.

3.4.1 Vannets effekt på brannen

Vann har en god evne til å absorbere varme, spesielt når det blir oppvarmet. Forbrenning er som kjent en kjedereaksjon som er avhengig av at det produseres mer varme enn det som tapes. Dersom vann blir tilført forbrenningsprosessen vil oppvarmingen av vannet føre til et stort varmetap for forbrenningen. Varmetapet er spesielt høyt dersom vannet går fra flytende form til gassform ved at gassform opptar mer volum enn vann i væskeform. Når vann går fra væskeform til gassform vil det økte volumet fortynne de andre gassene som er tilstede slik at konsentrasjonen av oksygen blir lavere og betingelsene for forbrenning reduseres. En viktig faktor for slukkeeffekten er hvilken dråpestørrelse vannet har. Et eksempel på et slukkeanlegg som leverer vann med en liten

dråpestørrelse er vanntåkesystemer [12]. Dråpene er her i en størrelsesorden som vil fordampe kort tid etter de kommer inn i oppdriftsstrømmen fra brannen. Dette medfører en inertgassproduksjon av vannet som bidrar til å dempe og å kjøle ned gassfasedelene av brannen. I motsetning til et vanntåkesystem har vannet fra et konvensjonelt boligsprinkleranlegg en større dråpestørrelse som kan trenge gjennom oppdriftsstrømmen til brannen uten å fordampe, slik at vannet vil kunne kjøle ned brannen ved å treffe brannkilden direkte.

3.4.2 Funksjon

Formålet med et sprinkleranlegg er å slokke eller kontrollere brannen frem til slokking kan gjennomføres på andre måter. Sprinkleranlegget kan også dekke samme funksjon som et alarmanlegg ved å varsle om brann. Tabell 3.3 beskriver sprinkleranleggets funksjon [12].

Tabell 3.3. Sprinkleranleggets funksjon

| Reaksjon | Funksjon |
|--------------------|--|
| Utløse | Sprinklerhodet utløses av brannen. Sprinklerhodets utløsningstemperatur varierer fra 57 °C til 260°C |
| Alarm | Automatisk alarm til personell, brannvesen og/eller hjelpepersonell |
| Slokke/kontrollere | Slokker eller kontrollerer brannen inntil slokking kan bli fullført med andre midler |

For at sprinkleranlegget på svalgangen skal ha en funksjon må det oppstå en brann på svalgangen som kan kontrolleres eller slukkes slik at brannen ikke sprer seg. De bakenforliggende preaksepterte ytelsene krever at svalgangen skal bygges opp med ubrennbare eller begrenset brennbare materialer. En brann som oppstår på svalgangen vil derfor ikke ha mulighet til å spre seg.

3.4.3 Statistikk for sprinkleranlegg

En innhenting av statistikk som omhandlet sprinkleranlegg er gjennomført i USA av The National Fire Protection Association (NFPA) og gir et tall på sprinkleranleggets effekt [13]. Tallene er samlet inn fra 2007 til 2011 og resultatene viser at sprinklere ble utløst i 91% av tilfellene, og hadde en effektivitet på 96%. Dette gir en kombinert effektivitet på 87%. Disse tallene er basert på operative bygninger som har sprinkleranlegg installert. For ulike sprinklertyper er effektiviteten forskjellig:

- 89% for våtanlegg
- 76% for tørranlegg.

Årsakene til at sprinklene ikke ble utløst er fordelt på følgende måte:

- 64% var på grunn av at systemet var skrudd av.
- 17% var på grunn av manuell påvirkning.
- 7% var på grunn av en skade på komponenten.
- 6% var på grunn av et mangelfullt vedlikehold.
- 5% var på grunn av feil type anlegg for branntypen.

Når sprinkleranlegget ble utløst men ineffektivt, var årsaken i 44% av tilfellene at vannet ikke kom frem til brannen, og i 30% av tilfellene ble det ikke sprinklet ut nok vann. Dette er årsaker som kan

være et resultat av feilprosjektering eller mangel på forståelse av brannsikringstiltak for brukeren av byggverket.

For boliger og leiligheter spesifiserer forskningen at et våtanlegg opererte i 95% av tilfellene der effektiviteten var på 92%. Ved et vått sprinkleranlegg i bolig som var tatt i bruk, var tallet på antall omkomne redusert med 82% og skadeomfanget på bygningene redusert med 68%.

Et våtanlegg er mer effektivt enn et tørranlegg. Dette kommer av at tørranlegg har sprinklerhodene på enden av et rørsystem fylt med luft eller nitrogen. Når sprinklerhodene løses ut, strømmer luften eller nitrogengassen ut av sprinklerhodet og lar et vanntrykk bygges opp inne i rørsystemet. Dette vanntrykket åpner igjen en ventil som la vannet strømme fritt ut det utløste sprinklerhodet. I forhold til et våtanlegg har et tørranlegg en ekstra komponent der det er mulighet for feil.

3.5 Tålegrenser for personer

Det fremgår i veiledningen til TEK10 §11-11 (5) i at "Kriterier for menneskers tåleevne for temperatur, stråling, røykgasstemperaturer mv. skal fastsettes med referanse til anerkjent litteratur." Med anerkjent litteratur brukes her Temaveiledningen HO-3/2000 Røykventilasjon [14]. HO-3/2000 ble utgitt i 2000 og er hovedsakelig basert på verdier fra NFPA. Der dette ikke har vært tilstrekkelig for å fastsette tålegrensene har SFPE og rapporter utgitt av SINTEF blitt benyttet som supplerende referanser.

3.5.1 Branngasser

Under en brann dannes det flere helseskadelige stoffer. De vanligste er CO og CO₂. I tillegg til dette vil en brann medføre en reduksjon av oksygen i luften.

Karbonmonoksid CO er en giftig gass som dannes ved ufullstendig forbrenning og er giftig ved at den binder seg til de røde blodlegemene slik at oksygen ikke blir tatt opp i kroppen. Tålegrensen er avhengig av alder og helsetilstand og varierer fra person til person. Det har blitt stilt spørsmål om produksjon av CO når det påføres vann. Grunnen til dette er at vannet skaper en lokalt uventilert brann som gir en ufullstendig forbrenning der et av biproduktene er en økt mengde CO [12].

Karbondioksid CO₂ er i seg selv ikke giftig men vil ved store konsentrasjoner, som ved etter overtenning, føre til en økt pustefrekvens og et høyere opptak av CO [12].

Mangel på oksygen vil skape ulevelige forhold i brannrommet samtidig som det vil bidra til å dempe brannen. Oksygentilgangen under brann bestemmes av hvor store lufteåpninger som er til stede slik at frisk luft kan trekke inn.

HO-3/2000 oppgir følgende verdier på konsentrasjoner av gasser [14]:

- CO maks 2000 ppm.
- CO₂ maks 5 %
- O₂ min 15 %

I tillegg til de overnevnte stoffene vil det kunne dannes flere giftige gasser. Et eksempel på en slik gass er HCN (hydrogencyanid) som er omtrent 20 ganger giftigere enn CO og kan medføre en rask død. [12]. Ved simulering av brann i innvendige rom vil branngasser være en faktor som må inkluderes for å kunne fastsette tiden frem til kritiske forhold oppstår. En svalgang er en utvendig konstruksjon slik at branngasser vil bli delvis luftet ut og der den tilgjengelige rømningstiden

hovedsakelig er avhengig av temperatur og varmestråling. Giftige branngasser inkluderes derfor ikke i beregningen for tiden til kritiske forhold oppstår

3.5.2 Sikt

På svalgangen vil redusert sikt være faktor som har innvirkning på hvordan rømningen foregår. En røykfyllt svalgang vil kunne føre til at beboere opplever situasjonen som truende og beboeren må ta en beslutning om å bli i egen branncelle eller forflytte seg gjennom røyken. Denne beslutningen må beboeren ta på et begrenset informasjonsgrunnlag der forhold ved brannen kan feiltolkes.

Sikten er et mål på hvilken røykthet som er i rommet. H0-3/2000 angir for brannrommet en sikt på 3 meter og i rømningsvei en sikt på minst 10 meter [14]. Under en brann vil røykgassene hovedsakelig samle seg i øverste del av rommet og ved sprinkleraktivering vil vannet kunne trekke denne brannrøyken ned mot gulvnivået slik at sikten reduseres. Figur 3.3 viser et eksempel på sikten i et brannrom før og etter sprinkleraktivering. Figuren viser at vannet fra sprinkleranlegget virvler opp røyken og skaper en lavere siktbarhet. Figuren er hentet fra forsøk gjennomført av Fredrik Nystedt [16].



Figur 3.3. Røykforhold ved sprinkleraktivering

Stefan Schönberg utførte ti fullskallatester for å undersøke om hvilken effekt sprinkleranlegget hadde på å redusere giftige gasser i brannrommet [45]. Resultatet var her at produksjonen av karbondioksid og karbonmonoksid var lavere i tilfellene der sprinkleranlegget ble utløst. I tillegg til dette var temperaturen i brannrommet målt til å være lavere i tilfellene der sprinkleranlegget ble utløst i tillegg til at oksygenkonsentrasjonen var høyere. Fra testene ble det også her konkludert med at siktbarheten var lav i etterkant av sprinkleraktivering.

For å beregne siktbarheten så må frisiktshøyden, z , minst være lik den som beregnes etter *Formel 3.1* oppgitt i standarden SN-INSTA/TS 950 [7].

$$z = 1,6 \text{ m} + 0,1 * H$$

Formel 3.1

Der:

H er svalgangens innvendige takhøyde

For en svalgang med en høyde på 2.4 meter tilsvarer dette en frisiktshøyde på 1,84 meter.

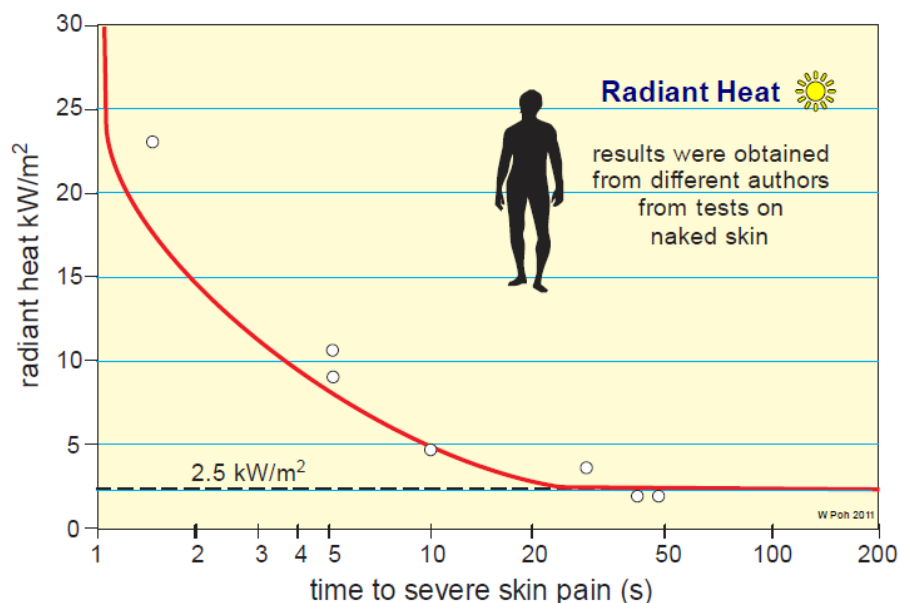
For svalganger vil vind være et forhold som har en stor innvirkning på sikten. Selv en liten vindstyrke mot svalgangen vil føre til en raskere utlufting av svalgangen som igjen fører til forbedrede sikt- og rømningsforhold. For beregningen av den tilgjengelige rømnings tiden i denne oppgaven vil derfor ikke sikten bli tallfestet men heller kommentert i lys av forholdet mellom de ulike vindusdimensjonene som benyttes.

3.5.3 Stråling og temperatur

Det oppgis også i temaveiledningen H0-3/2000 grenser for maksimal varmestråling [14]:

- Vedvarende stråling på 1 kW/m^2
- Strålingsintensitet på 10 kW/m^2 i maks 4 s
- Samlet strålingsenergi på 60 kJ/m^2 (60 kW s/m^2) utover energien fra en stråling på 1 kW/m^2

I denne oppgaven benyttes en strålingsintensitet på 10 kW/m^2 som grenseverdi for rømning. Denne verdien er også anbefalt i SFPE for eksponering under 4 sekunder [15]. Figur 3.4 illustrerer resultater fra ulike tester utført fra 1950 til 1980 [17]. Testene undersøkte ulike smertegrenser ved forskjellige strålingsintensiteter. Resultatene fra disse testene ble samlet inn og sammenstilt som vist i figuren nedenfor. Strålingsintensiteten i testene varierte fra $2,4\text{ kW/m}^2$ til $23,5\text{ kW/m}^2$. Som Figur 3.4 viser, så spesifiseres det ingen maksimal kortvarig varmestråling en person kan utsettes for. Det vil derfor i denne oppgaven tillattes en kortvarig høy strålingsintensitet på svalgangen dersom den befinner innenfor 30 kW/m^2 som er satt som den maksimale verdien fra grafen. Med kortvarig menes en eksponering på mindre enn 1 sekund.



Figur 3.4. Tålegrense for varmestråling

Menneskers respons på høye temperaturer er vist i Tabell 3.4 og er hentet fra en rapport utgitt av SINTEF [12]. Tålegrensen for vedvarende temperatureksponering i denne oppgaven er 150°C i henhold til den oppgitte verdien for temperaturgrense for å kunne evakuere. Dersom rømningsveien opplever en kortvarig høy temperatur må dette kommenteres i lys av eksponeringsvarigheten og hvilken verdi temperaturen er på. Tålegrensen for temperatur er avhengig av flere faktorer som luftfuktighet, røyk tetthet og bekledningen til personen som evakuerer. Sammenlignet med annen anerkjent litteratur er denne oppgavens temperaturgrense ansett som lav. Med anerkjent litteratur

henvises det til SFPE kapittel 63 side 2385 som viser verdier på over 200°C [15]. I denne oppgaven kommenteres overskridelsen av temperaturrensene i lys av eksponeringsvarighet og hvor høy temperaturen er.

Tabell 3.4. Temperaturløselse [°C] for personer

| Temperatur [°C] | Konsekvens |
|-----------------|---|
| 125 | Vanskelig å puste |
| 140 | 5 minutters toleranstid |
| 150 | Temperaturløselse for å kunne evakuere |
| 160 | Rask, ulidelig smerte mot tørr hud |
| 180 | Irreversibel skade etter 30 sekunder |
| 205 | Ånderettssystem tåler dette mindre enn 4 minutter med våt hud |

3.6 Brannmodellering

Brannmodellering kan variere fra enkle handberegninger til kompliserte simuleringer med dataverktøy som baserer seg på strømningsdynamikk (Computational Fluid Dynamics – CFD). Innen CFD finnes det flere modelleringsverktøy som igjen kan deles inn i to hovedkategorier: sonemodeller og feltmodeller. Hvilken modell som burde velges, bestemmes av kompleksiteten og geometrien på modellen som skal simuleres. Kompliserte modeller krever av brukeren en god kunnskap om brannndynamikk i tillegg til en god kjennskap om programvaren som blir benyttet.

3.6.1 Sonemodeller

Sonemodeller er enkle modeller som deler beregningsområdet inn i separate soner og regner ut masse- og energibalansen for hver sone. Den vanligste sonemodellen som brukes i dag er tosonemodellen. Tosonemodellen deler hele beregningsområdet inn i to soner; en øvre som består av røyk og gasser, og en nedre som består av kald frisk luft. Formler for masse, energi, hastighet og kjemiske prosesser er deretter regnet ut separat for hver sone. Begge lagene er antatt å være homogene. Tosonemodellen kan være en god tilnærming dersom brannen ikke er for liten og gitt et ukomplisert problem med en enkel geometri [18].

3.6.2 Feltmodeller

Hovedforskjellen mellom sonemodeller og feltmodeller er at i tillegg til å løse masse- og energi likninger så inkluderer feltmodellene også impulsbevarelsen. Ved å inkludere impuls i beregningene vil også retningen av røyken kalkuleres. I virkeligheten vil det være en gradvis overgang av temperatur, tetthet og røyk mellom lagene. For å modellere dette trengs det en annen tilnærming enn sonemodeller [19].

Når en feltmodell benyttes, deles hele beregningsområdet inn i små kontrollvolum slik at beregningsområdet blir bestående av et nettverk av celler. Bevarelsen av masse, energi og moment for beregningsområdet uttrykkes matematisk for hver celle ved hjelp av Navier-Stokes likningene. Navier-Stokes-likningene kalles også for bevegelseslikningene og er et sett av differensiallikninger som beskriver strømming av fluider. Differensiallikningene er tredimensjonale, tidsavhengige og ikke lineære, og er for kompliserte til å løse for hånd. CFD er prosessen knyttet til å løse Navier-Stokes likningene ved hjelp av datamaskiner. Løsningen av likningene er fortsatt for komplisert til å beregne nøyaktig med dagens datakapasitet noe som medfører at en forenkling i turbulensmodellen må gjøres [19].

3.7 Computational Fluid Dynamics (CFD)

På norsk står *Computational Fluid Mechanics* for numerisk væskedynamikk og er prosessen knyttet til å beregne gass og væsketransport ved hjelp av kraftige beregnings- og analyseverktøy.

Programvaren som benyttes løser numerisk en form av Navier-Stokes for å vise verdier som temperatur, hastigheter, og konsentrasjoner med hensyn på tiden. Beregningsområdet deles inn i et tusen- eller milliontalls celler der likningene blir løst separat for hver celle. Navier Stokes-likningene kalles også for bevegelseslikningene og er et sett av differensiallikninger som beskriver strømming av fluider. Selve grunnpilaren i CFD-modellering er at bevegelseslikningene blir forenklet til enkle volumintegrerende størrelser. Resultatene av en slik beregning vises vanligvis i 3D slik at løsninger og utforminger av geometrien kan optimaliseres [19].

Beregningsmetodikken i CFD programmer følger en viss fremgangsmåte som vist nedenfor [20].

1. *Pre-processing*. Inndataen og geometrien bestemmes, deretter velges de fysiske og kjemiske egenskapene til materialene samt at egenskapene til strømminger og grensebetingelser spesifiseres.
2. *Solver*. Simuleringen utføres på grunnlag av verdiene gitt i *Pre-processing*
3. *Post processing*. Simuleringen er ferdig og resultatene kan analyseres.

3.8 Turbulensmodeller

Turbulensmodellen kan ha stor effekt på modelleringen av røykbevegelse. Innen ulike CFD-verktøy som benyttes for brannsimulering, finnes det tre ulike løsningsmetoder for å beregne strømming og turbulens [20].

1. *Direct Numerical Simulation (DNS)*
2. *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)*
3. *Large Eddy Simulation (LES)*

DNS er en direkte numerisk løsning av de hydrodynamiske strømningslikningene (Navier-Stokes) som funksjon av rom og tid. Denne metoden krever et meget fint grid og små tidsintervaller noe som fører til at den ofte er uegnet til å modellere storskalabranner med tanke på kapasiteten og tidsbruken på prosesseringen [22].

RANS står for Reynolds Average Navier Stokes og tilnærmer seg de hydrodynamiske likningene ved å utføre en gjennomsnittsberegning over tid og rom [20].

LES er en metode som kombinerer DNS og RANS ved å dele det turbulente strømningsfeltet inn i et tredimensjonalt rutenett kalt "subgrid scale"-komponenter. Ved å filtrere ut de minste virvlene i turbulensen, simulerer LES de største virvlene og estimerer de minste med forenklete modeller (Smagorinsky modellen). Grunnlaget for denne tilnærmingen er at de store virvlene som inneholder mye energi er avhengig av geometrien til modellen og har derfor størst betydning for resultatet av beregningene. Det er denne modellen som er den mest vanlige å benytte [22].

3.9 Fire Dynamics simulator (FDS)

Programvaren som blir benyttet for å modellere de ulike scenarioene i denne oppgaven er *Fire Dynamics Simulator* versjon 6.3.0. Fire Dynamics Simulator (FDS) ble først publisert offentlig februar år 2000 og er et program som har vært under utvikling i over 25 år. Programmet er utviklet og vedlikeholdes av "National Institute of Standards and Technology" (NIST). FDS er under kontinuerlig

utvikling ved at brukerne av programmet kan gi tilbakemeldinger på eventuelle endringer som burde gjøres i programmet. Disse brukerne er blant annet ulike ingeniørfirmaer som bruker programmet på daglig basis. Utviklerne av programmet har sammen utgitt publikasjoner som underbygger programmets funksjoner og bruksområder. Disse publikasjonene finnes i totalt 4 deler og tar for seg forskjellige aspekter ved programmet og de ulike funksjonene. Del 1 tar for seg den matematiske bakgrunnen [1]. Del 2 og 3 tar for seg tidligere og nyere arbeid med henholdsvis verifikasjonen og valideringen av FDS [23][24]. Del 4 tar for seg konfigureringen av FDS [25]. I tillegg til dette er det også publisert en separat brukermanual [21] som gir instruksjoner på hvordan programmet skal brukes.

FDS er et såkalt "Fortran"-program som leser ut Input-parametere fra en tekstfil og skriver, ved hjelp av de numeriske løsningene, ut datafiler [21]. Smokeview er et støtteprogram til FDS som leser ut datafilene og visualiserer resultatene.

FDS løser, som andre CFD-programmer, en form for Navier-Stoke-likninger. På grunnlag av lavhastighets, varmedreven strømming kan røyk og varmetransport fra en brann kalkuleres med hensyn på tiden.

3.9.1 Bruksområder

Eksempler på hva som kan modelleres i FDS er lavhastighetstransport av varme og forbrenningsprodukter fra brann, stråling og konvektiv varmetransport mellom gass og faste materialer, aktivering av sprinkleranlegg, og varme- og røyk-detektorer. Halvparten av bruksområdene til programmet omhandler røykhåndtering og sprinkler- og varslings-systemer. De resterende bruksområdene består av ombygging av bolig- og industri-konstruksjoner [21].

3.9.2 PyroSim

All inndataen til en simulering i FDS må spesifiseres i en tekstfil. Denne tekstfilen kan enten skrives manuelt eller utformes ved hjelp av en "Graphical User Interface" (GUI). I dette tilfellet er tekstfilen generert av programmet PyroSim. PyroSim er utviklet av Thunderhead Engineering Consultants, Inc og fungerer som et GUI for FDS [26].

3.9.3 Visualisering

For å visualisere resultatene fra FDS benyttes et program som kalles Smokeview. FDS og Smokeview er fritt tilgjengelige programmer som kan lastes ned gratis fra NISTs sine hjemmesider [27]. Versjonene av programmene som er brukt i denne oppgaven er FDS 6.3.0 og SMV 6.3.0.

3.9.4 Begrensninger

Som mange andre programmer har FDS noen begrensninger som det er viktig å merke seg før man skal utføre en simulering [21].

Matematisk modell

De ulike prosessene som finner sted må beskrives ved hjelp av matematiske likninger. For å gjøre dette må antakelser i de matematiske, kjemiske og fysiske forholdene gjøres. Den matematiske modellen vil alltid representere en tilnærming til virkeligheten slik at det aldri vil bli en fullstendig overenstemmelse med virkeligheten. De matematiske likningene må diskretiseres for å kunne uttrykke en numerisk modell som kan løses i et gitt antall punkter. Dette medfører en ny usikkerhet der antall punkter i diskretiseringsområdet bestemmer nøyaktigheten. Et høyt antall punkter vil minske usikkerheten som igjen vil øke simuleringstiden betraktelig [21]. Det er derfor i denne

oppgaven gjennomført en sensitivitetsanalyse for å finne den optimale inndelingen av beregningsområdet.

Strømning

Strømningen som modelleres er lavhastighetsstrømning av røyk og varme fra en brann. FDS kan derfor ikke brukes i tilfeller der strømningene nærmer seg lydens hastighet slik som i eksplosjoner og i noen forbrenningsreaksjoner [21].

Geometri

FDS benytter seg av rettlinjert grid noe som medfører at buede former må tilpasses. Innenfor boligblokker og leiligheter er dette et begrenset problem. I tillegg til dette må alle objekter tilpasses et helt antall celler. En grov celleinndeling vil derfor føre til en lavere grad av frihet i utformingen av modellen [21].

Branneffekt

Branneffekten (HRR) er i mange tilfeller en usikker parameter. I tilfellene der det er lite usikkerhet knyttet til størrelsen på branneffekten regner FDS hastigheter og temperaturer med en feilmargin på mellom 10%-20%. Denne feilmarginen vil bli diskutert under Kapittel 6. I modellene der varmeavgivelsen er usikker, vil usikkerheten naturligvis være høyere [21].

Forbrenningsmodell

En standard forbrenningsmodell i FDS kalles en "mixture fraction-based" forbrenningsmodell. Dette vil si at FDS antar at reaksjonen mellom brenselet og oksygenet skjer uendelig rask uavhengig av temperaturen. I en stor simulering der brannen er godt ventilert er dette en god antakelse. Dersom brannen befinner seg i oksygenfattige omgivelser, eller blir utsatt for slukning i form av sprinklere, vil oksygen og brensel blandes uten at en forbrenning finner sted. Den valgte forbrenningsmodellen med tilhørende egenskaper blir omtalt videre under kapittel 4.8

Varmestråling

FDS benytter seg av en "grey medium"-forutsetning når det kommer til varmemestråling. Strålingen beregnes fra brann og forbrenningsprodukter gjennom et antall definerte vinkler. Antall vinkler er en brukerstyrt parameter der 100 er en default-verdi. Et mangelfullt antall vinkler kan føre til en unaturlig fordeling av varme flater på en ellers lite eksponert flate. Dersom antall vinkler økes vil også simuleringstiden øke betraktelig. Antall vinkler må derfor bestemmes utfra kompleksiteten på modellen.

Turbulensmodell

FDS benytter seg av LES som turbulensmodell. Det er også mulig å bruke DNS dersom meshet er fint nok. LES er satt som default i FDS og benyttes i denne oppgaven.

Alle de overnevnte forenklingene og begrensningene medfører usikkerheter i simuleringene. For å minske disse bør det derfor utføres en sensitivitetsanalyse av de viktigste parameterne. Parameteren som blir sett på som den mest kritiske er graden av oppdelingen av beregningsdomenet. Dette omtales videre under kapittel 4.12.

3.9.5 Validering og verifisering

En viktig operasjon når en simulering er ferdig er å evaluere resultatene for å undersøke hvor korrekte de er. Generelt kan det å evaluere en prosess deles inn i to deler: verifisere og validere.

Verifisere er å sjekke hvor korrekt løsningen av likningene er. En verifisering sier ikke noe om riktige likninger er tatt i bruk men tar kun for seg om de er løst korrekt. Validering er å sjekke om den matematiske løsningen av likningene er passende for den fysiske modellen som blir simulert. Validering sammenligner som regel resultatene fra en simulering med målinger fra eksperimentelle forsøk. Dersom det finnes avvik eller usikkerheter i sammenlikningene forklares disse med antakelse og forenklinger som er gjort i modellen [24]. En omfattende evaluering av FDS i regi av U.S.NRC tar for seg en validering av FDS [28]. Konklusjonen er at FDS kan beregne gasstemperaturer, forbrenningsprodukter og trykket i brannrommet med innenfor 15% fra eksperimentelle målinger. I tillegg måles varmestråling og overflatetemperaturer innenfor 25% av eksperimentelle målinger. På bakgrunn av dette velges det derfor å benytte de samme verdiene som i valideringsstudiet. Disse verdiene diskuteres senere i oppgaven under kapittel 6. Når det kommer til oppdelingen av beregningsdomenet utføres det en sensitivitetsanalyse for å finne en celledørrelse som best gjenspeiler oppgavens hensikt.

4 Analysemodellen

Dette kapitlet tar for seg utformingen av analysemodellen. Forutsetningene som ligger til grunn for den valgte modellen er krav og anbefalinger gitt i standardene NS 3901:2012 [3] og SN-INSTA/TS 950:2014 [7].

4.1 Eksisterende forskning

Eksisterende forskning som kan brukes som referanser til problemområdet for oppgaven er begrenset til bæresystem og røykproduksjon. En bacheloroppgave skrevet for Universitet i Stord Haugesund omhandler røykutvikling ved ulike rekkverksutforminger [29]. Konklusjonen på denne oppgaven var at svalganger med rekkverk som tillater luftgjennomstrømning, øker den tilgjengelige rømningstiden ved at det begrenser røykspredningen i svalgangen. Det finnes per dags dato ingen kjent forskning som tar for seg effekten av sprinkleranlegget og bruk av brannklassifisert vindu på svalgang.

4.2 Komparativ analyse

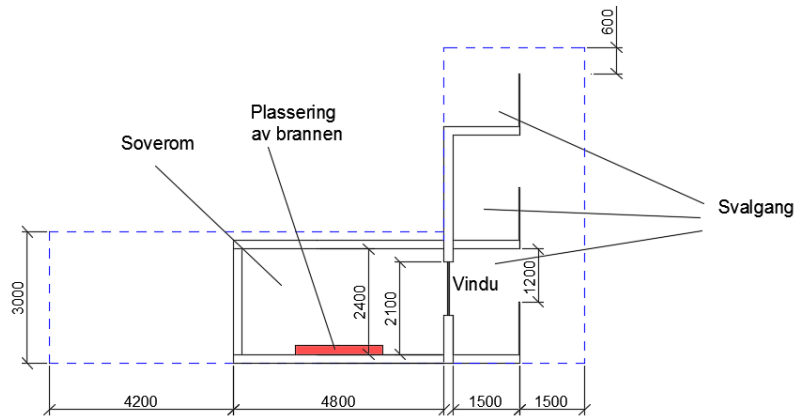
Det gjennomføres det en komparativ analyse i henhold til standarden NS 3901, kapittel 7. En komparativ analyse vil si at det gjennomføres en sammenligning mellom brannsikkerheten i et analysebyggverk med et tilsvarende referansebyggverk utført i henhold til ett sett av preaksepterte ytelser. I en komparativ analyse sammenlignes risikoen i analysebyggverket med risikoen i referansebyggverket for et begrenset antall brannscenarier der scenarioene er bestemt av gitte kriterier oppgitt i NS 3901.

4.3 Risikoaksept: referansebyggverk

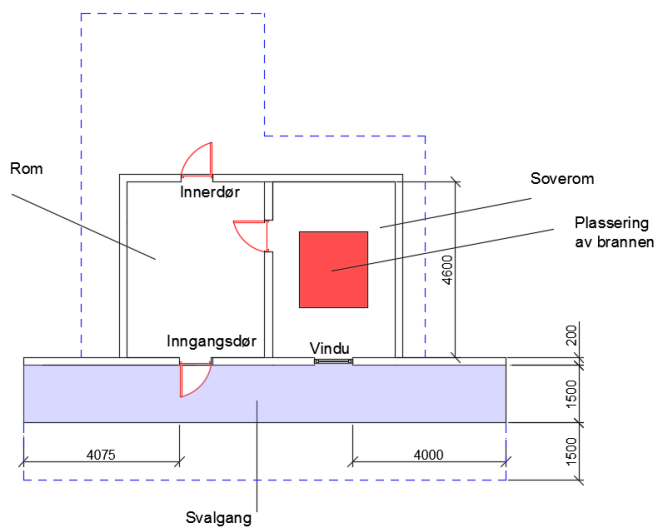
Referansebyggverket skal i henhold til NS 3901 være et preakseptert alternativ til analysebyggverket. I denne oppgaven anses et bygg som følger de preaksepterte ytelsene til TEK10 ha et tilstrekkelig sikkerhetsnivå. For å gi et dekkende svar på problemstillingen må modellen være såpass generell at den kan være gjeldene for flere byggverk. Byggene som kommer innunder problemstillingen i denne oppgaven er hovedsakelig leilighetskomplekser i risikoklasse 4 med brannklasse 2 eller 3 der det er krav om heis. Dette er bygninger der personer kjenner rømningsforholdene og der bygningen er beregnet for overnatting. Under brann vil personer kunne være nødt til å benytte svalgang som rømningsvei. Dersom rømningsveien går forbi dører og vinduer er det krav om en brannklassifisering på henholdsvis EI 30 og EI 60 på dører og vinduer. Det er i tillegg til dette krav om automatisk slukkeanlegg på svalgang.

Byggverket i denne oppgaven består av et soverom med et tilliggende rom samt en svalgang som går over to etasjer. Soverommet har dimensjon 4,6 meter * 3,2 meter * 2,4 meter (L*B*H) og har et vindu som vender ut mot svalgang. Høyden på svalgangen er 2,4 meter og de øvrige dimensjonene tilfredsstillende VTEK10 ved at bredden på svalgangen er 1.5 meter og høyden på rekkverket er 1.2 meter, som tilsvarer at svalgangen er 50% åpen. Rekkverket er simulert som å være helt tett med bakgrunn i det som er spesifisert i VTEK10 om at "åpning i rekkverk er ikke å anse som åpent areal". [5]. I noen tilfeller vil rekkverket kunne ha en annen utforming som tillater luftgjennomstrømning og derfor bedrer rømningsforholdene. For mer informasjon angående utformingen av rekkverket henvises det til bacheloroppgaven skrevet ved HSH angående dette området [29].

Figur 4.2 og Figur 4.1 viser et plan og snitt av byggverket som analyseres i denne oppgaven. Den blå stiplede linjen viser beregningsområdet til modellen i FDS. Beregningsområdet befinner seg 1,5 m utenfor svalgangen for å inkludere røykbevegelsen opp i den overliggende etasjen. Beregningsområdet i det tilliggende rommet går forbi ytterveggen for å få en mer realistisk tilnærming av luftbevegelsen på tilluften til brannen [21].



Figur 4.1. Snitt av modellen



Figur 4.2. Plantegning av modellen

Referansebyggverket følger de preaksepterte ytelsene og har på bakgrunn av det som er omtalt i teorikapittelet disse egenskapene:

- Sprinkleranlegg er installert på soverommet.
- Sprinkleranlegg er installert på svalgang.
- Alle dører og vinduer som vender mot svalgang er brannklassifisert i henhold til veiledningen til TEK10.
- Leiligheten utført som egen branncelle der vegg mot svalgang er utført med brannmotstand EI 60.

Ved å følge de overnevnte antakelsene for referansebyggverket vil det ikke oppstå kritiske forhold på svalgangen før det har gått 30 min da den pålagte brannklassifiseringen på EI 30 på inngangsdøren ikke lenger er gjeldende.

4.4 Analysebyggverk

På grunn av at referansebyggverket følger de preaksepterte ytelsene i veiledningen, antas det at byggverket er utenfor risiko for beboerne i en rømningsituasjon. Det vil derfor i analysebyggverket undersøkes ulike endringer i modellen som vil føre til at de preaksepterte ytelsene ikke følges, for å se om rømningsforholdene likevel er tilfredsstillende. De preaksepterte ytelsene som analysebyggverket ved gitte scenarioer vil fravike er:

- Innstalling av sprinkleranlegg i leilighet.
- Innstalling av sprinkleranlegg på svalgang.
- Brannklassifisering på vinduet som vender mot svalgangen.

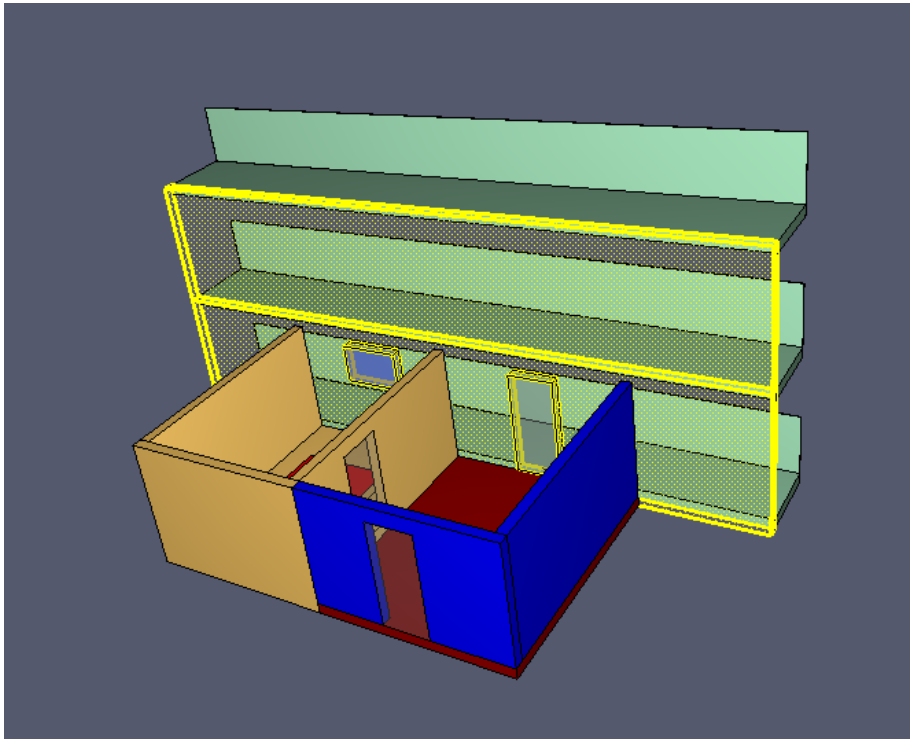
For øvrig er analysebyggverket likt referansebyggverket. Brannsikkerheten i analysebyggverket skal gi minst samme brannsikkerhet som referansebyggverket. I denne oppgaven anses derfor sikkerhetsnivået som tilfredsstillt dersom rømningsforholdene på svalgangen er lavere enn kritiske verdier under hele brannforløpet.

4.4.1 Brannscenario

NS 3901 for valg av brannscenarioer angir at følgende scenarioer vurderes:

1. *Et alvorlig brannscenario med rask utvikling og høy branneffekt som representerer det verste troverdige brannscenarioet i byggverket.*
2. *Brann som oppstår i et rom som normalt er uten personer, og som kan true et større antall personer i andre deler av byggverket.*
3. *Brann som utvikler seg langsomt, og som ikke vil utløse et automatisk brannslukkeanlegg.*
4. *Representative brannscenarioer for det aktuelle byggverket som skal analyseres for å avdekke robustheten i den branntekniske utformingen.*

For punkt 2 vil brannen befinne seg i en leilighet der det normalt befinner seg personer. For punkt 3 vil en brann som utvikler seg langsomt og som ikke utløser slukkeanlegget antas å ha for lav temperatur og varmestråling til å medføre farlige rømningsforhold på svalgangen. I denne oppgaven vil derfor ikke punkt 2 og 3 være relevante. For å kunne vurdere robustheten til modellen i henhold til punkt 4, settes det opp et sett av ulike scenarioer der det vil bli simulert to forskjellige brannvekster både med og uten sprinkleraktivering. For å undersøke hvilken effekt ulike vindusdimensjoner har for rømningsforholdene er det etablert seks ulike vindusdimensjoner som vil gå igjen ved de ulike brannveksttilfellene. For å inkludere tilfeller med underventilering vil det simuleres scenarioer der døren til soverommet er lukket under hele brannforløpet. Punkt 1 i de overnevnte scenarioene inkluderes ved at det simuleres flere scenarioer med en rask brannvekst. En liste over de ulike scenarioene med tilhørende vindusdimensjon og brannvekst omtalt under kapittel 4.6. Figur 4.3 nedenfor illustrerer 3D-modellen utarbeidet i PyroSim som analyseres videre i oppgaven.



Figur 4.3. Tredimensjonal fremstilling av modellen

4.5 Bygningsdeler

Overflaten i brannrommet er forutsatt å være "INERT". Bakgrunnen for dette er at det benyttes standardiserte brannkurver som er basert på en gitt brannlast i hele rommet. Materialet på svalgangen er definert som betong.

4.6 Ventilasjonkontrollert brann

Tiden fra brannstart til overtenning i et brannrom avhenger av lufttilgangen til brannen. Lufttilgangen er bestemt av størrelsen og plasseringen av ventilasjonsåpningene og om de er åpne og kan tilføre luft til brannen. I denne oppgaven brukes det en enkel modell for å beskrive den maksimale varmeavgivelsen som er mulig basert på ventilasjonsåpningene. Mer avanserte modeller for brannveksten er tilgjengelig, men i denne oppgaven anses de enklere modellene å gi et dekkende bilde av effekten ved de ulike ventilasjonsåpningene.

Den ventilasjonkontrollerte branneffekten, Q_v [MW], er gitt ved *Formel 4.1* hentet fra FEDG [37].

$$Q_v = 1,5 A_v \sqrt{h}$$

Formel 4.1

Der:

A_v er det totale åpningsarealet [m^2]

h er den gjennomsnittelige høyden [m]

Den nødvendige branneffekten for overtenning finnes ved hjelp av *Formel 4.2* som er hentet fra FEDG [37].

$$Q_{fo} = 0,0078 A_t + 0,378A_v\sqrt{h} \quad \text{Formel 4.2}$$

Der:

Q_{fo} er den nødvendige varmeeffekten [MW]

A_t er brannrommets innvedige areal inkludert åpningene

Videre vil overtenning inntreffe i brannrommet dersom: $Q_{fo} < Q_v$ [37]. Ved å undersøke om formel 4.1 gir en høyere branneffekt enn *Formel 4.2*, kan det påvises om overtenning vil inntreffe i rommet. Dette er vist nedenfor i Tabell 4.1. Tabellen baserer seg på at tilluften i rommet kommer fra vinduet og en inngangsdør med dimensjon 0,9x2,1 meter. Vedlagt i *Vedlegg A* er plasseringen og størrelsen av de ulike vindustypene presentert.

Tabell 4.1. Ventiljonskontrollert branneffekt [kW]

| Vindusdimensjon [mxm] | Vindu [m ²] | Av [m ²] | h [m] | Q _v [MW] | Q _{fo} [MW] |
|----------------------------|-------------------------|----------------------|-------|---------------------|----------------------|
| V1. 0,8x0,8 | 0.64 | 2.53 | 1.45 | 4.56978514 | 1.67324986 |
| V2. 0,8x1,2 | 0.96 | 2.85 | 1.65 | 5.49133693 | 1.90548091 |
| V3. 1,2x0,8 | 0.96 | 2.85 | 1.45 | 5.14778168 | 1.81890498 |
| V4. 1,2x0,5 | 0.6 | 2.49 | 1.3 | 4.25855521 | 1.59481991 |
| V5. 0,5x1,2 | 0.6 | 2.49 | 1.65 | 4.79769437 | 1.73068298 |
| V6. 1,2x1,2 | 1.44 | 3.33 | 1.65 | 6.41619367 | 2.13854481 |
| V5. Dør til soverom lukket | 0.6 | 0.6 | 1.2 | 0.9859006 | 0.77011095 |
| V6. Dør til soverom lukket | 1.44 | 1.44 | 1.2 | 2.36616145 | 1.11793669 |
| Vindu lukket | 0 | 1.89 | 2.1 | 4.10830531 | 1.55695694 |

Tabell 4.1 viser forholdet mellom den nødvendige varmeeffekten for overtenning (Q_{fo}) og den maksimale varmeeffekten (Q_v) ved det gitte ventilasjonsarealet. Med de valgte vindusdimensjonene vil overtenning alltid inntreffe. Hovedårsaken til dette er at størrelsen på brannrommet er såpass lite. Det trengs derfor en liten effekt på brannen for at overtenning skal inntreffe i motsetning til et stort rom vil trenge en stor branneffekt.

4.7 Vindusbrudd

For at en brann ikke skal bli underventilert er vindusbrudd en viktig faktor. Dersom en brann bryter ut i et rom der både dører og vinduer er lukket vil den manglende lufttilførselen føre til at brannen blir underventilert. Et viktig punkt i denne oppgaven er derfor ved hvilken temperatur et eventuelt vindusbrudd vil inntreffe.

En rapport skrevet av Michael J. Skelly tar for en ulike eksperimenter som omhandler vindusbrudd under brann i et rom [31]. Rapporten skiller mellom vinduer som isolert rundt kanten og vinduer som er helt eksponert mot brannen. Bakgrunnen for denne oppdelingen er forskjellen i den termiske spenningen langs kanten av glasset. Når det gjelder vinduer som vanligvis blir benyttet i boliger og leiligheter er disse isolert i ytterkant. Skelly referer til Keski-Rahkonen som kom frem til *Formel 4.3* ved beregninger av spenninger i vindusflaten i forhold til temperatur [32]:

$$\sigma_y = E\beta(T_\infty - T_0) \qquad \text{Formel 4.3}$$

Der:

σ_y er glassets bruddspenning [MPa]

E er glassets elastitetsmodul [MPa]

β er lineær termisk ekspansjonskoeffisient [$9,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]

T_∞ er høyeste temperatur på den oppvarmede glassflaten [$^\circ\text{C}$]

T_0 er temperaturen på den isolerte delen av vinduet [$^\circ\text{C}$]

Bruddspenningen til glasset antas å være 47 MPa i henhold til Michael Skelly, og elastitetsmodulen 74,5 MPa i henhold til verdier oppgitt fra SINTEF [33]. Temperaturen på glasset som er under den isolerte delen antas å være 20 °C [293K]. Ved å løse *Formel 4.3* med hensyn på $T_\infty - T_0$ er resultatet at glasset tåler en maksimal temperaturforskjell på 66°C. Dette vil si at ved 20 °C starttemperatur så vil glasset få brudd ved 86 °C.

Denne modellen for vindusbrudd er det knyttet visse usikkerheter til. Dersom det benyttes vinduer med flere lag vil det den overnevnte formelen kun gjelde for det innerste glasset slik at glassbrudd på de resterende glassene vil inntreffe senere. Dersom det er kaldt ute vil glasset ha en temperatur som er under den antatte temperaturen på 20°C noe som medfører at det tar kortere tid før spenningen som fører til vindusbrudd oppstår. En annen faktor som spiller inn er strålingsintensiteten. Dersom varmestrålingen er sterk, vil glasset kunne bli varmet opp så raskt at brudd vil inntreffe momentant. Det motsatte gjelder dersom vinduet opplever en treg oppvarming. Defekter i form av mikrosprekker i glassflaten vil kunne ha en negativ innvirkning på den tillatte spenningen i glasset som igjen vil føre til et raskere brudd. Beregningen ovenfor benyttes selv om det finnes flere usikkerheter. Grunnen til dette er formelen er basert på mange forsøk fra flere forskere der et valideringsarbeid foreligger.

Ved en reel brann vil deler av glasset kunne stå igjen i vindusrammen slik at brannen blir delvis underventilert [31]. Dette er en usikkerhet som ikke er mulig å forutse eller beregne seg frem til. Det

velges derfor å anta at hele glasset knuser slik at brannen får maksimalt med lufttilførsel, som igjen vil gi en høyere branneffekt.

Følgende bruddkriterier er oppgitt i HO-3/2000:

- *Enkeltglass: 40 °C overtemperatur*
- *Dobbeltglass: 80 °C-100 °C overtemperatur*
- *Herdet glass: 200 °C overtemperatur*
- *Brannklassifisert glass: Ikke brudd*

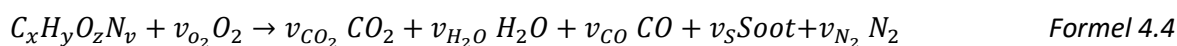
Den utregnede verdien på 86 °C er i nærheten av kriteriene oppgitt i temaveiledningen når det kommer til dobbeltglass. Temperaturen som blir benyttet i simuleringene er derfor den beregnede temperaturen på 86 °C. For å undersøke hvilken effekt et senere vindusbrudd medfører har det under kapittel 5.10 blitt simulert flere tilfeller der vindusbrudd oppstår ved 200°C, 300°C og 400°C. Disse simuleringene er ikke en del av den komparative analysen og har som hensikt å undersøke om den utregnede vindusbruddtemperaturen på 86°C gir pålitelige resultater.

For å implementere noen av de nevnte usikkerhetene vil det simuleres scenarioer der glassflaten i vinduet fjernes for å undersøke virkningen et tidlig vindusbrudd har på sprinkleraktivering og rømningsforholdene på svalgangen. Det vil også simuleres hvilken effekt et senere vindusbrudd vil ha rømningsforholdene. En utfyllende forklaring av scenarioene gjøres under kapittel 5.3.

4.8 Forbrenning

Forbrenning kan modelleres med to forskjellige metoder i FDS. Som en default-modell i FDS benyttes modellen "mixing controlled". Denne modellen antar, som tidligere nevnt, en uendelig rask blanding av oksygen og brensel som kun er avhengig av blandingen av de to komponentene. Modellen antar også et enkelt brensel som kun består av Karbon, Hydrogen, Oksygen og Nitrogen som medfører en redusert simuleringstid. Det andre alternativet er en reaksjon som kalles "finite-rate" som benytter seg av en Arrhenious modell. Denne metoden krever en liten cellestørrelse som igjen medfører en forlenget simuleringstid [21].

Forbrenningen i denne oppgaven defineres som "mixing controlled". Dette er modell som er på formen skrevet i *Formel 4.4*. Modellen antar at forbrenningen kun består av C, H, O og N som reagerer med oksygen i et steg og danner de tilhørende stoffene som vist i formelen.



Polyuretan er materialet oppgitt i standarden SN-INSTA/TS 950:2014 ved beregning av en designbrann. For å definere denne forbrenningen i FDS trengs den kjemiske formelen for brenselet sammen med produksjonen av sot og CO. I denne oppgaven benyttes Polyuretan GM27, med den kjemiske formelen $CH_{1.7}O_{0.30}N_{0.08}$, som brensel der materialegenskapene er hentet fra SFPE [2]. For utregningen FDS gjennomfører av formelen henvises det til FDS User's guide [21]. Egenskapene til materialet og den tilhørende forbrenningsreaksjonen er vist under Vedlegg B.

4.8.1 Sotproduksjon

Sotproduksjonsraten er et tall på hvor stor andel av brenselet som blir omgjort til sotpartikler og er en faktor som må spesifiseres i den overnevnte formelen. Standarden SN-INSTA/TS 950:2014 angir en sotproduksjon på henholdsvis 0,01 g/g og 0,1 g/g for treverk og polyuretan. I denne oppgaven benyttes materialet polyuretan i forbrenningen slik at sotproduksjonsraten vil være 0,1 g/g. I realiteten ville forbrenningen bestått av en blanding av flere ulike materialer slik at sotproduksjonen ville vært noe lavere enn ved å anta 100% polyuretan. Sotproduksjonsraten er et tall som er umulig å beregne korrekt dersom analysen skal være gjeldene for flere byggverk. Årsaken til dette er at det finnes mange ulike produkter som en beboer vil fylle leiligheten med. Det stiles krav i TEK10 om minimumskrav på innvendige kledninger. For å kunne påvirke sotproduksjonsraten må det det også stilles krav til hvilke produkter som er tiltatt å fylle leiligheten med. I denne oppgaven er det derfor valgt en høy verdi for å kunne inkludere de fleste brannlasttilfeller som måtte forekomme i en generell leilighet.

Sikten er bestemt av ulike parametere som fører med seg en større usikkerhet i beregningene. I FDS er det 3 parametere som bestemmer sikten:

1. SOOT_YIELD. Denne verdien er definert som andelen av brenselet som blir omgjort til sot. Denne verdien er som nevnt ovenfor definert som 0,1 g/g.
2. MASS_EXTINCTION_COEFFICIENT. Denne verdien angir lysabsorberingen til røyken. Her benyttes defaultverdien på $K_m = 8700 \text{ m}^2/\text{kg}$, som anbefales ved forbrenning av tre og plastprodukter [21].
3. VISIBILITY_FACTOR. Denne verdien er avhengig av hvilken type objekt som observeres gjennom røyken. Denne verdien settes lik defaultverdien på $C=3$ som tilsvarer en verdi for et lysreflekterende skilt [15].

4.8.2 Varmeavgivelse

For å bergene varmeutviklingen til forbrenningen benyttes en kalkulator utarbeidet av Daniel Swenson ved Thunderhead Engineering som benytter de overnevnte antakelsene for forbrenningen [35]. Forbrenningsvarmen er i oppgaven bestemt av mengde energi per mengdeenhet oksygen der defaultverdien 13.100 kJ/Kg benyttes. Resultatet er at varmeutviklingen i forbrenningen er 23.3 MJ/kg. Denne verdien er i henhold til standarden SN-INSTA/TS 950:2014 som viser til en verdi på 23 MJ/Kg for Polyuretan.

4.9 Brannvekst

Brannveksten er kontrollert av kjemien til brenselet og hvilken geometri og sammensetning det har. En brann som øker i energi eller varme over tid kan bli sett på som voksende. Voksende branner har som regel tilgang på mer luft enn det som trengs i forbrenningen og vil vokse frem til enten luften eller brenselet begrenses. Vekstfasen til brann er ofte definert til tiden det tar å forbrenne 80% av det tilgjengelige brenselet [36]. I denne oppgaven vil starten av brannforløpet være den styrende faktoren for rømning. Det undersøkes derfor om forholdene vil overskride de angitte tålegrensene før en eventuell brenselskontrollert brann inntreffer.

Å definere en brann er ofte den vanskeligste delen i en brannsimulering. Grunnen til dette er at brannveksten er avhengig av de termiske egenskapene til de omkringliggende materialene. En annen grunn er at selv om alle faktorene som er med i simuleringen er godt definert, vil begrensninger i

de underliggende algoritmene og oppløsningen på beregningsdomenet kunne gi et unøyaktig resultat [21].

I FDS er en brann en spesifikk randbetingelse som er definert på en flate. Det finnes to måter å definere dette [21]:

1. Materialer og væsker kan modelleres ved å kun spesifisere de relevante egenskapene i forbrenningen. Den enkleste metoden bruker en varmeavgivelsesrate per arealenheter (HRRPUA). Denne metoden kan ses på som å kun definere en brannkilde med konstant varmeavgivelse og en gitt forbrenningsreaksjon.
2. Den andre metoden kallen *Heat of reaction*. Her defineres ulike forbrenningsreaksjoner med tilhørende forbrenningsvarme for de ulike materialene. Denne metoden vil skape et mer realistisk bilde av brannen men krever også en nøyaktig input på de ulike egenskapene til materialene.

I denne oppgaven velges det å benytte en standardisert generell modell for brannvekst som omtales som en t^2 -brann. Hensikten med å bruke standardiserte brannkurver er å kunne etablere et felles sammenligningsgrunnlag for ytelseevnen ved brannpåvirkning i tillegg til å forenkle dimensjoneringsprosessen.

I stedet for å bruke materialeegenskapene direkte for å modellere brannveksten, modelleres veksten direkte med en gitt varmeavgivelsesrate. En " t^2 -brann" er en brann som kan bli sett på akselererende med en konstant varmeavgivelse per arealenheter. Denne brannmodellen er definert ved *Formel 4.5* [37].

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

Formel 4.5

Der:

\dot{Q} er varmeavgivelsen [kW]

α er Brannvekstskonstant [kW/s²]

t er tiden [s]

t^2 -branner er følger en kvadratisk brannvekst. Dette vil si at når tiden dobles, vil energien bli fire ganger større. Brannvekstskonstanten er relatert til den forventede hastigheten på brannutviklingen. Verdiene i Tabell 4.2 er hentet fra H0-3/2000, som henviser til NFPA. Tabellen viser forskjellige veksthastigheter med tilhørende brannvekstskonstant [38]. Referansetiden er tiden det tar å nå 1000 kW.

Tabell 4.2. Eksempler på brannveksthastigheter

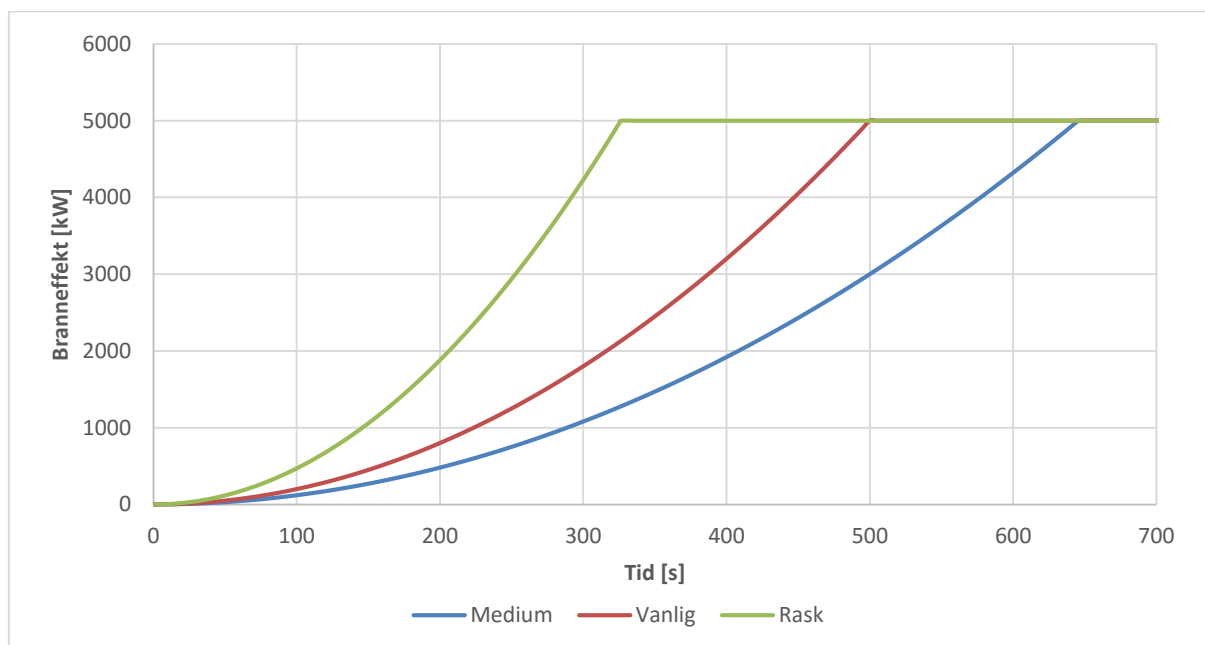
| Veksthastighet | $\alpha \left[\frac{kW}{s^2} \right]$ | Referansetid, t_g [s] | Eksempler på lokale |
|----------------|--|-------------------------|------------------------------------|
| Sakte | 0.003 | 600 | Tettpakkede treprodukter |
| Medium | 0.012 | 300 | Boligbygninger |
| Rask | 0.047 | 150 | Hoteller, skoler og kontorer |
| Ultra-rask | 0.190 | 75 | Klesbutikker, underholdningssentre |

Som Tabell 4.2 viser, benytter NFPA seg av en "medium" brannvekst når det kommer til boliger. Den norske temaveiledningen HO-3/2000 klassifiserer bolig med en "vanlig" brannvekst der brannveksttiden t_g er 225 sekunder. Dette tilsvarer en brannvekstskonstant på 0,020 kW/s². Sammenlignet med Tabell 4.2 befinner den norske definisjonen seg mellom "medium" og "rask" i definisjonen fra NFPA. Til sammenlikning angir det svenske regelverket, i sine råd om analytisk brannprosjektering, en brannvekstskonstant på 0,047 kW/s² [39]. Dette tilsvarer en "rask" brannvekst slik at den tilgjengelige rømningstiden vil bli kortere enn ved å benytte den norske temaveiledningen HO-3/2000.

4.9.1 Maksimal branneffekt

Den maksimale branneffekten er et resultat av graden av ventilasjon og hvilken brannlast som befinner seg i rommet i tillegg. For brannlasten, vil det verst tenkelige tilfellet analyseres for å sikre de verst tenkelige rømningsforholdet på svalgangen. Samtidig vil de fleste byggverkene som faller innunder problemstillingen inkluderes. Som en øvre grense benyttes en branneffekt på 5000 kW. Denne grensen er den oppgitte verdien fra det svenske regelverket [39]. I tillegg til dette vil 5000 kW være i nærheten av de tidligere beregnede ventilasjonskontrollerte branneffektene beregnet i kapittel 4.6.

På grunn av den ulike praksisen for brannvekst i ulike landene, velges det å inkludere to av de overnevnte brannkurvene ovenfor i oppgaven. Brannkurvene som velges omtales videre som "vanlig" og "rask" En fremstilling av de ulike brannkurvene er vist under i Figur 4.4.



Figur 4.4. Branneffekt [kW] som funksjon av tiden [s]

Brannen i FDS defineres i denne oppgaven gjennom en varmeavgivelse per arealenhet (HHRPUA-Heat Release Per Unit Area). Arealet brannen strekker seg over er satt til å være 3,6 m² (1,8 meter * 2 meter) for å representere et typisk sengeareal. Som øvre grense benyttes den spesifiserte verdien på 5000 kW fra det svenske regelverket som vil gi $Q_{maks}=1389 \text{ kW/m}^2$. På grunn av at brannkurven representerer en brannlast for hele rommet, er brannen plassert i en høyde på 0,2 meter i senter av rommet. Høyden 0,2 meter er valgt for å få brannen opp av gulvet som vil gi et mer realistisk bilde av brannforløpet.

4.9.2 Simuleringstid

På grunn av at de scenarioene vil ha ulik tid til den maksimale branneffekten er nådd vil de ulike scenarioene ha forskjellige simuleringstider. Simuleringstiden for de ulike scenarioene er satt til å være lenger enn tiden til den maksimale branneffekten er nådd. Dette har blitt gjort for å simulere forholdene på svalgangen når branneffekten er konstant. Tabell 5.3 i kapittel 5.3 viser tiden til den maksimale branneffekten er nådd i tillegg til den angitte simuleringstiden for de ulike scenarioene.

4.10 Sprinkleranlegg

Det dimensjonerende sprinkleranlegget som brukes spesifiseres i VTEK10 som "NS-INSTA 900 type 2". Dette er et sprinkleranlegg som er beregnet for byggverk til boligformål med høyst åtte etasjer og en kjelleretasje. Arealer avsatt til boligformål skal ha hurtigløsende sprinklere med en aktiveringstemperatur på 57°C og en RTI-verdi på $50 \sqrt{m \cdot s}$. [5]. RTI er et mål på den termiske sensitiviteten og sier noe om hvor fort varme blir absorbert i sprinklerhodet. En høy RTI vil si at varme blir absorbert sakte og sprinkleren vil ha en senere aktivering.

Minstekravene oppgitt i standarden NS-INSTA 900 *Boligsprinkler Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold*, for denne type sprinkler er vist i Tabell 4.3 [11].

Tabell 4.3. Krav til sprinkleranlegg

| Minste vanntetthet [mm/min] | Antall sprinklere | Minste varighet av vannforsyning [min] |
|-----------------------------|-------------------|--|
| 2.04 | 1-4 | 30 |

Ved å benytte en konvensjonell boligsprinkler med Quick response kan strømningshastigheten regnes ved hjelp av *Formel 4.6* [11].

$$Q = K * \sqrt{p} \quad \text{Formel 4.6}$$

Der:

Q er strømningshastigheten $\left[\frac{l}{min}\right]$

K er dysekapasiteten $\left[\frac{l/min}{bar^{\frac{1}{2}}}\right]$

p er vanntrykket [bar]

Arbeidstrykket til en aktivert sprinkler skal ligge mellom 0.5 bar til 12 bar, der det minste trykket kan spesifiseres av produsent. [5] Ved å sette operasjonstrykket (p) til 0,5 bar og dysekapasiteten til 5,6 inn i *Formel 4.6*, vil strømningshastigheten bli 3,96 mm/min, som er godt innenfor kravet på 2,04 mm/min.

4.10.1 Tid til sprinkleraktivering

Usikkerhetene knyttet til sprinkleraktivering hovedsakelig på grunn av den målte varmeavgivelsesraten, RTI og aktiveringstemperaturen. Usikkerhetene knyttet til aktiveringstiden er neglisjerbar, dette på grunn av at tiden er bestemt av en trykkmåler som igjen som er avhengig av de nevnte usikkerhetene. For å estimere usikkerhetene i varmeavgivelsesraten, RTI og aktiveringstemperaturen har på temperaturen, T_{link} , på glassbulben, kan *Formel 4.7* nedenfor benyttes [24].

$$\frac{dT_{link}}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T_{gas} - T_{link}) \quad \text{Formel 4.7}$$

Der u og T_{gas} er hastigheten og temperaturen på røyklaget.

Gitt en usikkerhet i varmeavgivelsen på 7.5%, vil den tilhørende usikkerheten i røyklagstemperaturen være 5% og hastigheten på røyklaget 2.5% [24]. Når det kommer til RTI og aktiveringstemperatur er disse verdiene eksperimentelt testet der usikkerheten varierer etter hvilken testmetode som er benyttet. *Formel 4.7* ble i valideringsstudiet fra NIST integrert 1000 ganger med tilfeldig valgte verdier for røyklagstemperaturen, røyklagshastigheten, RTI og aktiveringstemperatur. Resultatene

her viste en usikkerhet i tiden til sprinkleraktivering på 6%. Denne verdien vil bli drøftet i lys av resultatene senere i oppgaven.

4.10.2 Slokkeeffekt

NIST utviklet i 1993 *Formel 4.8* for slukkeeffekten til sprinkleranlegg. Forskerne ved NIST mener at formelen er best egnet i tilfeller der vannet kommer i kontakt med brenselet. Formelen er basert på brenning av treverk, noe som medfører at den kun fungerer for en lav fareklasse LH [\[40\]](#).

$$\dot{Q}(t) = (\dot{Q}_{act}) \exp\left(\frac{-t}{3.0(\dot{w}'')^{1.85}}\right) \quad \text{Formel 4.8}$$

Der:

\dot{Q} er slukkeeffekten [kW]

\dot{Q}_{act} er branneeffekten ved aktivering [kW]

t er tiden etter aktivering [s]

\dot{w}'' er vanntettheten $\left[\frac{mm}{min}\right]$

Det svenske Boverket angir i sine råd at [\[39\]](#):

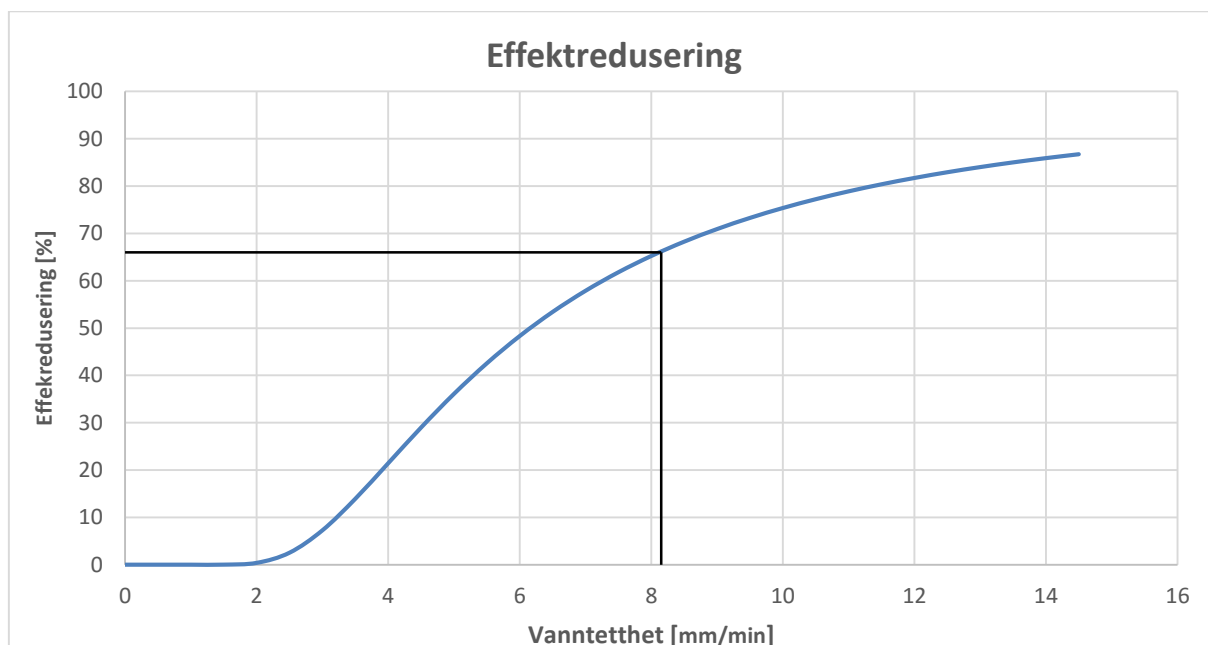
Om effektutviklingen ved aktivering av et automatisk vannsprinkleranlegg er boligsprinkler er høyst 5 MW; kan effektutviklingen reduseres følgende:

- Etter sprinkleraktivering holdes effektutviklingen konstant i 1 min
- Deretter minskes effekten til 1/3 av effekten ved tidspunkt for aktivering.
- Effekten holdes deretter på dette nivået.

Dette vil si at ved sprinkleraktivering vil det være en konstant nedgang på effektutviklingen i 60 sekunder etterfulgt av en konstant effektutvikling som er 1/3 av effekten ved før aktivering..

En studie utført av SINTEF underbygger det som blir skrevet i det svenske regelverket: "Etter sprinkleranlegget er bitt aktivert, forutsetter en at utviklet varmeeffekt til brannen faller til en tredel av verdien før sprinkleranlegget utløses" [\[41\]](#).

Ved å benytte *Formel 4.8* kan effektreduseringen vises som funksjon av vanntettheten. Dette er illustrert i Figur 4.5 nedenfor. En effektredusering på 66%, som omtalt i Boverket og SINTEF, tilsvarer en vanntetthet på 8.15 mm/min. Ved å benytte *Formel 4.6* tilsvarer dette et operasjonstrykk på 2.11 bar.

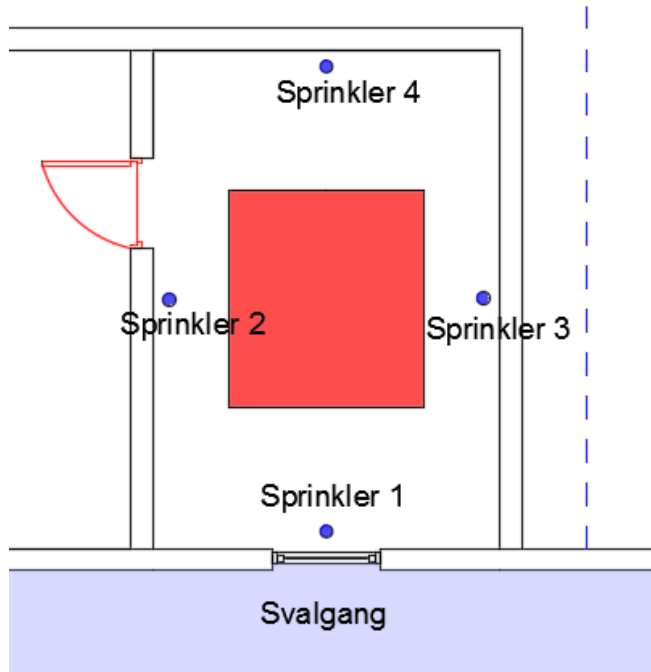


Figur 4.5. Effektredusering [%] som funksjon av vanntetthet [mm/min]

I denne oppgaven velges det å benytte antakelsen om en tredjedel reduseringen av varmeeffekten ved sprinkleraktivering. For å simulere dette, vil brannkurven manipuleres til å følge en gitt kurve som er bestemt av tiden og effekten ved sprinkleraktivering. For å simulere dette i FDS blir det definert en varmedetektor med like egenskaper som et sprinklerhode. Modellen blir først simulert uten effekt av sprinkler for å finne tiden frem til sprinkleraktivering, deretter blir simuleringen utført på nytt med den nevnte effektreduseringen som sprinkleranlegget vil påføre. For tilfellene der sprinkleranlegget løses ut og ikke kontrollerer brannen vil branneffekten være lavere og rømningsforholdene bedre enn ved sprinklersvikt. Dette er i denne oppgaven ikke simulert på grunn av de mange usikkerhetene som ligger til grunn hvilken slukningseffekt sprinkleranlegget vil ha.

4.10.3 Plassering av sprinklerhodene

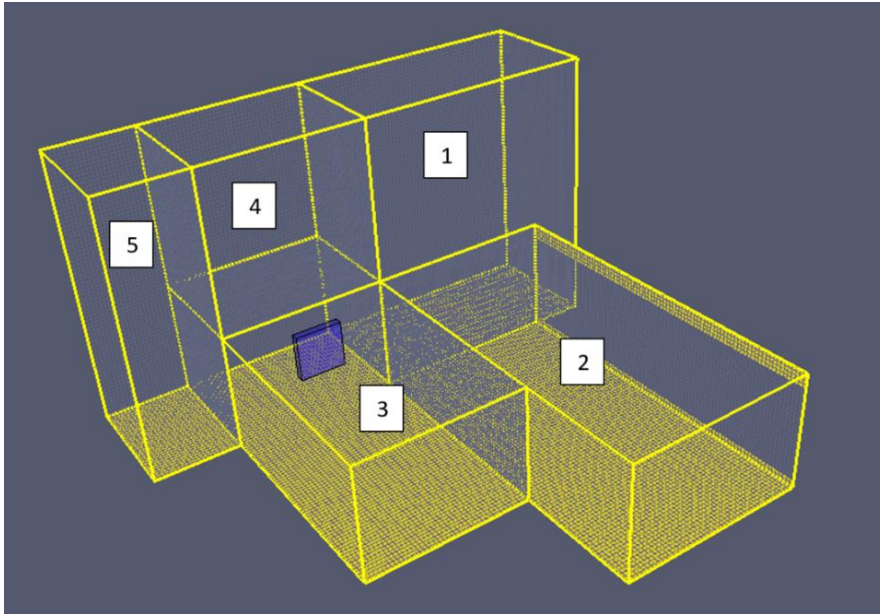
Det blir plassert fire detektorer i rommet for å undersøke hvilken plassering som gir den raskeste tiden til sprinkleraktivering. Plasseringen er vist nedenfor Figur 4.6. Detektoren befinner seg 100 mm horisontalt fra senter av veggen og 40 mm vertikalt ned fra himlingen. Dette i henhold til standarden NS-INSTA 900-1:2013 *Boligsprinkler Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold*. [11].



Figur 4.6. Plassering av sprinklerhodene

4.11 Beregningsdomene

Som forklart tidligere under kapittel 3.6, så deler en feltmodell hele beregningsdomenet inn i små kontrollvolum som består av et cellesystem. Ved bruk av feltmodeller og FDS er dette en viktig prosess fordi både nøyaktigheten av simuleringen og prosesseringstiden blir påvirket av den valgte størrelsen på cellene. En halvering av cellestørrelsen reduserer unøyaktigheten med 4 samtidig som det øker simuleringstiden med 16. Den optimale cellestørrelsen er gitt ved $2^k \times 3^m \times 5^n$, der k, m og n er heltall [21]. Grunnen til dette er at FDS benytter seg av en matematisk modell som kalles *Poison Pressure Solver* som er basert på *Fast Fourier Transform*. For mer informasjon tilknyttet *Poison Pressure Solver* og *Fast Fourier Transform* henvises det til FDS Users guide [21]. En tommelfingerregel er at de ulike cellesystemene i en modell skal inneholde like mange celler. Dette betyr at et lite mesh bør ha en mindre cellestørrelse enn et stort mesh. En mindre cellestørrelse gir også en større nøyaktighet i beregningene. Når en modell skal deles inn i et cellesystem, burde det derfor tas utgangspunkt i området rundt brannen for å så bygge seg utover med en stadig grovere cellestørrelse. Det anbefales også at grensene mellom cellesystemene skal plasseres utenfor områder der kritisk informasjonsutveksling finner sted [21]. I denne oppgaven er det rømningsforholdene på svalgangen som står i fokus, et kritisk område i modellen vil da være vinduet som vender mot svalgangen. Figur 4.7 viser en oversikt over inndelingen av cellesystemene. Som Figur 4.7 viser så er beregningsdomenet i brannrommet kontinuerlig forbi yttervegg for å hindre eventuelle feil i informasjonsutvekslingen ved vinduet. Modellen består av i alt fem cellesystemer.



Figur 4.7. Inndeling av modellen i mesh

Tabell 4.4 viser en oversikt over celleinndelingen av modellen med antall celler og cellestørrelsen for de ulike meshene. Som tabellen viser så har mesh nr. 4 og 5 et lite antall celler sammenlignet med mesh nr. 1. Ved å benytte et grovere mesh på deler av modellen vil det bli en skjevfordeling mellom antall celler, som vil gi en liten gevinst i simuleringstid og en mer unøyaktig modell. Cellestørrelsen 0,1 meter benyttes derfor for alle meshene.

Tabell 4.4. Antall celler og cellestørrelser i modellen

| Mesh nr. | Antall celler | Cellestørrelse [m] |
|--------------|---------------|--------------------|
| 1 | 142 848 | 0,1 |
| 2 | 129 600 | 0,1 |
| 3 | 113 400 | 0,1 |
| 4 | 56448 | 0,1 |
| 5 | 50688 | 0,1 |
| Total | 492984 | |

4.12 Sensitivitet knyttet til cellestørrelsen

For simuleringer som involverer oppdriftsdrivne brannstøyer brukes det dimensjonsløse uttrykket, D^*/dx , for å gi et mål på hvor god oppløsningen av strømningsbildet er. Her er dx størrelsen på en celle og D^* den karakteristiske brandidiameteren [m]. Forholdet, D^*/dx , kan bli sett på som antall celler som spenner over den karakteristiske brannen. Med et høyt forholdstall vil antall celler brannen befinner seg i være høyere, og nøyaktigheten til simuleringen vil øke. Den karakteristiske brandidiameteren beregnes ved *Formel 4.9* [21].

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{Formel 4.9}$$

Der:

\dot{Q} er brannens totale varmeavgivelse [kW]

ρ_{∞} er tettheten i luften [kg/m^3]

T_{∞} er omgivelsestemperaturen [K]

g er tyngdeakselerasjonen [m/s^2]

FDS User's guide henviser til en valideringsstudie der et forholdstall mellom 4 og 16 på forholdet D^*/dx har gitt gode resultater [21]. En rapport skrevet av Fredrik Nystedt og Håkan Frantzich anbefaler en verdi på mellom 10 og 20 nærme brannen [42]. Selv om forholdstallet ligger mellom de anbefalte verdiene fra de overnevnte kildene, burde det uansett gjennomføres en sensitivitetsstudie for å undersøke om celleinndelingen er fin nok og om informasjonsutvekslingen mellom meshene er god. Dette gjøres ved å starte med en grov celleinndeling for å deretter minske cellestørrelsen flere ganger til de ønskede parameterne ikke endres for mye for hver inndeling. Prosessen med å finne en passende størrelse på cellene omtales som en sensitivitetsanalyse og er en vurdering som må gjøres for hvert enkelt tilfelle. Størrelsen på cellene i et mesh må ses i sammenheng av hensikten til simuleringen og hvilke resultater som er ønskelig å få. I denne oppgaven er det rømningsforholdene på svalgangen som er hovedhensikten med simuleringen.

Tabell 4.5 nedenfor viser de to cellestørrelsene som er simulert i sensitivitetsanalysen og det tilhørende forholdstallet beregnet etter *Formel 4.9*. Tabellen viser også simuleringstiden for de to cellestørrelsene.

Tabell 4.5. Forholdstall [D^*/dx] og simuleringstid på bakgrunn av cellestørrelsen [m]

| Cellestørrelse [m] | Forholdstall D^*/dx | Simuleringstid |
|--------------------|-----------------------|-------------------------|
| 0.1 | 18 | 24 timer og 25 minutter |
| 0.2 | 9 | 2 timer og 45 minutter |

Som tabellen antyder, så har begge cellestørrelsene et høyt forholdstall sammenlignet med anbefalingene fra NIST.

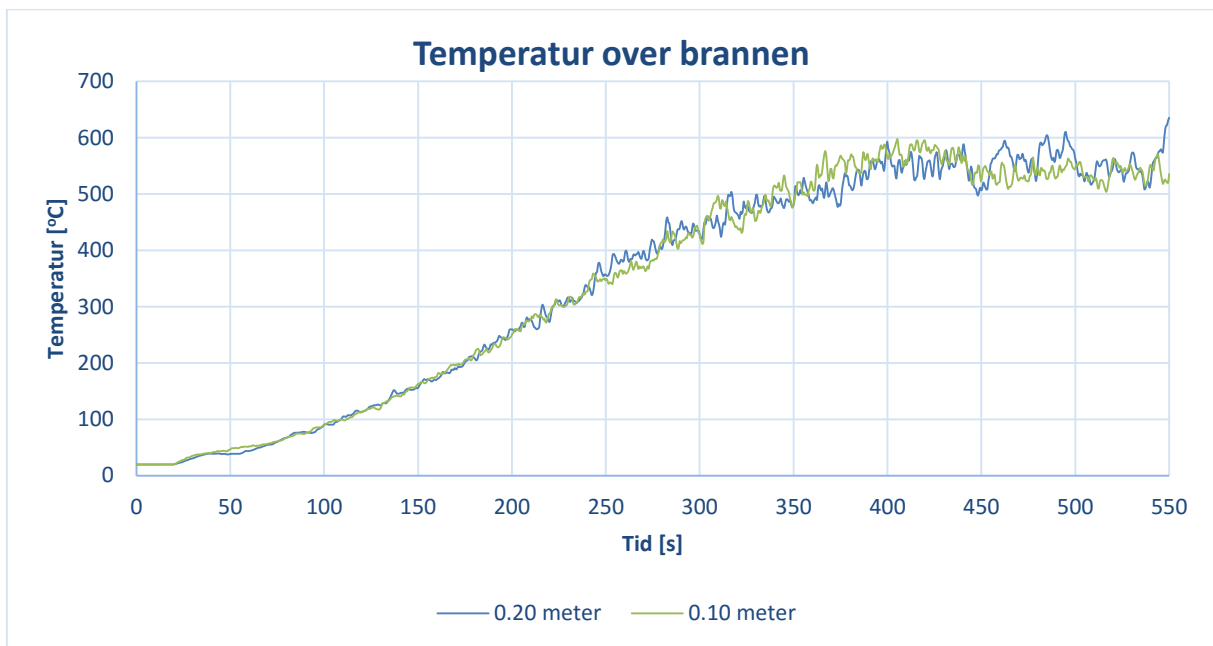
I de ulike scenarioene som simuleres benyttes to forskjellige brannvekster. Disse brannvekstene vil føre til to ulike sprinklerkontrollerte branneffekter. En brann som blir utsatt for vann fra et sprinkleranlegg vil få en lavere maksimal branneffekt, som medfører at det kreves et finere oppløsning på cellene i FDS. For en brann med en "vanlig" brannvekst, er branneffekten ved sprinkleraktivering 328 kW. Dette gir ved en cellestørrelse på 0,1 meter faktoren $D^*/d_{xyz}=6$. Dette er innenfor anbefalingen fra NIST som sier at faktoren bør befinne seg mellom 4 og 16. For brannen som er oppgitt til å være "rask" vil branneffekten ved sprinkleraktivering være 429.5 kW. Dette gir ved en cellestørrelse på 0,1 meter faktor $D^*/d_{xyz}=6.8$. Denne verdien er i likhet med en "vanlig" brann innenfor anbefalingen fra NIST. Det utføres derfor ingen sensitivitetsanalyse for disse tilfellene.

4.12.1 Resultater fra sensitivitetsanalysen

De påfølgende underkapitlene tar for seg resultatene fra sensitivitetsanalysen på cellestørrelsen. Brannen som benyttes er den som omtales "vanlig" og vindusdimensjonen er satt til 1.2 x 1.2 meter.

Temperatur over brannen

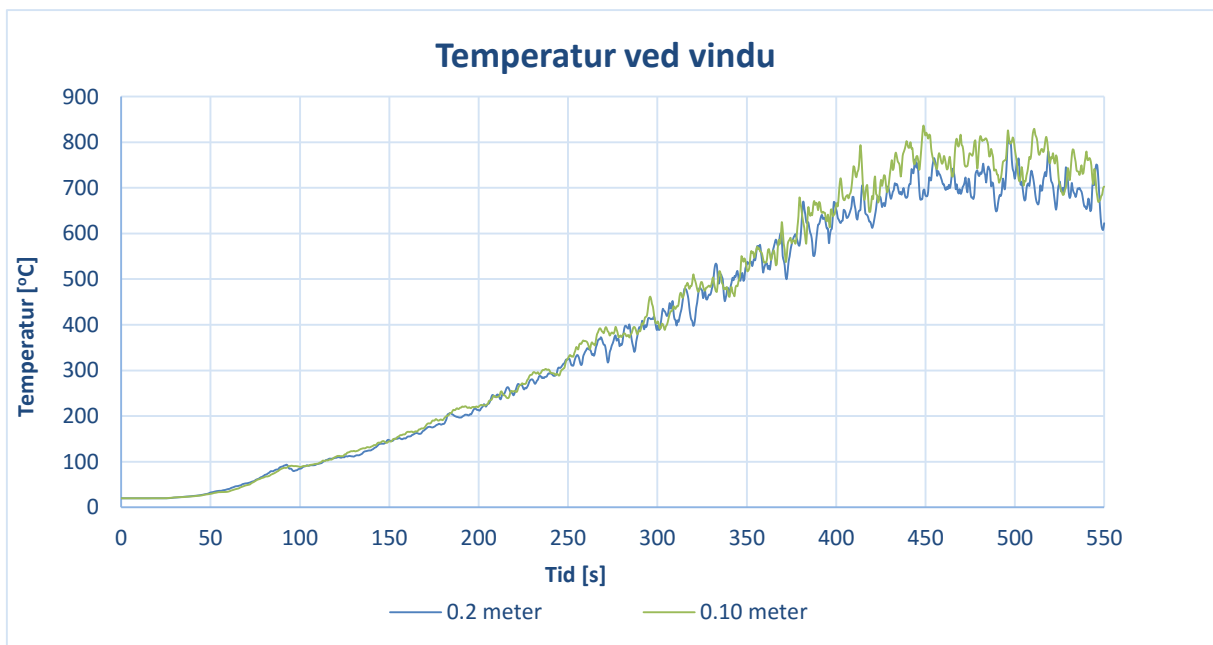
Figur 4.8 viser temperaturen 2,3 meter over brannen. Som grafen illustrerer, er det liten forskjell mellom de forskjellige cellestørrelsene i begynnelsen av brannforløpet. Når tiden passerer 250 sekunder er det større svingninger med den grove celleinndelingen.



Figur 4.8. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] over brannen

Temperatur ved vinduet

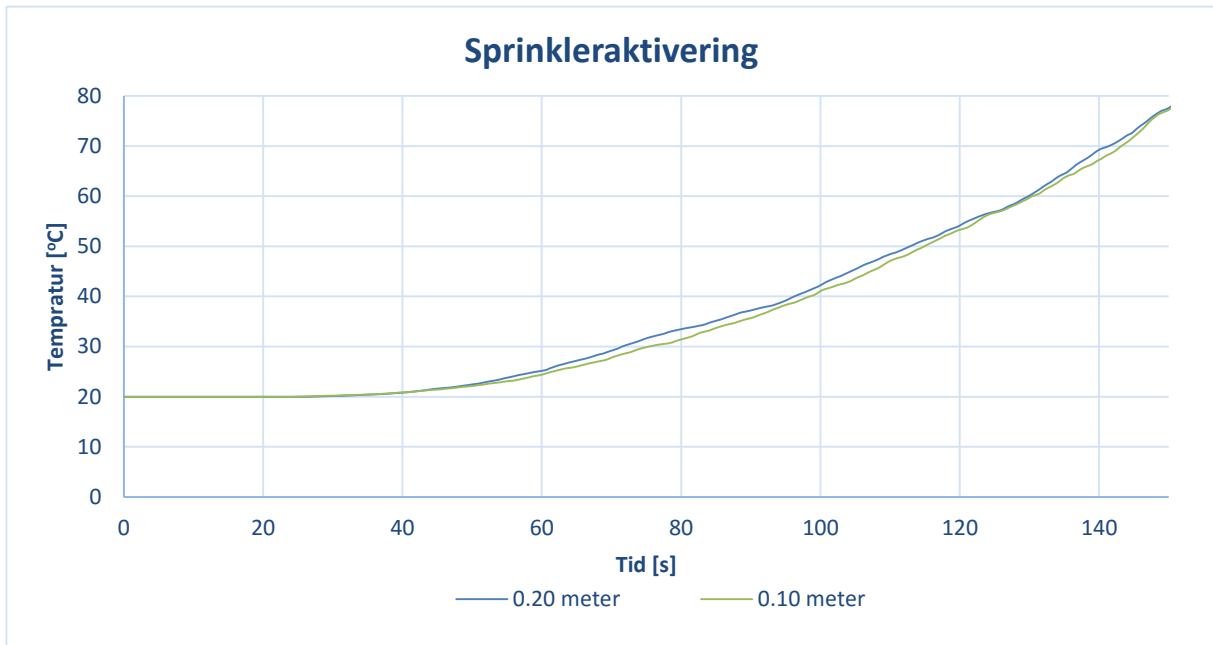
Temperaturen ved vinduet er vist nedenfor i Figur 4.9. Dette målepunktet er samme målepunktet som bestemmer vindusbruddet. Den kritiske temperaturen er her 86°C som vil medføre vindusbrudd i modellen. Tiden til vindusbrudd er 88 sekunder for cellestørrelse $d_{xyz}=0,2$ meter og 91 sekunder for cellestørrelse $d_{xyz}=0,1$ meter. Denne differansen er kun 3 sekunder er neglisjerbar i lys av oppgavens hensikt.



Figur 4.9. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] på innsiden av vinduet

Sprinkleraktivering

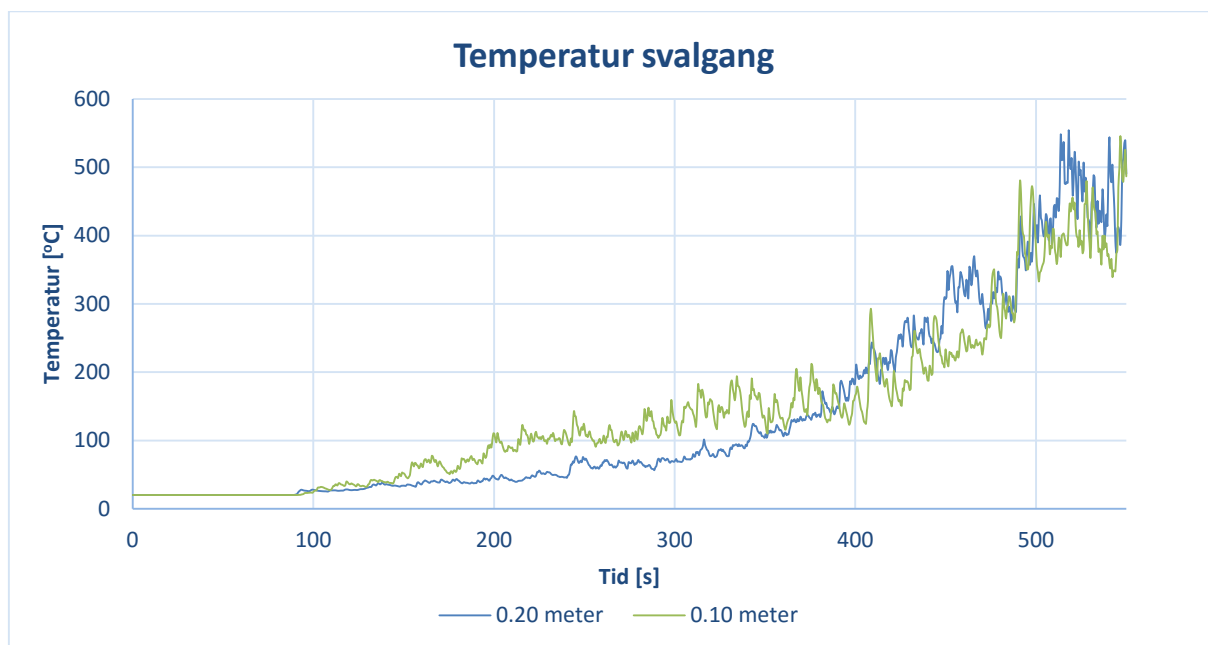
For tiden til sprinkleraktivering er det liten forskjell mellom de to celledørelsene. Figur 4.10 nedenfor er data hentet fra en sprinkler som står plassert lengst fra vindu. Tiden til aktivering er 125 sekunder for $d_{xyz}=0,2$ m og 126 sekunder for $d_{xyz}=0,1$ meter. Dette er også et forhold som er såpass lite til at det kan forsvares å bruke en den grove inndelingen.



Figur 4.10. Tiden [s] til sprinkleraktivering

Temperatur svalgang

Figur 4.11 nedenfor viser temperaturen på svalgangen i en høyde på 1,7 meter. Her er det klare forskjeller mellom de ulike celledørelsene på slutten av simuleringen. Som grafen viser, så vil det ved å benytte en celledørelse på d_{xyz} på 0,20 meter, simuleres en lavere temperatur i starten av brannforløpet. Når tiden passerer rundt 400 sekunder vil den grove celleinndelingen vise en høyere temperaturen enn den finere celleinndelingen.



Figur 4.11. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] på svalgangen

Oppsummering av sensitivitetsanalysen

Et av formålene med oppgaven er å undersøke rømningsforholdene ved ulike vindusdimensjoner. Ved å benytte cellestørrelse $d_{xyz}=0,20$, må dører og vinduer ha en størrelse som medfører at en uønsket forskyving ikke finner sted. Dette vil si at dimensjonene på vinduer og dører må kun må være partall (eller oddetall). For å ikke ligge under begrensningen ved at alle dimensjoner må passe med celleinndelingen $d_{xyz}=0,2$ meter, velges det å benytte en cellestørrelse på $d_{xyz}=0,10$ meter. Ved å gjøre dette kan det velges dimensjoner som bedre passer oppgavens hensikt. Selv om simuleringstiden økes betraktelig er friheten til valg av geometri sett på som et viktigere punkt. I tillegg til dette spiller branneffekten ved sprinkleraktivering inn som en avgjørende faktor. Ved å benytte en cellestørrelse på $d_{xyz}=0,2$ meter vil forholdstallet D^*/dx befinne seg under den laveste anbefalingen på $D^*/dx = 4$. Konklusjonen blir derfor å benytte seg av en cellestørrelse på $d_{xyz}=0,10$ meter.

5 Simuleringer

For å forsikre seg om at resultatene er innenfor de ønskelige feilmarginene benyttes et sett at inndata som holdes fast ved alle simuleringene. Tabell 5.1 nedenfor viser parameterne som har blitt benyttet for de ulike scenarioene. Parameterne for turbulens og stråling er de samme som de som ble benyttet i det tidligere nevnte valideringsstudiet av FDS utført av U.S.NRC [28].

Tabell 5.1. Sentral inndata benyttet i FDS

| Brannen | |
|---|--|
| Brannutvikling, $Q(t)$ | Brannen følger en t^2 -utvikling som omtalt under kapittel 4.9. De ulike vekstratene er spesifisert under de ulike scenarioene. |
| Maksimal branneffekt | For de usprinklede modellene er $Q_{maks}=5000kW$. For de sprinklede modellene bestemmes Q_{maks} av tiden til sprinkleraktivering. Dette blir spesifisert under hvert scenario. |
| Brannkonfigurasjon | Brannen er plassert midt i soverommet på alle modellene med et areal på $3,6 m^2$. |
| Andel forbrent materiale som sot Y_s | Alle scenarioer: $Y_s=0,10 g/g$ |
| Forbrenningsenergi per masse konsumert oksygen, ΔH_{CO_2} | Alle scenarioer: $1,31 \times 10^6 J/g$ |
| Brensel | Alle scenarioer: Polyuretan GM27 |
| Vindusbrudd | Scenarioer som involverer vindusbrudd, har vindusbrudd ved $88^\circ C$ |
| Stråling | |
| Strålingsfraksjon | Default=0,35 |
| Antall vinkler | Default=100 vinkler |
| Modell for absorpsjonskoeffisient | Grå gass |
| Turbulens | |
| Modelleringsteknikk | Large Eddy Simulation (LES) |
| Modell for overføring av energi | Smagorinsky-modell ($C=0,2$) |
| Modellen | |
| Antall mesh | 5 |
| Totalt antall celler | 492 984 celler |
| Omsluttende flater | INERT |

5.1 Rømningstid

For å undersøke om personer blir utsatt for kritiske forhold under rømning må forholdet mellom nødvendig og tilgjengelig rømningstid sammenlignes. Differansen mellom disse kalles for sikkerhetsmarginen og er et uttrykk for sikkerhetsnivået til personene som oppholder seg i byggverket.

Det står skrevet i TEK10 at "Den tiden som er tilgjengelig for rømning, skal være større enn den tiden som er nødvendig for rømning fra byggverket. Det skal legges inn en tilfredsstillende sikkerhetsmargin." [4]. Ved beregning av disse tidene vil det alltid forekomme usikkerheter som må vurderes. Disse usikkerhetene må i henhold til VTEK "legges til grunn ved vurdering av hvilken sikkerhetsmargin som er nødvendig" (§11-11 annet ledd). Det nødvendige sikkerhetsnivået i denne oppgaven anses som tilfredsstillende dersom analysebyggverket har minst samme sikkerhetsnivå som referansebyggverket. Dette i henhold til NS 3901.

5.1.1 Nødvendig rømningstid

Den nødvendige rømningstiden regnes ut ved *Formel 5.1* som vist nedenfor [46].

$$t_{\text{evakuering}} = t_{\text{deteksjon}} + t_{\text{reaksjon}} + t_{\text{forflytning}} \quad \text{Formel 5.1}$$

Deteksjon er tiden fra brannstart frem til brannen er detektert eller sanset. De preaksepterte ytelsene til TEK10 for denne type byggverk sier at "ved utløst slukkeanlegg skal alle varsles" (TEK10 §11-12 annet ledd). Dette vil si at dersom sprinkleranlegget utløses i en leilighet må alle i byggverket varsles. For våtanlegg utløses alarmanlegget i form av en alarmventil som er ømfintlig for trykkforandringer i rørsystemet. Når sprinkleranlegget utløses vil det forekomme en kontinuerlig vannstrøm i anlegget, som igjen medfører trykkendringer slik at alarmventilen utløses. For å unngå falske alarmer, utføres denne ventilen med en sikkerhetsmargin ved at mindre trykkforskjeller ikke vil løse ut alarmen. Standarden NS-EN 12259 *Faste brannslukkesystemer - Deler til sprinkler og vannspray-systemer - Del 1: Sprinkler*, angir at utsettelsestiden til alarmutløsning ikke skal være høyere enn 15 sekunder [43]. For tilfellene med sprinkleranlegg installert, vil deteksjonstiden være denne utsettelsestiden summert med tiden til sprinkleraktivering.

For tilfellene der soverommet ikke er sprinklet er deteksjonstiden for brannen noe mer usikker. En anbefaling gitt til §11-2 annet ledd i veiledningen til TEK 10 sier at: "For boligbygninger, jf. nr. 2, anbefales det at alarm utløst i leilighet som ikke er kvittert ut i løpet av 2 minutter, varsler alle. (...)" [5]. På bakgrunn av dette settes responstiden til 2 minutter for scenarioene som ikke har sprinkleranlegg. H0-3/2000 oppgir ulike deteksjonstider for røykdetektorer på bakgrunn av brannveksttid og takhøyde. Verdiene som oppgis er 1 min for en brann med "vanlig" brannvekst og 0,5 min for en "rask" brannvekst. Takhøyden er her angitt til å være 3 meter. Takhøyden i denne oppgaven er 2,4 meter, slik at deteksjonstiden i realiteten vil være noe lavere. Disse verdiene summeres med den anbefalte verdien på 2 min fra veiledningen til TEK10 slik at den totale deteksjonstiden blir 2,5 min for den raske brannen og 3,0 min for den vanlige.

Reaksjonstiden kommer etter deteksjonen i rømningsforløpet og består av en fortolkningsfase og en beslutningsfase. Dette er tiden fra brannen er sanset til forflytningen starter. Reaksjonstiden er

vanskelig å forutsi på grunn av alle de menneskelige faktorene som spiller inn. En rapport utgitt av SINTEF viser til ulike reaksjonstider med tilhørende varslingsmetode. Ved sprinkleraktivering og alarmaktivering vil varslingen, i denne oppgaven, komme fra et sentralt varslingsanlegg innad i bygningen. For denne type varsling angir SINTEF en reaksjonstid på 250 sekunder [44].

Forflytningstiden er avhengig av hastigheten og avstanden beboeren må bevege seg. For å tilfredsstille kravet i TEK10 om maksimal lengde på 15 meter fra rømningsvei settes, avstanden til dette. Ved å anta en bevegelseshastighet på 1 m/s vil den totale forflytningstiden være 15 sekunder. En studie utført av Frantzych og Nilsson viser til en hastighet på 0,45 m/s ved lav siktbarhet [15]. I denne oppgaven er 1 m/s ansett til å være tilstrekkelig grunnet svalgangens utforming som tillater en delvis utlufting og den korte avstanden beboeren må forflytte seg har liten innvirkning på den totale nødvendige rømningstiden.

I denne oppgaven vil reaksjonstiden og forflytningstiden være lik for alle scenarioene. For å beregne den nødvendige rømningstiden må derfor tiden til sprinkleraktivering simuleres slik at deteksjonstiden kan beregnes. Den nødvendige rømningstiden for de ulike scenarioene er oppsummert i slutten av kapittelet Tabell 5.14.

En sammenstilling av hvilke tider som benyttes er vist nedenfor i Tabell 5.2. Med aktiveringstid menes tiden det tar for sprinkleranlegget å løse ut.

Tabell 5.2. Nødvendig rømningstid for brannveksttilfellene

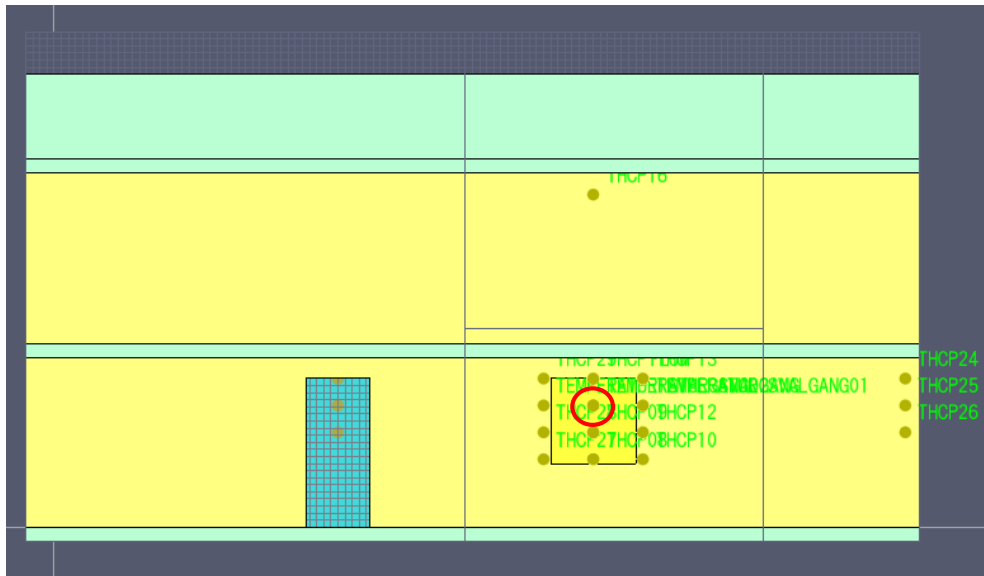
| Brannvekst [kW/s ²] | Scenario | Deteksjon [s] | Reaksjon [s] | Forflytning [s] | Nødvendig rømningstid [s] |
|---------------------------------|----------------|--------------------|--------------|-----------------|---------------------------|
| "Vanlig" 0.020 | Uten sprinkler | 150 | 250 | 15 | 415 |
| | Med sprinkler | Aktiveringstid +15 | 250 | 15 | 280 + aktiveringstid |
| "Rask" 0.047 | Uten sprinkler | 180 | 250 | 15 | 445 |
| | Med sprinkler | Aktiveringstid +15 | 250 | 15 | 280 + aktiveringstid |

5.1.2 Tilgjengelig rømningstid

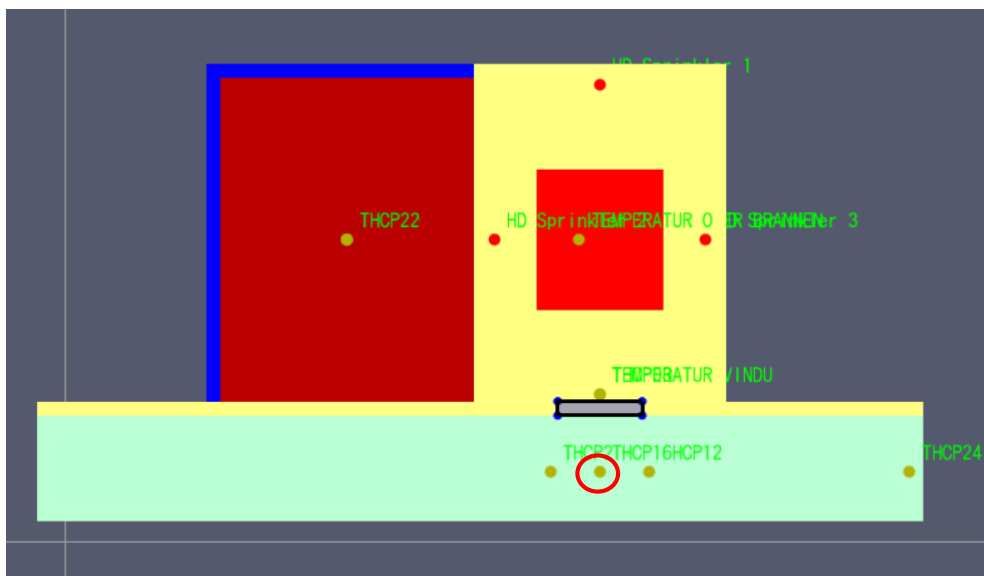
Den tilgjengelige rømningstiden er bestemt av tiden det tar før kritiske forhold oppstår på svalgangen. De kritiske forholdene som vil være en referanse for den tilgjengelige rømningstiden er temperatur, stråling og sikt. Verdiene er her satt til 150°C og 10 kW/m² for temperatur og stråling, i henhold til de oppgitte verdiene omtalt under kapittel 3.5.3. For sikten vil ikke rømningstidene tallfestes på lik linje som temperaturen og sikten, men kommenteres i lys av virkningen ved å benytte ulike vindusdimensjoner.

5.2 Målepunkter

For å kunne sammenligne de ulike scenarioene har det blitt etablert et felles sett av målepunkter som har samme plassering for alle simuleringene. På svalgangen er disse punktene plassert 0,8 meter fra ytterveggen. Høyden på målepunktene varierer fra 0,9 meter til 2,1 meter. Figur 5.1 nedenfor viser plasseringen av temperaturmålerne, et tilsvarende oppsett har blitt gjort for å måle strålingsintensiteten. De høyeste verdiene for både stråling og temperatur som har innvirkning på den tilgjengelige rømningstiden befinner seg i en høyde på 1.8 meter rett utenfor vinduet. Dette punktet er uthevet i Figur 5.1 og Figur 5.2 og sammenlignes i form av grafer for de ulike scenarioene senere i kapitlet. I tillegg til dette har det blitt etablert flere snitt som viser distribueringen av ulike forhold ved brannen.



Figur 5.1. Plassering av målepunkter plan z-x



Figur 5.2. Plassering av målepunkter plan x-y

5.3 Oversikt over scenarioene

Tabell 5.3 viser en oversikt over de ulike scenarioene. I tabellen er vindusdimensjoner, brannvekst og simuleringstid spesifisert. Tabellen inneholder også kommentarer som er relevante for å forstå analysebyggverket. Det er etablert seks vindusdimensjoner som senere omtales som "V1"- "V6". Disse er etablert for å underbygge robustheten i analysen og for å undersøke eventuelle fordeler og ulemper for de ulike vindusdimensjonene. Det er antatt i scenario 1-28 at inngangsdøren til leiligheten står åpen. Dette vil medføre mer tilluft til brannrommet og en høyere branneffekt som igjen vil medføre høyere verdier.

Tabell 5.3. Oversikt over scenarioene

| Scenario nr. | Vindusdimensjon [mxm] | Brannvekstskonstant [kW/s ²] | Tid til maksimal branneffekt [s] | Simuleringstid [s] | Kommentar |
|--------------|-----------------------|--|----------------------------------|--------------------|------------------------|
| 1 | V1. 0,8x0,8 | 0,020 | 500 | 550 | |
| 2 | V2. 0,8x1,2 | 0,020 | 500 | 550 | |
| 3 | V3. 1,2x0,8 | 0,020 | 500 | 550 | |
| 4 | V4. 1,2x0,5 | 0,020 | 500 | 550 | |
| 5 | V5. 0,5x1,2 | 0,020 | 500 | 550 | |
| 6 | V6. 1,2x1,2 | 0,020 | 500 | 550 | |
| 7 | V1. 0,8x0,8 | 0,020 | 128,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 8 | V2. 0,8x1,2 | 0,020 | 128,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 9 | V3. 1,2x0,8 | 0,020 | 128,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 10 | V4. 1,2x0,5 | 0,020 | 128,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 11 | V5. 0,5x1,2 | 0,020 | 128,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 12 | V6. 1,2x1,2 | 0,020 | 128,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 13 | V1. 0,8x0,8 | 0,047 | 326,2 | 400 | |
| 14 | V2. 0,8x1,2 | 0,047 | 326,2 | 400 | |
| 15 | V3. 1,2x0,8 | 0,047 | 326,2 | 400 | |
| 16 | V4. 1,2x0,5 | 0,047 | 326,2 | 400 | |
| 17 | V5. 0,5x1,2 | 0,047 | 326,2 | 400 | |
| 18 | V6. 1,2x1,2 | 0,047 | 326,2 | 400 | |
| 19 | V1. 0,8x0,8 | 0,047 | 95,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 20 | V2. 0,8x1,2 | 0,047 | 95,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 21 | V3. 1,2x0,8 | 0,047 | 95,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 22 | V4. 1,2x0,5 | 0,047 | 95,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 23 | V5. 0,5x1,2 | 0,047 | 95,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 24 | V6. 1,2x1,2 | 0,047 | 95,6 | 250 | Sprinklerkontrollert |
| 25 | V6. 1,2x1,2 | 0,020 | 500 | 550 | Åpent vindu |
| 26 | V5. 0,5x1,2 | 0,020 | 500 | 550 | Åpent vindu |
| 27 | V6. 1,2x1,2 | 0,047 | 326,2 | 400 | Åpent vindu |
| 28 | V5. 0,5x1,2 | 0,047 | 326,2 | 400 | Åpent vindu |
| 29 | V6. 1,2x1,2 | 0,047 | 224,3 | 400 | Dør til soverom lukket |
| 30 | V5. 0,5x1,2 | 0,047 | 144,8 | 300 | Dør til soverom lukket |

5.4 Preaksepterte ytelser for scenarioene

Referansebyggverket er som forklart under kapittel 4.3 et bygg utformet i henhold de preaksepterte løsningene i veiledningen til TEK 10. De ulike scenarioene tar for seg byggverket som ved ulike scenarioer ikke vil følge veiledningen til TEK10 ved at det fravikes fra ulike preaksepterte ytelser. Det skal på bakgrunn av dette å undersøkes ved hjelp av analyse om analysebyggverket likevel tilfredsstiller kravene i TEK10 med hensyn til rømning. Nedenfor i Tabell 5.4 er det listet opp de ulike scenarioene med de tilhørende preaksepterte ytelsene som er installert eller som fravikes i analysebyggverket. Likheten mellom alle scenarioene er at sprinkleranlegget ikke er installert på svalgangen og at det ikke er montert brannklassifisert vindu i leiligheten.

Tabell 5.4. Preaksepterte ytelser for scenarioene

| Scenario nr. | Preaksepterte ytelser i byggverket | Avvik fra preaksepterte ytelser |
|--------------|--|---|
| 1-6 | Leilighet utført som egen branncelle | Uten sprinkleranlegg i leilighet Uten sprinkleranlegg på svalgang Ingen brannklassifisering på vindu mot svalgang |
| 7-12 | Leilighet utført som egen branncelle Sprinkleranlegg installert i leilighet | Ingen sprinkleranlegg på svalgang Ingen brannklassifisering på vindu på soverom |
| 13-18 | Leilighet utført som egen branncelle | Uten sprinkleranlegg i leilighet Uten sprinkleranlegg på svalgang Ingen brannklassifisering på vindu mot svalgang |
| 19-24 | Leilighet utført som egen branncelle Sprinkleranlegg installert i leilighet | Ingen sprinkleranlegg på svalgang Ingen brannklassifisering på vindu på soverom |
| 25-28 | Leilighet utført som egen branncelle | Uten sprinkleranlegg i leilighet Uten sprinkleranlegg på svalgang Ingen brannklassifisering på vindu mot svalgang |
| 29-30 | Leilighet utført som egen branncelle | Uten sprinkleranlegg i leilighet Uten sprinkleranlegg på svalgang Ingen brannklassifisering på vindu mot svalgang |

5.5 Vanlig brannvekst

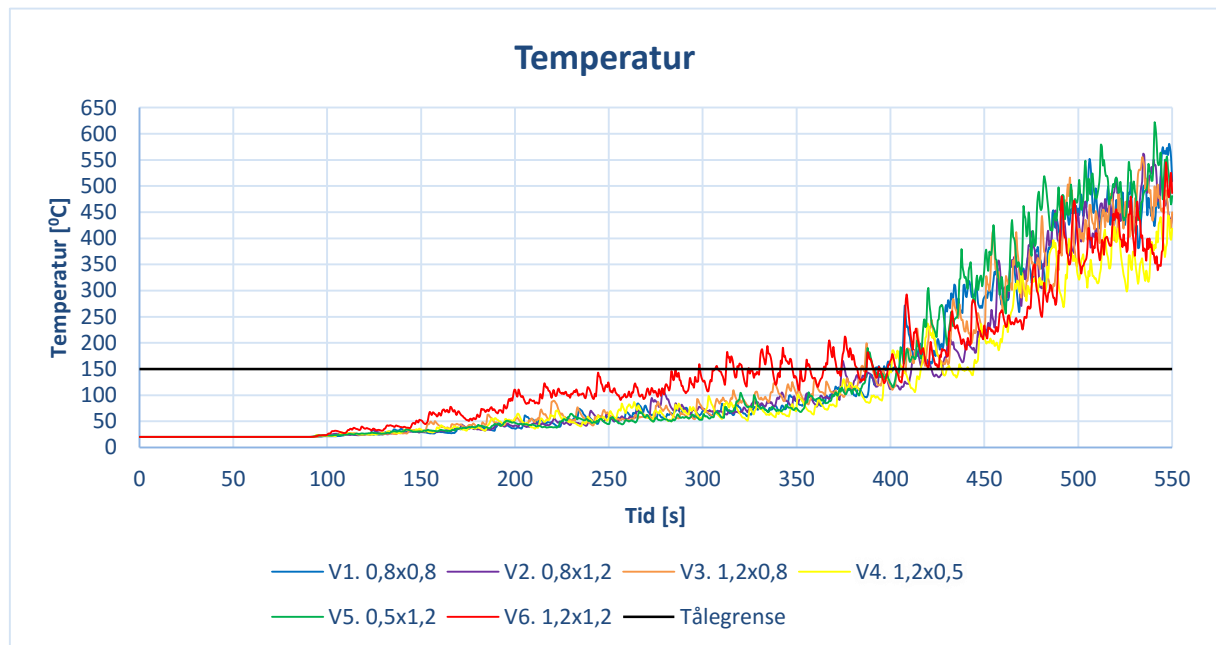
Dette delkapittelet tar for seg scenario 1-12.

5.5.1 Scenario 1-6

Disse scenarioene tar for seg en "vanlig" brannvekst der sprinkleranlegget ikke aktiveres.

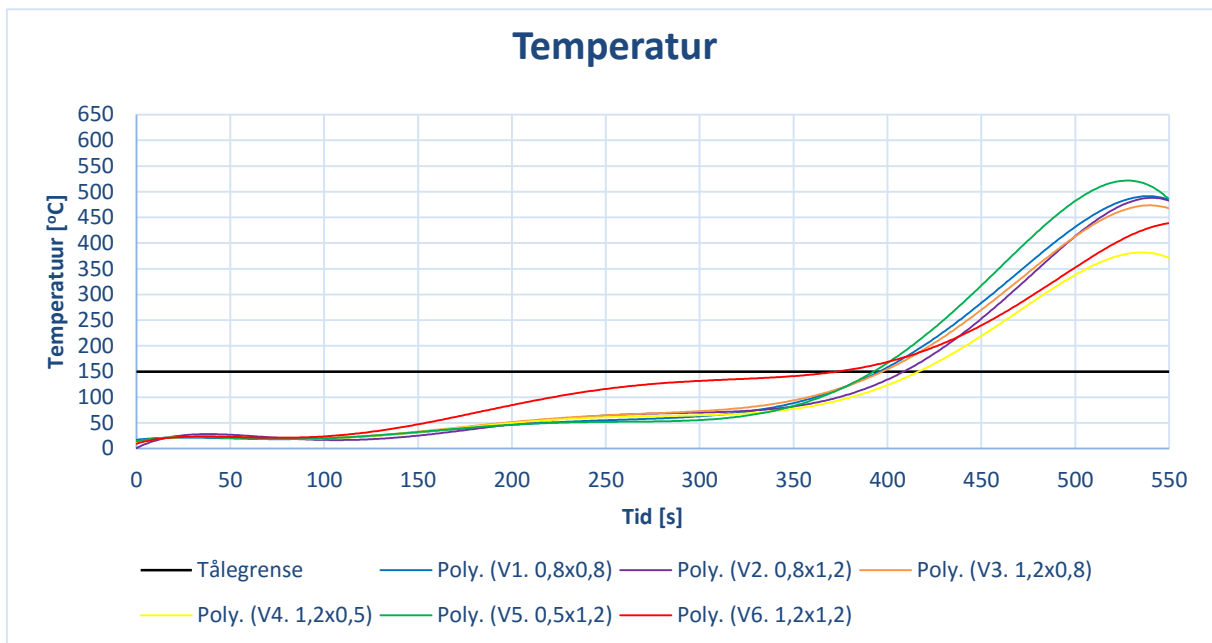
Temperatur

Temperaturen i målepunktet foran vinduet på svalgangen er vist i Figur 5.3 nedenfor. Figuren viser at vindu "V6" skiller seg ut ved at tiden frem til kritisk temperatur forekommer er raskere enn ved de andre vindusdimensjonene. En av årsakene til dette er den store spredningen i måleresultater på grafen der mange lokale maksimum- og minimumspunkter medfører en usikkerhet i avlesningen.



Figur 5.3. Temperatur [°C] med hensyn på tid [s] for scenario 1-6

Figur 5.4 nedenfor fremstiller temperaturen for de ulike vindusdimensjonene i form av trendlinjer. Disse trendlinjene er tilpasset resultatene fra FDS ved hjelp av 6. grads polynomer generert i Microsoft Excel 2016. Ved å benytte trendlinjer kan forskjellen i de ulike vindusdimensjonene lettere vises. En sammenligning av vindu "V6" i Figur 5.3 og Figur 5.4 viser at trendlinjene gir en høyere tilgjengelig rømningstid enn ved å benytte de originale datapunktene som er gitt av utdataen direkte fra FDS. I denne oppgaven vil trendlinjer få frem forskjellen mellom de ulike vindusdimensjonene på en mer oversiktlig måte enn ved å benytte FDS-resultatene direkte. I tillegg tid dette er den fastsatte kritiske temperaturen ikke gjeldene for kortvarig temperatureksponering. I henhold til det som står skrevet under kapittel 3.5.3, vil en kortvarig temperaturoverskridelse, dersom den er under 200°C, tillates.



Figur 5.4. Temperaturen [°C] fremstilt som trendlinjer

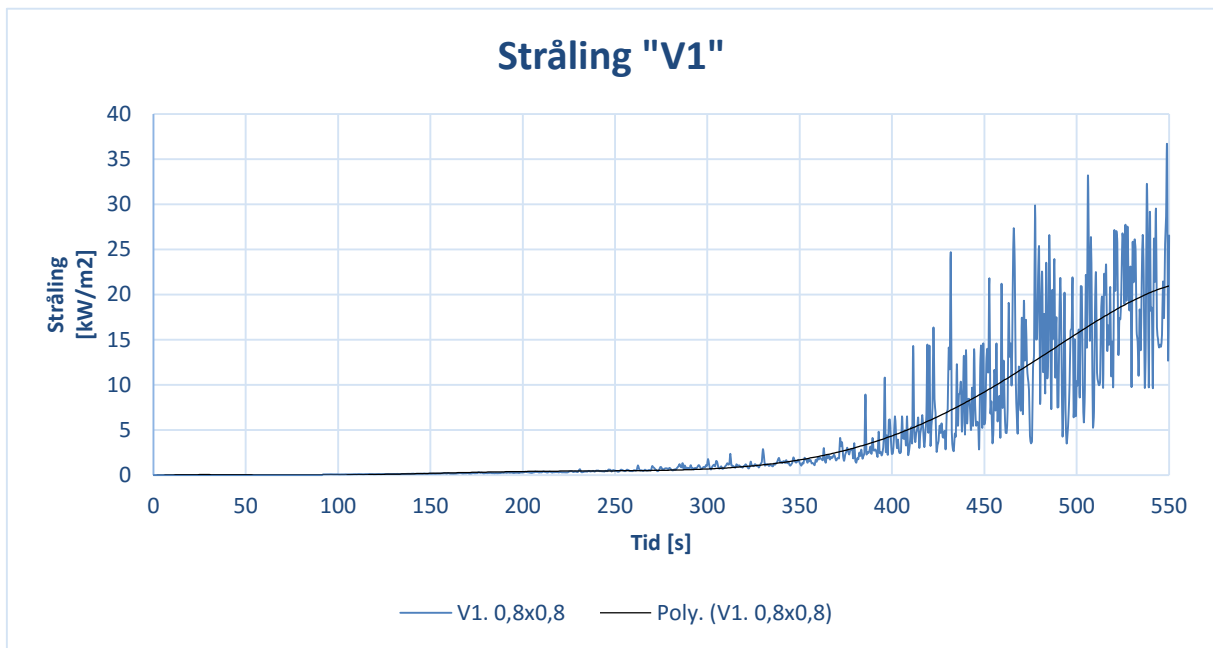
Tabell 5.5 viser en oversikt over forskjellen mellom resultatene fra FDS og de beregnede trendlinjene. Verdien som skiller seg ut er vindu "V6" med en differanse på 71 sekunder i avlesningsmetode. Årsaken til dette er de nevnte lokale maksimal- og minimalpunktene som fører til at temperaturoverskridelsen kommer fortere enn ved å benytte en trendlinje for å representere dataserien. Trendlinjene benyttes videre for å fastsette den tilgjengelige rømningstiden.

Tabell 5.5. Differanse i avlesningsmetode

| Vindusnummer [mxm] | FDS-output [s] | Trendlinje [s] | Differanse [s] |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| V1. 0.8x0.8 | 392.0 | 390.0 | 2.0 |
| V2. 0.8x1.2 | 411.0 | 410.0 | 1.0 |
| V3. 1.2x0.8 | 384.0 | 400.0 | -16.0 |
| V4. 1.2x0.5 | 400.0 | 415.0 | -15.0 |
| V5. 0.5x1.2 | 387.0 | 390.0 | -3.0 |
| V6. 1.2x1.2 | 298.0 | 369.0 | -71.0 |

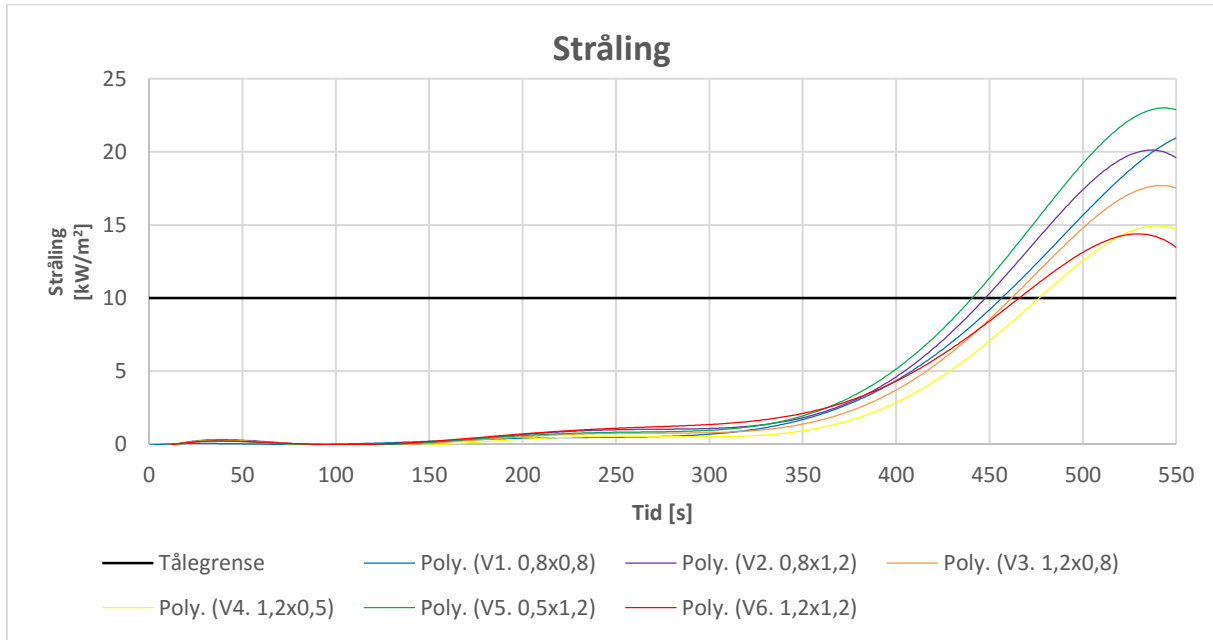
Varmestråling

Figur 5.5 nedenfor viser varmestrålingen i høyden 1,8 meter og lengden 0,8 meter utenfor vindu "V1" på svalgangen. Verdiene FDS gir på varmestråling er vanskelig å tolke direkte på grunn den store spredningen av verdier i grafen. Figuren viser også en trendlinje som er etablert for å lettere se trenden i datasettet. På grunn av at tålegrensen på varmestråling er basert på en overskridelse som går over 4 sekunder, vil trendlinjene benyttes videre for tiden frem til varmestrålingsoverskridelse. Før tålegrensen for vedvarende varmestråling er nådd, forekommer det kortvarige strålingsintensiteter oppimot 30 kW/m². Varigheten på disse verdiene er kortere enn 0,5 sekund og anses derfor ikke som kritisk i en rømningssituasjon.



Figur 5.5. Etablering av trendlinje

Figur 5.6 illustrerer trendlinjene for de ulike vindustypene. Trendlinjene viser en stor forskjell for den maksimale varmestrålingen for de ulike vindusdimensjonene. Tiden til overskridelse av tålegrensene er vist i Tabell 5.6.



Figur 5.6. Varmestrålingen [kW/m²] fremstilt som trendlinjer

Den korteste tiden til varmestrålingsoverskridelse forekommer ved vindu "V5" og "V1" som også er vinduene som har den minste bredden i forhold til vindusareal. Et lite vindu medfører at trykket i brannrommet blir høyere slik at røykgasser vil bli slynget i en høyere hastighet ut av vinduet. Strålingen blir derfor konsentrert over et mindre areal som igjen medfører en høyere varmestråling.

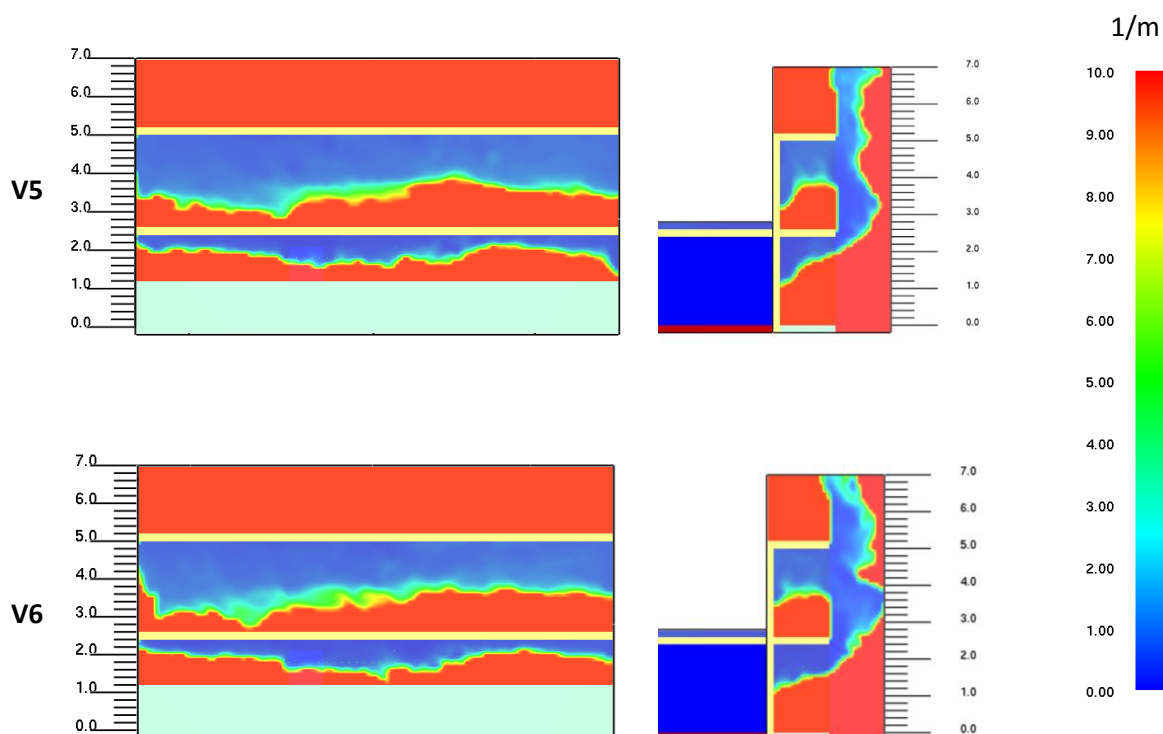
Tabell 5.6 viser at det er en overensstemmelse mellom en kort tid til overskridelse av tålegrensen og den maksimale intensiteten løpet av det simulerte brannforløpet.

Tabell 5.6. Maksimal varmestråling [kW/m^2] og tid til overskridelse [s]. "Vanlig" brannvekst

| Vindusnummer | V1. 0.8x0.8 | V2. 0.8x1.2 | V3. 1.2x0.8 | V4. 1.2x0.5 | V5. 0.5x1.2 | V6. 1.2x1.2 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tid til overskridelse [s] | 440.3 | 454.5 | 461.9 | 458 | 438.5 | 465.9 |
| Maksimal stråling [kW/m^2] | 21 | 20 | 17.7 | 15 | 23 | 14.5 |

Sikt

Som nevnt tidligere er sikt på svalganger et usikkert forhold å tallfeste. Simuleringene i denne oppgaven er antatt å finne sted under vindstille forhold i en temperatur på $20\text{ }^\circ\text{C}$. Dersom det i virkeligheten står et vindtrykk på svalgangen vil dette hjelpe til å luften ut røyken slik at siktforholdene blir bedre. Figur 5.7 nedenfor viser sikten 400 sekunder ut i brannforløpet, der siktkravet på 10 meter er illustrert som rødt. Figuren viser vindu "V6" og "V5" i form av et snitt midt i svalgangen i Y-planet og gjennom vinduet i X-planet. Forskjellen mellom disse vindusdimensjonene er liten, men figuren illustrerer en noe dårligere sikt for vindu V6 ved at røyken er distribuert noe lavere. For vindu V5 kan det ved utgangsdøren observeres en lavere sikt enn ved vindu "V6". Dette har grunn i en høyere hastighet ut døren grunnet at en mindre vindusdimensjon gir et høyere trykk i brannrommet, som igjen gir mer rom for røyken å bevege seg ut utgangsdøren.



Figur 5.7. Siktforholdene på svalgangen ved "vanlig" brannvekst

5.5.2 Scenario 7-12

Disse scenarioene tar for seg en "vanlig" brannvekst der sprinkleranlegget aktiveres.

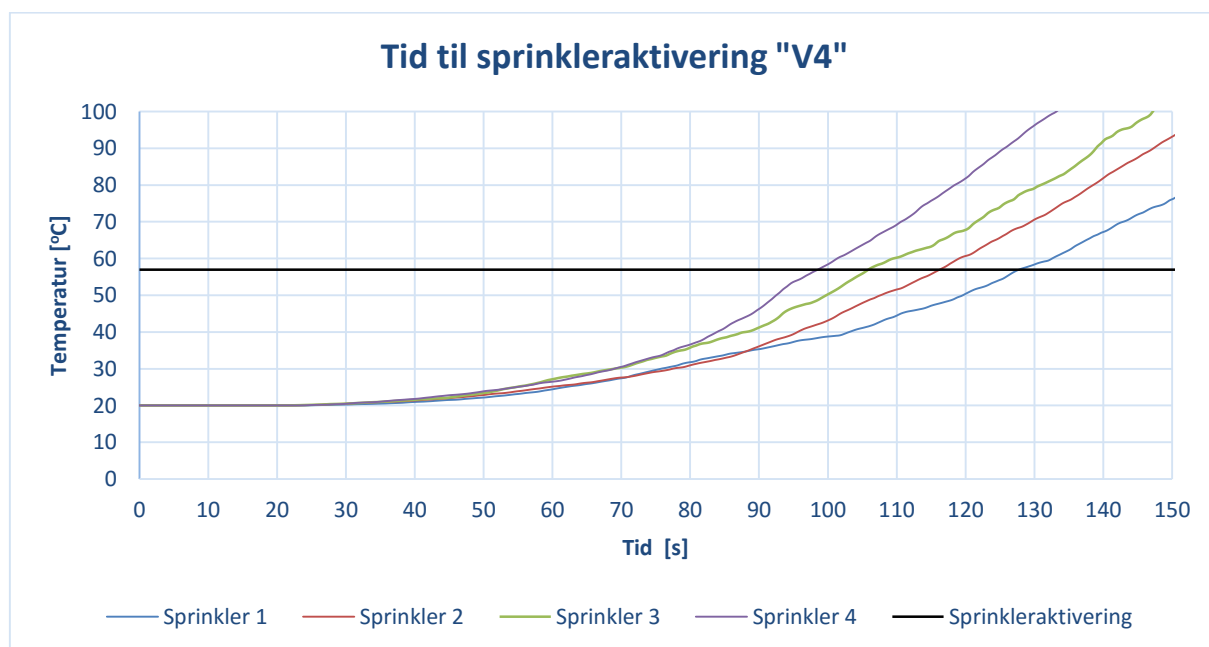
Sprinkleraktivering

Tabell 5.7 nedenfor viser en oversikt over de ulike vindusdimensjonene og den tilhørende aktiveringstiden for de ulike sprinklerhodene. Sprinkleren med den raskeste aktiveringstiden er "Sprinkler 4" som er plassert over vinduet. Sammenlignet med "Sprinkler 1" er aktiveringstiden rundt 30 sekunder raskere. Denne forskjellen i aktiveringstid har mye å si på den tilgjengelige nødvendige rømningstiden ved at tiden til sprinkleraktivering bestemmer hvor stor branneffekten vil være, i tillegg til deteksjonstiden ved rømning fra naboileilighet. For at analysebyggverket skal dekke det verst tenkelige tilfellet, vil tiden til sprinkleraktivering være den høyeste verdien fra tabellen.

Tabell 5.7. Tid til sprinkleraktivering

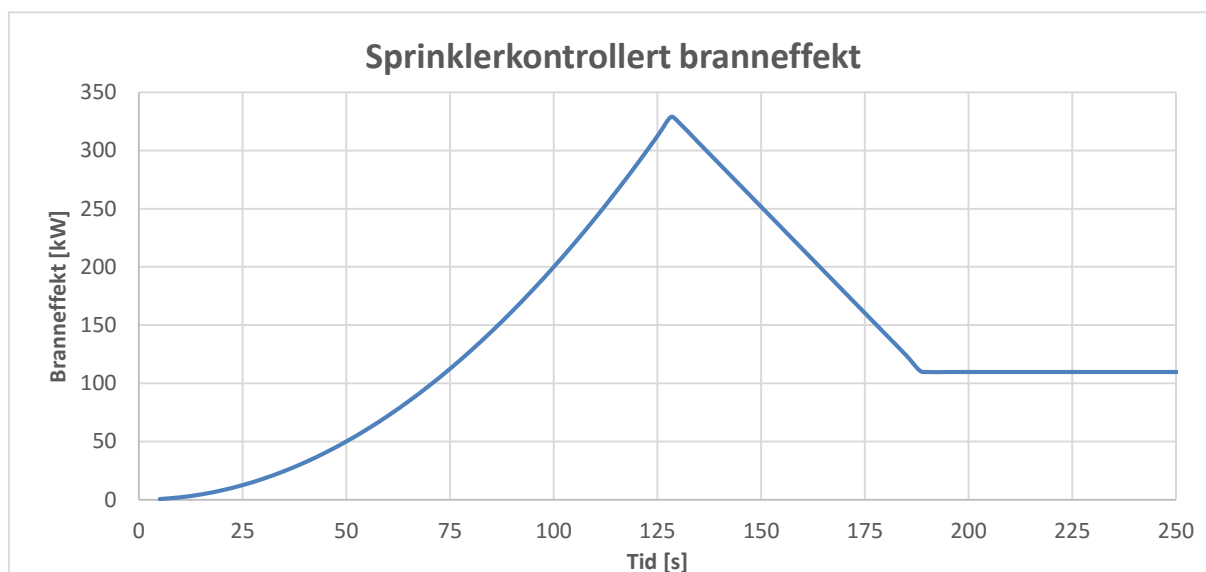
| Vindusnummer [mxm] | Sprinkler 1 [s] | Sprinkler 2 [s] | Sprinkler 3 [s] | Sprinkler 4 [s] |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| V1. 0.8x0.8 | 127.7 | 116.7 | 108.3 | 98.5 |
| V2. 0.8x1.2 | 124.9 | 121.6 | 106.7 | 98.5 |
| V3. 1.2x0.8 | 128.2 | 116.6 | 106.0 | 99.6 |
| V4. 1.2x0.5 | 128.2 | 116.6 | 106.2 | 99.0 |
| V5. 0.5x1.2 | 126.5 | 119.9 | 109.9 | 99.0 |
| V6. 1.2x1.2 | 126.0 | 125.4 | 109.5 | 100.1 |

Figur 5.8 viser illustrerer aktiveringstiden for de ulike sprinklerhodene for vindu "V4". Dette er vindusdimensjonen, sammen med "V3", som gir den lengste tiden til sprinkleraktivering.



Figur 5.8. Tiden [s] til sprinkleraktivering for vindu "V4"

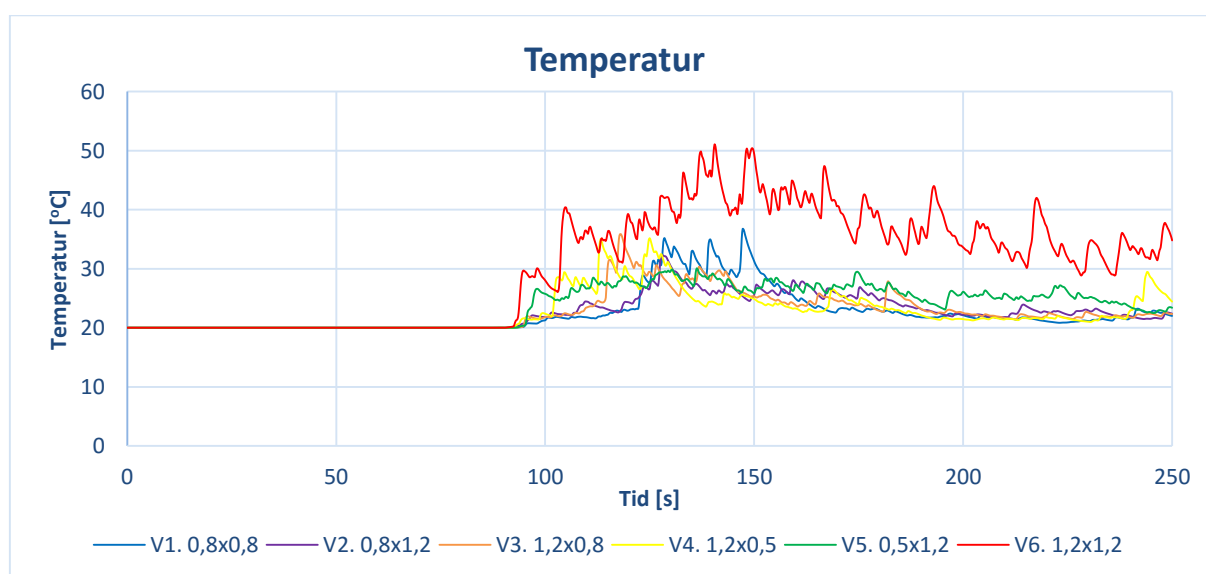
Branneffekten ved sprinkleraktivering følger en kurve som har bakgrunn i det som er skrevet under kapittel 4.10.2 om at branneffekten følger en konstant nedgang i varmeavgivelse i ett minutt etter sprinkleraktivering, etterfulgt av en konstant branneffekt tilsvarende 1/3 av branneffekten ved aktivering. Figur 5.9 viser en fremstilling av brannforløpet benyttet i denne oppgaven ved en "vanlig" brannvekst. Den maksimale effekten for denne brannen er 328,7 kW. Tiden til sprinkleraktivering er satt til 128.2 sekunder som er den lengste tiden til sprinkleraktivering og er lik for vindu V3 og vindu V4. Den valgte tiden underbygges med at en lenger tid til sprinkleraktivering vil gi en kortere tilgjengelig rømningstid og en høyere branneffekt. Simuleringstiden for scenario 7-12 som involverer sprinkleranlegg satt til 250 sekunder. Dette har blitt gjort på grunn av branneffekten er konstant etter 188.2 sekunder.



Figur 5.9. Fremstilling av sprinklerkontrollert branneffekt [kW]

5.5.3 Temperatur

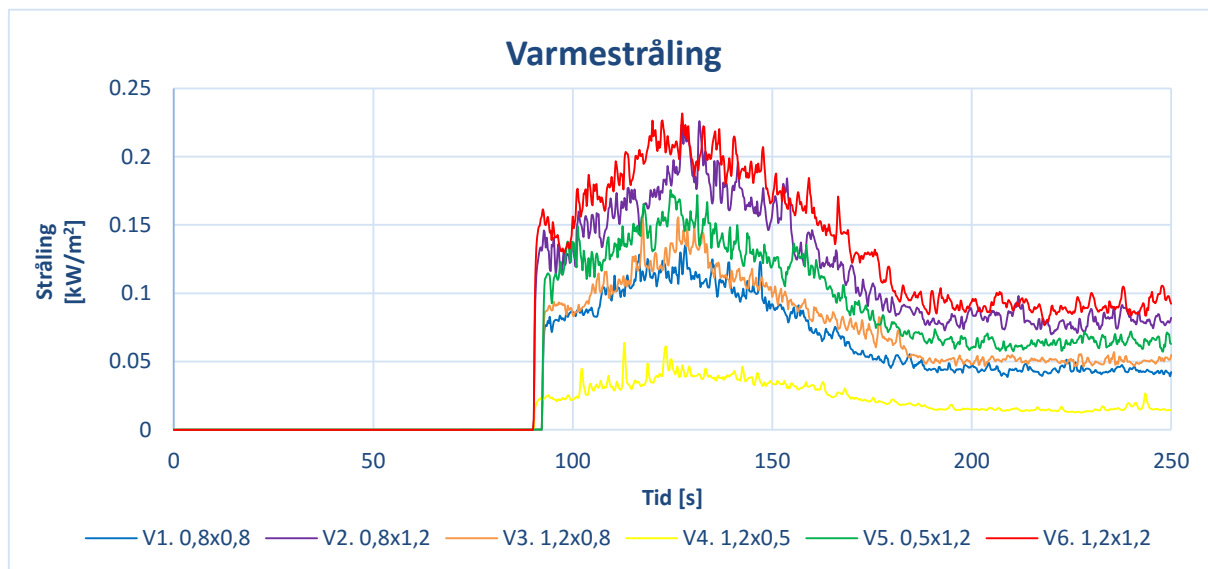
Figur 5.10 nedenfor viser temperaturen på det angitte målepunktet figurene omtalt i kapittel 5.2. Som figuren viser, så oppstår det ikke kritisk temperatur på svalgangen under den angitte simuleringstiden på 250 sekunder.



Figur 5.10. Temperaturen [°C] med hensyn på tiden [s] under sprinklerkontroll

Varmestråling

Figur 5.11 nedenfor viser strålingsintensiteten som funksjon av tiden. Resultatet viser en stor forskjell i strålingsintensitet for de ulike vindusdimensjonene, der den høyeste verdien på stråling kommer fra vindu "V6" og er i overkant av 0,22 kW/m². Sammenlignet med tålegrensen for mennesker, vil varmestrålingen ved vindu "V6" tilsvare 2.2% av den gitte grensen på 10 kW/m² og derfor langt innenfor rømningskriteriene.



Figur 5.11. Varmestråling [kW/m²] med hensyn på tiden [s] ved sprinklerkontroll

5.5.4 Oppsummering av scenario 1-12

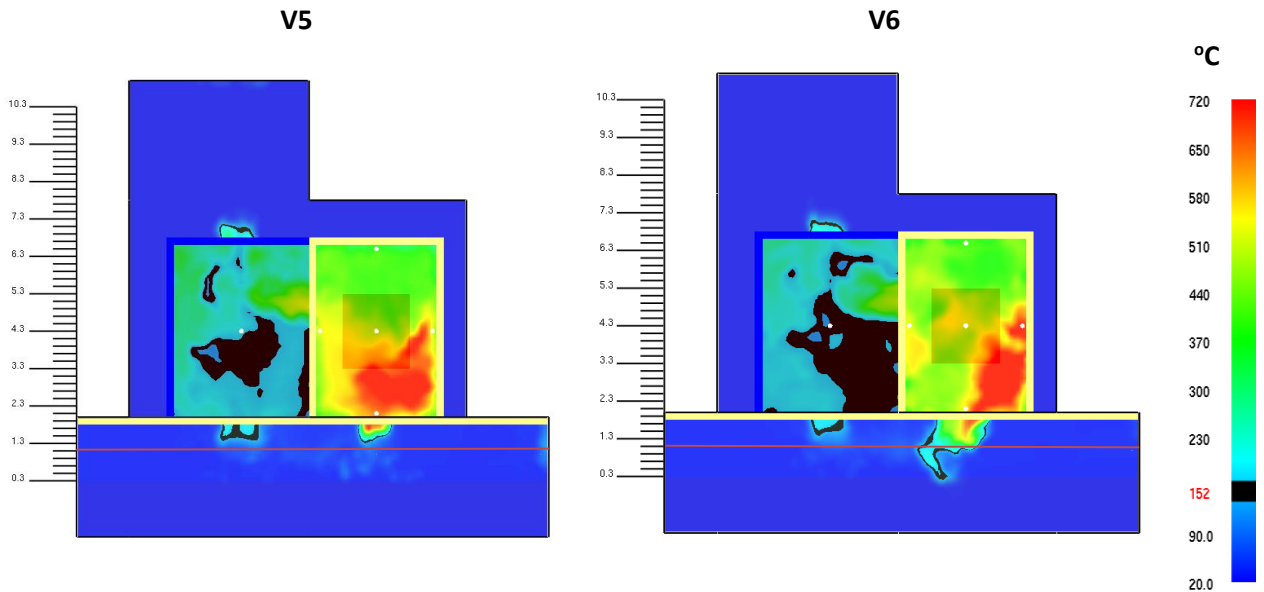
Forskjellen mellom tiden til stråling- og temperaturoverskridelse for scenario 1-6 er vist nedenfor i Tabell 5.8. Tabellen viser at temperaturen er den styrende faktoren for rømningsforholdet på svalgangen. Verdiene i tabellen er basert på de tidligere nevnte trendlinjene som har blitt etablert.

Tabell 5.8. Differanse i tilgjengelig rømningstid

| Vindusnummer [mxm] | Temperatur [s] | Stråling [s] | Differanse [s] |
|--------------------|----------------|--------------|----------------|
| V1. 0.8x0.8 | 390 | 445 | 55 |
| V2. 0.8x1.2 | 410 | 447 | 37 |
| V3. 1.2x0.8 | 395 | 462 | 67 |
| V4. 1.2x0.5 | 415 | 458 | 43 |
| V5. 0.5x1.2 | 390 | 440 | 50 |
| V6. 1.2x1.2 | 370 | 466 | 96 |

I tillegg til å vise hvilken vindusdimensjon som er den mest kritiske, viser tabellen også differansen mellom tiden til stråling- og temperaturoverskridelse. For stråling, er vindu "V5" og "V6" henholdsvis den mest og minst kritiske dimensjonen. Disse vinduene er også vinduene med det minste og største arealet. For temperaturoverskridelsen er vindu V6 det mest kritiske, etterfulgt av vindu "V5" og "V1". Både tiden til stråling- og temperaturoverskridelse kan forklares med areal- og bredde-forholdet på vinduet. Et mindre areal på vinduet gir et høyere trykk i brannrommet og derfor en høyere hastighet av branngasser ut mot svalgangen. Dette vises med en kort tid til strålingsoverskridelse for vinduet med det minste arealet. For temperatur gjelder det motsatte ved at et stort areal gir fra seg mer

varme mot svalgangen. Dette er illustrert i Figur 5.12 nedenfor som viser temperaturen 370 sekunder ut i brannforløpet for vindu V5 og V6. Dette er tiden som Tabell 5.8 angir som den korteste tiden frem til kritiske forhold. Der vinduene har samme areal men ulikt bredde-, høyde-forhold (Vindu "V4" og "V5") vil vinduet med den lengste bredden fordele varmen mer utover svalgangen slik at tiden til kritiske forhold blir lengre.



Figur 5.12. Temperaturløstribuering ved vindu "V5" og vindu "V6"

For scenario 7-12 der sprinkleranlegget utløses vil det ikke oppstå kritiske forhold på svalgangen, noe som medfører at den tilgjengelige rømningstiden er lenger enn det simulerte brannforløpet.

5.6 Rask brannvekst. Scenario 13-24

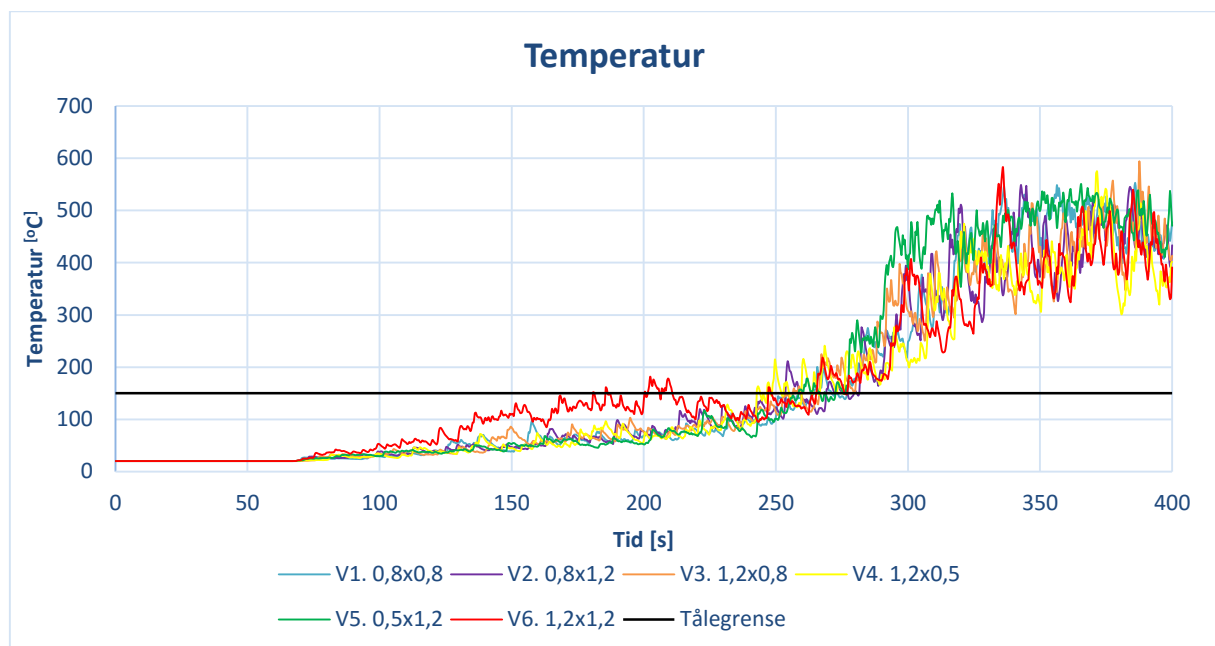
Dette delkapittelet tar for seg scenario 13-24

5.6.1 Scenario 13-18

Disse scenarioene tar for seg en "rask" brannvekst der sprinkleranlegget ikke aktiveres.

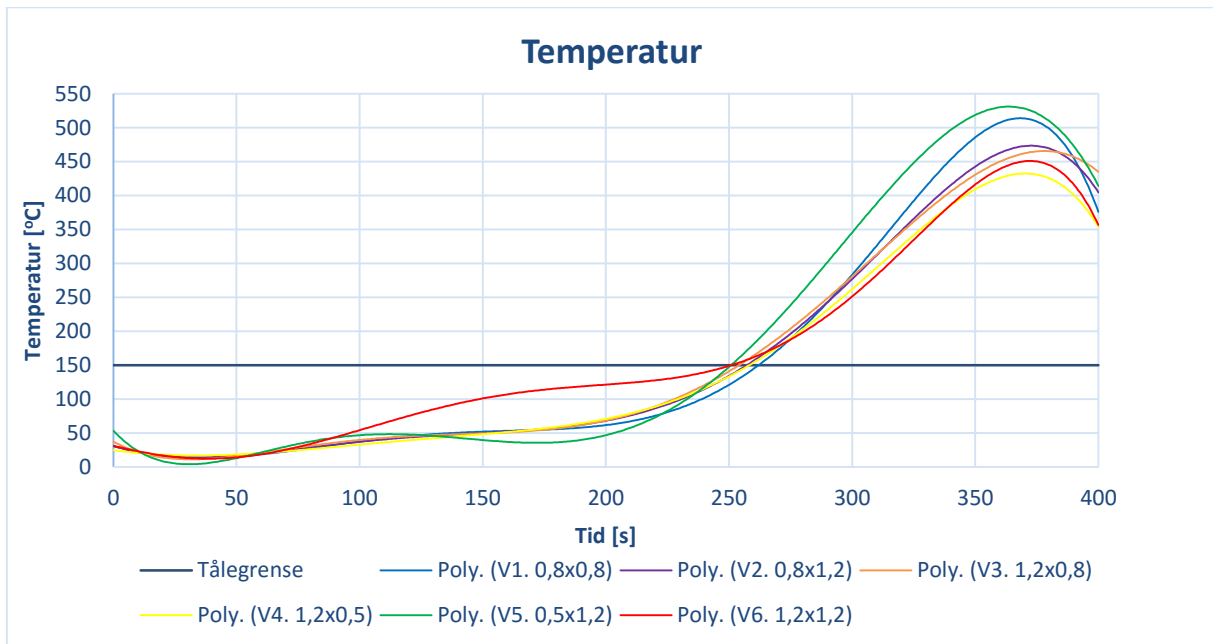
Temperatur

Figur 5.13 viser temperaturen på svalgangen for den raske brannveksten. I likhet med den scenario 1-6, skiller vindu "V6" seg ut ved at temperaturen her er høyere i starten av brannforløpet. Når tiden passerer 250 sekunder minsker forskjellen og store svingninger i temperaturen for alle vindusdimensjonene oppstår.



Figur 5.13. Temperaturen [°C] på svalgangen med hensyn på tiden [s]

Figur 5.14 fremstiller temperaturen for de ulike vindusdimensjonene i form av trendlinjer. Trendlinjene er som tidligere nevnt en tilpasning av datasettet ved hjelp av 6. grads polynomer. For en dataseriene i dette tilfellet gir trendlinjene en feil fremstilling i starten og på slutten av den simulerte tiden. Likevel illustrer trendlinjene en god oversikt over forskjellen til overskridelse av rømningsforholdene for de ulike vindusdimensjonene.



Figur 5.14. Temperaturen [°C] på svalgangen fremstilt som trendlinjer

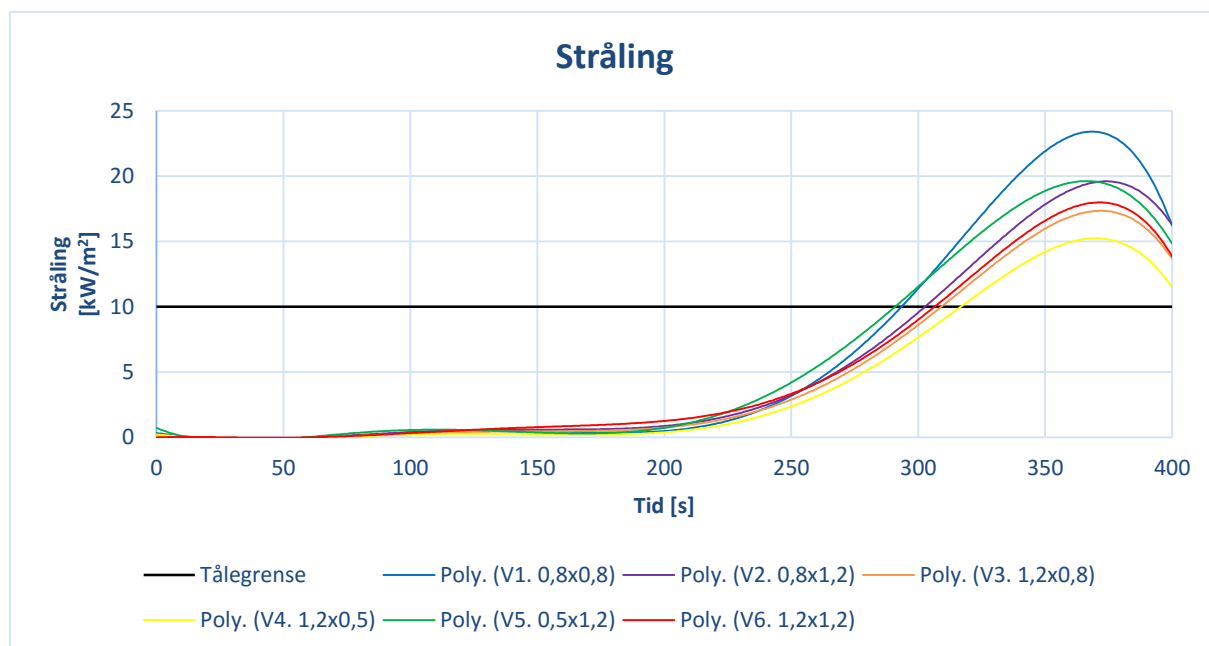
Tiden frem til kritiske forhold oppstår for temperaturoverskridelse er vist nedenfor i Tabell 5.9. Tabellen viser differansen for tiden til kritiske forhold ved å benytte trendlinjene i forhold til å benytte utdataen fra FDS direkte. Den store differansen i avlesningsmetode for vindu "V6" skyldes et lokalt høyt punkt på grafen fremstilt i Figur 5.13. I en rømningssituasjon vil en kortvarig eksponering av temperatur være ansett som tillatt dersom temperaturen er under 200°C, som beskrevet i kapittel 3.5.3. Trendlinjene benyttes derfor i denne oppgaven for beregningen av den nødvendige rømningstiden.

Tabell 5.9. Differanse i avlesningsmetode

| Vindusnummer [mxm] | FDS-output [s] | Trendlinje [s] | Differanse [s] |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| V1. 0.8x0.8 | 263 | 262 | 1 |
| V2. 0.8x1.2 | 253 | 255 | -2 |
| V3. 1.2x0.8 | 257 | 252 | 5 |
| V4. 1.2x0.5 | 242 | 255 | -13 |
| V5. 0.5x1.2 | 259 | 250 | 9 |
| V6. 1.2x1.2 | 180 | 250 | -70 |

Stråling

Resultatene for strålingintensiteten for den raske brannen blir presentert på lik linje som ved vanlig brann ved å etablere trendlinjer. Disse trendlinjene er vist i Figur 5.15.



Figur 5.15. Strålingen [kW/m²] fremstilt som trendlinjer

Tabell 5.10, viser på lik linje som ved den vanlige brannen, sammenhengen mellom tid til strålingsoverskridelse og maksimal stråling. I likhet med den vanlige brannen er det en overenstemmelse mellom en kort tid til overskridelse og den maksimale strålingen. Til forskjell fra scenario 1-6 er det for scenario 13-18 vindu "V1" som er det mest kritiske med hensyn til stråling. Etterfulgt av vindu "V1" er vindu "V5", som var det mest kritiske for den vanlige brannen.

Tabell 5.10. Maksimal varmestråling [kW/m²] og tid til overskridelse [s]. "Rask" brannvekst

| Vindusnummer | V1. 0.8x0.8 | V2. 0.8x1.2 | V3. 1.2x0.8 | V4. 1.2x0.5 | V5. 0.5x1.2 | V6. 1.2x1.2 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tid [s] | 265 | 278 | 288 | 268 | 278 | 285 |
| Maksimal stråling [kW/m ²] | 23.5 | 19.7 | 17.3 | 15.2 | 19.8 | 18 |

Sikt

Det antas at siktforholdene for scenario 12-24 følger samme trenden som scenario 1-12 ved at det er en noe dårligere sikt for vindu "V6" på grunn av røyken distribueres mer over svalgangen og vindu "V5" har en lavere sikt ved inngangsdøren på grunn av et høyere trykk i brannrommet.

5.6.2 Scenario 19-24

Disse scenarioene tar for seg en "rask" brannvekst der sprinkleranlegget fungerer.

Sprinkleraktivering

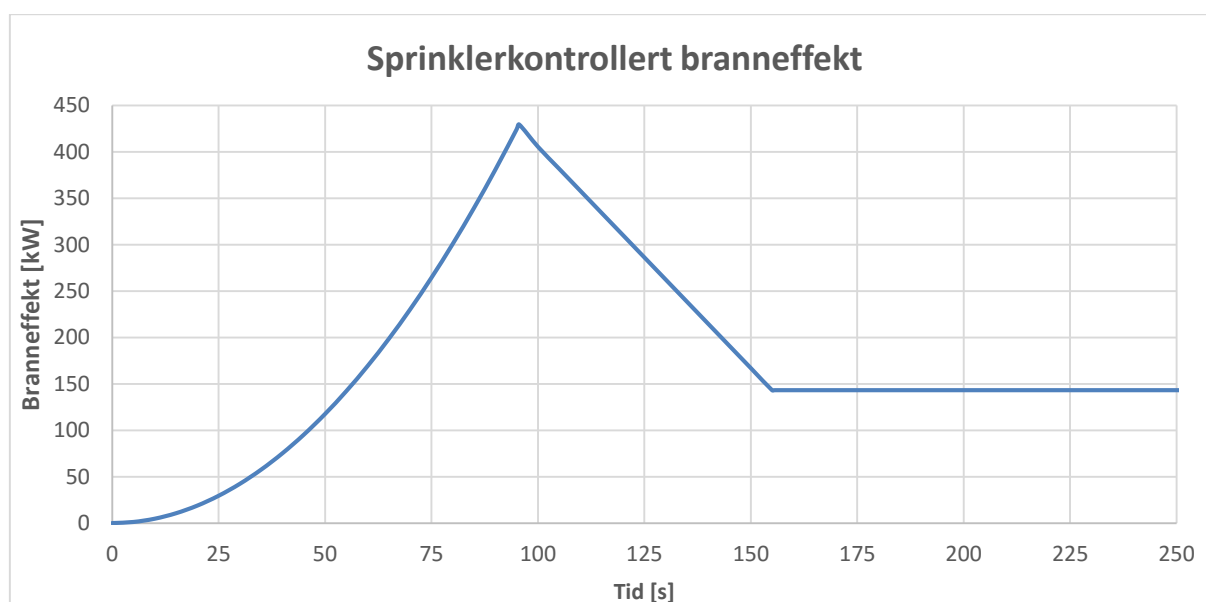
Tiden til sprinkleraktivering for de ulike sprinklerhodene er vist nedenfor i Tabell 5.11. For vindu "V1"- "V5" er aktiveringstiden tregest for "Sprinkler 1". For alle vindusdimensjonene er tiden til aktivering raskest for "Sprinkler 4" som befinner seg over vinduet. Aktiveringstiden som benyttes er

den lengste tiden, som i likhet med den vanlige brannveksten forekommer ved vindu "V3". Aktiveringstiden på 95,6 sekunder, gir ved å benytte *Formel 4.5*, en maksimal branneffekt på 429,5 kW.

Tabell 5.11. Tiden [s] til sprinkleraktivering

| Vindusnummer [mxm] | Sprinkler 1 [s] | Sprinkler 2 [s] | Sprinkler 3 [s] | Sprinkler 4 [s] |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| V1. 0.8x0.8 | 93.6 | 88.4 | 82.8 | 77.2 |
| V2. 0.8x1.2 | 92.8 | 92.8 | 82.4 | 77.6 |
| V3. 1.2x0.8 | 95.6 | 90.4 | 82.8 | 77.2 |
| V4. 1.2x0.5 | 95.2 | 90.0 | 81.2 | 77.2 |
| V5. 0.5x1.2 | 93.2 | 90.8 | 79.6 | 76.4 |
| V6. 1.2x1.2 | 92.4 | 94.1 | 80.0 | 76.8 |

Branneffekten ved sprinkleraktivering følger samme utvikling som ved den vanlige brannen med har en høyere maksimal og konstant branneffekt grunnet en høyere effekt ved sprinkleraktivering. Figur 5.16 nedenfor viser den sprinklerkontrollerte branneffekten for scenario 19-24.

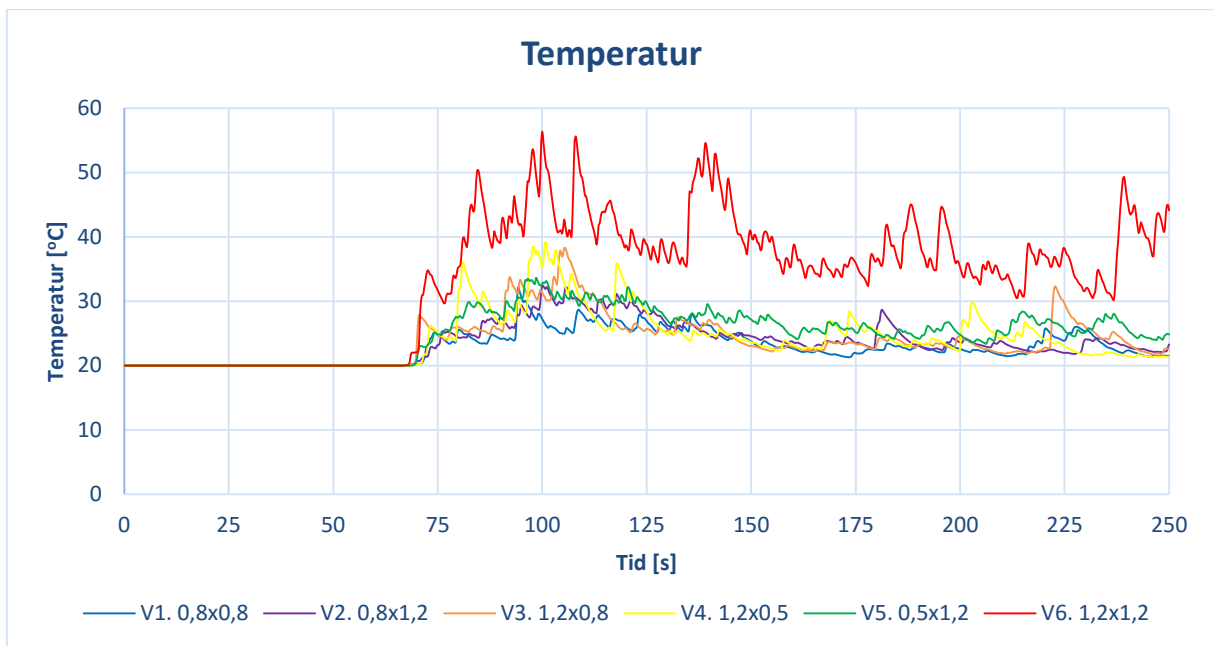


Figur 5.16. Sprinklerkontrollert branneffekt [kW] "rask" brann

5.6.3 Rømningsforhold

Temperatur

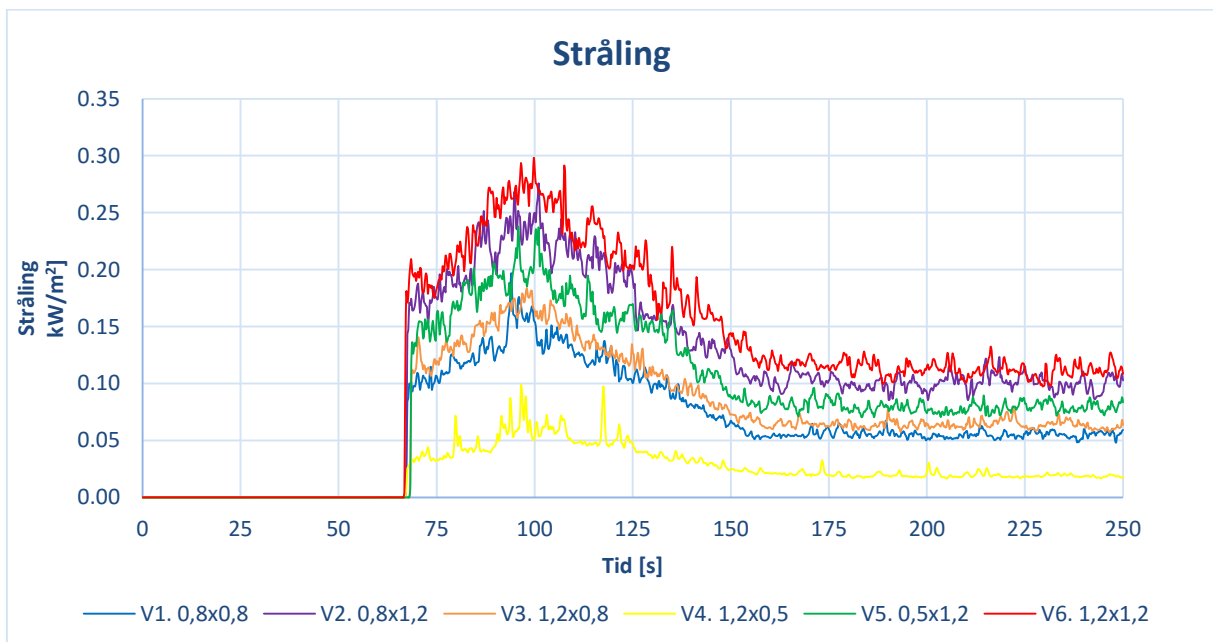
Temperaturen på utenfor vinduet er fremstilt i Figur 5.17. Her skiller igjen vindu "V6" seg ut ved at temperaturen er høyere enn ved de andre dimensjonene. Den maksimale temperaturen i brannforløpet er i underkant av 60 °C, slik at rømning med hensyn til temperatur er utenfor fare.



Figur 5.17. Temperaturen [°C] men hensyn på tiden [s] ved sprinkleraktivering

Stråling

Strålingsintensiteten ved samme målepunkt som temperaturen er fremstilt i Figur 5.18. Figuren illustrerer et bedre samsvar mellom de ulike vindusdimensjonene ved at kurvene følger en lik utvikling. I dette tilfellet befinner den maksimale strålingsintensiteten seg langt under tålegrensen for rømning.



Figur 5.18. Varmestråling [kW/m²] men hensyn på tiden [s] ved sprinkleraktivering

Sikt

Som forklart tidligere under kapittel 4.10.2, er sikten ved sprinkleraktivering vanskelig å beregne grunnet vannets påvirkning på brannen. På grunn av den lave temperaturen og strålingsintensiteten anses derfor rømningsforholdene å være så gode at sikten ikke vil sette en grense for den tilgjengelige rømningstiden.

5.6.4 Oppsummering scenario 13-24

Tabell 5.12 viser den tilgjengelige rømningstiden til overskridelse av temperatur og varmestråling for scenario 13-18. De ulike tidene viser samme trend som ved en "vanlig" brannvekst ved at det største vinduet har den korteste tiden til temperaturoverskridelse og den lengste til strålingsoverskridelse. Verdiene for en "rask" brannvekst gir en mindre forskjell av tiden til overskridelse mellom de ulike vindusdimensjonene. Dette kan også vises ved at differansen mellom de ulike tidene er lavere for raske brannveksten enn ved den vanlige brannveksten.

Tabell 5.12. Differanse mellom tid til stråling- og temperaturoverskridelse [s]

| Vindusnummer [mxm] | Temperatur [s] | Stråling [s] | Differanse [s] |
|--------------------|----------------|--------------|----------------|
| V1. 0.8x0.8 | 262 | 293 | 31 |
| V2. 0.8x1.2 | 255 | 303 | 48 |
| V3. 1.2x0.8 | 252 | 310 | 58 |
| V4. 1.2x0.5 | 255 | 315 | 60 |
| V5. 0.5x1.2 | 250 | 290 | 40 |
| V6. 1.2x1.2 | 250 | 305 | 55 |

For scenario 19-24 viser resultatene det ikke vil oppstå kritiske forhold på svalgangen. Det vil derfor være mulig å benytte svalgangen som rømningsvei under hele det simulerte brannforløpet.

Hovedforskjellen mellom de to forskjellige brannvekstene er en lavere tid til overskridelse av tålegrensene ved å benytte den raske brannen. I tillegg til dette viser den raske brannen en mindre forskjell i tiden frem til kritiske forhold oppstår mellom de ulike vindusdimensjonene.

5.7 Vindu åpent under hele brannforløpet

Dette delkapittelet tar for seg scenario 25-28.

5.7.1 Scenario 25-26

Disse scenarioene simulerer tilfeller der vinduet står åpent under hele brannforløpet.

Vindusdimensjonene som simuleres her er vindu "V5" og "V6" som gav de høyeste verdiene for scenario 1-12. Disse vindustypene simuleres som helt åpne fra brannstart og sammenlignes med tilfellene der vinduet er lukket frem til vindusbrudd inntreffer.

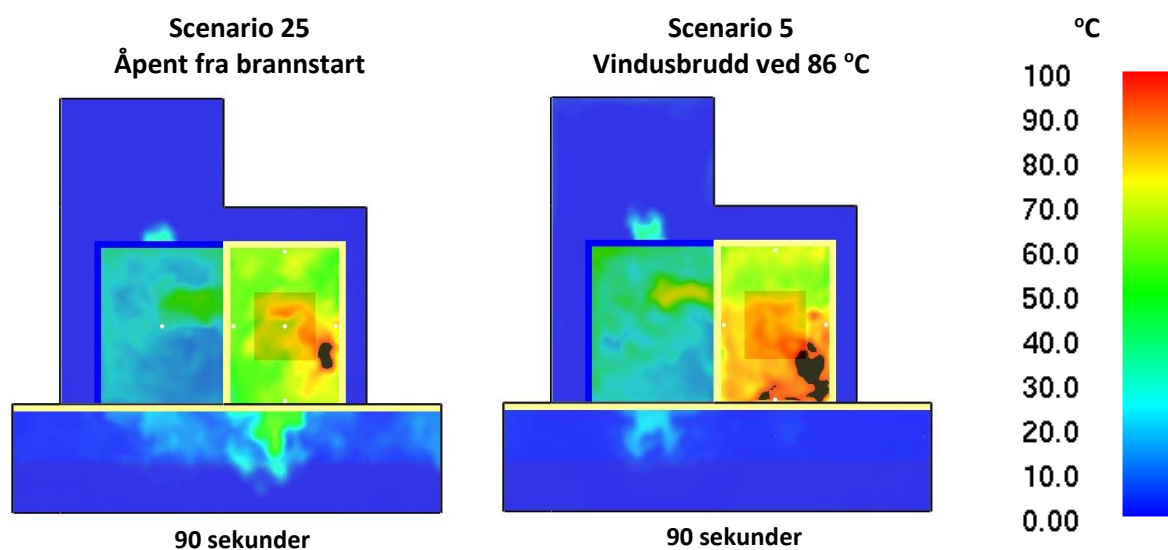
Tid til sprinkleraktivering

Tiden til sprinkleraktivering for vindu "V5" og "V6" er vist nedenfor i Tabell 5.13. Den maksimale forskjellen i tiden til sprinkleraktivering er 5,5 sekunder. Denne verdien anses å ikke ha avgjørende effekt på rømningsforholdene ved sprinkleraktivering. Det antas derfor at en sprinklerkontrollert brann som oppstår i scenario 25 og 26 følger lik utvikling som scenario 5 og 6. Vindusbrudd oppstår ved tiden 90 sekunder for alle vindusdimensjonene.

Tabell 5.13. Tid til sprinkleraktivering

| | V5 | | | V6 | | |
|-------------|-------|-------------|------------|-------|-------------|------------|
| | Åpent | Vindusbrudd | Differanse | Åpent | Vindusbrudd | Differanse |
| Sprinkler 1 | 126.0 | 126.5 | -0.5 | 120.5 | 126.0 | -5.5 |
| Sprinkler 2 | 124.3 | 119.9 | 4.4 | 129.8 | 125.4 | 4.4 |
| Sprinkler 3 | 109.5 | 109.9 | -0.4 | 104.5 | 109.5 | -5.0 |
| Sprinkler 4 | 100.0 | 99.0 | 1.0 | 105.6 | 100.1 | 5.5 |

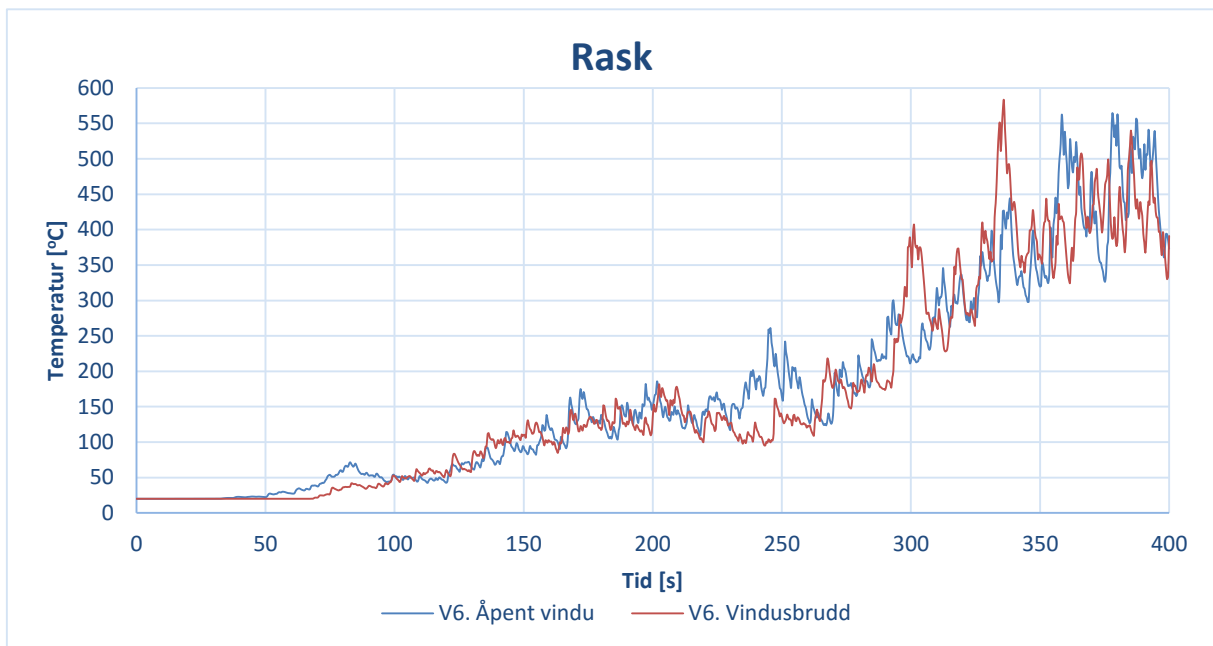
Selv om forskjellen i tiden til sprinkleraktivering er liten, kan trenden i resultatene observeres. Når vinduet er åpent fra brannstart tar det lenger tid til sprinkleraktivering for "Sprinkler 2" og "Sprinkler 4". Dette kommer av at luften trenger gjennom vinduet fra brannstart og fører til en bedre utlufting enn når vinduet er lukket. "Sprinkler 1" og "Sprinkler 3" har derfor en kortere tid overskridelse enn de andre sprinklerne fordi de befinner seg på motsatt side og til høyre for vinduet slik at luften fra det åpne vinduet trekker varmen med seg mot disse. For vindu "V6" er forskjellen mellom tidene større, som kan tyde på at det blir mer utlufting og en større forskjell i strømningsbildet i rommet. Figur 5.19 viser temperaturen i rommet for scenario 25 som har vindusdimensjonen 1,2x1,2 meter ved siden av scenario 6 ved tiden 90 sekunder, som er tiden like før vindusbruddet oppstår. Når vindusbrudd oppstår i scenario 6 oppstår vil en stor del av varmen trekke ut mot svalgangen og brannforløpet vil likne starte å likne scenario 25.



Figur 5.19. Temperatur ved tiden 90 sekunder

Temperatur

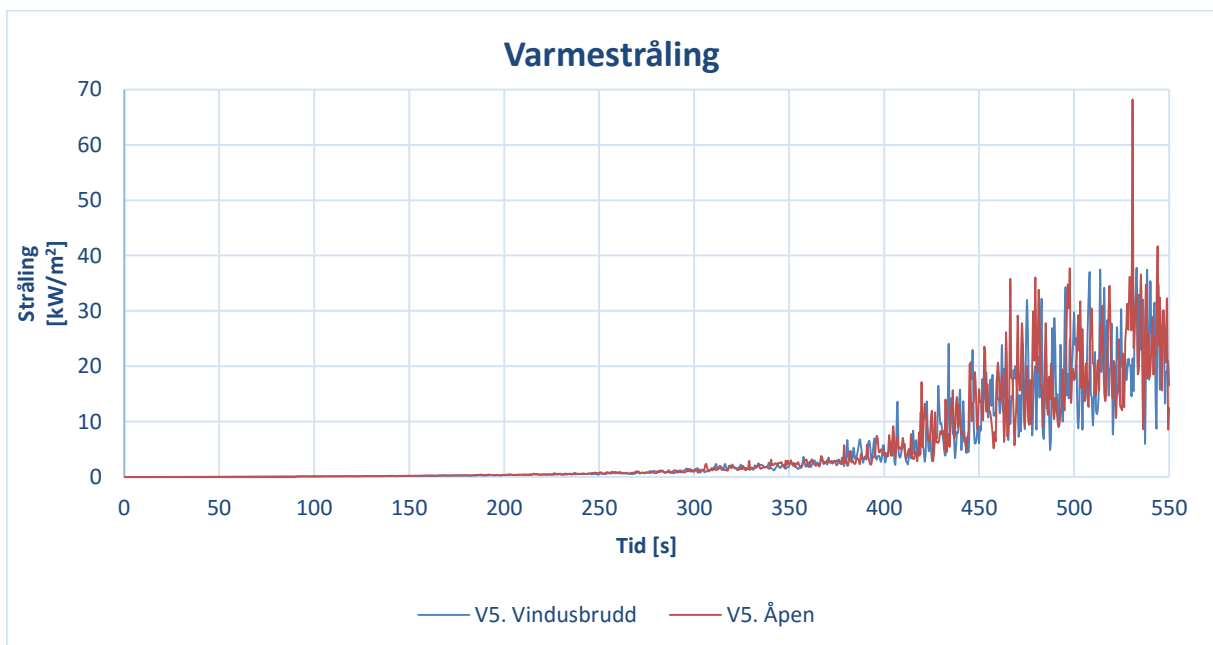
For å undersøke virkningen det medfører å ha vinduet åpent fra brannstart, sammenlignes temperaturen og strålingen med scenario 1-24 der vinduene er lukket frem til vindusbrudd oppstår ved 86 °C. Vindusstørrelsen som simuleres er "V6" som viste den høyeste temperaturen for scenario 1-12. Figur 5.20 viser temperaturen på svalgangen for vindu ved en "vanlig" brannvekst. For vindu "V6" er virkningen ved å ha vinduet åpent fra brannstart liten. Det vil oppleves en temperaturøkning i starten av brannforløpet før vindusbruddet oppstår, men dette jevnes ut så fort vindusbrudd oppstår.



Figur 5.20. Forskjellen i temperatur [°C] for åpent og lukket vindu fra brannstart

Varmestråling

For strålingsintensiteten undersøkes kun den vanlige brannveksten og vindu "V5" som hadde den korteste tiden til strålingsoverskridelse for scenario 1-6. En sammenstilling av brannforløpet for vindu "V5" i åpent tilstand og ved vindusbrudd er vist nedenfor i Figur 5.21. Forskjellen mellom scenarioene er liten og grafene følger samme utvikling. Det antas derfor at et vindu åpent fra brannstart har lite å si på den tilgjengelige rømningstiden og at den vil følge samme utvikling som scenario 5 der det oppstår vindusbrudd ved 86 °C.



Figur 5.21. Forskjellen i varmestråling [kW/m²] for åpent og lukket vindu fra brannstart

5.7.2 Scenario 27-28

Det antas at scenario 27 og 28 som har en "rask" brannvekst, vil følge samme trend som scenario 25 og 26 ved at et åpent vindu under hele brannforløpet har liten eller ingen virkning på resultatet. Dette antakelsen begrunnes ved at simuleringene for scenario 1-24 viste at en "vanlig" brannvekst fikk frem større forskjeller i datasettet enn en "rask" brannvekst. For rømningstiden og rømningsforholdene vil dette si at det antas at scenario 27 og 28 vil ha samme tilgjengelige rømningstid som scenario 17 og 18.

5.7.3 Oppsummering scenario 25-28

Scenario 25-28. Simuleringene viste her for scenario 25 og 26, som hadde en vanlig brannvekst, nesten identiske resultater som ved scenario 5 og 6 der vindusbrudd oppstår ved 86 °C. Tiden til sprinkleraktivering er rundt 5 sekunder lenger for scenarioene som har åpent vindu fra brannstart. Denne forskjellen i tiden til sprinkleraktivering har lite å si på branneffekten ved sprinkleraktivering. På grunn av de små forskjellene det medfører å ha vinduet åpent fra brannstart, antas det at scenario 25-28 vil ha samme tilgjengelige rømningstid som scenario 5 og 6

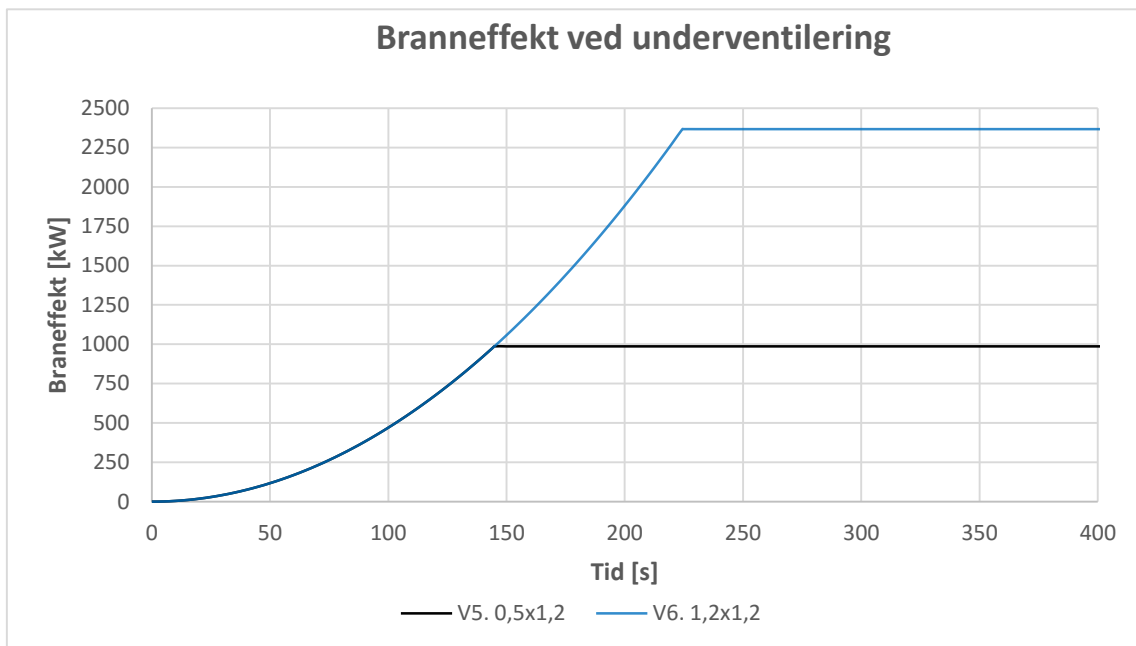
5.8 Dør til soverommet lukket

Scenario 29 og 30 tar for seg tilfellet med en rask brannvekst der døren til soverommet er lukket. Når døren til soverommet er lukket vil brannen bli underventilert slik at branneffekten vil være lavere. Forholdet som bestemmer branneffekten er dimensjonen på vinduet. Ved å benytte den utregnede verdien fra Tabell 4.1 i kapittel 4.6, som gir et tall på hvor stor den maksimale branneffekten i rommet kan være, vil brannkurven følge samme utvikling som den raske brannen, men benytte seg av en lavere maksimal branneffekt. Modellen for scenarioene er bygget opp uten vindusbrudd med den hensikt å føre mest mulig luft til brannen fra brannstart.

5.8.1 Scenario 29

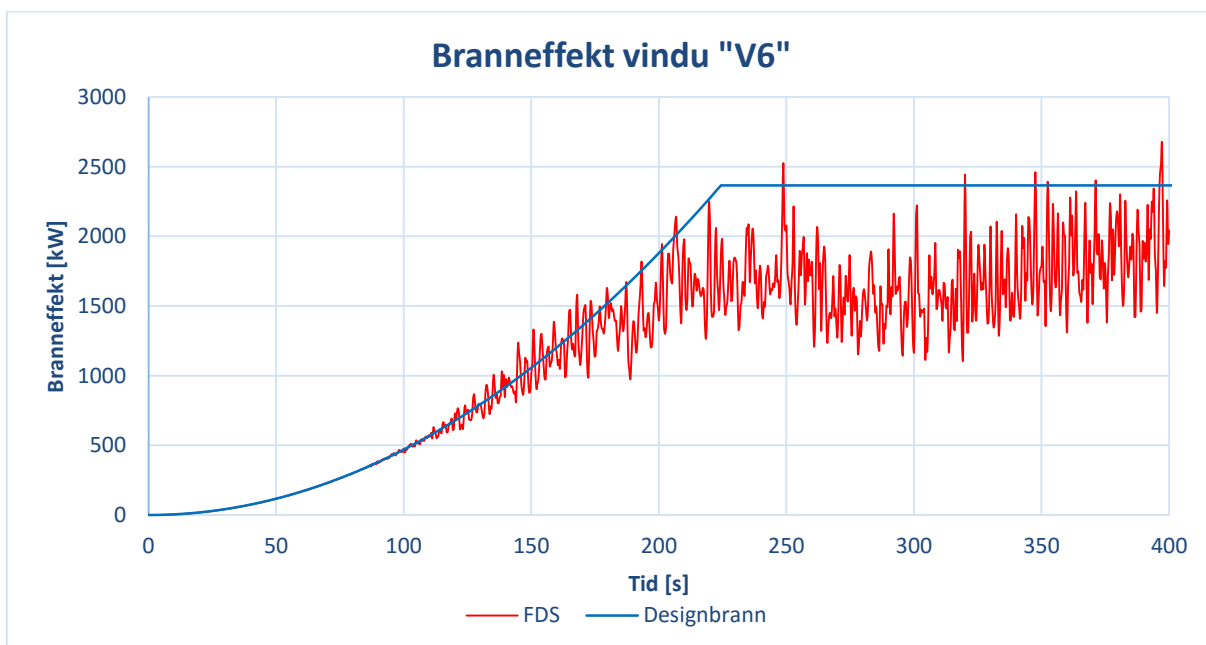
Dette scenarioet har en vindusdimensjon på 1,2mx1,2m. Som utregnet under kapittel 4.6, medfører dette en maksimal branneffekt på 2366 kW. Tiden det tar brannen å nå denne effekten ved en rask brannvekst, beregnes ved *Formel 4.5* til å være 224 sekunder. For vinduet med dimensjon 0,5*1,2 meter vil den maksimale branneffekten være 986 kW med tiden 145 sekunder. En fremstilling av disse grafene er vist nedenfor i Figur 5.22. En rask brannvekst er benyttet for å få frem det verst tenkelige resultatet i henhold til standarden NS 3901.

Grafene i Figur 5.22 nedenfor viser de teoretiske grafene som ligger til grunn for beregning av underventilerte branner ved de gitte vindusdimensjonene. I realiteten vil grafene følge samme utvikling som vist ovenfor, men være mer ustabile etter at den maksimale branneffekten er nådd på grunn av en ujevn frisklufttilførsel. Figur 5.22 ovenfor viser derfor totalt en høyere brannenergi enn det det som ville forekommet i praksis.



Figur 5.22. Branneffekt [kW] ved underventilering

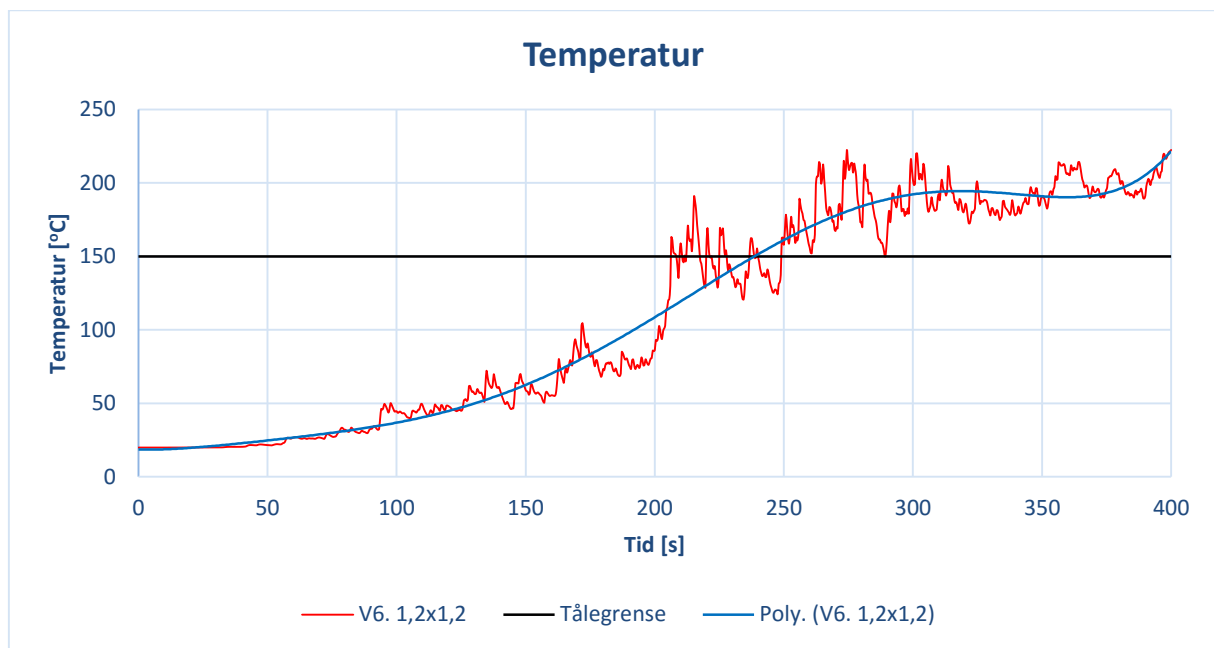
En sammenstilling av den beregnede og simulerte branneffekten er vist i Figur 5.23. Her illustreres tydelig forskjellen i branneffekten. En faktor som spiller inn på den beregnede branneffekten er hvilken formel som benyttes i beregningen. Det finnes flere formler for å beregne den underventilerte branneffekten som vil gi forskjellige resultater som kunne passet bedre med branneffekten FDS simulerer. Denne masteroppgavens hensikt er å belyse rømningsforholdene ved fravik fra ulike preaksepterte ytelser. De beregnede verdiene på maksimal branneffekt anses derfor tilstrekkelig for å belyse oppgavens hensikt.



Figur 5.23. Fremstilling av underventilert branneffekt [kW] for vindu "V6"

Temperatur

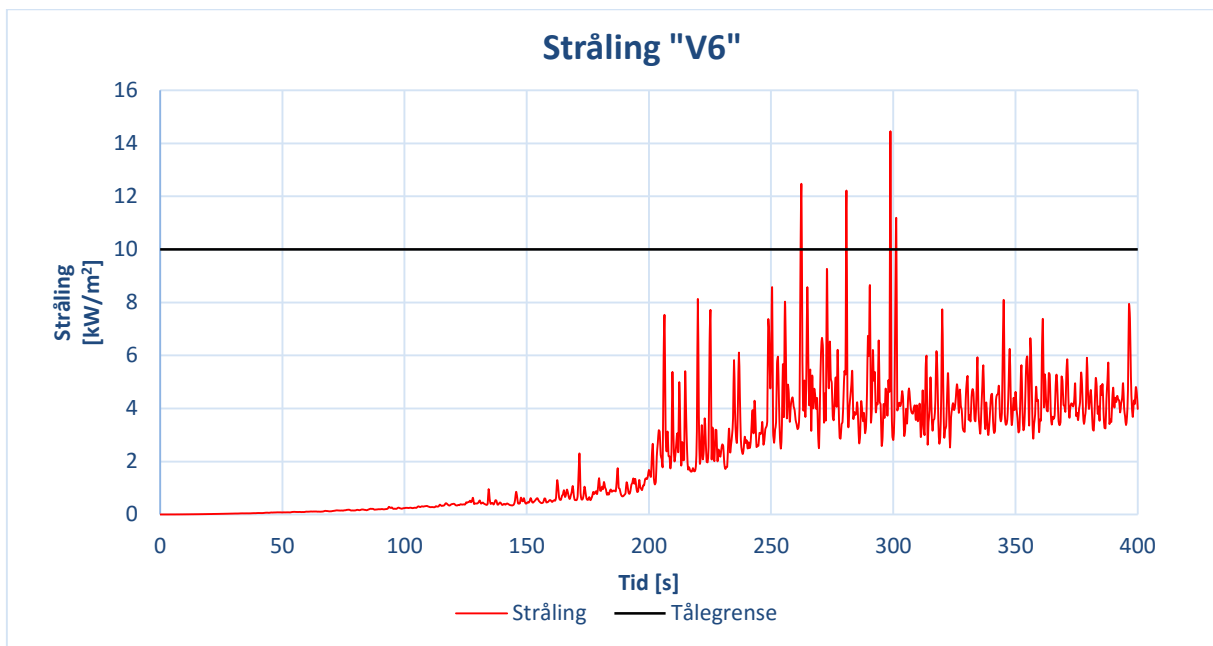
Figur 5.24 viser temperaturen på svalgangen som funksjon av tiden. Etter i overkant av 200 sekunder ut i brannforløpet overskrider temperaturen tålegrensen på 150°C. Til sammenligning er tiden til overskridelse for scenario 18, der døren er åpen, 180 sekunder ved avlesing direkte fra graf og 250 sekunder ved avlesing av trendlinjen. Scenario 17, som vist i Figur 5.13, har en lenger til tid overskridelse for avlesning av grafen og en kortere tid for avlesning av trendlinjen. Dette kan tyde på at når luften i rommet først er varmet opp er svingningene i temperaturen lavere grunnet et allerede varmt brannrom.



Figur 5.24. Temperaturen [°C] ved underventilering

Stråling

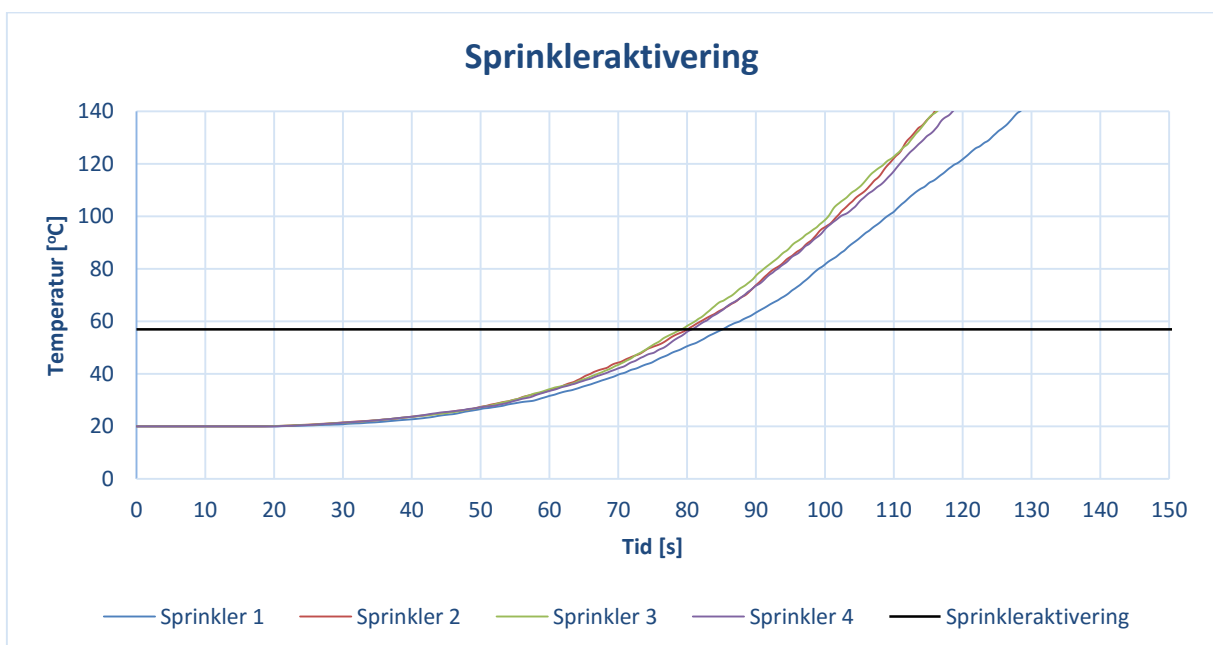
Strålingsintensiteten med hensyn på tiden er vist nedenfor i Figur 5.25. Som figuren illustrerer så vil det ikke forekomme vedvarende varmestråling som overskrider 10 kW/m². Det er flere høye varmestrålingsverdier etter 250 sekunder i brannforløpet der, den høyeste er i overkant av 14 kW/m². Denne verdien er langt under tålegrensen oppgitt som maksimal kortvarig eksponering. Varmestrålingen stabiliseres ved rundt 5 kW/m² når branneffekten blir konstant.



Figur 5.25. Varmestråling [kW/m²] ved underventilering

Sprinkleraktivering

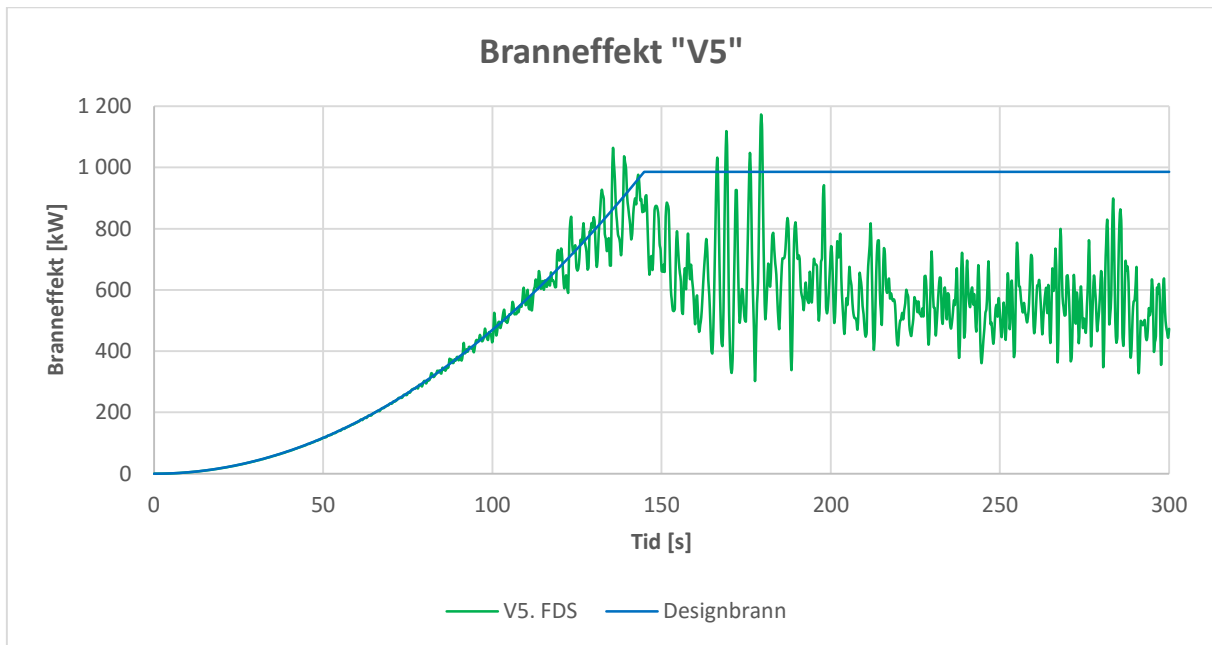
Aktiveringstidene følger samme trenden sammenlignet med scenario 18. "Sprinkler 1", som befinner seg på den motstående veggen til vinduet har en lenger tid til sprinkleraktivering enn sprinklerhodene i nærheten av vinduet. For scenario 29 er aktiveringstiden for sprinkler 1. 85,2 sekunder. Dette er nesten 9 sekunder raskere enn "Sprinkler 2" som viste den lengste aktiveringstiden for scenario 18. Figur 5.26 viser illustrerer for de ulike sprinklerhodene for scenario 29.



Figur 5.26. Tiden [s] til sprinkleraktivering

5.8.2 Scenario 30

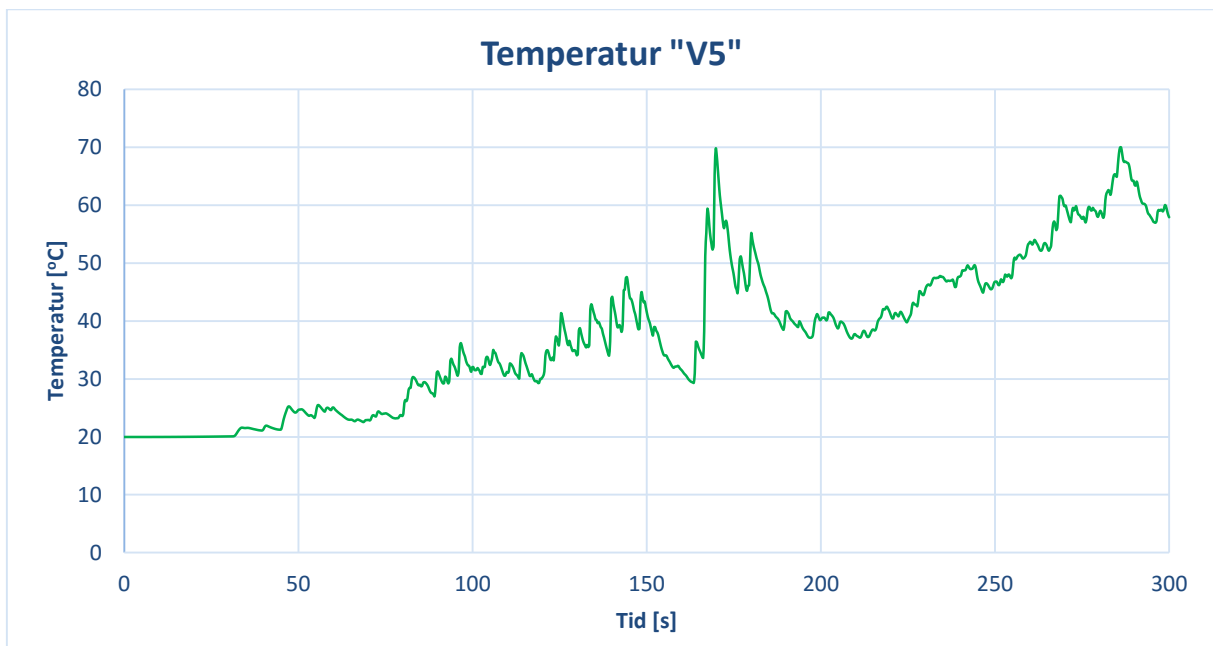
Scenario 30 har en vindusdimensjon på 0,5x1,2 meter. Som vist i Figur 5.23 innledningsvis i delkapittelet vil denne vindusdimensjonen medføre en lavere branneffekt som følge av at brannen er underventilert. Denne branneffekten er vist sammen med designbrannen nedenfor i Figur 5.27. I likhet med scenario 29 vil kurven følge samme utvikling som beregnet frem til den maksimale branneffekten er nådd. Etter dette vil brannkurven falle noe før den stabiliseres på et lavere nivå enn den maksimale branneffekten.



Figur 5.27 Fremstilling av kalkulert branneffekt [kW] for vindu "V5"

Temperatur

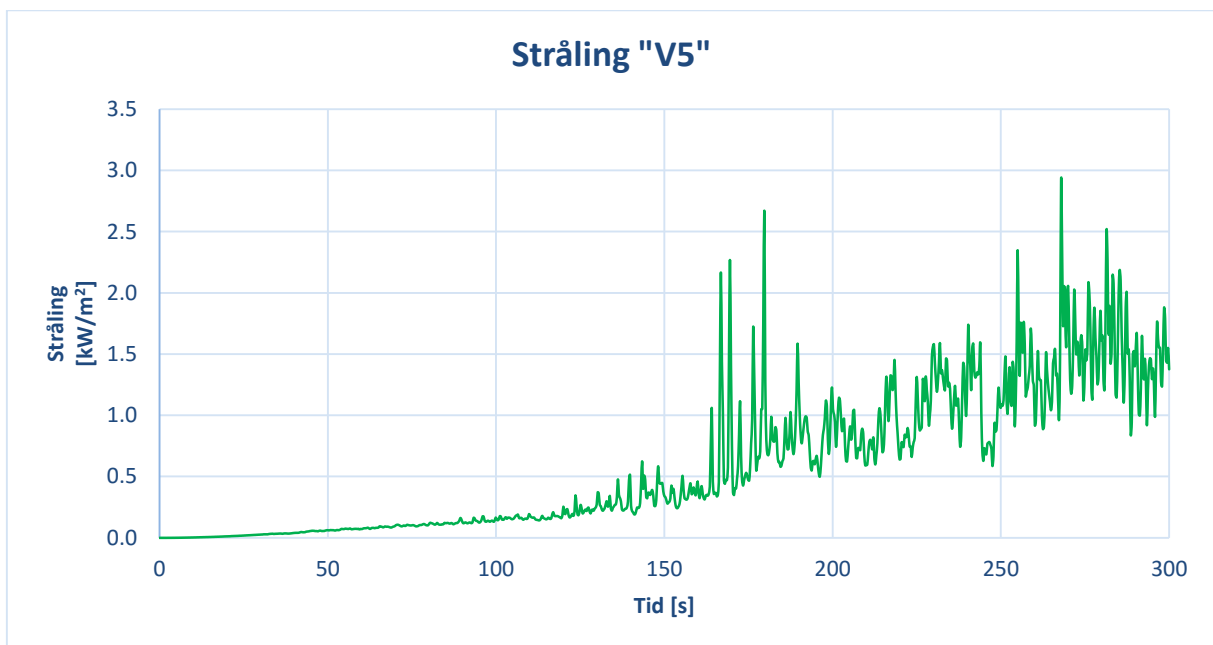
Temperaturen for scenario 30 er vist nedenfor i Figur 5.28. Som det fremgår av figuren, vil det ikke oppstå kritiske forhold med hensyn til temperaturen på svalgangen. Den maksimale temperaturen i det simulerte brannforløpet er på rundt 70°C som er under halvparten av den oppgitte tålegrensen på 150°C.



Figur 5.28. Temperaturen [°C] ved underventilering

Stråling

Strålingsintensiteten for scenario 30 er vist nedenfor i Figur 5.29. I likhet med temperaturen, vil det ikke oppstå kritiske forhold på svalgangen i løpet av det simulerte brannforløpet. Den maksimale strålingsintensiteten er i underkant av 3 kW/m² som tilsvarer 30% av tålegrensen på 10 kW/m².



Figur 5.29. Varmestråling [kW/m²] ved underventilering

5.8.3 Oppsummering

For beregning av tilgjengelig rømningstid for scenario 29 og 30 vises det til scenario 17 og 18 som har den samme brannveksten men som ikke er underventilert. For scenario 29 og 30 er døren inn til brannrommet lukket som medfører en ventilasjonskontrollert brann og en lavere maksimal branneffekt. Tiden til temperaturoverskridelse for scenario 29 er noe lavere enn det sammenlignbare scenario 18. Tiden til sprinkleraktivering er noe kortere for scenario 29 noe som medfører en lavere

branneffekt ved sprinkleraktivering. Det antas derfor at scenario et sprinklerkontrollert scenario 29 vil ha tilfredsstillende rømningsforhold ved sprinkleraktivering. For scenario 30 viser simuleringen av rømningsforholdene på svalgangen er tilfredsstillende selv uten sprinkleranlegg. Dette er på grunn av den lave branneffekten underventileringen medfører. Det antas også her at et sprinklerkontrollert tilfelle vil ha tilfredsstillende rømningsforhold.

5.9 Tilgjengelig rømningstid for alle modellene

En sammenstilling av rømningstidene for alle scenarioene er vist i Tabell 5.14. Den nødvendige rømningstiden er regnet ut ved *Formel 5.1* og tilgjengelige rømningstiden er funnet ved avlesning av de ulike grafene som simuleringene har produsert.

5.9.1 Fungerende sprinkleranlegg

Scenario 7-12 og 19-24 med henholdsvis en "vanlig" og "rask" brannvekst er tilfellet der sprinkleranlegget fungerer. Som det framgår av Tabell 5.14 vil det ikke oppstå kritiske forhold på svalgangen i det simulerte brannforløpet ved disse scenarioene selv om disse scenarioene fraviker den preaksepterte ytelsen om brannklassifisering av vindu på svalgang.

5.9.2 Ikke fungerende sprinkleranlegg

Scenario 1-6 og 13-18 men henholdsvis en "vanlig" og "rask" brannvekst er tilfellet der sprinkleranlegget ikke fungerer. Ved disse scenarioene er den utregnede nødvendige rømningstiden kortere enn den nødvendige rømningstiden, noe som resulterer i en negativ sikkerhetsmargin. Scenarioene tilfredsstiller derfor ikke TEK10 som krever at det skal legges inn en tilfredsstillende sikkerhetsmargin.

5.9.3 Vindu åpent fra brannstart

Scenario 25-28 er tilfeller der vinduet på soverommet står åpent fra brannstart. Simuleringer har vist at rømningsforholdene følger samme trenden som tilfellene der det oppstår vindusbrudd ved 86°C. Rømningstiden for disse scenarioene vil derfor være lik som scenarioene som har de like vindusdimensjonene med vinduet lukket fra brannstart.

5.9.4 Døren til soverommet lukket

Scenario 29 har en vindusdimensjon på 1,2x1,2 meter. Sikkerhetsmarginen for dette tilfellet er en negativ verdi på 206 sekunder. Denne er verdien i likhet med tilfellet der døren er åpen, ikke tilfredsstillende i henhold til TEK10. Scenario 30 har en vindusdimensjon på 0,5x1,2 meter og tilfredsstillende rømningsforhold. På grunn av at rømningsforholdene ved sprinkleraktivering for scenario 7-12 og 19-24 var så langt fra de fastsatte eksponeringsgrensene vil en sprinklerkontrollert scenario 29 være tilfredsstillende.

Tabell 5.14. Tilgjengelig og nødvendig rømningstid

| Sceanario. nr | Deteksjon [s] | Reaksjon [s] | Forflytning [s] | Nødvendig [s] | Tilgjengelig [s] | Sikkerhetsmargin [s] |
|---------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|------------------|----------------------|
| 1 | 180 | 250 | 15 | 445 | 390 | -55 |
| 2 | 180 | 250 | 15 | 445 | 410 | -35 |
| 3 | 180 | 250 | 15 | 445 | 400 | -45 |
| 4 | 180 | 250 | 15 | 445 | 415 | -30 |
| 5 og 26 | 180 | 250 | 15 | 445 | 390 | -55 |
| 6 og 25 | 180 | 250 | 15 | 445 | 373 | -72 |
| 7 | 142.7 | 250 | 15 | 407.7 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 8 | 139.9 | 250 | 15 | 404.9 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 9 | 143.2 | 250 | 15 | 408.2 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 10 | 143.2 | 250 | 15 | 408.2 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 11 | 141.5 | 250 | 15 | 406.5 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 12 | 141 | 250 | 15 | 406 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 13 | 150 | 250 | 15 | 415 | 262 | -153 |
| 14 | 150 | 250 | 15 | 415 | 255 | -160 |
| 15 | 150 | 250 | 15 | 415 | 252 | -163 |
| 16 | 150 | 250 | 15 | 415 | 255 | -160 |
| 17 og 28 | 150 | 250 | 15 | 415 | 250 | -165 |
| 18 og 27 | 150 | 250 | 15 | 415 | 250 | -165 |
| 19 | 108.6 | 250 | 15 | 373.6 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 20 | 107.8 | 250 | 15 | 372.8 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 21 | 110.6 | 250 | 15 | 375.6 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 22 | 110.2 | 250 | 15 | 375.2 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 23 | 108.2 | 250 | 15 | 373.2 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 24 | 109.1 | 250 | 15 | 374.1 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |
| 29 | 180 | 250 | 15 | 445 | 239 | -206 |
| 30 | 150 | 250 | 15 | 415 | Ikke kritisk | Tilfredsstilt |

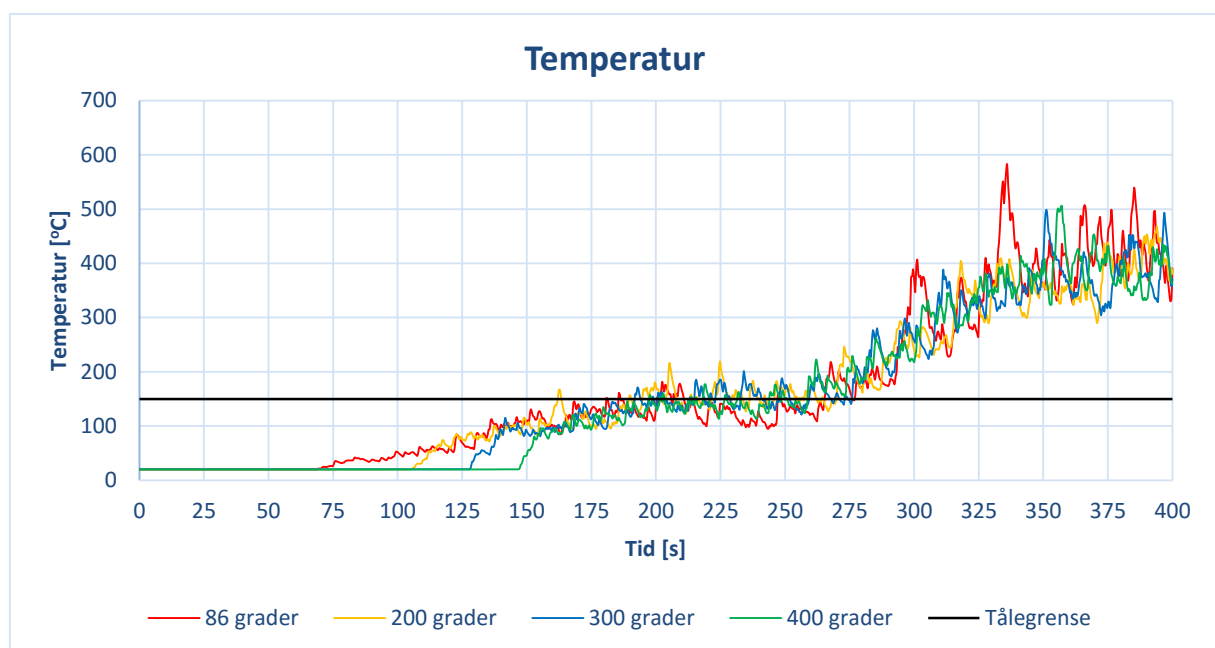
5.10 Effekten av senere vindusbrudd

For å undersøke hvilken effekt et senere vindusbrudd har på rømningsforholdene har det ved en rask brannvekst og vindusstørrelse 1,2x1,2 meter ("V6") blitt simulert tilfeller der vindusbrudd inntreffer ved 200°C, 300°C og 400°C. Forholdene på svalgangen med disse bruddtemperaturene sammenlignes med den tidligere benyttede bruddtemperaturen på 86°C.

En høy vindusbruddtemperatur kan medføre at brannen blir underventilert. I henhold til Tabell 4.1 i kapittel 4.6 vil det ved å benytte et brannklassifisert vindu forekomme en underventilert brann når branneffekten er større enn 4100 kW. Ved å benytte *Formel 4.5* for en rask brannvekst forekommer dette ved 295 sekunder. Figur 5.30 nedenfor viser at vindusbrudd inntreffer raskere enn denne tiden til underventilering. Det er derfor ingen fare for underventilering så lenge døren til soverommet holdes åpen.

Temperatur

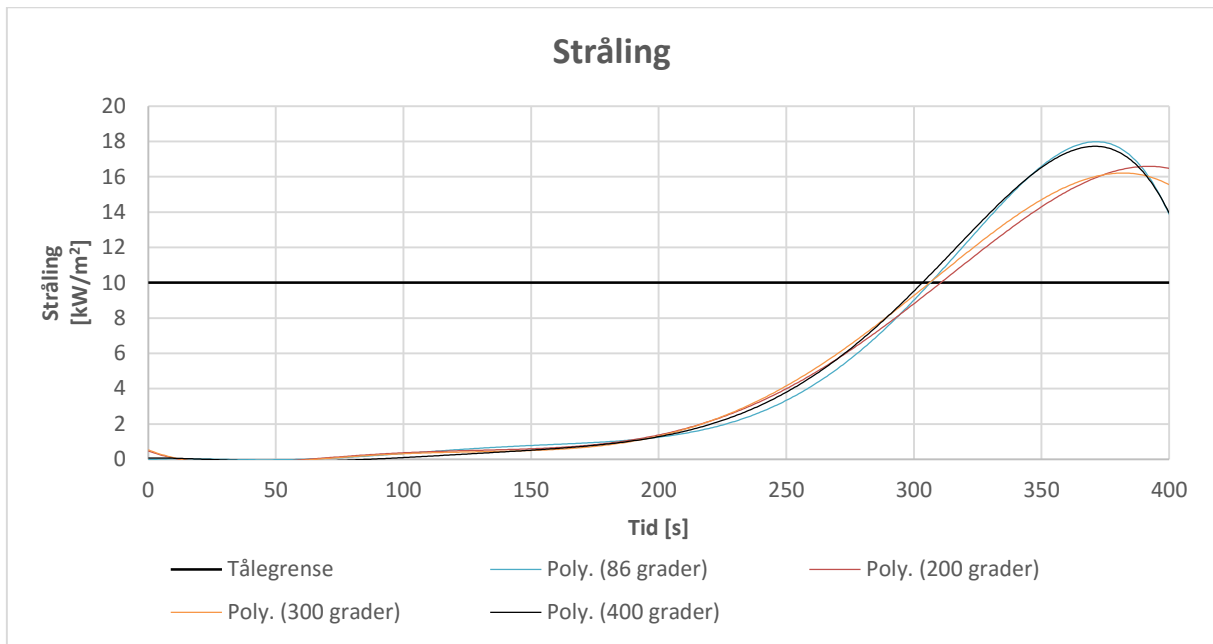
Temperaturen for de ulike tilfellene er fremstilt nedenfor i Figur 5.30. I starten av brannforløpet kan de ulike tidene til vindusbrudd inntreffer observeres. Som figuren viser så vil en lenger tid til vindusbrudd medføre en raskere stigning i temperatur i etterkant av bruddet. For alle tilfellene flater denne økningen ut ved rundt 100°C. Ved tiden 170 sekunder følger grafene samme utvikling.



Figur 5.30. Temperaturen på svalgangen [°C] ved ulike bruddtemperaturer for glasset

Stråling

Figur 5.31 viser brannforløpet med hensyn til strålingsintensiteten på svalgangen. I likhet med temperaturen er det liten forskjell mellom de ulike bruddtemperaturene. Tilfellet der vindusbrudd inntreffer på 200 °C har en noe lenger tilgjengelig rømningstid men dette er ubetydelig. Den benyttede bruddtemperaturen anses derfor som tilstrekkelig til å vurdere oppgavens problemområde.



Figur 5.31. Varmestråling på svalgangen [kW/m²] ved ulike bruddtemperaturer for glass

5.10.1 Oppsummering senere vindusbrudd

Simuleringer har vist at simuleringer med et senere vindusbrudd har liten innvirkning på den tilgjengelige rømningstiden på svalgangen. Scenario 1-30 belyser oppgavens område godt nok ved å anta vindusbrudd ved 86°C.

6 Diskusjon

6.1 Punkter til diskusjon

Det ble skrevet under kapittel 3.9.4 angående begrensingene i FDS at hastigheter og temperaturer blir kalkulert med en feilmargin på 10%-20%. I tillegg til dette ble det skrevet under kapittel 3.9.5 at FDS beregner gasstemperaturer, forbrenningsprodukter og trykket i brannrommet innenfor 15% fra eksperimentelle målinger, og at varmestråling og overflatetemperaturer måles innenfor 25%. Dette er nokså store marginer og kan ha mye å si på de gitte resultatene. Ved å legge de overnevnte marginene til grunn i resultatene, må sikkerhetsmarginen for den nødvendige rømningstiden være stor. Resultater og konklusjoner i oppgaven er tatt på bakgrunn av at sikkerhetsmarginen er tilfredsstillende. Den mest kritiske verdien fra de sprinklerkontrollerte forholdene er ved en rask brannvekst og vindu "V6". Temperaturen er her 60°C, som er under halvparten av grensen på 150°C. For å overskride denne tålegrensen ved dette tilfellet, må feilmarginene være over 100%. De sprinklerkontrollerte tilfellene anses derfor å ha en tilfredsstillende brannsikkerheten på grunn av gode rømningforholdene sprinkleranlegget medfører.

6.2 Valg av brann

Formlene som ligger til grunn for den underventilerte branneffekten baserer seg på et rom med en standard romhøyde og en enkel geometri. Modellen i denne oppgaven får en stor del av tilluften gjennom et tilliggende rom, noe som kan medføre en turbulens i rommet som sinker luftstrømmen. Innvirkningen dette har på resultatet er at branneffekten vil kunne være noe lavere enn den teoretiske branneffekten som ligger til grunn. Det vil også kunne forekomme flere høye maksimalverdier som vist på de presenterte grafene. Tålegrensene i denne oppgaven er definert ved når den er vedvarende. De høye maksimalverdiene er derfor negligert for korte overskridelser av eksponeringsgrensene.

6.3 Siktforhold

For siktforholdene har simuleringene vist at et stort vindu vil slippe ut noe mer røyk enn et lite vindu. En usikkerhet ved sikten er værforholdene og hvilken utforming byggverket har. Modellen i oppgaven er antatt å ha en omkringliggende temperatur på 20°C, uten påvirkning av vind. Selv et lite vindtrykk mot svalgangen vil føre til at siktforholdene forandrer seg. I tillegg til dette det antatt at det finnes et tilliggende rom inntil brannrommet som har direkte utgang til svalgangen. Dette fører til at mer røyk kommer ut på svalgangen slik at siktforholdene forverres.

6.4 Sprinkleraktivering

Et sprinkleranlegg installert på svalgang vil ha samme vannforsyning som et sprinkleranlegg installert i leilighet. Som omtalt i kapittel 3.4, viser statistikken fra NFPA at i tilfellene der sprinkleranlegget ikke løste ut, var 64% av tilfellene grunnet med at systemet var avslått. Sannsynligheten for skade på komponenten var 7% og er den eneste årsaken til sprinklerfeil som i denne oppgaven skiller sprinkleranlegget i leiligheten med sprinkleranlegget på svalgangen. I tillegg til dette har et tørranlegg en generell lavere sannsynlighet for å løse ut grunnet en ekstra ventil i systemet som er montert for å holde den utvendige delen av sprinkleranlegget tørt. Det antas derfor at sannsynligheten for at et sprinkleranlegg som ikke løses ut i leilighet vil ha samme feilårsak som et sprinkleranlegg som ikke løses ut på svalgang.

Det ble under kapittel 4.10.1 omtalt en usikkerhet på 6% i tiden til sprinkleraktivering. Simuleringene har vist at sprinklerkontrollerte branner gir såpass gode rømningsforhold at denne usikkerheten neglisjerbar for å fastsette en tilgjengelig rømningstid

6.5 Usikkerheter og videre arbeid

I denne oppgaven er det presentert hvilke rømningsforhold det vil være på en svalgang dersom det fravikes fra ulike preaksepterte ytelser. Resultatene fra simuleringene viser at dersom det installerte sprinkleranlegget i leiligheten fungerer, vil det være mulig å fravike fra de preaksepterte ytelsene for brannklassifisering på vindu og innstallering av sprinkleranlegg på svalgang, og likevel ha tilfredsstillende rømningsforhold. For tilfellene der sprinkleranlegget ikke fungerer vil det ikke være tilfredsstilte rømningsforhold på svalgangen dersom det benyttes et uklassifisert vindu. For spørsmålet om det er mulig er utforme byggverket uten brannklassifisering på vindu, må dette sees i sammenheng av hvilke konsekvenser en svikt i sprinkleranlegget vil medføre. Dersom en svikt i sprinkleranlegget inntreffer, vil ikke rømningsforholdene på svalgangen lenger være tilfredsstillende.

I henhold til NS 3901, skal det ved en komparativ analyse utføres en usikkerhetsanalyse etter prinsippene omtalt i standardens punkt 6.9. Denne usikkerhetsanalysen er vanligvis kvalitativ der hensikten er å beskrive usikkerhetene som ligger til grunn i antakelser og generelle unøyaktigheter i modellen. Denne oppgaven har kun tatt for seg en kvantitativ analyse der brannsikkerheten i et analysebyggverk har blitt sammenlignet med brannsikkerheten i et referansebyggverk. Oppgaven har tatt for seg et generelt leilighetsbygg der parameterne til grunn for analysen har blitt valgt basert på det verst tenkelige scenarioet som vil kunne inntreffe. For å vurdere om svalgangen kan utføres uten brannklassifisering på vindu må det derfor utføres en usikkerhetsanalyse der et spesifikt byggverk analyseres og alternative rømningsveier drøftes på bakgrunn av det spesifikke byggverkets utforming.

Som omtalt under kapittel 3.4.3, har et sprinkleranlegg, basert på statistikk, en 89% sjanse for å aktiveres og kontrollere en brann. For boliger og leiligheter er tallet enda høyere. Dette bringer usikkerhet inn i den endelige konklusjonen på oppgaven ved at sannsynligheten for at sprinkleranlegg ikke løses ut og kontrollerer brannen er tilstede.

Operasjonstrykket i sprinkleren er gitt til å gi den antatte effektreduseringen ved et operasjonstrykk på 2,11 bar. Et videre arbeid kan være å undersøke om en reduisering i sprinklerens operasjonstrykk, som medfører en reduisering i slukkeeffekten, likevel gir tilfredsstillende rømningsforhold.

Siktbarheten er sterkt avhengig av værforholdene. Simuleringene er gjennomført i vindstille forhold med en omgivelsestemperatur på 20°C. Et videre arbeid kan være å undersøke virkningen vind og temperaturer har på røykbevegelsen og siktbarheten på svalgangen.

7 Konklusjon

- Vil det være forsvarlig å utforme svalgangen uten sprinkleranlegg?

Simuleringene har vist at det ikke vil oppstå kritiske forhold på svalgangen dersom sprinkleranlegget i leiligheten fungerer. Hvis sprinkleranlegget i leiligheten feiler, vil sannsynligheten for at sprinkleranlegget på svalgangen også feiler være så stor at det kan antas at dette vil hende. Det vil derfor være forsvarlig å utforme svalgangen uten sprinkleranlegg, dersom det installeres sprinkleranlegg i leilighet. Ingen av de simulerte scenarioene har involvert sprinkleranlegg på svalgang, likevel er rømningsforholdene tilfredsstilte dersom sprinkleranlegget i leiligheten fungerer.

- Vil det, ved å ikke benytte et brannklassifisert vindu mot svalgang, likevel være tilfredsstillende rømningsforhold under brann?

Analysene i oppgaven har vist at dersom det fravikes fra den preaksepterte ytelsen for brannklassifisering på vindu og innstallering av sprinkleranlegg på svalgangen, vil et sprinkleranlegg i leiligheten kontrollere en brann i så stor grad at det ikke oppstår kritiske rømningsforhold på svalgangen. På grunn av at sannsynligheten for at sprinkleranlegget ikke løses ut er til stede, bør det utføres en risikoanalyse for å påvise om brannsikkerheten likevel tilfredsstillende.

- Hvilken innvirkning har et sprinkleranlegg installert i en leilighet på rømningsforholdene på svalgangen?

Som forklart under det første spørsmålet vil et sprinkleranlegg på svalgangen være avgjørende for at rømningsforholdene på svalgangen er utenfor kritiske grenser.

- Hvilken effekt har vindusbrudd under brann for rømningsforholdene på svalgangen?

Effekten av tiden til vindusbrudd har vist seg å være liten. En sammenligning av rømningsforholdene ved ulike temperaturer for vindusbrudd har vist at innvirkningen fra vindusbrudd er merkbar frem til temperaturen på svalgangen er rundt 100 °C. Etter dette flater forskjellen mellom de ulike bruddtemperaturene ut. Det konkluderes derfor med at et sent vindusbrudd har liten eller ingen innvirkning på rømningsforholdene.

Simuleringene har vist at en stor vindusdimensjon medfører en kortere tid til temperaturoverskridelse og en lenger tid til strålingsoverskridelse. Årsaken til dette er at ved å benytte en stor vindusdimensjon, vil mer varme overføres til svalgangen mens en mindre vindusdimensjon vil holde mer av varmen inne i brannrommet. En mindre vindusdimensjon vil også ha den korteste tiden til strålingsoverskridelse fordi det bygges opp et høyere trykk i brannrommet, slik at hastigheten på branngassene ut vinduet blir høyere. På grunn av at temperaturen har vist seg å være den styrende faktoren for den tilgjengelige rømningstiden, vil en mindre vindusdimensjon være å foretrekke. Selv om en mindre vindusdimensjon gir en lenger tilgjengelig rømningstid, har simuleringene vist at den tilgjengelige rømningstiden er kortere enn den nødvendige rømningstiden, dersom sprinkleranlegget i leiligheten ikke fungerer. Dette betyr at en tilfredsstillende brannsikkerhet på svalgangen er avhengig av et fungerende sprinkleranlegg i leilighet. Simuleringene har vist vindusdimensjonen har ingen innvirkning på brannsikkerheten ved

sprinklerkontrollert brann. For underventilerte tilfeller vil en mindre vindusdimensjon være å foretrekke på grunn av at den gir en lavere maksimal branneffekt.

7.1 Valg av brannvekst

I oppgaven har det blitt simulert to forskjellige brannvekster der resultatene har vist at den raskeste brannveksten gir en kortere tilgjengelig rømningstid. For tilfellene der rømningsforholdene var utenfor kritiske verdier var dette uavhengig av brannveksten, men heller et resultat av sprinkleranleggets reduserende effekt på brannen.

7.2 Innstilling DIBK

DIBK jobber med en forenkling og forbedring av TEK10 med den hensikt å redusere byggekostnadene uten at det går på bekostning av den generelle sikkerheten. For brannsikkerheten skal sikkerhetsnivået for personer, samfunn og materielle verdier opprettholdes. Resultatene funnet i denne masteroppgaven viser at dersom kravet om sprinkleranlegg på svalgang fjernes, er sikkerhetsnivået likevel tilfredsstillende. For å tillegg kunne fjerne kravet om brannklassifisering på vinduet trengs det å utføre en risikoanalyse der et spesifikt byggverk analyseres og muligheten for alternative rømningsveier drøftes i bakgrunn i en sannsynlighet for at sprinkleranlegget i brannrommet ikke fungerer.

Referanser

- [1] SINTEF Byggforsk. *Byggdetaljer 526.301 Svalganger og altanganger i boligbygninger*, Høst 2004.
- [2] Morgan J. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (fifth edition)*, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2016
- [3] *Krav til risikovurdering av brann i byggverk*, NS 3901, 2012
- [4] *Byggteknisk forskrift 2010*, 01.01.2016
- [5] *Veiledning om tekniske krav til byggverk 2010*, 01.01.2016
- [6] SINTEF Byggforsk. *Byggdetaljer 626.102 Dokumentasjon av brannsikkerhet for bygninger i bruk*, 2013
- [7] *SN-INSTA/TS 950 Analytisk brannteknisk prosjektering*, 2014
- [8] *REN veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven*, utgave 2. 1999
- [9] *REN veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven*, utgave 3. 2003
- [10] *Veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997*, 4. utgave 2007
- [11] *Boligsprinkler - Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold*, NS-INSTA 900, 2013
- [12] Mostue, Stensaas og Wighus. *Forventet effekt av faste, aktive slokkeanlegg –Boligsprinkler og vanntåke*, rapport A03105, 14.05.03.
- [13] Hall, J.R., U.S. Experience with sprinklers, National Fire Protection Association 2013
- [14] HO-3/2000. *Temaveiledning Røykventilasjon*, melding HO-3/2000, Statens Bygningstekniske etat, 2000.
- [15] David A. Purser and Jamie L. McAllister, "Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat" i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (fifth edition)*, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2016, kapittel 63
- [16] Nystedt, F. (2011). "Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings", Department of Fire Safety Engineering and System Safety, Lund University, Sweden. Rapport 3150, Lund 2011.
- [17] Practice Note for Tenability Criteria in Building Fires
- [18] William D. Walton, Douglas J. Carpenter, and Christopher B. Wood, "Zone Computer Fire Models for Enclosures" i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (fifth edition)*, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2016, kapittel 31
- [19] Kevin McGrattan and Stewart Miles, "Modelling Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD)" i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (fifth edition)*, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2016, kapittel 32

- [20] Emanuele Gissi. (2010, *An introduction to Fire Simulation with FDS and Smokeview*. Hentet fra <http://www.emanuelegissi.eu/>
- [21] McGrattan, K, et al. *FDS Fire Dynamics Simulator User's Guide*. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition. November 2015.
- [22] McGrattan, K, et al. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*. NIST Special Publication 1018-1 Sixth Edition. November 2015.
- [23] McGrattan, K, et.al. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification*. NIST Special Publication 1018-2 Sixth Edition. November 2015.
- [24] McGrattan, K, et.al. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation*. NIST Special Publication 1018-3 Sixth Edition. November 2015.
- [25] McGrattan, K, et.al. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 4: Configuration Management*. NIST Special Publication 1018-4 Sixth Edition. November 2015.
- [26] Thunderhead Engineering, "PyroSim User Manual", 2016
- [27] NIST. *Nedlasting av FDS*. <https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- [28] McGrattan, K. (2007). *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications. Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS)*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Rockville, MD, 2007, and Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, CA, NUREG-1824 and EPRI 1011999.
- [29] Bergmal og Wang, "Hjelp jeg bor ved en svalgang", Hovedprosjekt, Studie for ingeniørfag, Høgskolen Stord/Haugesund, 2013.
- [30] Michael Spearpoint, "Post flashover Fires", i *Fire Engineering Design Guide Third Edition, New Zealand, 2008*.
- [31] Skelly Michael J. *An experimental investigation of glass breakage in compartment fires*. Faculty of Virginia Polytechnic Institute, 1990.
- [32] Keski-Rahkonen, Olavi, "Breaking of Window Glass Close to Fire", *Fire and Materials*, vol 12, pp 61-69 (1988)
- [33] SINTEF Byggforsk. *Byggdetaljer 571.951 Bygningsglass*, April 2016
- [34] Tokiyoshi Yamada and Yuki Akizuki, "Visibility and Human Behaviour in Fire Smoke" i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (fifth edition)*, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2016, kapittel 61
- [35] Thunderhead Engineering. *Fuel Composition Calculator*, <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/resources/> Nedlastet 1. februar 2016.
- [36] Michael Spearpoint, "Fire Behaviour", i *Fire Engineering Design Guide Third Edition, New Zealand, 2008*.

- [37] Michael Spearpoint, "Pre-flashover Fires", i *Fire Engineering Design Guide Third Edition, New Zealand, 2008*.
- [38] National Fire Protection Association. *Standard for Smoke and Heat Venting NFPA 204*. 1998
- [39] Boverket. *Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd*. BBRAD 3 2013:12
- [40] Russel P. Fleming, "Automatic Sprinkler System Calculations" i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (fifth edition)*, Quincy, Mass.: National Fire Protection Association, 2016, kapittel 42
- [41] Mostue og Stensaas. *Effekt av boligsprinkler i omsorgsboliger*, rapport A02117, 11.08.2002
- [42] Nystedt og Frantzich. "Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar", Department of Fire Safety Engineering and System Safety, Lund University, Sweden. Rapport 3160, Lund 2011
- [43] *Faste brannsløkkesystemer - Deler til sprinkler og vannspray-systemer - Del 1: Sprinkler*, NS-EN 12259-1:1999, 2001
- [44] Mostue og Opstad. *Effekt av brannverntiltak- Vegger og sprinkler*, rapport A01118, 19.02.2002.
- [45] Stefan Schonberg. " Fullskaleforsøk av brand i ett rum med boendesprinkler", Department of Fire Safety Engineering and System Safety, Lund University, Sweden. Rapport 5061, Lund 2000.
- [46] Michael Spearpoint, "Means of escape", i *Fire Engineering Design Guide Third Edition, New Zealand, 2008*.
- [47] Michael Spearpoint (Ed), *Fire Engineering Design Guide Third Edition, New Zealand, 2008*.
- [48] DSB, *Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn*, 01.07.2002

Vedlegg

Vedlegg A **Plan- og snitt-tegning av de ulike vindusdimensjonene**

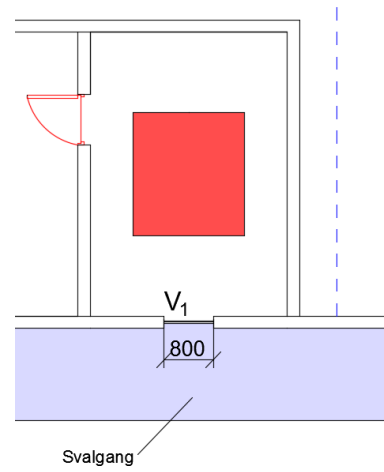
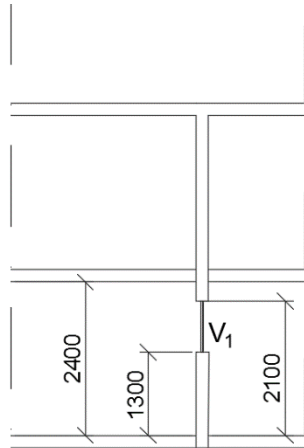
Vedlegg B **Inndatafil til FDS**

Vindu

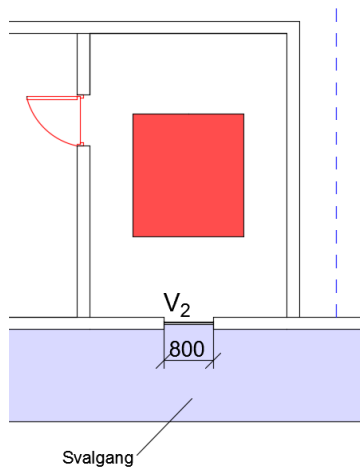
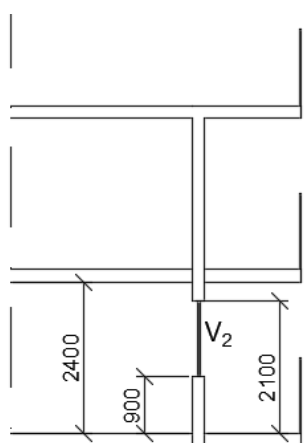
Snitt

Plan

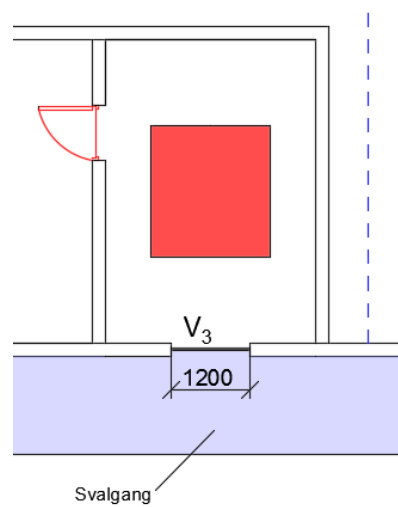
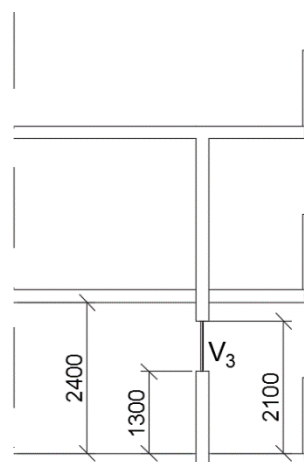
V1
0,8x0,8



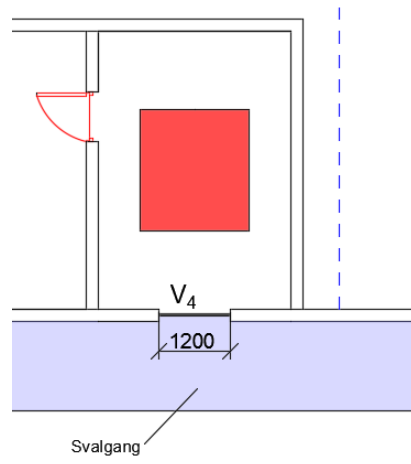
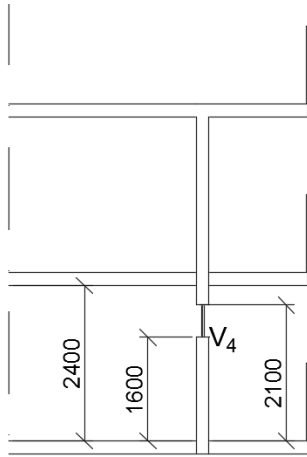
V2
0,8x1,2



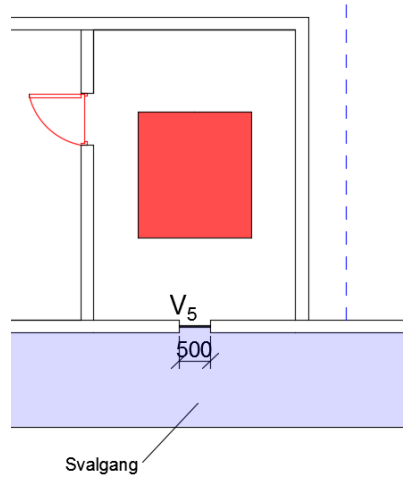
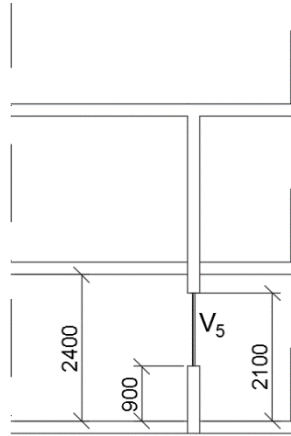
V3
1,2x0,8



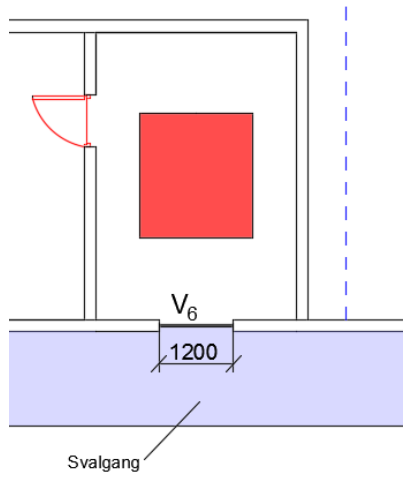
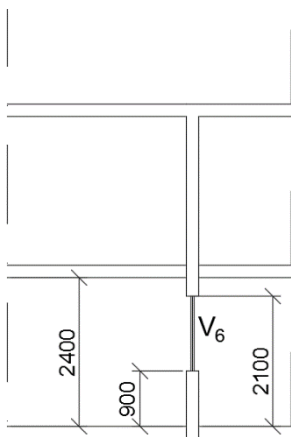
V4
1,2x0,5



V5
0,5x1,2



V6
1,2x1,2



Forklaring til vedlegg:

Dette vedlegget viser kodefilen til fds i .fds-format for Scenario 6 som har en "vanlig" brannvekst. Der koden er forskjellig for de ulike scenarioene har dette blitt kommentert i rød skrift og koden ved disse punktene er uthevet i blått. Målepunktene for strålingen og temperaturen som grafene er hentet fra er uthevet i grønt.

Modell_6_ekstra.fds

Generated by PyroSim - Version 2015.4.1214

11.mai.2016 14:58:33

&HEAD CHID='Modell_6_ekstra'/

&TIME T_END=550.0/ *Simuleringstiden har vært forskjellig mellom ulike scenarioene*

&DUMP RENDER_FILE='Modell_6_ekstra.ge1', COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_RESTART=300.0/

&MESH ID='Mesh lavt nede', IJK=62,32,72, XB=-0.4,5.8,-1.2,2.0,-0.2,7.0/

&MESH ID='Mesh rom venstre', IJK=48,90,30, XB=1.0,5.8,2.0,11.0,-0.2,2.8/

&MESH ID='Mesh brannrom', IJK=42,90,30, XB=5.8,10.0,-1.2,7.8,-0.2,2.8/

&MESH ID='Mesh høyt oppe', IJK=42,32,42, XB=5.8,10.0,-1.2,2.0,2.8,7.0/

&MESH ID='Mesh høyre ute', IJK=22,32,72, XB=10.0,12.2,-1.2,2.0,-0.2,7.0/

&REAC ID='POLYURETHANE_REAC',

FYI='SFPE GM27 3465 og BBRAD',

FUEL='REAC_FUEL',

C=1.0,

H=1.7,

O=0.3,

N=0.08,

CO_YIELD=0.1,

SOOT_YIELD=0.1/

&PROP ID='QR ',
 QUANTITY='LINK TEMPERATURE',
 ACTIVATION_TEMPERATURE=57.0,
 RTI=50.0/
&DEVC ID='THCP03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,2.1,0.96/
&DEVC ID='THCP04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,2.1,1.34/
&DEVC ID='TEMPERATUR VINDU', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,2.1,1.72/ Dette målepunktet bestemmer
temperaturen på vindusglasset.
&DEVC ID='THCP06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,2.1,2.1/
&DEVC ID='THCP09', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,1.0,1.34/
&DEVC ID='TEMPERATUR SVALGANG', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,1.0,1.72/ Måling av temperaturen
&DEVC ID='THCP11', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,1.0,2.1/
&DEVC ID='THCP16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.6,1.0,4.7/
&DEVC ID='THCP20', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.0,4.3,1.34/
&DEVC ID='THCP21', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.0,4.3,1.72/
&DEVC ID='THCP22', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=4.0,4.3,2.1/
&DEVC ID='THCP24', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=12.0,1.0,2.1/
&DEVC ID='THCP25', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=12.0,1.0,1.72/
&DEVC ID='HD Sprinkler 1', PROP_ID='QR ', XYZ=7.6,6.5,2.3/
&DEVC ID='HD Sprinkler 2', PROP_ID='QR ', XYZ=6.1,4.3,2.3/
&DEVC ID='HD Sprinkler 3', PROP_ID='QR ', XYZ=9.1,4.3,2.3/
&DEVC ID='HD Sprinkler 4', PROP_ID='QR ', XYZ=7.6,2.1,2.3/
&DEVC ID='TEMPERATUR OVER BRANNEN', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.3,4.3,2.3/
&DEVC ID='THCP12', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=8.3,1.0,1.34/
&DEVC ID='TEMPERATUR SVALGANG01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=8.3,1.0,1.72/
&DEVC ID='THCP13', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=8.3,1.0,2.1/
&DEVC ID='THCP28', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=6.9,1.0,1.34/
&DEVC ID='TEMPERATUR SVALGANG02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=6.9,1.0,1.72/
&DEVC ID='THCP29', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=6.9,1.0,2.1/
&DEVC ID='FLOW', QUANTITY='HEAT FLOW', XB=7.0,8.2,1.8,1.8,0.9,2.1/
&DEVC ID='SENER TOPP', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.6,1.0,1.8/
&DEVC ID='GAS01', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.9,1.0,1.8/
&DEVC ID='GAS02', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=8.2,1.0,1.8/
&DEVC ID='GAS15', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=12.1,1.0,1.8/

```

&DEVC ID='GAS16', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.3,1.0,1.8/
&DEVC ID='GAS17', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.0,1.0,1.8/
&DEVC ID='GAS22', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.0,1.0,1.5/
&DEVC ID='SENER_MIDT', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.6,1.0,1.5/
&DEVC ID='GAS24', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.9,1.0,1.5/
&DEVC ID='GAS25', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=8.2,1.0,1.5/
&DEVC ID='GAS27', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.3,1.0,1.5/
&DEVC ID='GAS31', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.0,1.0,1.2/
&DEVC ID='SENER_BUNN', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.6,1.0,1.2/
&DEVC ID='GAS33', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.9,1.0,1.2/
&DEVC ID='GAS34', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=8.2,1.0,1.2/
&DEVC ID='GAS36', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.3,1.0,1.2/
&DEVC ID='TEMPERATUR OVER BRANNEN01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.3,4.3,1.9/
&DEVC ID='TEMPERATUR OVER BRANNEN02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.3,4.3,1.5/
&DEVC ID='TEMPERATUR OVER BRANNEN03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=7.3,4.3,1.1/
&DEVC ID='GAS10', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.0,1.0,2.1/
&DEVC ID='GAS12', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.3,1.0,2.1/
&DEVC ID='SENER_TOPP01', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.6,1.0,2.1/
&DEVC ID='GAS14', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=7.9,1.0,2.1/
&DEVC ID='GAS23', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=8.2,1.0,2.1/

&CTRL ID='Kontroll_vindu', FUNCTION_TYPE='DEADBAND', SETPOINT=23.0,86.0, ON_BOUND='UPPER', LATCH=.FALSE.,
INPUT_ID='TEMPERATUR VINDU'/ Tiden til vindusbrudd har variert i slutten av oppgaven for å undersøke virkningen av
sent vindusbrudd.

&MATL ID='CONCRETE',

    FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',

    SPECIFIC_HEAT=1.04,

    CONDUCTIVITY=1.8,

    DENSITY=2280.0/

&SURF ID='Concrete',

    RGB=146.0,202.0,166.0,

    BACKING='VOID',

    MATL_ID(1,1)='CONCRETE',

    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,

    THICKNESS(1)=0.2/

```

&SURF ID='burner',

COLOR='RED',

HRRPUA=1389.0,

TAU_Q=-500.0/ Her bestemmes branneffekten. Denne har variert mellom de ulike scenarioene i henhold til det som står skrevet i oppgaven.

&OBST XB=-0.4,12.2,0.3,1.8,-0.2,0.0, SURF_ID='Concrete'/ Svalgang-dekke

&OBST XB=6.0,9.2,2.0,6.6,-0.2,0.0, SURF_ID='INERT'/ Gulv-leilighet

&OBST XB=5.8,6.0,2.0,6.6,-0.2,2.4, SURF_ID='INERT'/ Vegg-leilighet

&OBST XB=9.2,9.4,2.0,6.6,-0.2,2.4, SURF_ID='INERT'/ Vegg- leilighet

&OBST XB=5.8,9.4,6.6,6.8,-0.2,2.4, SURF_ID='INERT'/ Vegg-leilighet

&OBST XB=5.8,9.4,2.0,6.8,2.4,2.6, SURF_ID='INERT'/ Tak-leilighet

&OBST XB=-0.4,12.2,1.8,2.0,-0.2,2.6, SURF_ID='INERT'/ Yttervegg

&OBST XB=-0.4,12.2,0.3,0.31,0.0,1.2, SURF_ID='Concrete'/ Rekkverk

&OBST XB=-0.4,12.2,0.3,1.8,2.4,2.6, SURF_ID='Concrete'/ Svalgang-dekke, øvre

&OBST XB=-0.4,12.2,1.8,2.0,2.6,5.2, SURF_ID='INERT'/ Yttervegg

&OBST XB=-0.4,12.2,0.3,0.31,2.6,3.8, SURF_ID='Concrete'/ Rekkverk

&OBST XB=-0.4,12.2,0.3,0.31,5.2,6.4, SURF_ID='Concrete'/ Rekkverk

&OBST XB=-0.4,12.2,0.3,1.8,5.0,5.2, SURF_ID='Concrete'/ Svalgang-dekke, øvre

&OBST XB=2.0,5.8,6.6,6.8,0.0,2.4, SURF_ID='INERT'/ Veg tilleggende rom

&OBST XB=2.0,5.8,2.0,6.8,-0.2,0.0, SURF_ID='INERT'/ Gulv tilleggende rom

&OBST XB=2.0,2.2,2.0,6.6,0.0,2.4, SURF_ID='INERT'/ Vegg tilleggende rom

&OBST XB=2.0,5.8,2.0,6.8,2.4,2.6, SURF_ID='INERT'/ Tak tilleggende rom

&OBST XB=6.7,8.5,3.3,5.3,0.0,0.2, SURF_ID='INERT'/ Plassering av brann

&HOLE XB=7.0,8.2,1.8,2.0,0.9,2.1, RGB=20.0,0.0,255.0, CTRL_ID='Kontroll_vindu'/ Vindu glassflaten fra vinduet når "kontroll_vindu" når den angitte temperaturen for brudd.

Denne koden har fjernet

&HOLE XB=5.79,6.0,4.5,5.4,0.0,2.1/ Dør_soverom

&HOLE XB=3.55,4.45,6.6,6.8,0.0,2.1/ Hole

&HOLE XB=3.55,4.45,1.8,2.01,0.0,2.1/ Hole

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.4,-0.4,-1.2,2.0,-0.2,7.0/ Mesh Vent: Mesh lavt nede [XMIN]

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.4,5.8,-1.2,-1.2,-0.2,7.0/ Mesh Vent: Mesh lavt nede [YMIN]

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.4,5.8,-1.2,2.0,7.0,7.0/ Mesh Vent: Mesh lavt nede [ZMAX]

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=12.2,12.2,-1.2,0.3,-0.2,7.0/ Mesh Vent: Mesh høyre ute [XMAX]

&VENT SURF_ID='OPEN', XB=10.0,12.2,-1.2,-1.2,-0.2,7.0/ Mesh Vent: Mesh høyre ute [YMIN]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=10.0,12.2,-1.2,2.0,7.0,7.0/ Mesh Vent: Mesh høyre ute [ZMAX]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=5.8,10.0,-1.2,-1.2,3.4,7.0/ Mesh Vent: Mesh høyt oppe [YMIN]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=5.8,10.0,-1.2,2.0,7.0,7.0/ Mesh Vent: Mesh høyt oppe [ZMAX]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=5.8,10.0,-1.2,-1.2,-0.2,3.4/ Mesh Vent: Mesh brannrom [YMIN]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=10.0,10.0,2.0,7.8,0.0,2.4/ Mesh Vent: Mesh brannrom [XMAX]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=5.8,10.0,7.8,7.8,0.0,2.4/ Mesh Vent: Mesh brannrom [YMAX]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=5.8,5.8,7.8,11.0,0.0,2.4/ Mesh Vent: Mesh 3 [XMAX]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.0,1.0,2.0,11.0,0.0,2.4/ Mesh Vent: Mesh 3 [XMIN]
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.0,5.8,11.0,11.0,0.0,2.4/ Mesh Vent: Mesh 3 [YMAX]02
&VENT SURF_ID='burner', XB=6.7,8.5,3.3,5.3,0.2,0.2/ Vent05

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=7.6/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', VECTOR=.TRUE., PBX=7.6/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.5/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=1.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=1.8/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=5.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=4.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', VECTOR=.TRUE., PBY=1.0/
&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', VECTOR=.TRUE., PBX=7.6/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=7.6/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=1.8/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=1.0/

&TAIL /