



Sammendrag

Det er denne oppgavens hensikt å vekke oppmerksomhet knyttet til husbranner i Norge. I 2014 var husbranner alene årsaken til 55 dødsfall i landet (DSB 2013b). Dette innebærer et gjennomsnitt på 4-5 tap av menneskeliv, grunnet brann, per måned.

Oppgaven har som mål å undersøke hvilken betydning intern bygningstetthet har for spredning av den dødelige CO-gassen mellom leiligheter, og hvordan dette påvirker personsikkerheten ved brann. Det velges å ta utgangspunkt i CO, da gassen er vurdert til å stå for flest tap av menneskeliv ved brann (Karlsson & Quintiere 2000). Videre søker oppgavens problemstilling svar på hvor lang tid, vurdert i minutter, det vil ta før dødelige mengder CO har spredd seg til nærmeste nabo.

Det velges å studere tre ulike brannfaser. Disse er ulmebrann, brann under utvikling og fullt utviklet brann. Problemstillingen besvares ved hjelp av brannsimuleringer i dataprogrammet Argos, matematiske formler og sporgassmålinger med utgangspunkt i NS-EN ISO 12569. Sporgassmålingene, der CO₂ er benyttet som sporgass istedenfor CO, er utført i tre utvalgte leiligheter i Finstad Park, Ski, Akershus. Prinsippet bak målingene er å tilføre en leilighet en høy CO₂-konsentrasjon, for så å studere naboileilighetenes CO₂-endring.

Under utarbeidelse av oppgaven, kommer det frem flere felles faktorer som påvirker opptredende tidsgrenser før dødelige CO-konsentrasjoner har oppstått i naboileilighetene. De ulike rommenes volum, opptredende trykkdifferanser, prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen og om luftlekkasjene opptrer lokalt eller jevnt fordelt over branncelleveggen, er faktorer som viser seg å være av høy betydning.

Med bakgrunn i utførte målinger, beregninger og vurderinger, konkluderes det med at intern bygningstetthet er av stor betydning for personsikkerhet ved brann. CO-spredning påvirkes i stor grad av interne luftlekkasjer mellom leiligheter, hvor utfallet kan bli kritisk. For små rom, med lokale branngasslekkasjer, er tidsgrensen før kritiske CO-verdier er oppnådd i naboileiligheten, estimert til å variere mellom 10 - 50 minutter, avhengig brannfase. For større volum, typisk leiligheter på 70 - 80 m², er estimerte tidsgrenser tilfredsstillende. Dette med hensyn på tidsgrensen i brannmotstandskravet EI 60 A2-s1,d0.

Abstract

The intention of this thesis is to raise awareness related to house fires in Norway. In 2014 house fires were alone the cause of 55 deaths in Norway (DSB 2013b). This means an average of 4-5 fatalities due to fire, per month.

The thesis aims to examine the importance of internal building imperviousness due to the spread of deadly CO gas between apartments, and to examine how this affects personal safety during fire. CO is chosen as a basis, as the gas is estimated to be responsible for most fatalities in fires (Karlsson & Quintiere 2000). Furthermore the thesis seeks answers to how long it will take, estimated in minutes, before lethal amounts of CO has been spread to the nearest neighbor.

Three different fire phases will be studied. These are smoldering fire, fire under development and fully developed fire. The question of the thesis is answered by using fire simulations in the computer program Argos, mathematical formulas and trace gas measurements based on NS-EN ISO 12569. Trace gas measurements, where CO₂ is used as a tracer gas instead of CO, are performed in three selected apartments at Finstad Park, Ski, Akershus. The principle behind the measurements is to provide an apartment a high CO₂ concentration, and then study the CO₂ changes in the neighboring apartments.

During preparation of this thesis, several common factors that affect the occurrence of time limits before lethal CO-concentrations occur in the neighboring apartments were discovered. The rooms volume, occurring pressure differences, percentage leakage airflow over the fire compartment wall and if the air leakages occur locally or evenly distributed over a fire compartment wall, are all factors that prove to be of high importance.

Based on performed measurements, calculations and considerations, it is concluded that internal building imperviousness is of great importance for personal safety in case of fire. The CO-spreading is affected by internal air leakages between apartments, where the outcome can be critical. For small rooms, with local fire gas leakages, the time limit before critical CO values are obtained in the neighboring apartment, are estimated to vary between 10-50 minutes, depending on the fire phase. For larger volumes, typically apartments of 70 – 80 m², the estimated time limits are satisfying with consideration to the time limit due to the fire resistance requirement EI 60 A2-s1, d0.

Forord

Denne oppgaven markerer et avsluttende arbeid på et femåring masterprogram innenfor Byggeteknikk og arkitektur ved Norges miljø og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven omhandler intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann, og er skrevet ved Institutt for matematiske realfag og teknologi. Oppgaven gir 30 studiepoeng og er utarbeidet våren 2015.

Jeg ønsker å rette en stor takk til alle som har bidratt til gjennomførelse og motivasjon ved utførelse av denne oppgaven. En spesiell takk rettes til min hovedveileder, professor Tormod Aurlien, og biveileder overingeniør Einar Nathan, for veiledning, støtte og inspirasjon. Det rettes en stor takk til Dimitrios Kraniotis for drøfting og fremstilling av data, og Kolbjørn Mohn Jensen, Mycoteam, for lån av måleutstyr. For mulighet til utførelse av forsøket, takkes Skanska Norge As, Region Øst, ved Espen Rudshaug. For gode innspill, samt bidrag til benyttelse av simuleringsprogrammet Argos, rettes en stor takk til førsteamanuensis Bjarne Husted ved universitetet i Lund.

Avslutningsvis ønsker jeg å takke mine venninner Kari Ø. Abrahamsen og Annette Fosså for korrekturlesing, og mine studiekamerater på lesesalen, samt mine foreldre, for støtte og motivasjon gjennom hele masterperioden.

Ås, 11. mai 2015

Tatjana Hercigonja

Innhold

| | |
|--|------------|
| FIGURLISTE | IX |
| TABELLISTE | XI |
| FORKORTELSER | XII |
| 1 INTRODUKSJON | 1 |
| 1.1 BAKGRUNN..... | 1 |
| 1.2 PROBLEMSTILLING..... | 1 |
| 1.3 AVGRENSNINGER | 2 |
| 1.4 OPPGAVENS OPPBYGGING | 2 |
| 2 LITTERATURSTUDIE | 4 |
| 2.1 GENERELL BRANNTHEORI..... | 4 |
| 2.1.1 <i>Brannspredning</i> | 4 |
| 2.1.2 <i>Brannutvikling</i> | 5 |
| 2.1.3 <i>Kritiske faser for CO-dannelse</i> | 8 |
| 2.2 KARBONMONOKSIDFORGIFTNING..... | 10 |
| 2.2.1 <i>Branngasser</i> | 10 |
| 2.2.2 <i>Karbonmonoksid, CO</i> | 10 |
| 2.2.3 <i>Opptredende karbonmonoksidkonsentrasjoner i brann</i> | 11 |
| 2.2.4 <i>Karbonmonoksidforgiftning</i> | 12 |
| 2.2.5 <i>Indikator på karbonmonoksidforgiftning</i> | 12 |
| 2.2.6 <i>Spesielt utsatte</i> | 13 |
| 2.2.7 <i>Bivirkninger</i> | 13 |
| 2.2.8 <i>Regelverket</i> | 15 |
| 2.3 SPORGASSMÅLINGER OG KARBONDIOKSID (CO ₂)..... | 15 |
| 2.4 LUFTLEKKASJER OG INTERN BYGNINGSTETTHET | 16 |
| 2.4.1 <i>Luftlekkasjemåling</i> | 16 |
| 2.5 KRAV TIL BRANNSKILLENDE BYGNINGSKONSTRUKSJONER | 19 |
| 2.6 TESTING AV ISOLASJON OG INTEGRITET I BRANNCHELLER | 20 |
| 2.7 HJELPEMIDLER | 22 |
| 2.8 TANKEGANG VED BEREGNING AV TIDSGRENSER | 23 |
| 2.9 BEREGNINGSTEKNIKK | 24 |
| 2.9.1 <i>ELA: Effektivt lekkasjeareal</i> | 24 |
| 2.9.2 <i>Varmeutviklingsrate</i> | 26 |
| 2.9.3 <i>Trykkberegninger</i> | 27 |
| 2.9.4 <i>Fremstilling av resultater i form av lekkasjetall</i> | 28 |

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.9.5 | <i>Andel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen</i> | 28 |
| 2.9.6 | <i>Beregning av tidsgrenser</i> | 30 |
| 2.10 | ANTAKELSER OG FORARBEID..... | 31 |
| 2.11 | TIL ETTERTANKE: ÅPNE BRANNCELLEDØRER..... | 32 |
| 3 | METODE OG FREMGANGSMÅTE | 34 |
| 3.1 | INTRODUKSJON AV LEILIGHETENE I FINSTAD PARK, SKI..... | 35 |
| 3.2 | TRYKKSIMULERING I ARGOS | 36 |
| 3.3 | FREMGANGSMÅTE FOR UTFØRELSE AV SPORGASSMÅLINGER | 37 |
| 3.4 | FEILKILDER UNDER UTFØRELSE AV FORSØKET | 41 |
| 3.5 | ET KRITISK SYN: SPORGASSMETODEN..... | 42 |
| 4 | RESULTATER | 44 |
| 4.1 | RESULTATER FRA ARGOS | 44 |
| 4.2 | RESULTATER FRA MÅLINGER..... | 48 |
| 4.2.1 | <i>Måler 1: Plassert i testrom</i> | 49 |
| 4.2.2 | <i>Måler 2: Plassert i stua til leilighet nummer 1</i> | 51 |
| 4.2.3 | <i>Måler 3: Plassert i stua til leilighet nummer 3</i> | 52 |
| 4.2.4 | <i>Måler 4: Plassert i entreen til naboileilighet nummer 1</i> | 53 |
| 4.2.5 | <i>Måler 5: Plassert i entreen til naboileilighet nummer 3</i> | 54 |
| 4.2.6 | <i>Samlet data for hvert forsøk i naboileilighetene</i> | 55 |
| 4.3 | RESULTATER VED HJELP AV MATEMATISKE FORMLER: TIDSGRENSER | 56 |
| 5 | UTREGNINGER | 62 |
| 5.1 | VALG AV OPPTREDENDE TRYKKDIFFERANSER..... | 62 |
| 5.2 | GJENNOMSNTLIG LEKKASJELUFTMENGDE..... | 62 |
| 5.3 | BEREGNING: PROSENTANDEL LUFTLEKKASJE OVER BRANNCELLEVEGG | 64 |
| 5.4 | GRENSEVERDIER FOR CO-KONSENTRASJONER I NABOILEILIGHET | 66 |
| 5.5 | BEREGNING AV ESTIMERTE TIDSGRENSER | 67 |
| 6 | DISKUSJON | 69 |
| 6.1 | ARGOS..... | 69 |
| 6.2 | TOLKNING AV GRAFER..... | 69 |
| 6.3 | VALG AV CO-KONSENTRASJONER..... | 71 |
| 6.4 | BEREGNINGSGRUNNLAG..... | 71 |
| 6.5 | TIDSGRENSER | 72 |
| 6.6 | SAMMENLIKNING: LUFTLEKKASJEMÅLINGER OG SPORGASSMÅLINGER..... | 73 |
| 6.7 | OPPSUMMERING | 75 |
| 6.8 | TIL ETTERTANKE..... | 76 |

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

| | | |
|---|-----------------------|----|
| 7 | KONKLUSJON | 78 |
| 8 | VIDERE ARBEIDER | 79 |
| 9 | LITTERATURLISTE | 80 |

VEDLEGG A: KONTROLL AV EFFEKTIVT LEKKASJEAREAL

VEDLEGG B: LULFTLEKKASJEMÅLINGER I TETSLEILIGHET

VEDLEGG C: LUFTLEKKASJEMÅLINGER I LEILIGHET NR. 3

VEDLEGG D: LUFTLEKKASJEMÅLINGER I LEILIGHET NR. 3, MED STØTTETRYKK

VEDLEGG E: LUFTLEKKASJEMÅLINGER I LEILIGHET NR. 1

VEDLEGG F: LUFTLEKKASJEMÅLINGER I LEILIGHET NR. 1, MED STØTTETRYKK

Figurliste

| | |
|--|----|
| Figur 2-1: Branntrekanten (Moseng & Klewe 2010) | 4 |
| Figur 2-2: Illustrasjon av konveksjon, varmeledning og varmestråling (Soffar 2015). | 5 |
| Figur 2-3: Illustrasjon av de ulike brannfasene (Norges Arktiske Universitet 2011). | 8 |
| Figur 2-4: Eksempel på kurve for overtrykk og undertrykksmålinger (Holøs & Aurlien 2014). | 18 |
| Figur 2-5: Brannrommets to soner (Karlsson & Quintiere 2000). | 22 |
| Figur 2-6: Rotronic CP11 (ROTRONIC 2014). | 22 |
| Figur 2-7: Minneapolis Blower Door-vifte (The Energy Conservatory). | 23 |
| Figur 2-8: Tankegangen bak tidsgrensene. | 24 |
| Figur 2-9: Trykkendring i en leilighet med lekkasjer (Karlsson & Quintiere 2000). | 27 |
| Figur 3-1: Plantegning av test - og naboileiligheter, leilighet nr. 1, 2 og 3. | 35 |
| Figur 3-2: Leilighetens opprinnelige og simulerte form. | 37 |
| Figur 3-3: Benyttet utstyr. 1. Otermo vifte, 2. Stor ebm vifte, 3. CO ₂ -gass. | 39 |
| Figur 3-4: Plassering av måler nummer 2, 1 og 3 under forsøk nummer 1. | 39 |
| Figur 3-5: Montert Blower Door-Vifte. | 40 |
| Figur 3-6: Utstyrs plassering for forsøk 1. | 41 |
| Figur 3-7: Utstyrs plassering for forsøk 2 og 3. | 41 |
| Figur 4-1: Beskrivelse av kritiske tilstander i simulert brann. | 44 |
| Figur 4-2: Den simulerte brannens endring i varmeutviklingsrate (HRR). | 45 |
| Figur 4-3: Ending i gjennomsnittstemperatur for simulert brann. Kun den røde grafen er aktuell. | 46 |
| Figur 4-4: Endring i trykkdifferanse for den simulerte brannen. | 47 |
| Figur 4-5: Lekkasjetall ved 50 Pa overtrykk. | 49 |
| Figur 4-6: Samlet data for CO ₂ -endring i testrom. | 50 |
| Figur 4-7: Samlet data for CO ₂ -endring, måler 2. | 51 |
| Figur 4-8: Samlet data for CO ₂ -endring, måler 3. | 52 |
| Figur 4-9: Samlet data for CO ₂ -endring, måler 4. | 53 |
| Figur 4-10: Samlet data for CO ₂ -endring, måler 5. | 54 |
| Figur 4-11: Samlet data for CO ₂ -endring, forsøk 1. | 55 |
| Figur 4-12: Samlet data for CO ₂ -endring, forsøk 2. | 55 |
| Figur 4-13: Samlet data for CO ₂ -endring, forsøk 3. | 56 |

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

| | |
|---|----|
| Figur 4-14: Illustrasjon av utvalgte arealer. | 56 |
| Figur 5-1: Trykksimuleringer fra Argos..... | 62 |
| Figur 6-1: Illustrasjon av leilighet på 42 m ² | 73 |

Tabelliste

| | |
|--|----|
| 1:1 Oppsummert innhold. | 2 |
| 2:1 Oversikt over kritiske CO-konsentrasjoner (Njå & Nilsen 2004). | 14 |
| 2:2 CO-verdier med tilhørende eksponeringstid før kritiske følger vil oppstå. | 14 |
| 2:3 Oversikt over arbeidstilsynets normer for eksponering av CO og CO ₂ | 15 |
| 3:1 Oversikt over de tre aktuelle leilighetene. | 36 |
| 4:1 Forklaring til figur 4-2. | 45 |
| 4:2 Forklaring til figur 4-3. | 46 |
| 4:3 Forklaring til figur 4-5. | 48 |
| 4:4 Lineærisert lekkasjetall ved bruk av sporgassmetode. | 49 |
| 4:5 CO ₂ -endringer for testrom, måler 1. | 50 |
| 4:6 CO ₂ -endringer for måler 2. | 51 |
| 4:7 CO ₂ -endringer for måler 3. | 52 |
| 4:8 CO ₂ -endringer for måler 4. | 53 |
| 4:9 CO ₂ -endringer for måler 5. | 54 |
| 4:10 Tidsgrenser for dannelse av kritiske CO-konsentrasjoner når $f = 0,70$, ulmebrann. | 58 |
| 4:11 Tidsgrenser for dannelse av kritiske CO-konsentrasjoner når $f = 0,14$, ulmebrann. | 58 |
| 4:12 Tidsgrenser for dannelse av kritiske CO-konsentrasjoner når $f = 1,00$, ulmebrann. | 59 |
| 4:13 Tidsgrenser for dannelse av kritiske CO-konsentrasjoner når $f = 0,20$, ulmebrann. | 59 |
| 4:14 Tidsgrenser for dannelse av kritiske CO-konsentrasjoner når $f = 1,00$, brann under utvikling. | 60 |
| 4:15 Tidsgrenser for dannelse av kritiske CO-konsentrasjoner når $f = 0,12$, fullt utviklet brann. | 61 |
| 4:16 Tidsgrenser for dannelse av kritiske CO-konsentrasjoner når $f = 0,24$, fullt utviklet brann. | 61 |
| 5:1 Benyttede verdier for beregning av lekkasjeluftmengde, 50 Pa. | 63 |
| 5:2 Benyttede verdier for beregning av lekkasjeluftmengde, 550 Pa. | 63 |
| 5:3 Oversikt over benyttede verdier for beregning av tidsgrense før naboileiligheten når kritiske CO-konsentrasjoner. | 68 |
| 6:1 Sammenlikning av lekkasjetall ved 50 Pa, overtrykk. | 74 |
| 6:2 Oppnådd lekkasjeluftmengde i prosent over branncellevegg til respektiv leilighet. | 75 |

Forkortelser

| Symbol | Beskrivelse | Enhet |
|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| CO | Karbonmonoksid | - |
| CO ₂ | Karbondioksid | - |
| ppm | Parts per million | |
| ELA | Effektivt lekkasjeareal | cm ² |
| HHR | Heat release rate, varmeutviklingsrate | kW |
| ΔP | Trykkdifferanse | Pa |
| T | Temperatur | K eller °C |
| \dot{V}_L | Lekkasjeluftmengde | m ³ /h |
| n ₅₀ | Luftveksling ved 50 Pa | h ⁻¹ |
| C _L | Lekkasjeluftkoeffisient | m ³ /(h·Pa ⁿ) |
| n | LekkasjeluftekspONENT | - |
| α | Brannens intensitet/utviklingsfaktor | kW/s ² |
| V | Innvendig oppvarmet volum | m ³ |
| C _d | Kalibreringskonstant | 1,00 eller 0,61 |
| ρ | Luftens tetthet | kg/m ³ |
| \dot{Q} | Varmeutviklingsrate | kW |
| t | Tid | s |
| t _{ΔP} | Tidsgrense ved et gitt differansetrykk | h |
| C _N | Normalisert CO ₂ -konsentrasjon | - |

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

| | | |
|---|---|-------------------|
| $C(t)$ | CO ₂ -konsentrasjon ved ønsket tidspunkt | ppm |
| C_0 | Uteluftens CO ₂ -konsentrasjon | ppm |
| $C(0)$ | CO ₂ -konsentrasjon ved start | ppm |
| \bar{C} | Gjennomsnittlig CO ₂ - konsentrasjon | ppm |
| f | Konsentrasjonsfaktor | - |
| $\% \dot{V}_{x \rightarrow y}$ | Prosent lekkasjeluftmengde over ønsket branncellevegg (Luftlekkasjeberegninger) | % |
| $\% \dot{V}_{testrom \rightarrow z}$ | Prosent lekkasjeluftmengde over ønsket branncellevegg (Sporgassberegninger) | % |
| $\bar{C}_{leil. nr. z}$ | Gjennomsnittsverdi av CO ₂ -endring for naboleilighet nr. z | ppm |
| $\bar{C}_{måler x, z}$ | Gjennomsnittsverdi av CO ₂ -endring for alle forsøk for måler x | ppm |
| $\bar{C}_{testrom}$ | Gjennomsnittsverdi av CO ₂ -endring for testrom | ppm |
| $\dot{V}_{\Delta P, leil. x}$ | Gjennomsnittlig lekkasjeluftmengde målt i leilighet x | m ³ /h |
| $\dot{V}_{\Delta P, støttetrykk, x}$ | Gjennomsnittlig lekkasjeluftmengde målt i leilighet x med støttetrykk i leilighet y | m ³ /h |
| $\dot{V}_{differanse, x \rightarrow y}$ | Antatt lekkasjeluftmengde over branncellevegg ved luftlekkasjemålinger | m ³ /h |

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

I følge Oslo brann- og redningsetat er det «I 9 av 10 tilfeller røyken som dreper og ikke flammene» (Stabell 2007). Samfunnets manglende frykt knyttet til branngasser forsterkes i TNS Gallups (et datainnsamling, datatilrettelegging og analyse firma) undersøkelse utført etter forespørsel fra IF Skadeforsikring. I undersøkelsen kommer det frem at «6 av 10 vil forsøke å ta seg gjennom tett røyk» (IF Skadeforsikring 2011). Dette til tross for at få åndedrag av røykskyen er nok til å få fatale følger. Med tanke på nevnt prosentandel og statistikk, vil mennesket la seg skremme av sigende røyk inn i leiligheten, eller vil vi stole på bygningskonstruksjonen?

Det er denne oppgavens hensikt å vekke oppmerksomhet knyttet til branngassspredning, samt å gjøre mennesker oppmerksom på alvorlighetsgraden knyttet til brann og brannsikkerhet. Oppgaven vil fokusere på gassen karbonmonoksid (CO), også kjent som kullos, da gassen står for flest tap av menneskeliv ved brann (Penney 2000).

1.2 Problemstilling

Med bakgrunn i Oslo brann- og redningsetats høye dødsstatistikk grunnet brannrøyk, er det ønskelig å undersøke i hvilken grad branngass-spredning over brannceller, utført i henhold til dagens standard, kan være en dødsårsak ved brann. Byggteknisk forskrift av 2010 (TEK10), stiller kravet EI 60 A2-s1,d0 til brannceller i boliger. I hovedsak innebærer dette at boligen skal være motstandsdyktig mot spredning av branngasser (E, tetthet), og skal isolere eller hindre, videre temperaturøkning i nabobrannceller (I) i 60 minutter. På grunnlag av dette er det i denne oppgaven valgt å studere hva utfallet kan bli hvis branncelleveggen er utført i henhold til TEK10, men luftlekkasjene likevel finner en vei. Med dette nevnt, er oppgavens problemstilling som følger:

Hvilken betydning har intern bygningstetthet for spredning av den dødelige CO-gassen mellom leiligheter, og hvordan påvirker dette personsikkerheten ved brann?

Hvor lang tid, vurdert i minutter, vil det ta før dødelige mengder CO har spredd seg til nærmeste nabo?

1.3 Avgrensninger

Gjennom hele oppgaven tas det utgangspunkt i husbranner. Ettersom oppgavens forsøk er utført i et leilighetskompleks, vil alle resultater og diskusjoner omhandle potensielle CO-konsentrasjoner i naboileilighetene. Grunnet begrensende måleutstyr og tid, er det kun vurdert tre leiligheter i nær tiknytning til hverandre på samme plan. Dette innebærer at gass-spredning på tvers av etasjene, ikke er inkludert i oppgaven. Videre fokuserer oppgaven på prosentandel lekkasjeluftmengde fra testleiligheten og over branncelleveggene til naboileilighetene. Kartlegging av årsak til branngasslekkasjene vil ikke bli omtalt.

Det er ønskelig å svare på problemstillingen på en generell måte, slik at oppnådde resultater kan gi en indikator på estimerte tidsgrenser før gass-spredning får dødelige følger. For å muliggjøre ønsket om en generell konklusjon, er det benyttet gjennomsnittsverdier av alle resultater.

Opgavens problemstilling er besvart ved studie av tre ulike brannsituasjoner. Disse er:

- Ulmebrann
- En brann under utvikling
- Fullt utviklet brann

1.4 Oppgavens oppbygging

1:1 OPPSUMMERT INNHOLD.

| <i>Kapittel</i> | <i>Oppsummert innhold</i> |
|------------------------|---|
| 2 | Relevant teori og beregningsteknikk belyses. Hjelpemidler benyttet til besvarelse av problemstillingen introduseres, og gjennomgående antakelser oppsummeres. |
| 3 | Beskrivelse av valgt metode og fremgangsmåte. Utført forsøk beskrives i detalj og simuleringer forklares nærmere. |
| 4 | Presentasjon av resultater fra forsøk og simuleringer. |
| 5 | Opgavens samtlige utregninger beskrives i detalj. |
| 6 | Diskusjon av resultater i kapittel 4. |

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

| | |
|---|------------------------------|
| 7 | Konklusjon. |
| 8 | Forslag til videre arbeider. |

2 Litteraturstudie

I 2011 var det registrert 3837 boligbranner totalt i Norge, hvorav 1573 av disse var pipebranner (DSB 2013a). Samme år omkom 46 personer i boligbrann i Norge. I 2014 steg antall omkomne til 55 personer (DSB 2013b). Det innebærer at det i 2014 døde i gjennomsnitt 4-5 personer grunnet brann per måned.

Brann er et alvorlig og livstruende tema. Det er derfor ønskelig å forme en oppgave som kan leses og forstås av alle. I dette kapittelet vil derfor all relevant teori bli belyst på en grundig og lettleselig måte.

2.1 Generell brannteori

En brann kan defineres som en kjemisk reaksjon mellom brennbart materiale og oksygen. Ettersom det avgis varme til omgivelsene under forbrenningen, er forbrenningsprosessen eksoterm. Varmeproduksjon fra tennkilden varmer opp omkringliggende materialer, slik at brennbare og ikke brennbare gasser dannes. Når disse antennes og kommer ut av kontroll, har en brann oppstått. Hvis den kjemiske kjedereaksjonen mellom oksygen, varme og brennbart materiale brytes, vil brannen slukkes (Høgskolen i Sør-Trøndelag).



FIGUR 2-1: BRANNTREKANTEN (MOSENG & KLEWE 2010)

Branntrekanten illustrerer hva som må til for at en brann skal oppstå. Se figur 2-1.

2.1.1 Brannspredning

En brann kan spres på fire ulike måter (Se figur 2-2):

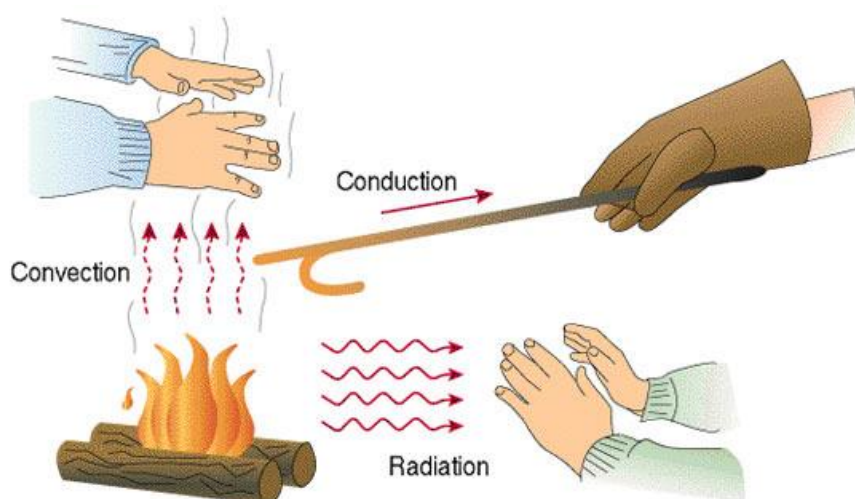
Varmeledning: Varmeledning vil si varme som ledes fra et fast stoff/materiale med høy temperatur til et fast stoff/materiale med lavtemperatur (Pisupati 2014). Materialer som metall har god varmeledningsevne og er derfor svært godt egnet til å antenne brennbare gasser (Hagen 2004).

Varmestråling: Varmestråling vil si elektromagnetisk stråling. I hovedsak innebærer varmemestråling synlig energiutslipp. Eksempelvis synlig lys i form av flammer. Varmestråling

skiller seg fra de resterende varmetransportmetodene ved at strålingen ikke trenger et medium for å videreføres. Det vil si at det ikke er nødvendig for molekylene å bevege seg fra et objekt til et annet for å videreføres (Pisupati 2014). I en brannsituasjon kjennetegnes dette ved stråling, fra flammer eller røyklag, som er så kraftig at nærliggende materialer varmes opp. Når materialene blir tilstrekkelig varmet opp vil de selvantennes. I en fullt utviklet brann vil varmestråling være dominerende for brannspredning (Hartin 2008).

Konveksjon/varmestrømning: Spredning ved konveksjon foregår gjennom brannens flammer eller røyklag, og kan defineres som energistrømning. Varme gasser stiger opp og blander seg med de kalde gassene (Pisupati 2014). Flammene eller røyklaget bærer på så mye energi at de etter hvert vil antenne brennbare materialer.

Flyvebrann: Flyvebrann kjennetegnes ofte ved gnist som sprer seg fra en bygningsdel til en annen. Når gnist treffer andre bygningsdeler kan disse bli varmet opp, og brannen sprer seg videre (Hagen 2004).



FIGUR 2-2: ILLUSTRASJON AV KONVEKSJON, VARMELEDNING OG VARMESTRÅLING (SOFFAR 2015).

2.1.2 Brannutvikling

En husbrann utvikler seg vanligvis i fire faser. Disse er antenningsfase, vekstfase, fullt utviklet brann og avkjølingsfase/utbrenningsfase (Hagen 2004). Se figur 2-3. Det er ikke alltid en brann går igjennom alle fasene. Ofte dør brannen ut på egenhånd eller slukkes av mennesker, før den rekker å videreutvikle seg til en full brann (Hagen 2004).

Antenningsfasen er den første fasen i brannforløpet. Her vil brennstoffenes karakteristiske egenskaper sammen med tilstrekkelig oksygentilførsel definere fasens utvikling (Hartin 2008).

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Prosessen oppstår ved at brennbare materialer varmes opp. Kilden til antennelse kan være uforsiktig bruk av ild, feil på elektrisk anlegg, selvantennelse eller bevist antenning (Hagen 2004). Reaksjonen mellom de brennbare materialene og varmekilden vil danne en pyrolyse (Hartin 2008). Pyrolyse kan defineres som «Spalting av sammensatte stoffer til enklere forbindelser ved bruk av varme» (*Pyrolyse* 2009).

Antenningsfasen kan videreutvikles i to retninger. Retning ulmebrann og flammebrann. Med ulmebrann menes «En langsom, lav-temperert, flammeløs form for forbrenning, som opprettholdes av varmeutviklingen som oppstår når oksygen er i direkte kontakt med brensel i kondensert form» (Ohlemiller 1995). En flammebrann kan beskrives på to måter. Enten som varmestråling fra brannens varme røyklag som bidrar til selvantennelse i nærliggende objekt, eller tilfeller hvor allerede oppvarmede objekter antennes av brannens flammer (Hagen 2004). Kjennetegnet for fasen, uavhengig av brannens videreutvikling, er høy gassutvikling og lav temperatur.

Ettersom varme partikler er lettere enn tunge, vil de stige opp mot taket og blande seg med de kalde gassene i rommet. Rommets temperatur vil stige som et resultat av energioverføring mellom gassene og energiutvikling fra flammene (Hartin 2008). Hvis brannens videreutvikling foregår uhindret, vil det dannes et røyklag langs taket. Røyklaget vil etter kort tid øke i volum og få en tydelig farge. Brannen har nå passert antenningsfasen og vil med tilstrekkelig oksygentilførsel fortsette å vokse (Hartin 2008).

Vekstfasen, eller utviklingsfasen, defineres av energiutvikling og mengde gass som oppstår. Hvorvidt en brann utvikler seg raskt eller langsomt, avhenger av de tre faktorene forbrenningstype, brensel og tilgang på oksygen (Karlsson & Quintiere 2000).

Som nevnt ovenfor, kan antenningsfasen utvikles til en ulmebrann. I de fleste tilfeller er energiutvekslingen i en ulmebrann lav, men dannelsen/produksjonen av giftige gasser, der i blant CO, er høy (Ohlemiller 1995). Ulmebranner varer gjerne i flere timer. Likevel er det flere tilfeller der brannen dør ut, før videre utvikling oppstår.

Ved tilstrekkelig oksygen og brensel, vil utviklingsfasen inntre raskt (Hartin 2008). Ved en rask brannutvikling deltar de resterende brennbare materialene i forbrenningsprosessen, og brannens varmeutveksling vil eskalere. Rommet vil etter hvert få et temperaturskille som deler rommet i to lag. Under taket vil det være et røyklag med varme gasser hvor røyktemperaturen er svært høy. Ved gulvet vil det være et klart lag med betydelig lavere temperatur. Det dannes en varm og en kald sone i rommet. Videre vil konveksjon fra gassene i røyklaget, samt strålingsvarme

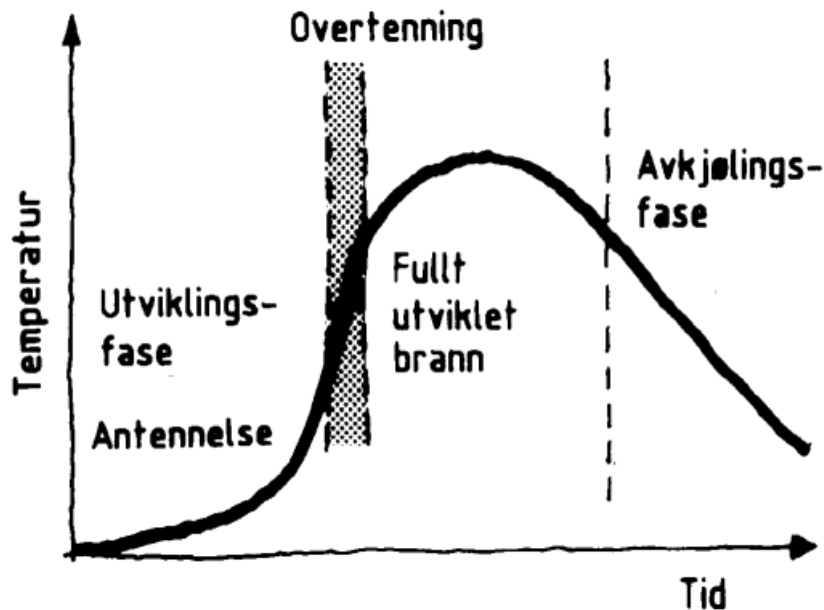
fra brannen og andre varme partikler i rommet, øke rommets gjenstandstemperatur og romtemperatur (Hartin 2008).

Gass under oppvarming vil ekspandere, og et rom vil fungere som en ekspansjonsbegrensning. Rommets vegger, gulv og tak kan sammenliknes med en til dels lukket boks. Etter hvert som temperaturen i rommet øker, vil også gassbevegelsen øke. Rommets begrensninger vil hindre gassmolekylene i å bevege seg fritt, slik at det oppstår et overtrykk i rommets øvre lag. I rommets nedre, og betydelig kaldere lag, vil det være et opptredende undertrykk, hvor frisk tilluft suges inn i brannen. Da oppvarmingen av gassene ikke avtar, vil overtrykket øke, og gassene vil bli presses mot nærmeste åpning. I punktet hvor lagene møtes, nøytralplanet, er trykket nøytralt (Hartin 2008).

På et tidspunkt i brannforløpet vil hele rommet stå i flammer. Dette innebærer at alle overflater og brennbare gasser i rommet brenner. På dette tidspunktet har det oppstått en overtenning (*Overtenning: brann* 2009). Årsakene til overtenning er flere, hvor betingelsene variere fra brann til brann. En generell betingelse for overtenning er at temperaturen i rommets takhøyde er mellom 500 - 600°C. Alternativt kan overtenning oppstå hvis varmestrålingen fra gulvet er rundt 15-20 kW/m² (Karlsson & Quintiere 2000). Det kan diskuteres om overtenning er en fase i brannforløpet. Da overtenning skjer plutselig, og fordi en brann kan gå fra vekstfasen til en fullt utviklet brann uten overtenning, er overtenning ifølge Hagen (2004) ingen egen fase i brannforløpet.

I en fullt utviklet brann har brannen nådd sitt toppunkt (Hartin 2008). Det er i denne fasen energiutslippet og temperaturen er høyest. Temperaturen kan variere fra 700 - 1200°C. Hvor lenge brannen vil være i fasen er ofte avhengig av oksygentilførselen. Det er vanlig å omtale brannen som ventilasjonsstyrt (Hagen 2004). Dette innebærer at brannen styres av oksygentilførsel gjennom åpninger og utettheter. Etersom forbrenningen av de brennbare materialene er høyere enn oksygentilførselen, vil uantente gasser bevege seg langs taket, hvor de forbrennes mens de beveger seg ut mot nærmeste åpning. I flere tilfeller tar de uantente gassene fyr på utsiden av bygget (Hartin 2008).

Avkjølingsfasen kjennetegnes ved avtagende temperatur etter hvert som brenselet er forbrent. Det er vanlig å si at brannen går fra å være ventilasjonsstyrt til brenselstyrt (Karlsson & Quintiere 2000). Med brenselstyrt menes at brenselet er avgjørende for videre brannforløp.



FIGUR 2-3: ILLUSTRASJON AV DE ULIKE BRANNFASENE (NORGES ARKTISKE UNIVERSITET 2011).

2.1.3 Kritiske faser for CO-dannelse

Da denne oppgavens fokus er på CO-spredning, er det av interesse å kartlegge hvilke faser som er mest kritiske for CO-dannelse. Oppgaven er begrenset til de tre branntilfellene ulmebrann, brann i utvikling og fullt utviklet brann. Dette gir et aktuelt temperaturintervall på opp til ca. 450°C, da overtenning ofte inntreffer etter 500°C. For å kunne diskutere fasen fullt utviklet brann, er det nødvendig å forutsette at vinduer ikke har knust. Dette innebærer at temperaturintervallet igjen holdes under 450°C (Babrauskas 2010). I likhet med valg av opptredende temperaturintervall, må opptredende trykksdifferanser begrenses til størrelser som ikke knuser vinduer.

Følgende grunnlag er lagt for begrensningene:

Ulmebrann

En ulmebrann som får forbrenne lenge nok kan produsere så store mengder CO at mennesker som oppholder seg i naborommet dør (Karlsson & Quintiere 2000). Om Karlsson og Quintieres (2000) teori gjelder internt i en bolig, eller mellom to ulike boenheter, blir ikke spesifisert og forblir dermed uvisst. Ettersom flere ulmebranner har begrenset varme og røykutvikling, kan det være vanskelig for røykvarslere å detektere brannen (Sesseng 2012). Per i dag benyttes i hovedsak to typer røykvarslere. Disse er ioniske røykvarslere og optiske røykvarslere. Optiske røykvarslere har vist seg å være best egnet til å detektere ulmebranner, mens ioniske røykvarslerne er best egnet til å detektere flammebranner (Sesseng 2012). SINTEF NBL,

Norges branntekniske laboratorium, i dag SP Sveriges Tekniske Forskningsinstitut, ga i 1991 ut en rapport hvor de kom frem til at 90-95 % av alle norske boliger har ioniske røykvarslere (Meland & Lønvik 1991). Dog rapporten er fra 1991, kan det tenkes at prosentandelen ikke avviker mye fra dagens installerte røykvarslingssystemer. I henhold til DSB – Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, § 2-5, stilles det krav til minst en godkjent røykvarslere, uten å omtale boligens bruksareal. Videre anbefaler paragrafen optiske røykvarslere hvis det velges en minimumsløsning. Det presiseres at dette ikke er et krav men en anbefaling.

Selv om ulmebrann ofte er mest kritisk for individer som oppholder seg i nærheten av brannen (Gann et al. 1994), er det interessant å kartlegge hva utfallet kan bli hvis ulmebrannen ikke blir oppdaget.

Brann under utvikling

En brann under utviklingsfasen kan utvikles hurtig eller langsomt. Med «brann under utvikling» menes i denne oppgaven en hurtig eskalering av brannen. I valgt tilfelle er temperaturintervallet opp til 450°C av interesse. I henhold til simuleringene utført i simuleringsprogrammet Argos, kommer det frem at brannens trykkdifferanse er høyest i denne fasen. Det kommer også frem at fasen er betydelig kortere enn fasen «fullt utviklet» brann. En utfyllende tolkning av simuleringresultatene er gitt i kapittel 4.1 Resultater fra Argos.

Fullt utviklet brann

Da en ventilasjonsstyrt fullt utviklet brann produserer store mengder CO (Penney 2000) og da fasen står for flest tap av menneskeliv grunnet branngassforgiftning (Gann et al. 1994), er det svært aktuelt å studere gasstransporten via luftlekkasjer i denne fasen. Likevel byr fasen på utfordringer knyttet til trykkdifferanser. I de feste overtenningstilfeller hvor temperaturen er høyere enn 600°C, antas det at vinduer vil knuse. Dette både på grunn av den høye temperaturdifferansen som oppstår mellom inne- og uteluft, men også til dels på grunn av overtrykket som dannes (Babrauskas 2010). Når glassbitene begynner å falle ut, eller vinduene knuser helt, vil trykket avta. En fullt utviklet brann ligger per definisjon i et temperaturintervallet 700°C- 1200°C. Det innebærer at vinduene kan ha knust og at trykket har avtatt. På grunnlag av dette, er det besluttet å analysere et tilfelle hvor fasen fullt utviklet brann har betydelig lavere temperatur.

2.2 Karbonmonoksidforgiftning

I dette kapittelet introduseres karbonmonoksidforgiftning. Kapittelet gjør rede for hvilke påvirkninger ulike CO-konsentrasjoner har på mennesket, hvilken folkegruppe som er spesielt utsatt og typiske bivirkninger av CO-forgiftning.

2.2.1 Branngasser

Det er tre punkter som avgjør gassdannelsen (Næringslivets sikkerhetsorganisasjon 2011):

- Hva som brenner
- Lufttilførsel
- Branntemperatur

Det er vanlig å dele branngasser i de to kategoriene narkotiske og irriterende gasser. De narkotiske gassene kjennetegnes ved at de virker bedøvende, der lenger eksponering vil lede til død ved for eksempel kvelning. Irriterende gasser kjennetegnes ved at de har innvirkning på øynene og de øvre luftveiene. Dette innebærer i hovedsak at bevegelseevnen blir hemmet og rømning blir vanskelig (Stensaas 2007).

2.2.2 Karbonmonoksid, CO

Karbonmonoksid (CO) er sammen med karbondioksid (CO₂) blant de vanligste gassene som oppstår i en brann. Til tross for at CO ikke er den giftigste gassen i en brann, da blåsyre (HCN) er 20-30 ganger giftigere (Stensaas 2007), står CO-forgiftning for flest tap av menneskeliv (Karlsson & Quintiere 2000).

CO er en smakløs, luktfri, fargeløs og svært farlig gass (Ernst & Zibrak 1998). Gassen dannes ved at organiske materialer, materialer som stammer fra levende organismer eller inneholder karbonatomer, slik som for eksempel tre, forbrennes ved en ufullstendig forbrenning (Helsebiblioteket 2011).

Gassens egenskaper plasserer den i kategorien narkotiske gasser, og gjør det vanskelig for mennesker å oppdage gasseksponeringen. Individuer som eksponeres for CO-forgiftning mens de sover, vil ikke merke ubehag, og vil etter hvert bli bevisstløse. Vedvarende eksponering vil få fatale følger (Norsk Helseinformatikk 2013).

2.2.3 Opptredende karbonmonoksidkonsentrasjoner i brann

Dannelsen av CO under en brann påvirkes av flere faktorer. Disse er i hovedsak brenselets sammensetning, brannens utviklingshastighet og forbrenningsmuligheter (Penney 2000). Det er svært vanskelig å fastslå konkret hvilke CO-konsentrasjoner som vil dannes under en brann, eller hvilke som har blitt dannet i tidligere branner.

Penney (2000) anslår i sin bok *Carbon monoxide toxicity* mulige opptredende CO-konsentrasjoner ved ulike branntilfeller. For ulmebranner anslås det en opptredende CO-konsentrasjon på 100 – 2000 ppm (parts per million), hvor forbrenningen kan vare i flere timer før den utvikler seg til flammer, eller dør ut. Produksjonshastigheten av CO i en ulmebrann er som regel lav, men dersom brannen oppstår i et soverom med lukkede dører og vinduer vil CO-konsentrasjonen få kritiske følger (Penney 2000).

Selv om Penney (2000) anslår opptredende CO-konsentrasjoner mellom 100-2000 ppm, er det tilfeller hvor CO-konsentrasjonen i ulmebranner har blitt vurdert til å ligge mellom 100 – 10 000 ppm (Quintiere et al. 1982).

For en branns utviklingsfase anslår Penney en CO-dannelse opp til ca. 5000 ppm. Dette under forutsetningen godt ventilert brann. Med godt ventilert brann menes et oksygennivå på omtrent 15 %.

Ettersom CO er et resultat av en ufullstendig forbrenning, er det i en underventilert brann CO-dannelsen er høyest. Det kan diskuteres om CO-dannelsen er høyest før overtenning (Penney 2000) eller etter overtenning (Gann et al. 1994). I begge tilfeller vil oksygen være den begrensende faktoren (Penney 2000). I de fleste branntilfeller vil en brann bli ventilasjonskontrollert etter kun få minutter, der CO-konsentrasjonen kan bli opp til 5 % (Penney 2000). Dette tilsvarer en ppm-konsentrasjon på 50 000 ppm.

Flere branntilfeller er i ettertid blitt analysert og simulert, hvor tilsvarende CO-konsentrasjoner har vært dominerende. Ett av disse tilfellene er nevnt i *Fire Conditions for Smoke Toxicity Measurement*, hvor det kommer fram at CO-konsentrasjonen i en brann gikk fra 2000 ppm før overtenning, og til 60 000 ppm kun tre minutter etter overtenning (Gann et al. 1994).

2.2.4 Karbonmonoksidforgiftning

CO-forgiftning oppstår ved inhalering av CO-molekylene i luften. Når CO blir inhalert binder det seg til hemoglobinet (Hb) i blodet. Hemoglobin finnes i de røde blodcellene, hvor hemoglobinet oppgave er å ta opp oksygen i lungene og frakte det videre til de ulike organene og vevene i kroppen. Hemoglobinet tar også opp CO₂ i blodet, og frakter det tilbake til lungene, hvor CO₂ utåndes (Evensen 2009). CO binder seg ca. 200 - 250 ganger lettere til hemoglobin enn oksygen, og danner på denne måten karboksyhemoglobin (HbCO) (Åsberg & Stakkestad 2004). Når CO binder seg til hemoglobinet tar det oksygenets plass, og hindrer hemoglobinet i å frakte oksygen videre til viktige organer som hjernen og hjertet. Langvarig CO-forgiftning vil resultere i alvorlige skader på vev, hjerte og hjerne, og i verste tilfelle døden (Helsebiblioteket 2011). Eksempel på langvarige og kortvarige bivirkninger vil bli omtalt i avsnitt 2.2.7, Bivirkninger.

2.2.5 Indikator på karbonmonoksidforgiftning

Ved kartlegging av CO – forgiftning, tas det utgangspunkt i karboksyhemoglobininnholdet (%COHB) i blodet. COHb-prosenten representerer andel COHb i forhold til all tilgjengelig hemoglobin som i utgangspunktet kunne transportert og bundet seg til oksygen (Nasjonalt folkehelseinstitutt 2013). Det er ikke unormalt at mennesker har en gitt mengde COHb i blodet. Dette skyldes blant annet både naturlig CO-dannelse i kroppen og CO-konsentrasjon i luften (Nasjonalt folkehelseinstitutt 2013).

Generelt er COHb-nivået hos mennesker (Nasjonalt folkehelseinstitutt 2013):

- 0,5 – 1,5 % hos ikke – røykere
- 3 – 4 % hos røykere
- 10 % hos storrøykere
- CO – nivået hos fostre og gravide er høyere enn hos ikke-gravide

Hvor stor prosentandel COHb et menneske kan ha i blodet før det anses som dødelig, er svært varierende. Nasjonalt folkehelseinstitutt (2013), s. 29, anslår følgende: «COHb-nivåer på over 40 % er dødelig for friske personer, men lavere nivåer kan være livstruende for eldre, personer med hjerteproblemer, småbarn og gravide.» Helsebiblioteket (2011) anslår blant annet at «En akutt CO-forgiftning kan defineres ved COHb-verdier >10 % eller ved kliniske tegn/symptomer etter en kjent CO-eksponering.»

2.2.6 Spesielt utsatte

Det er ingen unntak for hvem som kan bli rammet av CO-forgiftning. Likevel er fostre, spebarn, gravide, mennesker med hjertesykdom, blodmangel (anemi), luftveisproblemer og eldre de mest utsatte. En av årsakene til at fostre er spesielt utsatte er at de av natur kan ha 10 – 15 % høyere COHb-verdier enn moren. Videre kan CO transporteres fra moren til fosteret gjennom livmorhalsen (Nasjonalt folkehelseinstitutt 2013). Studier på mennesker viser at «Hos hjerte og karpasienter synes imidlertid CO-eksponering å kunne utløse hjertearrytmier (rytmeforstyrrelser) ved CO-konsentrasjoner som gir COHb høyere enn 5%. Pasienter med redusert blodtilførsel på grunn av innsnevring av blodårene, kan få kliniske effekter (hjertekrampe, mangel på oksygen) ved 3-6% COHb.» s. 28 (Nasjonalt folkehelseinstitutt 2013). Sentrale faktorer som spiller inn på grad av forgiftning er CO-konsentrasjon, eksponeringstid og grad av innånding. Videre har faktorer som alder, lungetilstand og fysisk aktivitet vist seg å være av betydning. Eksempelvis vil åndedragene til en person i fysisk aktivitet øke i størrelse for hvert åndedrag, samtidig som hvert åndedrag skjer hyppigere (Bahr 2008).

2.2.7 Bivirkninger

Bivirkningene av CO-forgiftning kan oppstå ved langtids- og korttidsforgiftning. Videre kommer ikke bivirkningene nødvendigvis med det samme. I 10-30 % av tilfellene hvor personer har vært utsatt for CO-forgiftning, har bivirkningene kommet tilbake 3 – 240 dager etter behandling (Ernst & Zibrak 1998). Det er viktig å understreke at CO-forgiftningene varierer fra tilfelle til tilfelle. Når bivirkningene tilbakevender, kan de variere i omfang. Typiske ettervirkninger av en rehabilitert CO-forgiftning kan være (Ernst & Zibrak 1998):

- Personlighetsendringer
- Parkinsonisme
- Demens
- Psykose
- Inkontinens («Manglende evne til å holde på avføring og/eller urin.» (Kåss 2009))

Ettersom ingen individer er like, er det svært vanskelig å forutsi hvem som er spesielt utsatt for tilbakefall etter CO-behandling. Likevel er verdiene i tabell 2:1 tatt med for å illustrerer typiske symptomer ved en gitt CO-konsentrasjon i ppm og eksponeringstid. Verdiene er hentet,

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

med tillatelse, fra Rogalandforsknings (dagens IRIS) rapport om Bruk av risikoanalyser i planlegging og drift av vegtunneler, s. 76, Tabell D:2 (Njå & Nilsen 2004).

2:1 OVERSIKT OVER KRITISKE CO-KONSENTRASJONER (NJÅ & NILSEN 2004).

| <i>CO [ppm]</i> | <i>Eksponeringsstid</i> | <i>Effekt</i> |
|-----------------|--------------------------|--|
| 200 | 2 – 3 timer | Hodepine |
| 800 | 45 min 2 timer | Hodepine, svimmelhet og kvalme. Kollaps og mulig bevisstløshet. |
| 3200 | 5 - 10 min 30 min | Hodepine og svimmelhet. Bevisstløshet og muligens død. |
| 6400 | 1 – 2 min 10 – 15 min | Hodepine og svimmelhet. Bevisstløshet og mulig død. |
| 12 800 | 1 – 3 min | Umiddelbar effekt, bevisstløshet og død. |

Ettersom problemstillingen søker dødelige CO-konsentrasjoner vil verdiene i tabell 2:2 bli benyttet i videre arbeider. Verdiene i tabell 2:2 er hentet fra *Performance criteria used in fire safety design*, s. 495 (Hadjisophocleous & Benichou 1999), og kan også finnes i boken *Carbon monoxide toxicity*, s. 508. Det er viktig å nevne at verdiene i tabell 2:2 er fastslått fra ingeniørers ståsted, hvor det ikke tas høyde for personers aktivitetsnivå eller størrelse. Begge er sentrale faktorer som påvirker kroppens CO-opptak (Penney 2000).

2:2 CO-VERDIER MED TILHØRENDE EKSPONERINGSTID FØR KRITISKE FØLGER VIL OPPSTÅ.

| <i>Eksponeringsstid:</i> | <i>5 minutter</i> | | <i>30 minutter</i> | |
|--------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| <i>Tilstand</i> | <i>Hemmet rømningsevne</i> | <i>Død</i> | <i>Hemmet rømningsevne</i> | <i>Død</i> |
| <i>Konsentrasjon</i> | 6000 ppm | 12 000 ppm | 1400 ppm | 2500 ppm |

2.2.8 Regelverket

Dette delkapittelet viser anbefalte CO og CO₂-verdier. Verdiene i tabell 2:3 er hentet fra arbeidstilsynets forskrift Tiltaks og grenseverdier (Direktoratet for Arbeidstilsynet 2012). Verdiene for administrative normer er under forutsetningene 8 – timers arbeidsdag, og bør ikke overskrides.

2:3 OVERSIKT OVER ARBEIDSTILSYNETS NORMER FOR EKSPONERING AV CO OG CO₂.

| | <i>Karbonmonoksid, CO</i> | | | <i>Karbondioksid, CO₂</i> | | |
|----------------------|---|-------------------------|------------|---|-------------------------|------------|
| <i>Norm:</i> | <i>ppm</i> | <i>mg/m³</i> | <i>tid</i> | <i>ppm</i> | <i>mg/m³</i> | <i>tid</i> |
| <i>Adm. norm</i> | 25 | 29 | 8t | 5000 | 9000 | 8t |
| <i>Anbefalt norm</i> | 10 | 12 | 8t | 1000 | 1800 | 8t |
| | 25 | 29 | 1t | | | |
| | 80 | 92 | 15 min | | | |
| <i>Merknad:</i> | «Kortvarig eksponeringer bør ikke overstige 100 ppm. Hvis dette kan forekomme, skal det utarbeides skriftlig instruks for arbeid i CO-atmosfære.» s. 41 (Direktoratet for Arbeidstilsynet 2012) | | | «EU har en veiledende grenseverdi for stoffet.» s. 10 (Direktoratet for Arbeidstilsynet 2012) | | |

2.3 Sporgassmålinger og karbondioksid (CO₂)

Denne oppgaven baserer seg på forsøk utført med utgangspunkt i sporgassmetoden beskrevet i NS-EN ISO 12569. Standardens metode går ut på studie av sporgassens nedbrytning (decay) i en leilighet eller et rom. I utgangspunktet kan metoden benyttes til å kartlegge leilighetens lekkasjetall. Dette ved å se på tilført konsentrasjon ved start, og gjenstående konsentrasjon ved slutt. Ved å fremstille resultatet i form av normaliserte CO₂-konsentrasjoner innenfor et tidsintervall, eksempelvis en time, kan lekkasjetallet til testleiligheten estimeres (Standard Norge 2012a).

Ettersom problemstillingen søker gassendringer i naboileilighetene, er metodens prinsipp benyttet. I benyttet metode velges det å utvide sporgassmetoden. Dette ved å trykksette

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

testleiligheten med 50 Pa overtrykk, slik at målingene korresponderer med luftlekkasjemålingene. Ved å tilføre testleiligheten en gitt konsentrasjon sporgass vil det med et overtrykk i testleiligheten være mulig å måle sporgassendringene i naboileilighetene.

I denne oppgaven er karbondioksid, CO₂, benyttet som sporgass i forsøkene. ASTM - E741, 2006, (American Society for Testing and Material standard number E741) s. 1, definerer sporgass som «a gas that is mixed with air and measured in very small concentrations in order to study air movement». Karbondioksid er i hovedsak en ufarlig gass, som av natur pustes ut ved hvert åndedrag. Uteluft består av ca. 0,04 % CO₂. Det tilsvarer en konsentrasjon på 400 ppm. Videre er karbondioksid en fargeløs gass, som både har høyere tetthet og masse enn oksygen (Haraldsen 2015). Den er ikke antennelig, og blir ofte brukt til brannslukking.

Forsøkene er utført med forutsetning om at gassen er godt blandet i luften, og det har blitt valgt å se bort ifra de kjemiske egenskapene til CO₂. Da med tanke på reaksjonsevne, molarmasse og oppdriftshastighet. Bakgrunnen for dette presiseres ved at CO₂ er en sporgass, opptredende luftstrøm antas uniform og at trykkdifferansen i en brann antas å være dominerende.

2.4 Luftlekkasjer og intern bygningstetthet

Å måle luftlekkasjer, både innenfor og i bygningens klimaskjerm, er svært viktig for innvendig komfort og energiforbruk. Det er flere grunner til å måle luftlekkasjer. Det kan være i forbindelse med dokumentasjon av krav i TEK10, energiberegninger, kartlegging av luftlekkasjer, luftlekkasjers betydning for brannspredning eller avdekke fuktskader (Holøs & Aurlien 2014). I denne oppgaven benyttes luftlekkasjemålinger som grunnlag for videre arbeid med kartlegging av potensiell grad av gass-spredning ved brann.

2.4.1 Luftlekkasjemåling

Lekkasjemålingene er utført i leiligheter fra 2015 i Finstad Park, Ski, Akershus. All luftlekkasjedata benyttet i beregninger er hentet, med tillatelse, fra rapport om interne luftlekkasjer i Finstad Park (Iden & Sandeggen 2015). Se vedlegg B-F. Det er valgt en tilfeldig leilighet med høyt lekkasjetall, og tilhørende naboileiligheter. Alle luftlekkasjemålinger er utført i henhold til NS-EN 13829:2000, Bygningers termiske egenskaper – Bestemmelse av bygningers luftlekkasjemålinger – Differansetrykkmetoden.

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Fra luftlekkasjeteorien vil kun formel for lekkasjeluftmengde, luftmengde gjennom klimaskjermen, bli benyttet til videre arbeider.

Formel for lekkasjeluftmengde (Holøs & Aurlien 2014):

$$\dot{V}_L = C_L \cdot \Delta P^n \quad (1)$$

Hvor:

\dot{V}_L = Lekkasjeluftmengde [m^3/h]

ΔP = Fremkalt trykkdifferanse [Pa]

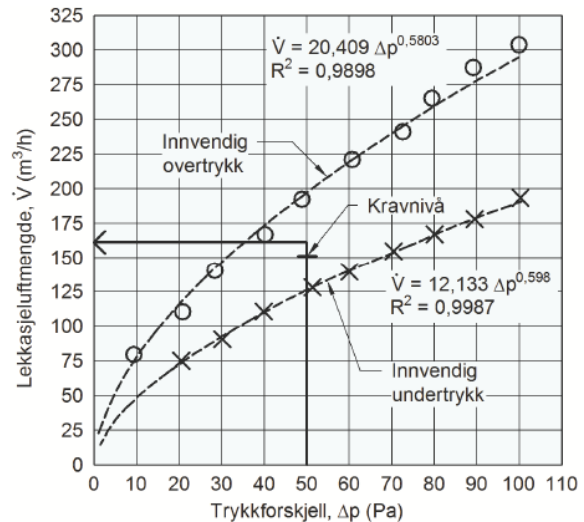
C_L = Lekkasjeluftkoeffisient [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$]

n = Lekkasjelufteksponent

Luftlekkasjer måles i hovedsak ved hjelp av en Blower Door-vifte, der deler eller hele bygningen trykkes med enten overtrykk eller undertrykk. Ved måling må alle åpninger tettes/lukkes. Det vil si dører, vinduer, avtrekk og andre åpninger. Mekanisk avtrekk må i likhet med luker for naturlig ventilasjon, tettes eller teipes (Holøs & Aurlien 2014). For å oppnå ønsket trykkforskjell på 50 Pa, må det enten tilføres luftmengde, eller suges ut luftmengde. Dette avhenger av om det ønskes et overtrykk eller et undertrykk i rommet. Luftmengde tilføres, eller suges ut, og registreres av viften. Prinsippet bak lufttilførselen er at den «luftmengden som passerer vifta, må gå gjennom utetthetene i bygningen» s. 1 (Holøs & Aurlien 2014). Ettersom viften registrerer lufttilførsel eller luftsug, kan luftvolumet (m^3) som må til for å danne en trykkforskjell på 50 Pa, måles. I tillegg må alle vinduer og ytterdører i nabo-leilighetene åpnes før målingene settes i gang, slik at samtlige trykkdifferanser rundt leiligheten nulles ut. Dette gjøres for kunne betrakte leilighetens branncellevegger som yttervegger (Klimaskjerm).

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Volumstrømmen (m^3/h) som blåses gjennom viften for å opprettholde en trykkforskjell på 50 Pa, kalles lekkasjeluftmengde (Holøs & Aurlien 2014). Lekkasjeluftmengden måles ved ulike trykkforskjeller. På grunnlag av målte lekkasjemengdene ved de ulike trykkforskjellene, kan det utarbeides en kurve som illustrerer lekkasjeluftmengdene. Se figur 2-4. Vanligvis vil det oppnås to ulike kurver. En for overtrykksmålinger og en for undertrykksmålinger. Den gjennomsnittlige lekkasjeluftmengden finnes ved å beregne gjennomsnittsverdien av overtrykk- og undertrykksmålingene (Holøs & Aurlien 2014).



FIGUR 2-4: EKSEMPEL PÅ KURVE FOR OVERTRYKK OG UNDERTRYKKSÅLINGER (HOLØS & AURLIEN 2014).

Lekkasjetallet, n_{50} (h^{-1}), også kjent som luftvekslingstallet, karakteriserer bygningens lufttetthet. Dette finnes ved å studere sammenhengen mellom lekkasjeluftmengde, ønsket trykk og boligens volum. Lekkasjetallet benyttes til sammenlikning av lufttetthet i ulike bygninger med ulike størrelser. Det kan også benyttes til å kontrollere boligens n_{50} -verdi opp mot krav i Byggteknisk forskrift av 2010 (TEK10) (Holøs & Aurlien 2014).

Lekkasjetallet finnes ved følgende formel (Holøs & Aurlien 2014):

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad (2)$$

Hvor:

$$n_{50} = \text{Lekkasjetallet ved 50 Pa trykkforskjell } [\text{h}^{-1}]$$

$$\dot{V}_{50} = \text{Lekkasjeluftmengde ved 50 Pa } [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$V = \text{Innvendig oppvarmet volum } [\text{m}^3]$$

Under utførelse av luftlekkasjemålingene ble det gjort målinger med støttettrykk. Dette er en målemetode som kan benyttes dersom det ønskes å kartlegge lekkasjeluftmengde over en vegg. Prinsippet bak luftlekkasjemålinger med støttettrykk er at både testleiligheten og naboileiligheten trykkes samtidig (Relander 2012). På denne måten forventes det null lufttransport over leilighetenes skillevegg (branncellevegg). Ved å benytte seg av et trykk på 50 Pa overtrykk eller undertrykk, gis en indikator på potensiell luftmengdetransport over branncelleveggen. Dette

ved å subtrahere den opprinnelige lekkasjeluftmengden fra lekkasjeluftmengde målt med støtetrykk (Relander 2012).

Beregningsgrunnlag for prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen finnes i kapittel 2.9.5, Andel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen. For utførte beregninger, se kapittel 5, Utrekninger.

2.5 Krav til brannskillende bygningskonstruksjoner

SINTEF Byggforsk definerer en branncelle som «En branncelle er en avgrenset del av en bygning hvor en brann i løpet av en fastsatt tid kan utvikle seg uten å spre seg til andre deler av bygningen. En branncelle kan også være en bruksenhet i boligbygg» s. 1 (Krohn 2013).

TEK10, §11-8, stiller følgende krav til brannceller:

1. «Bygget skal deles opp i brannceller på en hensiktsmessig måte. Områder med ulik risiko for liv og helse og/eller ulik fare for at brann oppstår, skal være egne brannceller med mindre andre tiltak gir likeverdig sikkerhet» (Lovdata 2010).
2. «Brannceller skal være slik utført at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tid som er nødvendig for rømning og redning» (Lovdata 2010).

Definisjoner:

Brannklasse: Den konsekvensen en brann kan ha på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø (DIBK 2015). I henhold til TEK10 må boliger med fem eller flere etasjer bygges i brannklasse 3. Brannklasse 3 vil si stor konsekvens ved brann.

Risikoklasse: Med risikoklasse menes hvor stor trussel en brann kan utgjøre på liv og helse. En bolig havner under risikoklasse 4 (DIBK 2014a).

For brannceller i brannklasse 3 er brannmotstandskravet EI 60 A2-s1,d0 (DIBK 2014b). Dette innebærer følgende:

E = Integritet eller tetthet.

«Evnen et prøveeksemplar fra en skillende bygningskonstruksjon har til å forhindre gjennomtrenging av flammer og varme gasser, samt forhindre flammedannelser på ueksponert side, når konstruksjonen utsettes for brann på en side.» s. 8 (Standard Norge 2012b)

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Det vil si at i løpet av 60 minutter skal ikke branncellen bidra til videre spredning av branngasser eller flammer til neste branncelle.

I = Isolasjon.

«Evnen et prøveeksemplar fra en skillende bygningskonstruksjon har til å begrense temperaturøkningen på ueksponert side, til under spesifiserte verdier.» s. 8 (Standard Norge 2012b)

Brannisolasjonen skal være av materialer som tåler en brannpåkjenning i 60 minutter før materialet mister sin isolasjonsevne (DIBK 2014b).

60 = 60 minutter.

Beskriver hvor lenge, i minutter, branncellen skal motstå brannpåkjenning.

A2-s1,d0 = Forteller hvilke materialer som er tillatt i branncellen.

A2-s1,d0 betyr begrenset brennbarhet.

A2 – Beskriver produktets bidrag i brann. (A2 = svært lite bidrag)

s1 – Beskriver røykproduksjon. (s1 = liten røykproduksjon)

d0 – Beskriver brennbare dråper som oppstår fra branncellen (d0 = ingen dannelse av flammende dråper eller partikler.) (DIBK 2014b)

I praksis vil det være utfordrende å oppnå helt tette brannceller. Årsakene er flere. Rørføringer, kabelføringer, overganger mellom himling/vegg og dekke/vegg, er typiske utfordringer. Ofte er tilkomsten rundt rørføringer minimal, slik at optimal branntetting blir vanskelig. Videre kan unøyaktig branntetting, eksempelvis ikke kontinuerlig fugemasse, bidra til svekkelse av branncellen og økning av lufttransport ut av branncellen.

2.6 Testing av isolasjon og integritet i brannceller

En branncelles isolasjonsevne og integritet testes i henhold til NS-EN 1363 – 1, Prøving av brannmotstand Del 1: Generelle krav.

Isolasjon

Ved testing av branncelleveggenes isoleringsevne studeres veggens kapasitet til å hindre temperaturøkning over en gitt grense, i minutter, på ueksponert side. Det stilles følgende temperaturkrav til ueksponert side (Standard Norge 2012b):

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

1. Det tillattes ikke «En økning av gjennomsnittlig temperatur på mer enn 140 K over initialtemperaturen på ueksponert side.» s. 28
2. Det tillates ikke «En økning på samtlige lokasjoner, (...), på mer enn 180 K over initialtemperaturen på ueksponert side.» s. 28

Integritet

For testing av branncellens integritet (E) utføres tre tester. Disse utføres henholdsvis ved hjelp av et bomullstykk festet til en ramme, sprekkmåler (gap gauge) og observasjon av synlige flammer på ueksponert side.

Prinsippet bak bomullstesten er at bomullstykket føres jevnt over branncelleveggens ueksponerte side. Dette inkludert sammenføyninger/skjøter. Bomullstykket skal holdes i ro på samme sted opp til 30 sekunder, eller til antennelse oppstår, før bomullstykket flyttes videre. Målet er at bomullstykket ikke skal antennes eller gløde før testen er over. Testens tidsintervall tilsvarer tiden det forventes at branncellen skal være motstandsdyktig mot brann.

Sprekkmåleren benyttes til å kartlegge når opptredende sprekker er blitt så store at måleren går gjennom veggen uhindret. Det skal ikke benyttes kraft ved utførelse av testen. Det benyttes to ulike målere (Standard Norge 2012b):

1. «En 6 mm (diameter) sylindrisk sprekkmåler som går gjennom testobjektet og inn i ovnen, hvor måleren så dras 150 mm horisontalt i testobjektet.» s. 26
2. «En 25 mm (diameter) sylindrisk sprekkmåler som går gjennom testobjektet og inn i ovnen.» s. 26

Ved observasjon av flammedannelser på ueksponert side skal tid, varighet og lokasjon noteres (Standard Norge 2012b).

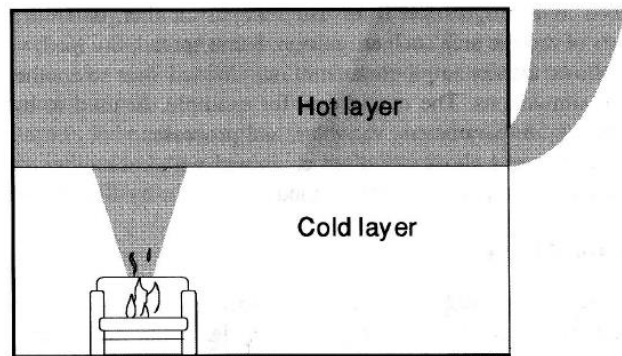
For utførelse av testen er det nødvendig med en spesiell ovn som kan påføre testobjektet riktig påkjenning i henhold til standardens krav. Videre kreves utstyr som kan kontrollere at overtrykket under testen ikke overstiger 20 Pa, og at temperaturpåkjenningen er i henhold til standardisert temperaturkurve ($T = 345\log_{10}(8t+1) + 20$, hvor t er testtid i minutter) (International Standard 1999).

En mer utfyllende beskrivelse av de ulike testene finnes i NS-EN 1363 – 1.

2.7 Hjelpemidler

Argos versjon 4.2

Argos er et brannsimuleringsprogram utviklet av Danish Institute of Fire and Security Technology (DIFT). Programmet gjør det mulig å simulere brannutvikling og røyktransport i rom, ved hjelp av en to-sonemodell. En to-sonemodell innebærer at programmet starter med en-sonemodell, det vil si en atmosfære med uniform kald temperatur, og videreutvikles til en sone



FIGUR 2-5: BRANNROMMETS TO SONER (KARLSSON & QUINTIERE 2000).

med et varmt lag og et kaldt lag. Se figur 2-5. Programmet kan benyttes til flere ulike formål, eksempelvis gjøre rede for effekten av spesifiserte branner, temperaturendringer, gasskonsentrasjoner, samt kartlegging av røyklagets høyde etter en gitt tid. Programmet kan også benyttes til å forutsi mulig varmeutviklingsrate og trykkdifferanse (Deibjerg et al. 2003).

CP11: CO₂-måler

Rotronic CP11 er et mobilt, håndholdt, apparat som kan benyttes til CO₂-, fukt- og temperaturmålinger (ROTRONIC 2014). Apparatet har en innebygd logger som kan logge opp til 10 000 ppm, og er selvkalibrerende mot uteluftskonsentrasjoner. Loggerens tilhørende programvare, Rotronic SW-21, er gratis og tilgjengelig på produktets hjemmeside. Programvaren kan benyttes til å lagre og analysere data. Programmet kan samkjøres med Excel slik at videre bearbeidelser av data er mulig. Brukermanualen er svært oversiktlig og målerne er ikke avanserte å bruke. Se figur 2-6.



FIGUR 2-6: ROTRONIC CP11 (ROTRONIC 2014).

Blower Door-vifte



Minneapolis Blower Door-vifte benyttes i hovedsak til lufttetthetsmålinger. Ved hjelp av viften kan blant annet lekkasjepoblemer avdekkes, og naturlig infiltrasjonsrater (inntrengingsrate) kartlegges. Viften kan ved enkle justeringer valgfritt benyttes til enten overtrykk- eller undertrykkmålinger. Videre er Blower Door en vifte som ofte plasseres i hovedinngangen, hvor viften lager en trykkdifferanse mellom inneluft og uteluft. Trykket presser luften ut igjennom åpninger i bygget, og ved å ta utgangspunkt i lufttransport gjennom viften, kan Blower Door – systemet gi en vurdering av byggets tetthet (The Energy Conservatory 2012). Se figur 2-7.

FIGUR 2-7: MINNEAPOLIS BLOWER DOOR-VIFTE (THE ENERGY CONSERVATORY).

2.8 Tankegang ved beregning av tidsgrenser

For å forstå prinsippet bak tidsberegningene, anses det som nødvendig med en forklaring av konseptet bak valg av beregningsmetode.

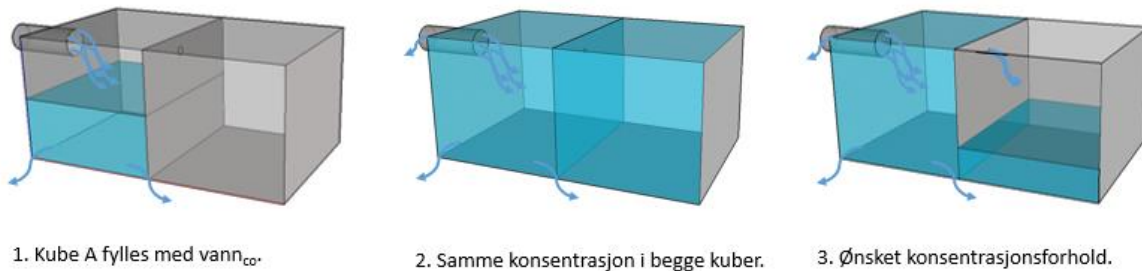
Det tenkes at testleiligheten (A) og naboileiligheten (B) er to kuber ved siden av hverandre. Kube A består av jevnt fordelte lekkasjearealer. Videre fylles kube A helt full med vann_{CO} (Hypotetisk vann med en gitt CO-konsentrasjon), der det etterfylles konstant med vann_{CO}. Etterfyllingen er nødvendig for å ta hensyn til opptredende trykkdifferanser som dannes ved brann og for å kunne anta konstant konsentrasjon vann_{CO} i kube A. Kube B er i utgangspunktet tom for vann_{CO} og anses som tilnærmet tett. Med tilnærmet tett menes følgende:

- Kube B anses som uventilert. Dette innebærer forutsetning om at det ikke tilføres luftmengder som kan tynne ut eller påvirke opptredende CO-konsentrasjoner.
- Mulige opptredende trykkdifferanser i kubene neglisjeres. Det vil si at det kun tas hensyn til opptredende trykkdifferanser i kube A.

Det er et unntak et sted på veggen (branncelleveggen) som skiller kubene. Der er det ett hull (lokalt), eller flere små hull (jevnt fordelt). Hullet, uavhengig av om det er jevnt fordelt eller lokalt, står for 1,14 % av kube A sin samlede vannlekkasje. (Valg av 1,14 % skyldes oppnådde måleresultater.) Ved å opprettholde et konstant trykk i kube A, vil det renne et gitt vannvolum

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

per time (m^3/h) over i kube B (m^3). Etter en gitt tid vil begge kubene bestå av samme konsentrasjon ($\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3\text{h}^{-1}}$). Når det ikke er ønskelig å fylle hele kube B med samme konsentrasjon som kube A, stoppes vanntilførselen ved et gitt konsentrasjonsforhold ($f = \frac{C_1}{C_{\text{brannrom}}}$). Se figur 2-8 for illustrasjon.



FIGUR 2-8: TANKEGANGEN BAK TIDSGRENSENE.

2.9 Beregningsteknikk

Røykspredning i små boliger drives i hovedsak av varmeproduksjon, konveksjon og branntrykk (Nelson 1997). Dette kapitlet gjennomgår grunnlaget for alle beregningsteknikker som er utført i denne oppgaven.

Følgende beregninger er utført:

- Kontroll av effektivt lekkasjeareal (ELA)
- Valg av varmeutvekslingsrate, HRR: Heat Release Rate
- Trykksimuleringer
- Fremstilling av resultater i form av lekkasjetall
- Prosentandel lekkaseluftmengder over branncellevegg
- Tidsberegning for dødelige CO-konsentrasjoner i naboilighet

2.9.1 ELA: Effektivt lekkasjeareal

I et tilnærmet tett rom, eller et rom med små lekkasjer, vil varmeutviklingen under en brann forårsake volumetrisk ekspansjon av gassene og en trykkøkning i rommet. Trykket som oppstår vil føre luftstrømmen ut gjennom lekkasjene (Karlsson & Quintiere 2000). For å beregne et potensielt trykk, er det nødvendig å kartlegge de samlede luftlekkasjearealene. Dette kan oppnås ved å benytte effektivt lekkasjeareal (ELA). Det effektive lekkasjearealet bestemmes ved å se

på trykkdifferansen og lekkasjeluftmengden i en leilighet, der lekkasjearealet utgjør en samlet verdi for leilighetens sprekker og hull (Dickinson & Feustel 1989).

Det effektive lekkasjetallet kan beregnes på to ulike måter. Disse skilles ved bruk av referansetrykk og kalibreringskontant (discharge coefficient). I følge Canadian General Standards Board, CGSB 149.10, settes som oftest referansetrykket til 10 Pa, og kalibreringskonstanten lik 0,61. Dette lekkasjearealet blir ofte omtalt som ekvivalent lekkasjeareal. I USA kalkuleres det effektive lekkasjearealet i henhold til American Society of Testing and Materials, ASTM E779, hvor det benyttes et referansetrykk på 4 Pa og en kalibreringskonstant lik 1,00 (RDH Building Engeneering Ltd. 2013). Selv om SINTEF Byggforsk benytter en referansetrykkforskjell på 4 Pa (Blom & Uvsløkk 2012), er det i denne oppgaven valgt å benytte gjennomsnittsverdien av de to representative metodene. Dette er gjort grunnet de representative metodenes høye avvik i lekkasjeareal.

Kalkulasjon av gjennomsnittlig effektivt lekkasjeareal er som følger:

Effektivt lekkasjeareal i henhold til CGSB 149.10:

$$ELA_{10} = \frac{\dot{V}_L}{C_d} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \quad (3)$$

Hvor:

ELA_{10} = Effektivt lekkasjeareal ved 10 Pa trykkforskjell [cm^2]

\dot{V}_L = Lekkasjeluftmengde ved en trykkdifferanse på 10 Pa [m^3/s]

C_d = Kalibreringskonstant [0,61]

ρ = Luftens tetthet ved 20°C [$1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$]

ΔP = Trykkdifferanse [10 Pa]

Effektivt lekkasjeareal i henhold til ASTM E779:

$$ELA_4 = \frac{\dot{V}_L}{C_d} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \quad (4)$$

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Hvor:

ELA_4 = Effektivt lekkasjeareal ved 4 Pa trykkforskjell [cm^2]

\dot{V}_L = Lekkasjeluftmengde ved 4 Pa [m^3/s]

C_d = Kalibreringskonstant [1,0]

ρ = Luftens tetthet ved 20°C [$1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$]

ΔP = Trykkdifferanse [4 Pa]

Benyttet effektivt lekkasjeareal:

$$ELA_{\text{middel}} = \frac{ELA_{10} + ELA_4}{2} \quad (5)$$

Hvor:

ELA_{middel} = Gjennomsnittlig effektivt lekkasjeareal [cm^2]

ELA_{10} = Effektivt lekkasjeareal ved 10 Pa trykkforskjell [cm^2]

ELA_4 = Effektivt lekkasjeareal ved 4 Pa trykkforskjell [cm^2]

2.9.2 Varmeutviklingsrate

En svært viktig og avgjørende faktor i en brann er varmeutviklingsraten, også kjent som heat release rate (HHR) (Särdqvist 1993). Det er flere faktorer som avgjør hvor stor varmeutviklingen i en brann vil bli. Faktorer som oksygen, temperatur, materiell, brensel og brannkildens plassering er noen av disse (Särdqvist 1993). Videre er det blitt utført tilnærmet identiske forsøk for måling av varmeutviklingsraten, under samme betingelser, hvor resultatene avviker fra hverandre (Särdqvist 1993). Dette er en indikasjon på at det er svært utfordrende, muligens umulig, å beregne eller simulere en branns eksakte varmeutviklingsrate.

Ettersom denne oppgavens forsøk er utført i helt nye leiligheter, hvor eierne ikke har flyttet inn enda, er det utfordrende å forutsi hvor stor varmeutviklingsraten vil bli. For unngå feil antakelser, er varmeutviklingsraten blitt simulert ved hjelp av simuleringsprogrammet Argos. I programmet er det valgt at brannen skal utvikles i henhold til Energy formula fire, for økning

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

av varmeutviklingsrate. Varmeutviklingsraten er derfor basert på følgende formel, og gjelder kun for brannens utviklingsfase (Karlsson & Quintiere 2000).

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (6)$$

Hvor:

$$\dot{Q} = \text{Varmeutviklingsrate [kW]}$$

$$\alpha = \text{Brannens intensitet, valgt til medium i denne oppgaven [0,012 kW/s}^2]$$

$$t = \text{Tid (Utviklingsfasens tidsintervall) [s]}$$

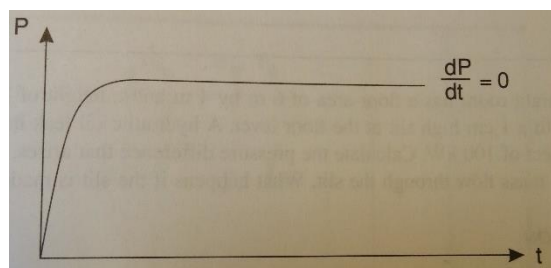
2.9.3 Trykkberegninger

Trykkestimering er, i likhet med varmutviklingsraten, svært utfordrende å fastslå konkret og varierer for hvert branntilfelle. Boligens lekkasjetall, varmeutviklingsraten, om vinduer står åpne og boligens størrelse er noen av påvirkningsfaktorene. Uansett trykktilfelle og hvor tett et bygg er, vil branngasser alltid finne en vei ut (Jensen 2002).

I følge Hagen (2004) kan trykkdannelsen i en bolig foregå på tre ulike måter:

1. I den mest ekstreme brannsituasjon vil trykket øke kraftig som et resultat av røykens utvidelsesbegrensning.
2. Ved å la dører eller vinduer stå åpne vil røyken utvides i volum uten at det oppstår en trykkøkning.
3. I de fleste tilfeller vil røykekspsjonen være noe begrenset, slik at det både dannes en liten trykkøkning og volumøkning.

Karlsson og Quintiere (2000) anslår følgende trykkforløp for en lukket leilighet med luftlekkasjer: Trykket vil øke kraftig i løpet av kort tid, før det så jevnes ut, og opptre tilnærmet konstant. Se figur 2-9.



For denne oppgaven er opptredende trykkdifferanser simulert i dataprogrammet

FIGUR 2-9: TRYKKENDRING I EN LEILIGHET MED LEKKASJER (KARLSSON & QUINTIERE 2000).

Argos. Simuleringene er gjort med utgangspunkt i valgt varmeutvekslingsrate, og ved å samle leilighetens lekkasjearealer i et samlet lekkasjeareal tilsvarende gjennomsnittlig effektivt

lekkasjeareal. Mer om Argos-simuleringer vil bli omtalt i kapittel 3.2, Trykksimuleringer i Argos.

2.9.4 Fremstilling av resultater i form av lekkasjetall

For måler nummer 1, plassert i testrommet, er det i tillegg til å presentere resultatene i en CO₂-konsentrasjon/tid – kurve, valgt å illustrere testrommets lekkasjetall ved 50 Pa overtrykk. Grafen er kun tatt med for å vise målte luftvekslinger ved 50 Pa overtrykk, og vil ikke bli benyttet til videre beregninger. Dette da testens hensikt er å kartlegge endringer i CO₂, og ikke å utføre luftvekslingsmålinger.

For å illustrere leilighetens lekkasjetall eller luftvekslinger, ved 50 Pa overtrykk, er følgende formel benyttet til normalisering av CO₂-konsentrasjonene (Kraniotis 2014):

$$C_N = \ln \frac{C(t) - C_0}{C(0) - C_0} \quad (7)$$

Hvor:

C_N = Normalisert CO₂-konsentrasjon

$C(t)$ = CO₂-konsentrasjon ved ønsket tidspunkt [ppm]

C_0 = Uteluftens CO₂-konsentrasjon, målt til 400 ppm

$C(0)$ = CO₂-konsentrasjon ved start [ppm]

2.9.5 Andel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen

For å muliggjøre videre arbeid er det nødvendig å kartlegge andel lekkasjeluftmengde fra testleiligheten og over branncelleveggen til naboileilighetene. Ved beregning av de respektive målerens gjennomsnittlige CO₂-endring er det valgt å benytte endringsverdier for målerens samtlige forsøk. Dette innebærer at feilkilder, og flytting av måler nummer 2 og 3, ikke tas høyde for. Mer om feilkilder og fremgangsmåte er beskrevet i kapittel 3, Metode og fremgangsmåte. Andel lekkasjeluftmengde i prosent er fastslått ved å ta utgangspunkt i en samlet gjennomsnittsverdi for måler i samme rom, og dividere denne på den gjennomsnittlige CO₂-endring i testrommet.

Fremgangsmåte for beregning av lekkasjeluftmengde i prosent ved bruk av sporgass:

Gjennomsnittlig CO₂-endring for målere i hver leilighet:

$$\bar{C}_{\text{leil. nr. z}} = \frac{\bar{C}_{\text{måler x,z}} + \bar{C}_{\text{måler y,z}}}{2} \quad (8)$$

Hvor:

$\bar{C}_{\text{leil. nr. z}}$ = Gjennomsnittsverdi av CO₂-endringer for naboileilighet nummer z [ppm]

$\bar{C}_{\text{måler x, z}}$ = Gjennomsnittsverdi av CO₂-endringer for alle forsøk for måler x [ppm]

$\bar{C}_{\text{måler y, z}}$ = Gjennomsnittsverdi av CO₂-endringer for alle forsøk for måler y [ppm]

Prosentandelen lekkasjeluftmengde over branncelleveggen:

$$\% \dot{V}_{\text{, testrom} \rightarrow z} = \frac{\bar{C}_{\text{leil. nr. z}}}{\bar{C}_{\text{testrom}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Hvor:

$\% \dot{V}_{\text{, testrom} \rightarrow z}$ = Prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen [%]

$\bar{C}_{\text{leil.nr. z}}$ = Gjennomsnittsverdi av CO₂-endringer for naboileilighet nummer z [ppm]

\bar{C}_{testrom} = Gjennomsnittsverdi av CO₂-endringer for alle forsøk for testrom [ppm]

Fremgangsmåte for beregning av lekkasjeluftmengde fra leilighet x til leilighet y, i prosent, ved luftelekkasjemålinger med støttetrykk:

$$\dot{V}_{\text{differanse,x} \rightarrow z} = \dot{V}_{\Delta P, \text{leil. x}} - \dot{V}_{\Delta P, \text{støttetrykk, x}} \quad (10)$$

Prosentandel over ønsket vegg:

$$\% \dot{V}_{\text{, x} \rightarrow z} = \frac{\dot{V}_{\text{differanse,x} \rightarrow z}}{\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. x}}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Hvor:

$\% \dot{V}_{\text{, x} \rightarrow z}$ = Prosentandel lekkasjeluftmengde over ønsket vegg [m³/h]

$\dot{V}_{\text{differanse,x} \rightarrow z}$ = Antatt andel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen [m³/h]

$\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. x}}$ = Gjennomsnittlig lekkasjeluftmengde målt i leilighet [m³/h]

$\dot{V}_{\Delta P, \text{støttetrykk, x}}$ = Gjennomsnittlig lekkasjeluftmengde målt i leilighet med støttetrykk [m³/h]

2.9.6 Beregning av tidsgrenser

For å komme frem til en løsning på oppgavens problemstilling velges det å ta utgangspunkt i lekkaseluftmengder. I hovedsak vil det bli studert opptredende lekkaseluftmengder ved 50 Pa og 550 Pa. Hvor 50 Pa og 550 Pa er opptredende trykkdifferanser ved henholdsvis a) lekkasjemålinger og b) trykkdifferanse simulert i Argos. For å beregne estimert tid før naboileilighet/rom når dødelige CO-konsentrasjoner, er det valgt å ta utgangspunkt i volumet lekkaseluftmengden skal fylle. Det velges å se bort fra naboileilighetens luftlekkasjer, da disse muligens kan bidra til fortynning av opptredende CO-konsentrasjoner.

Følgende formel er benyttet til estimering av tidsgrenser for fylling av et ønsket volum med en gitt prosentandel lekkaseluftmengde inn i leiligheten:

Beregning av tidsgrense ved en gitt trykkdifferanse, ΔP :

$$t_{\Delta P} = \frac{V}{\dot{V}_{\Delta P} \cdot \% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow z}} \cdot f \quad (12)$$

Der f defineres som:

$$f = \frac{C_1}{C_{\text{brannrom}}} \quad (13)$$

Hvor:

$t_{\Delta P}$ = Tiden det vil ta å fylle ønsket volum ved en gitt trykkdifferanse [h]

V = Størrelsen på volumet som ønskes fylt [m^3]

$\dot{V}_{\Delta P}$ = Lekkaseluftmengde ved ønsket trykkdifferanse [m^3/h]

$\% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow z}$ = Prosentandel lekkaseluftmengde over branncellevegg [%]

f = Konsentrasjonsforhold

C_1 = Ønsket oppnådd konsentrasjon i naboileilighet/rom [ppm]

C_{brannrom} = Opptredende CO-konsentrasjon i brennende leilighet [ppm]

2.10 Antakelser og forarbeid

Argos

På grunn av begrenset langvarig erfaring innenfor bruk av simuleringsprogrammet Argos, er det mulighet for uforutsette feilkilder i bruk av programmet. Det velges likevel å anta at simuleringene er riktig utført, og at resultatene er tolket riktig.

Lekkasjeluftmengdeformel

Det antas at lekkasjeluftmengdeformelen er gjeldende for opptredende trykkdifferanse. Under alle beregninger ses det bort i fra brannens påvirkning på utettheter. Det tas ikke høyde for brannens evne til å brenne sprekker større slik at lekkasjearealet, og dermed lekkasjeluftmengden, øker.

Trykkantakelser

Der ikke annet er spesifisert, antas det at dører og vinduer er lukket. På denne måten muliggjøres overtrykksdannelser. Videre tillates det ikke situasjoner der vinduer knuses. Knuste vinduer, samt åpne dører og vinduer, vil bidra til en drastisk trykkredusering. Det vil dermed ikke være korrekt å benytte simulerte trykkverdier. Med dette nevnt, antas det et trykkforløp tilsvarende figur 2-9.

Temperatur

Det er ønskelig å studere opptredende CO-konsentrasjon i naboileiligheten under brannstadiet «Fullt utviklet brann». For at dette skal være mulig, må det ses bort fra fasens generelle temperaturestimat på 700 - 1200°C. Ettersom ingen branntilfeller er like, tillates en antakelse der brannforløpet avviker fra de generelle beskrivelsene.

Forsøk

Det antas at forsøkets to sirkuleringsvifter gir testleiligheten tilstrekkelig sirkulasjon og skaper en uniform gasstilværelse/atmosfære.

Det velges å neglisjere CO₂-påvirkningen som kan skyldes menneskeferdsel inn i naboileilighetene under forsøk nummer 2. Dette utdypes i kapittel 3.4, Feilkilder under utførelse av forsøket.

Ettersom det søkes et generelt svar på problemstillingen, som kan benyttes for leiligheter generelt og ikke testleiligheten spesifikt, er det valgt å benytte gjennomsnittsverdier av de ulike måleapparatenes data. Det velges å se bort ifra måler nummer 2 og 3s flytting nærmere hver sin

representative branncellevegg. Dette ble gjort etter mistanke om målerens svekkede evne til å detektere CO₂-konsentrasjoner i naboileilighetens store volum. Mer om målerens plassering, samt endring av posisjon, er beskrevet i kapittel 3.3, Fremgangsmåte for utførelse av sporgassmålinger.

Resultatens fremstillingsmetode

Samtlige målerresultater er representert i form av grafer hvor y-aksen bevisst er valgt i logaritmisk skala. Ved bruk av logaritmisk skala oppnås rettere (mer lineære) grafer med mindre variasjon uten at resultatene endres. Ved fremstilling av testrommets lekkasjetall er det benyttet naturlige logaritmer. Årsaken til dette er forklart i kapittel 2.9.4, Fremstilling av resultater i form av lekkasjetall.

Beregninger

For beregninger av estimert tid før naboileilighet, eventuelt rom i naboileilighet, har nådd dødelige CO-verdier, antas det at naboileiligheten er tilnærmet tett, der det ikke muliggjøres for fortykning av opptredende CO-konsentrasjoner. Det forutsettes også at tilført CO-konsentrasjon sirkuleres i luften og ikke kun legger seg på ett sed.

Annet

Det antas at brannen ikke blir slukket underveis i beregningene og at definerte CO-konsentrasjoner i brennende leilighet holdes konstant.

2.11 Til ettertanke: Åpne branncelledører

Denne oppgaven er basert på forutsetningen: Et brannscenario i en lukket leilighet. Under en brann er det ikke uvanlig at branncelledører (dør inn til leilighet) forblir åpne i forbindelse med rømning (Hagen 2004). Dette innebærer at brannen får større oksygentilførsel, og bruker noe lenger tid på å kveles. Likevel vil oksygentilførselen være liten i forhold til brannens oksygenforbruk (Penney 2000). Med andre ord, vil det oppstå en ufullstendig forbrenning og dannelse av CO. I flere av dagens leilighetskompleks er det kun interne rømningsveier. For nyere boliger stilles det i henhold til Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, følgende krav til rømningsvei i leiligheter:

«Bor du i en nyere boligblokk (med maks åtte etasjer) som har sprinkelanlegg, er det nok at rømningskorridoren leder til en felles rømningstrapp som ender ute.» (DSB)

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Ved undersøkelse av sprinkleranleggseffektivitet, kommer det frem at «100 års erfaring fra hele verden viser at 97 % av alle branner slukkes eller kontrolleres i bygninger hvor sprinkleranlegg er installert.» s. 5 (Brødrene Dahl 2009). Selv om sprinkleranlegg er et svært effektivt brannslukningssystem, er det tilfeller hvor brannslukningssystemet ikke blir utløst. Hvis brennende leilighet er et tilfelle hvor sprinkelsystemet er defekt eller ikke klarer å slukke brannen, og ytterdøren står åpen grunnet rømning, kan den eneste rømningsveien være hindret.

3 Metode og fremgangsmåte

Valg av metode kan deles inn i kategoriene kvalitative metoder og kvantitative metoder. Disse skiller ved fremgangsmåte for datainnsamling. Data samlet inn ved bruk av kvantitativ metode kjennetegnes som regel av målbare data. Mens data samlet inn ved hjelp av kvalitative metoder ofte baserer seg på datainnsamling i form av meninger og opplevelser, eksempelvis intervjuer. Ofte er dette data som ikke kan måles (Dalland 2012).

I denne oppgaven er det benyttet kvantitative metoder for innsamling av relevante data. Oppgavens problemstilling er besvart ved hjelp av brannsimuleringer i dataprogrammet Argos, sporgassmålinger og matematiske formler. Sporgassmålingene er utført i tre leiligheter i Finstad Park, Ski, Akershus.

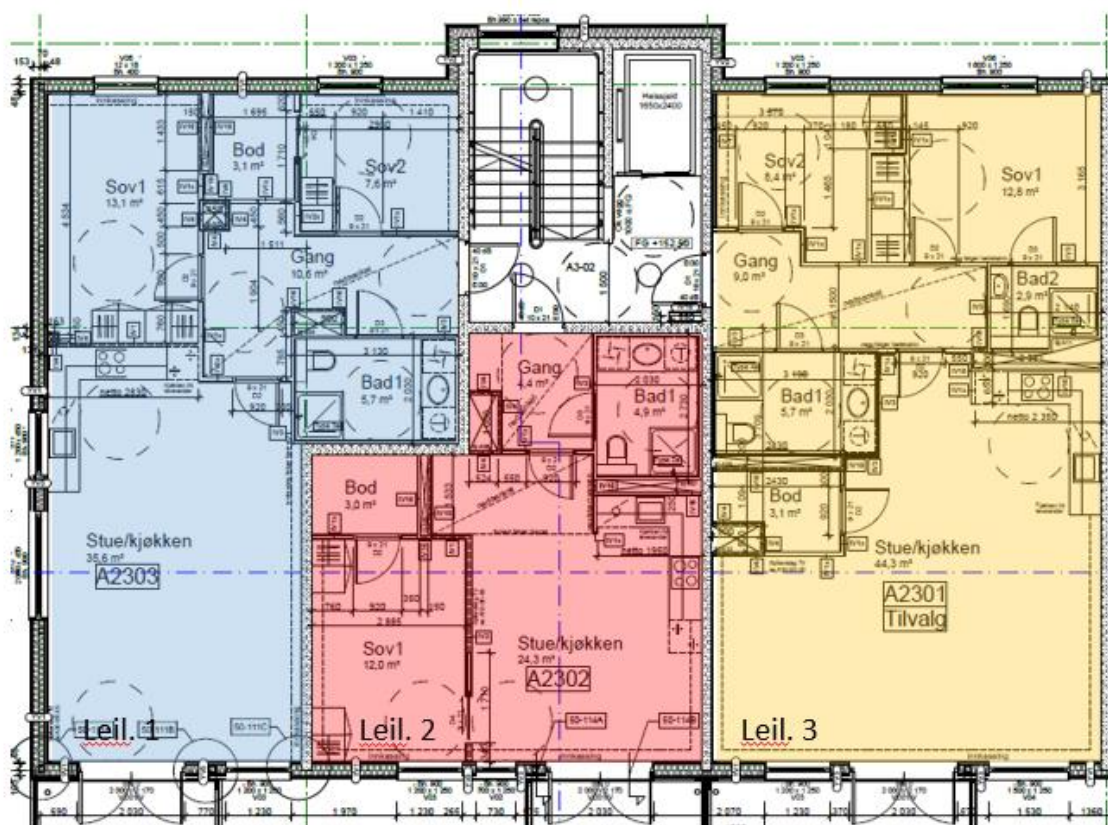
Argos er i hovedsak benyttet til å simulere et hypotetisk brannscenario. Ved å simulere et brannscenario oppnås et bilde av mulig opptredende temperatur, varmeutviklingsrate og trykkdifferanse. På grunn av en branns ulike utfallsalternativer, anses det som nødvendig å skape et grunnlag for videre beregninger.

Etttersom det er ønskelig å kartlegge konsentrasjonsendringer innenfor et gitt tidsintervall, er en utvidet versjon av sporgassmetoden valgt. Baktanken er å få et innblikk i konsentrasjonsendring gitt i ppm per tidsenhet, ved et gitt differansetrykk. Differansetrykk innebærer at det er en trykkforskjell mellom testleiligheten og omgivelsene. Sporgassmålingene er utført med utgangspunkt i NS-EN ISO 12569, Bygninger og byggematerialers termiske egenskaper – Bestemmelser av spesifikk luftmengde i bygninger – Sporgassmetode, punkt 3.2.2, 2-point decay method. For testens virkningstid, samt fremstilling av resultatene, er Standard ASTM E741 - Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Tracer Gas Dilution, blitt benyttet. Da CO₂ er oppført som en typisk sporgass i NS-EN ISO 12569, benyttes gassen som sporgass i alle forsøk.

For å svare på oppgavens problemstilling er det nødvendig å bearbeide resultatene. Det er benyttet matematiske formler til bearbeidelse av all data oppnådd ved bruk av sporgassmetoden. Bearbeidelsene er utført ettersom måleresultatene i seg selv ikke besvarer problemstillingen. Samtlige benyttede formler er introdusert i kapittel 2, Litteraturstudie. Resultater oppnådd ved hjelp av matematiske formler krever fremgangsmåte, forutsetninger og begrunnelser. Grundig gjennomgang av oppgavens samtlige utregninger er gitt i kapittel 5, Utregninger.

3.1 Introduksjon av leilighetene i Finstad Park, Ski

Opgavens forsøk er utført i tre leiligheter lokalisert i Finstad Park, Ski, Akershus. Leilighetene er en del av et nytt leilighetskompleks som ferdigstilles i løpet av sommeren 2015. De tre aktuelle leilighetene befinner seg i andre etasje. Byggets bæresystem består av bærevegger av betongskiver og hulldekkeelementer i gulv og himling. Takhøyden er 2,55 m (overkantdekke – underkantdekke) (Skanska AS 2015). Et utsnitt av leilighetenes plantegning (Figur 3-1), med tillatelse fra Skanska Norge AS, er tatt med for å illustrere testleiligheten plassering i forhold til naboileiligheter. Med testleilighet menes den leiligheten hvor forsøk er blitt utført, under markert med rødt. Naboileilighetene, under markert med blått og gult, er kun brukt til plassering av CO₂-målere. Leilighetenes størrelser er oppgitt i tabell 3:1.



FIGUR 3-1: PLANTEGNING AV TEST - OG NABOLEILIGHETER, LEILIGHET NR. 1, 2 OG 3.

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

3:1 OVERSIKT OVER DE TRE AKTUELLE LEILIGHETENE.

| <i>Leilighet nr.</i> | <i>Bruksareal</i> | <i>Volum</i> | <i>Farge</i> | <i>Kommentar</i> |
|----------------------|---------------------|--------------------|--------------|--|
| 1 | 76,0 m ² | 194 m ³ | Blå | Plassert CO ₂ -måler. |
| 2 | 49,0 m ² | 125 m ³ | Rød | Forsøkene blir utført i denne leiligheten. |
| 3 | 86,0 m ² | 219 m ³ | Gul | Plassert CO ₂ -måler |

3.2 Trykksimulering i Argos

For å determinere potensiell trykkendring i en brann er simuleringsprogrammet Argos benyttet. Under simuleringen kan det legges inn antatte lekkasjeareal. For å kartlegge hvor store lekkasjeareal leiligheten har, er det valgt å benytte gjennomsnittlig effektivt lekkasjeareal. Dette er en indikator på leilighetens samlede lekkasjeareal. Verdier for de effektive lekkasjearealene hentes fra rapport om luftlekkasjer i Finstad park, vedlegg B (Iden & Sandeggen 2015). Ettersom det i rapport for luftlekkasjemålinger kommer frem et stort avvik i arealverdiene, avhengig av hvilket referansetrykk som velges, er det benyttet en middelvei på 96,9 cm². Beregningskontroll av effektive lekkasjearealer er gitt i vedlegg A.

Argos er et program som krever kontakt med omgivelsene. På grunnlag av utførte sporgassmålinger, antas det at lekkasjene er størst gjennom den sørvendte vegg. Årsaken til antakelsen er blant annet at vegg består av leilighetens samtlige vinduer og en terrassedør i glass. For å muliggjøre bruk av effektivt lekkasjeareal er det nødvendig å sette vinduer og dører tetthet til 100 % (Imperviousness). Det vil si at det antas at vinduer og dører er helt tette. Vinduers toleransetemperatur settes til 350°C, ettersom dette mest sannsynlig er en temperaturpåkjenning vinduene vil tåle (Babrauskas 2010).

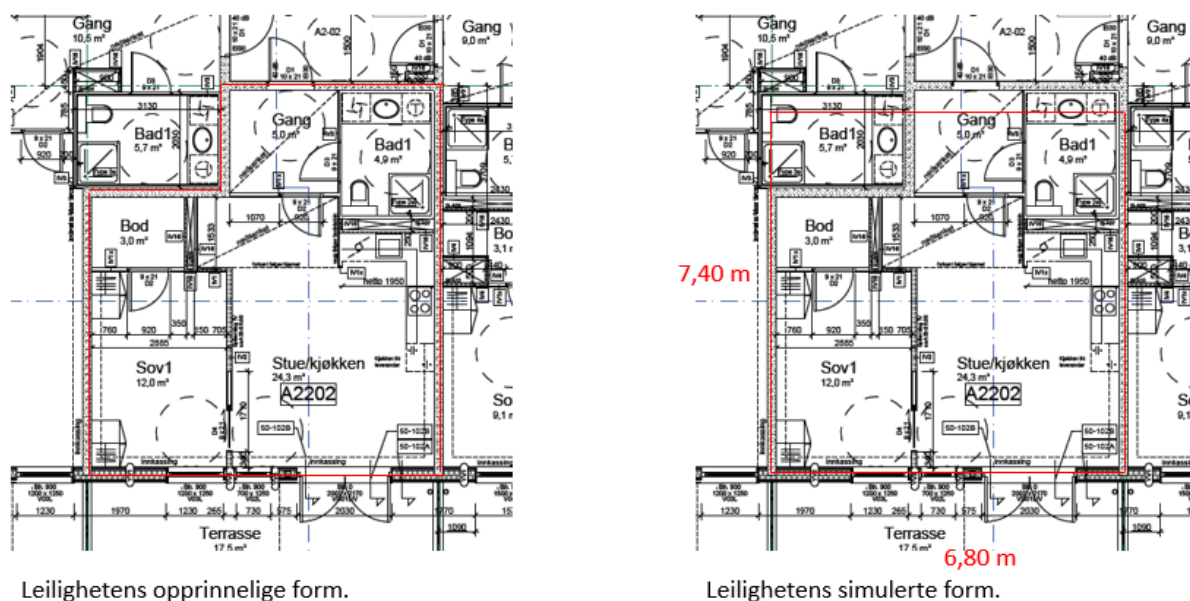
For å tilfredsstille Argos' krav angående kontakt med omgivelsene, er det nødvendig å legge inn ett lite hull i nord, øst og vest veggene. Etter ønske om å opprettholde konseptet om bruk av effektivt lekkasjeareal, settes hvert hull lik Argos' minste mål, 0,01 m·0,01 m. I sørveggen oppføres et dominerende hull på 0,09m·0,1m, som ca. tilsvarer det effektive lekkasjearealet.

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Det er da det ikke er mulig å legge inn en verdi på $0,093 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m}$. Videre plasseres alle hull i en valgt høyde på 2,4 m over overkant dekke. I virkeligheten er lekkasjearealenes lokasjon ukjent, og det dermed umulig å legge inn en eksakt høyde. Derfor står valg av lekkasjearealenes høyde fritt. I denne oppgaven velges det en felles høyde for samtlige lekkasjeareal (hull). 2,4 m over overkant dekke velges med tanke på brannens opptredende overtrykk.

Det velges et brannscenario av typen *Energy formula fire*, med intensitet, eller akselerasjonshastighet, *medium*. Dette for å korrespondere med tidligere fastsatt varmeutviklingsrate.

Begrenset langtidserfaring i bruk av programmet, resulterer i en tegneestetisk forenkling av leiligheten. Dette vises ved at leiligheten legges inn som en rektangulært formet leilighet, og ikke som sin opprinnelige form. Leilighetens arealandel er tilnærmet uendret. Innvendige vegger tas ikke med i simuleringen. For å unngå endring av arealandel, settes leilighetens kortsider til 6,80 m og langsider til 7,40 m. Romhøyden settes til 2,55 m. Alle mål for ytterdører og vinduer legges inn i henhold til plantegningen, inkludert brystningshøyde. Se figur 3-2 for nærmere forklaring av den tegneestetiske forenklingen.



FIGUR 3-2: LEILIGHETENS OPPRINNELIGE OG SIMULERTE FORM.

3.3 Fremgangsmåte for utførelse av sporgassmålinger

Dette avsnittet beskriver fremgangsmåten for målinger utført med utgangspunkt i NS-EN ISO 12569, sporgassmetoden. Det var på forhånd målt interne luftlekkasjer i utvalgte leiligheter, hvor en tilfeldig leilighet med høyt lekkasjetall over en brannskillende bygningskonstruksjon,

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

er valgt. Forsøkets hensikt er å måle endring i CO₂-konsentrasjon over et gitt tidsintervall. Ettersom valgt leilighet er en liten inneklemt leilighet, med to betydelig større leiligheter på hver side, se figur 3-1, er det aktuelt å måle CO₂ - konsentrasjonen i begge naboileilighetene.

Følgende utstyr er nødvendig for å utføre forsøket:

- 5 stk. Rotronic CP11 CO₂-målere
- 1 stk. Otermo vifte, 230V- 50 Hz – 18 W
- 1 stk. stor vifte ebm vifte, 220 – 230 V – 50 Hz – 130 W
- En tank CO₂-gass (Brannslukkingsapparat)
- Teip og plastfolie
- 5 stk. mikrofonstativ
- 1 stk. Minneapolis Blower Door, modell 4 (230 V)

Nødvendig data:

Forsøksdato: 24.03.14

Start klokken: 10.30, Slutt klokken: 14.15

Lokasjon: Ski, Akershus

Vindhastighet: Vindstille

Utetemperatur: 6°C

Utvendig CO₂-konsentrasjon: 400 ppm

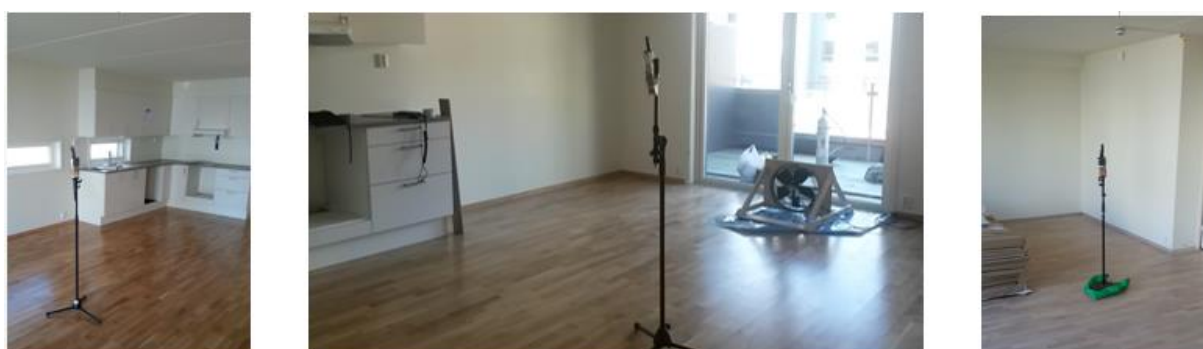
Forhåndsmålt gjennomsnittlig luftlekkasje $n_{50} = 2,32 \text{ h}^{-1}$

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann



FIGUR 3-3: BENYTTET UTSTYR. 1. OTERMO VIFTE, 2. STOR EBM VIFTE, 3. CO₂-GASS.

Forsøket igangsettes ved å skru av ventilasjonssystemet. For å unngå feilkilder, tettes alle avtrekk - og tilluftsventiler i de tre respektive leilighetene med plastfolie og teip. To Rotronic CP11-målere plasseres i hver av naboleilighetene og en måler plasseres i testleiligheten. Se figur 3-6. Da luftlekkasjenes lokasjon på branncelleveggen er ukjent, plasseres målerne ca. i rommets middelhøyde. Valg av målernes høyde er gjort med ønske om å oppnå en nøytral målehøyde. Dette oppnås ved å teipe hver måler til hvert sitt mikrofonstativ. Se figur 3-4.



FIGUR 3-4: PLASSERING AV MÅLER NUMMER 2, 1 OG 3 UNDER FORSØK NUMMER 1.

For å oppnå en start/referansekonsentrasjon på målerne, er det nødvendig å sjokklufte leilighetene slik at hver av målerne viser ca. 400 ppm. Når ønsket referansekonsentrasjon er nådd, lukkes alle vinduer og ytterdører i naboleilighetene. Innvendige dører åpnes og målernes innebygde loggere aktiveres. Naboleilighetene stenges for ferdsel.

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann



FIGUR 3-5: MONTERT BLOWER DOOR-VIFTE.

Blower Door-viften monteres i testrommets inngangsdør (Se figur 3-5), og to sirkuleringsvifter plasseres i rommet. Ebm-viften plasseres på gulvet i midten av stuens sørvegg. Otermo viften plasseres på soveromsgulvet inntil den vestre veggen. Viftenes hensikt er å skape god sirkulasjon i luften og en uniform gasstilværelse. Når viftene er skudd på, aktiveres Blower Door-viften med et konstant overtrykk på 50 Pa. For nærmere illustrasjon av sirkuleringsviftenes plassering, se figur 3-6.

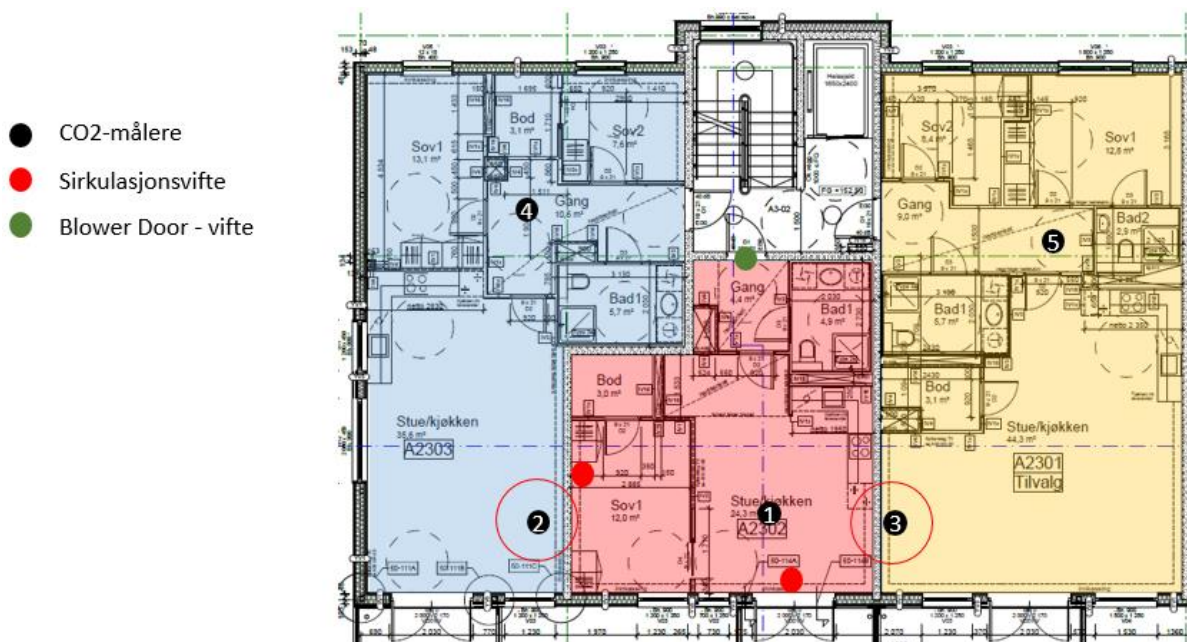
Når Blower Door-viften viser et konstant trykk på 50 Pa, tilføres CO₂-gass jevnt fordelt i leiligheten til måleren viser ca. 10 000 ppm. I henhold til ASTM E741, tabell 2, s. 5, er det på grunn av leilighetens lekkasjetall, nødvendig å la gassen «virke» i 30 minutter.

For å oppnå et korrekt resultat, er det nødvendig å gå ut av testrommet etter tilførsel av CO₂-gass. Både grunnet den høye tilførte CO₂-konsentrasjon, men også da mennesker puster ut CO₂. Ettersom Blower Door-viften er montert i leilighetens ytterdør, er terrassedøren eneste utgangsmulighet.

Etter 30 minutter avsluttes forsøket. Terrassedøren åpnes, viftene skrur av og alle leilighetene sjokkluftes. Alle målere stoppes for logging, og forsøket gjentas når alle målere i hver leilighet har stabilisert seg på ca. 400 ppm. Forsøket gjentas tre ganger for å kvalitetssikre resultatene.



FIGUR 3-6: UTSTYRSPASSERING FOR FORSØK 1.



FIGUR 3-7: UTSTYRSPASSERING FOR FORSØK 2 OG 3.

3.4 Feilkilder under utførelse av forsøket

Åpning av dører bidrar til å senke trykket drastisk. På grunn av dette var det nødvendig å kontrollere betydningen av å åpne terrassedøren. Når døren ble åpnet sank trykket drastisk, men returnerte tilbake til 50 Pa i løpet av få sekunder etter at terrassedøren ble lukket. Det konkluderes dermed med at å bevege seg ut av terrassedøren ikke påvirker forsøkets resultat.

Etter første utførelse av forsøket var det mistanke om at naboileilighetenes store bruksareal bidro til vanskeligheter for måler nummer 2 og 3 å detektere CO₂-endringene. Målerne ble derfor flyttet nærmere hver sin respektive branncellevegg. De to resterende målerne, måler nummer 4 og 5 forble urørt. Se figur 3 - 7 for illustrasjon.

Under utførelse av forsøk nummer 2, var det mistanke om at måleren i testrommet, måler nummer 1, ikke var blitt aktivert for logging. For å kontrollere dette, måtte terrassedøren åpnes for å få tilkomst til måleren. Det ble oppdaget at måleren var tom for strøm. For å fastslå at forsøket ikke måtte kanselleres, var det høyst nødvendig å entre leilighet nummer 1 og 3 (naboileilighetene). Dette ble gjort for å sikre at de resterende målerne fungerte som de skulle. Når det ble bekreftet at målerne var i orden, ble forsøket igangsatt på nytt, hvor gassens virkningstid var ca. 20 minutter.

3.5 Et kritisk syn: sporgassmetoden

Ettersom det var et ønske å måle konsentrasjonsendringer over en brannskillende bygningskonstruksjon, ble en utvidet versjon av sporgassmetoden vurdert til best egnet metode for besvarelse av oppgavens problemstilling. Likevel er det viktig å stille seg kritisk til valgt metode, da metoden kan bidra til flere potensielle feilkilder.

I et branntilfelle vil det ikke være sirkulasjonsvifter i naboileilighetene som bidrar til en uniform gasstilværelse. Dermed ble ikke sirkulasjonsvifter benyttet i utførelse av forsøkene. I ettertid kan det diskuteres om sirkulasjonsvifter i naboileilighetene ville endret oppnådd prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggene. Det kan tenkes at opptredende CO₂-konsentrasjoner i praksis er høyere enn antatt, men siger ut av leilighetene, for eksempel via luftlekkasjer eller legger seg utenfor målerens rekkevidde, uten å bli registrert. En annen mulig feilkilde er målerens plassering på mikrofonstativene. Ved plassering av målerne ble det benyttet en ca. middelhøyde av rommet. Høyden ble ikke fysisk målt. Dette innebærer at de ulike målerne kan avvike i plasseringshøyde over overkant dekke.

En manglende uniform tilværelse i naborommene, sammen med målerens ukjente målerrekkevidde, kan bidra til å svekkelse av målemetodens presisjon. Videre var det kun to tilgjengelig målere per leilighet. Flere målere per leilighet ville bidratt positivt til kvalitetssikring av oppnådde resultater. Likevel velges det å se seg fornøyd med oppnådde målerresultater. Dette både da målerresultatene indikerer at den ene leiligheten tillater større

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

gasstransport over branncelleveggen enn den andre, men også da målingene gir verdier som kan benyttes til videre arbeider.

Avslutningsvis er det ikke tatt hensyn til klimatiske påvirkninger, da målingene var utført på en vindstille dag.

4 Resultater

I dette kapittelet vil oppgavens samtlige resultater bli presentert. Det vil innledes med simuleringresultater, deretter omtales sporgassmetodens målte verdier, før det avsluttes med oppnådde tidsgrenser før hele naboileiligheten, eller naboileilighetens utvalgte rom, har nådd kritiske CO-konsentrasjoner.

4.1 Resultater fra Argos

Av resultatene fra Argos er det tre faktorer som er av interesse. Disse er endring i varmeutviklingsrate (HRR), temperaturendringer og trykkendringer. Ettersom simuleringen er utført ved å anta at alle dører og vinduer er lukket under hele simuleringperioden, og alle lekkasjearealene er samlet i et gjennomsnittlig effektivt lekkasjeareal, kan oppnådde trykksimuleringer være noe høyere enn i en reell brann. Følgende data er oppnådd i Argos:

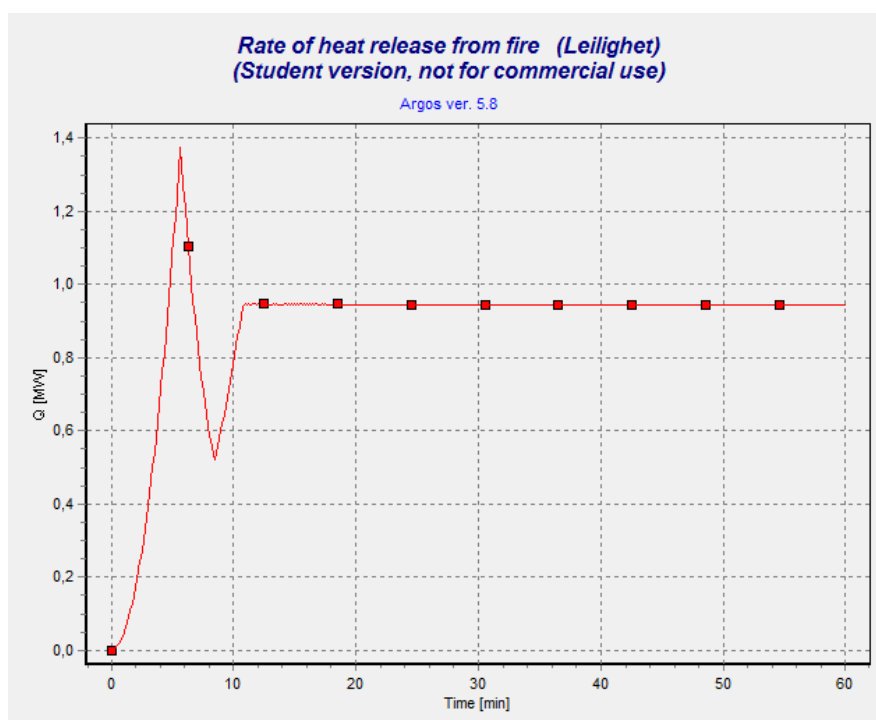
Tilleggsdata hentet fra Argos:

| | Q(t) | Smoke in room | Smoke in layer | Floor to layer | Layer temperature | Heat radiation |
|-----------------------|-------|---------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| | MW | dB/m | dB/m | m | °C | kW/m ² |
| <i>Leilighet 2102</i> | 0.944 | 0.00 | 46.61 | 0.00 | 296 | 5.37 |
| <i>Øst</i> | | 0.01 | - | - | - | - |
| <i>Vest</i> | | 0.01 | - | - | - | - |
| <i>Nord</i> | | 0.02 | - | - | - | - |

Fire progression:
 Energy formula fire > Medium
 Plumemodel > Heskestad
 00:02:03 : Critical condition in room 'Leilighet 2102': Smoke free height less than 1,85 m
 00:04:38 : Critical condition in room 'Leilighet 2102': Heat radiation from smoke layer greater than 2,5 kW/m²
 00:05:40 : Fire is declining
 00:06:45 : Room 'Leilighet 2102' is now filled with smoke
 00:49:55 : Room 'Leilighet 2102': Heat radiation at floor is now 5 kW/m²
 01:00:00 : MAX. CALCULATION TIME - CALCULATION ABORTED!

FIGUR 4-1: BESKRIVELSE AV KRITISKE TILSTANDER I SIMULERT BRANN.

Varmeutviklingsrate:



FIGUR 4-2: DEN SIMULERTE BRANNENS ENDRING I VARMEUTVIKLINGSRATE (HRR).

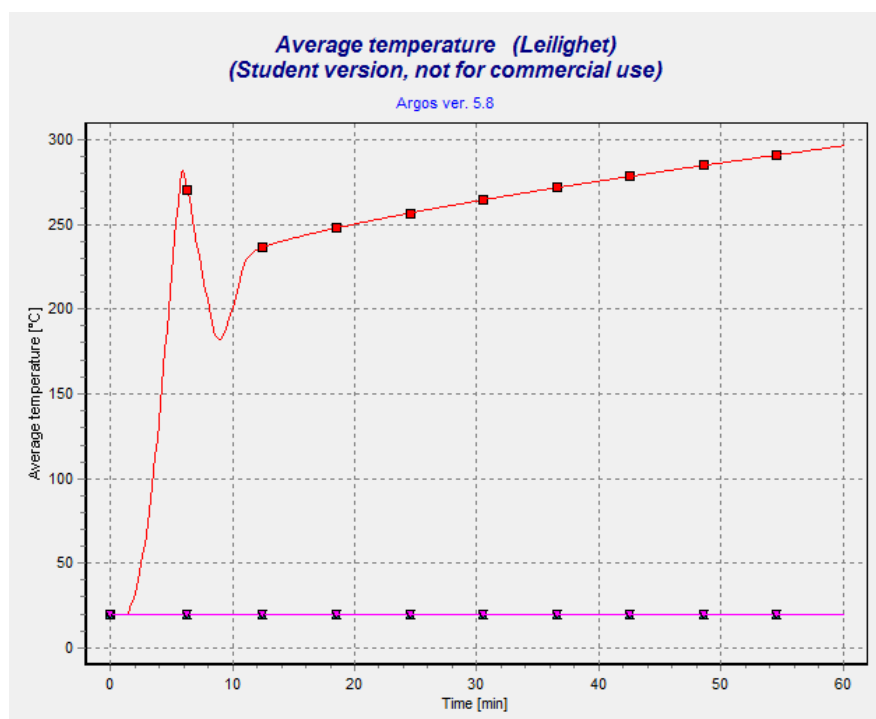
4:1 FORKLARING TIL FIGUR 4-2.

| <i>Tid</i> | <i>Brannfase</i> | <i>Forklaring</i> |
|-------------------|-----------------------------|---|
| 0 – 5 min | Startsfase → utviklingsfase | Varmeutviklingsraten utvikler seg i henhold til formelen $\dot{Q} = \alpha \cdot t^2$. Etter fem minutter har varmeutviklingsraten nådd sitt toppunkt. |
| 5 – 8 min | Brannen avtar | Utviklingsfasen er over og formelen er ikke gjeldende lenger. Brannen har blitt ventilasjonskontrollert og avtar. Som et resultat av brannens avtakelse, avtar også varmeutviklingsraten. |
| 8 – 10 min | Brannen avtar | Leiligheten er fylt med røyk, og som belyst i teorien innledningsvis, kan brannen spres videre ved blant annet varmestråling eller varmestrømning/konveksjon i røyklaget. |

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

| | | |
|-----------------|---------------|--|
| | | Varmeutviklingsraten stiger på nytt grunnet varmestrømning og stråling i røyklaget. |
| 10 min → | Brannen avtar | Når røyklaget har stabilisert seg, vil varmeutviklingsraten også stabiliserer seg og fortsetter å være konstant inntil alt brenselet er brent opp. |

Temperaturendring:



FIGUR 4-3: ENDING I GJENNOMSNIITTSTEMPERATUR FOR SIMULERT BRANN. KUN DEN RØDE GRAFEN ER AKTUELL.

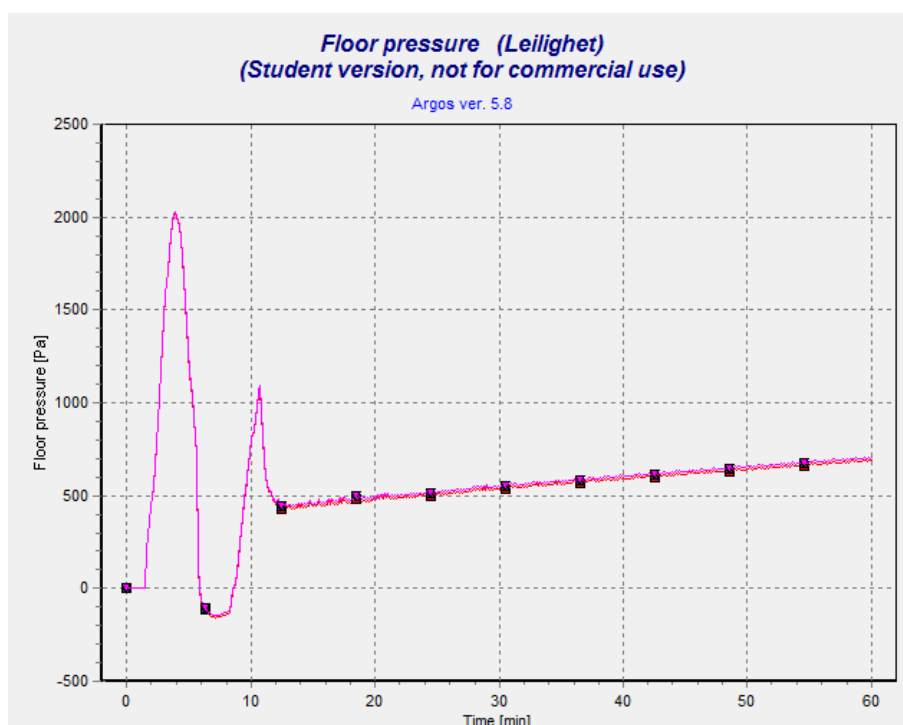
4:2 FORKLARING TIL FIGUR 4-3.

| <i>Tid</i> | <i>Brannfase</i> | <i>Forklaring</i> |
|------------------|-----------------------------|--|
| 0 – 5 min | Startsfase → utviklingsfase | Temperaturen utvikler seg i takt med varmeutviklingsraten inntil brannen har nådd sitt toppunkt. |
| 5 – 8 min | Brannen avtar | Etttersom brannen avtar vil også temperaturen avta. |

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

| | | |
|-------------------|---------------|--|
| 8 – 10 min | Brannen avtar | Etter hvert som leiligheten er blitt røyklagt vil temperaturen stige. Dette kan forklares både ved varmeutviklingen som oppstår i røyklaget, men også da leiligheten har gått fra en to-sonet tilværelse til en en-sonet tilværelse. |
| 10 min → | Brannen avtar | Når røyklaget har stabilisert seg, vil temperaturen stige gradvis som et resultat av konstant varmeutvikling og begrenset varmeutslipp. |

Trykkdifferanse:



FIGUR 4-4: ENDRING I TRYKKDIFFERANSE FOR DEN SIMULERTE BRANNEN.

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

4:3 FORKLARING TIL FIGUR 4-5.

| <i>Tid</i> | <i>Brannfase</i> | <i>Forklaring/tolkning</i> |
|-------------------|-----------------------------|--|
| 0 – 5 min | Startsfase → utviklingsfase | Trykket øker dramatisk som følge av hurtig økning av varmeutviklingsrate og temperatur. |
| 5 – 8 min | Brannen avtar | Brannen avtar på grunn av manglende oksygentilførsel. Brannen er blitt ventilasjonskontrollert og tar til seg det siste som er igjen av oksygenet. Som et resultat av dette, dannes det et dominerende undertrykk i en kort periode. |
| 8 – 10 min | Brannen avtar | Etter hvert som leiligheten er røyklaget, stiger trykket igjen. Dette kan skyldes gassmolekylens bevegelse i røyklaget (temperaturøkning), men også oksygentilførsel fra leilighetens lekkasjeareal. |
| 10 min → | Brannen avtar | Når røyklaget har stabilisert seg vil trykket synke. Etter kort tid vil trykket kun påvirkes av temperaturen og stige i takt med den. Dette grunnet konstant varmeutviklingsrate. |

4.2 Resultater fra målinger

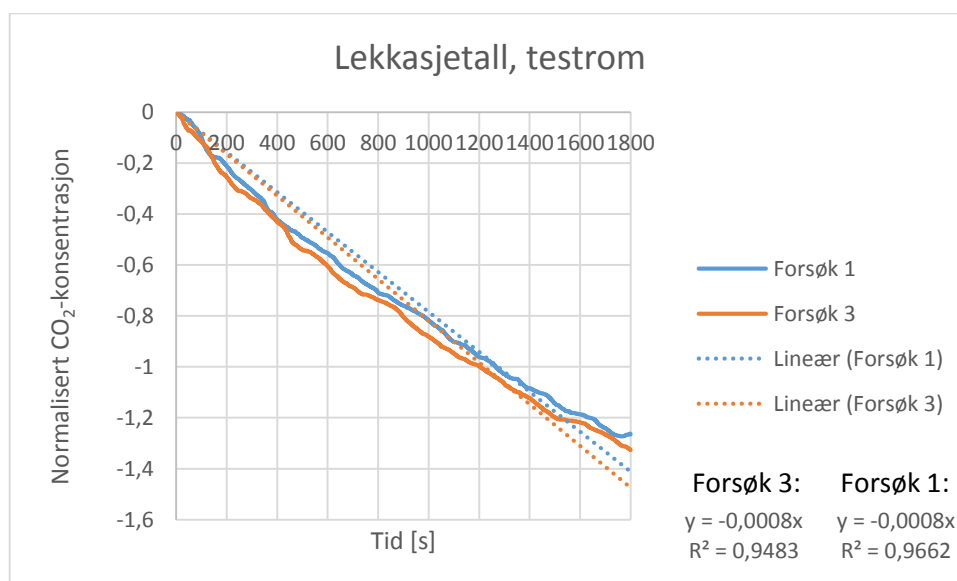
Dette kapittelet presenterer samtlige resultater oppnådd ved bruk av sporgassmetoden. For ordensskyld er det valgt å presentere hver måler i hvert sitt delkapittel. Avslutningsvis er resultatene for hvert forsøk samlet i hver sin representative graf. Dette er gjort for å illustrere de ulike CO₂-endringene som oppstår i hver leilighet under hvert forsøk. Bruk av logaritmisk fremstilling begrenser y-aksens akseverdier. Grafenes tilhørende tabeller er tatt med for å vise målingenes presise start- og sluttverdi.

Ettersom målerne ikke ble helt nullstilt til en presis startkonsentrasjon på 400 ppm ved start av hvert forsøk, varierer de samtlige grafenes startverdi på y-aksen. Det opplyses at dette ikke påvirker oppgavens sluttresultat, da det kun er CO₂-differansen fra start til slutt som er av

interesse. Videre er det trukket fra 400 ppm fra alle verdier. Dette fordi 400 ppm benyttes som referansekonsentrasjon.

4.2.1 Måler 1: Plassert i testrom

Som omtalt i kapittel 3.4, Feilkilder under utførelse av forsøket, oppstod det et tekniskproblem under forsøk nummer 2. På grunn av dette er det kun tilgjengelig data for forsøk nummer 1 og 3.



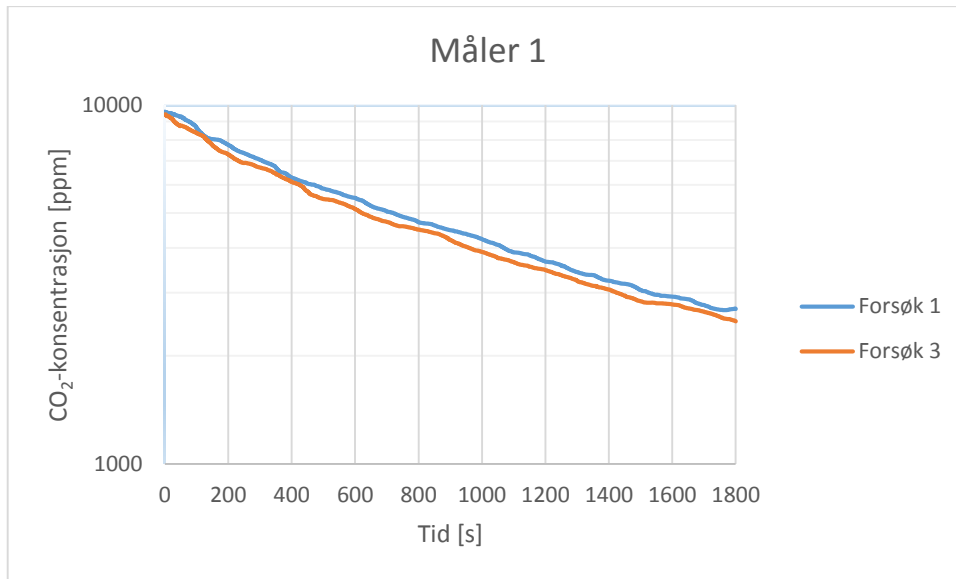
FIGUR 4-5: LEKKASJETALL VED 50 PA OVERTRYKK.

Grafen illustrerer hvordan den normaliserte CO₂-konsentrasjonen endrer seg med tiden. Tabell 4:4 viser testleilighetens lekkasjetall oppnådd ved bruk av sporgassmetoden.

4:4 LINEÆRISERT LEKKASJETALL VED BRUK AV SPORGASSMETODE.

| <i>Forsøk</i> | <i>Avlest n₅₀ per halvtime</i> | <i>Opptredende n₅₀</i> |
|-------------------|---|-----------------------------------|
| <i>Forsøk 1:</i> | 1,26 | 2,52 |
| <i>Forsøk 3:</i> | 1,32 | 2,64 |
| <i>Snittverdi</i> | - | 2,58 |

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann



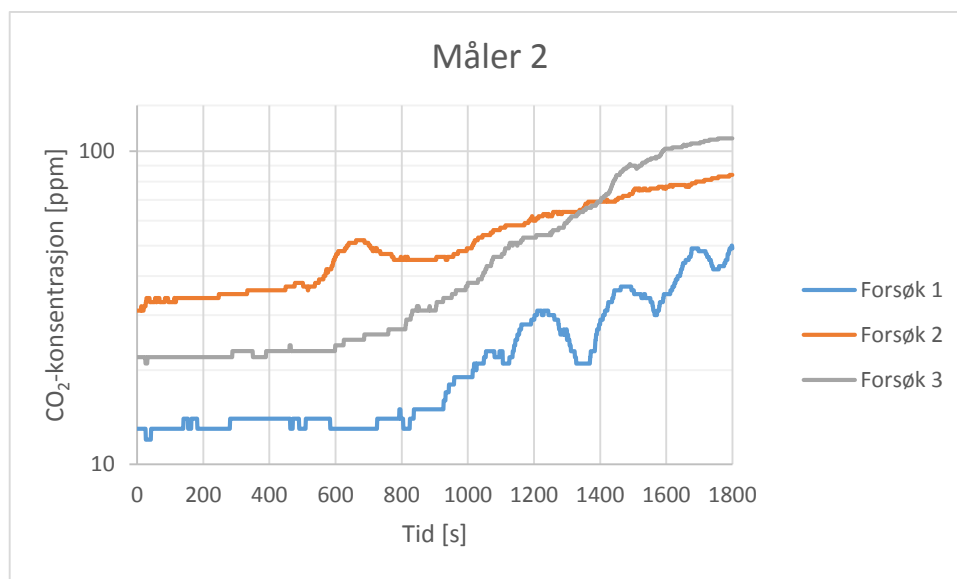
FIGUR 4-6: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING I TESTROM.

I testrommet ble det tilført en CO₂-konsentrasjon på ca. 10 000 ppm. Etter en halv time var leilighetens konsentrasjon 2703 ppm for forsøk nummer 1 og 2495 ppm for forsøk nummer 3. Grafen kan leses som at i løpet av en halv time siver i gjennomsnitt 6896 ppm ut av leiligheten.

4:5 CO₂-ENDRINGER FOR TESTROM, MÅLER 1.

| <i>Forsøk</i> | <i>C_{start} - C_{slutt} [ppm]</i> | <i>Oppnådd CO₂-endring [ppm]</i> |
|----------------------|--|---|
| <i>Forsøk nr. 1:</i> | 9586-2703 | 6883 |
| <i>Forsøk nr. 3:</i> | 9404-2495 | 6909 |
| <i>Snittverdi:</i> | $\frac{6883 + 6909}{2}$ | 6896 |

4.2.2 Måler 2: Plassert i stua til leilighet nummer 1

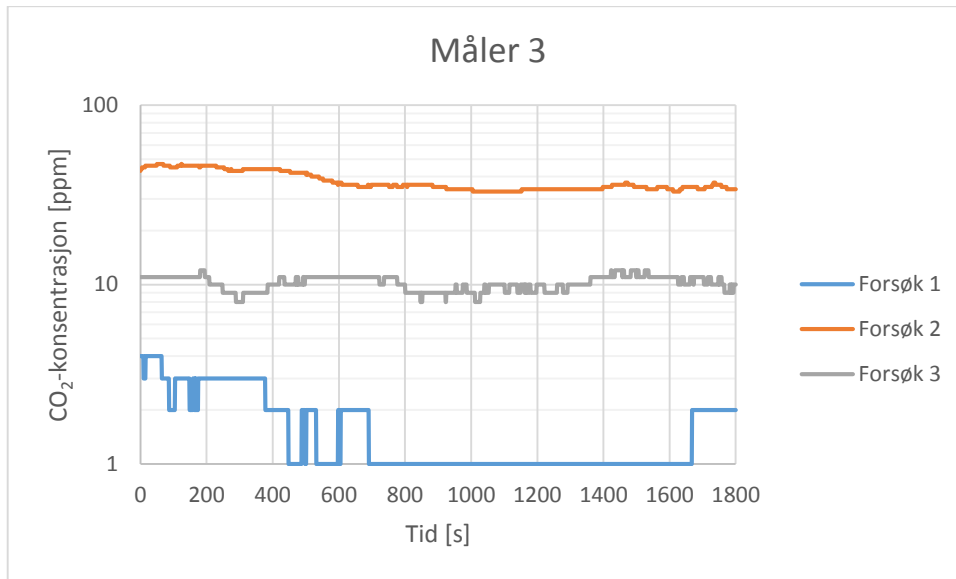
FIGUR 4-7: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING, MÅLER 2.

Ved å tilføre testrommet en CO₂-konsentrasjon på 10 000 ppm, detekterer respektiv måler endringsverdier mellom 36 - 88 ppm. Dette gir en gjennomsnittlig konsentrasjonsendring for måleren på 98,3 ppm.

4:6 CO₂-ENDRINGER FOR MÅLER 2.

| <i>Forsøk</i> | $C_{slutt} - C_{start}$ [ppm] | <i>Oppnådd CO₂-endring</i> [ppm] |
|----------------------|-------------------------------|---|
| <i>Forsøk nr. 1:</i> | 49-13 | 36 |
| <i>Forsøk nr. 2:</i> | 84-31 | 53 |
| <i>Forsøk nr. 3:</i> | 110-22 | 88 |
| <i>Snittverdi:</i> | $\frac{36 + 53 + 88}{3}$ | 59 |

4.2.3 Måler 3: Plassert i stua til leilighet nummer 3



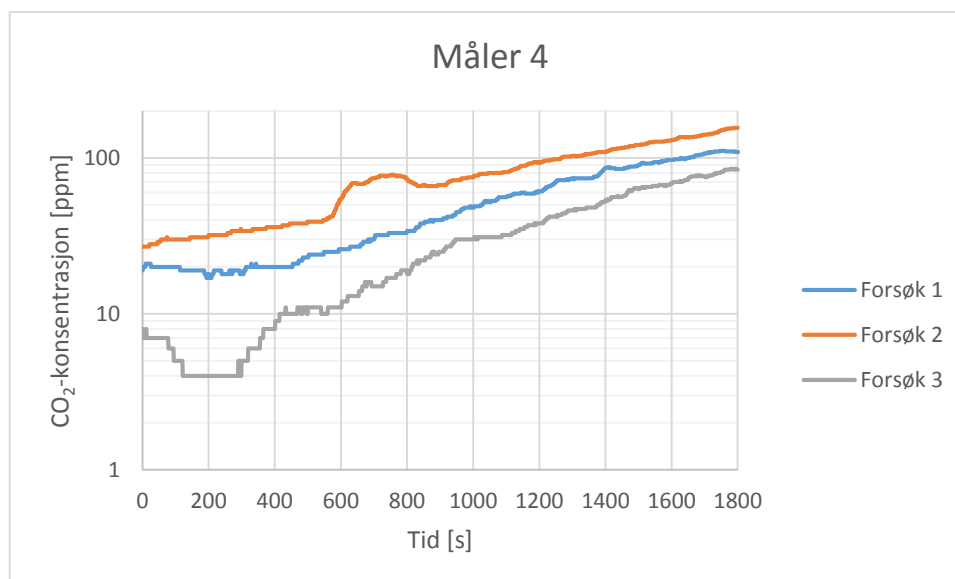
FIGUR 4-8: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING, MÅLER 3.

Ved å tilføre testrommet en konsentrasjon på 10 000 ppm, detekteres det ingen økning i CO₂-konsentrasjon for måler nummer 3.

4:7 CO₂-ENDRINGER FOR MÅLER 3.

| <i>Forsøk</i> | <i>C_{slutt} – C_{start} [ppm]</i> | <i>Oppnådd CO₂-endring [ppm]</i> |
|----------------------|--|---|
| <i>Forsøk nr. 1:</i> | 2-4 | -2 |
| <i>Forsøk nr. 2:</i> | 34-43 | -9 |
| <i>Forsøk nr. 3:</i> | 10-11 | -1 |
| <i>Snittverdi:</i> | $\frac{2 + 9 + 1}{3}$ | -4 |

4.2.4 Måler 4: Plassert i entreen til naboileilighet nummer 1

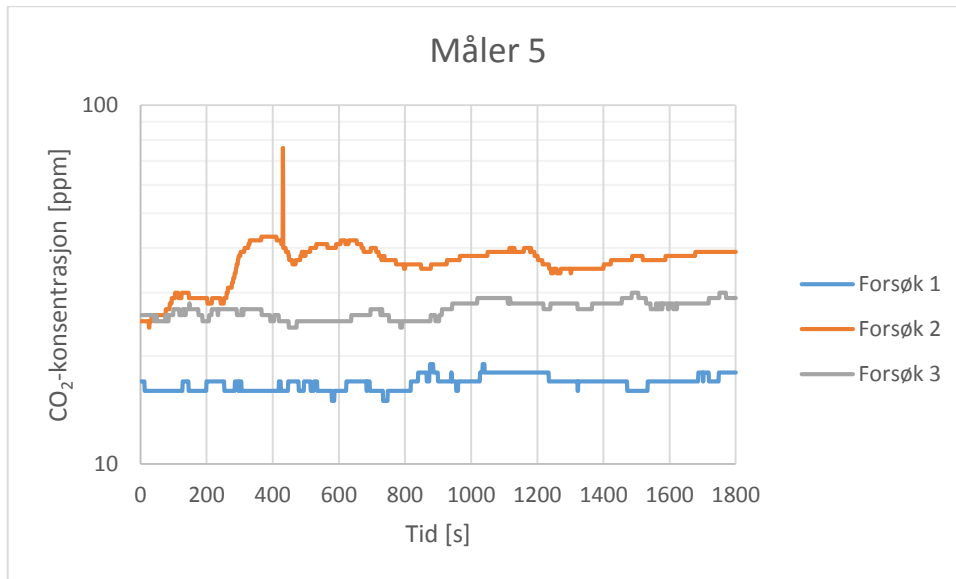
FIGUR 4-9: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING, MÅLER 4.

Ved å tilføre testrommet en CO₂-konsentrasjon på 10 000 ppm, detekterer respektive måler endringsverdier mellom 76 - 129 ppm. Dette gir en gjennomsnittlige konsentrasjonsendring for måleren på 98,3 ppm.

4:8 CO₂-ENDRINGER FOR MÅLER 4.

| <i>Forsøk</i> | <i>C_{slutt} – C_{start} [ppm]</i> | <i>Oppnådd CO₂-endring [ppm]</i> |
|----------------------|--|---|
| <i>Forsøk nr. 1:</i> | 109-19 | 90 |
| <i>Forsøk nr. 2:</i> | 156-27 | 129 |
| <i>Forsøk nr. 3:</i> | 84-8 | 76 |
| <i>Snittverdi:</i> | $\frac{90 + 129 + 76}{3}$ | 98,3 |

4.2.5 Måler 5: Plassert i entreen til naboelilighet nummer 3



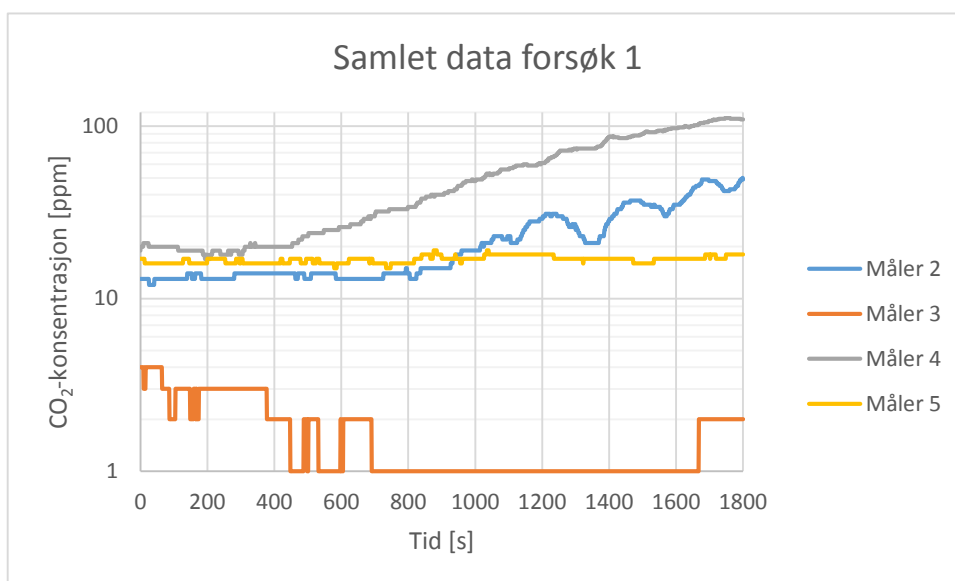
FIGUR 4-10: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING, MÅLER 5.

Ved å tilføre testrommet en konsentrasjon på 10 000 ppm, detekterer respektiv måler små CO₂-endringer. Dette gir en gjennomsnittlige konsentrasjonsendring for måleren på 6 ppm.

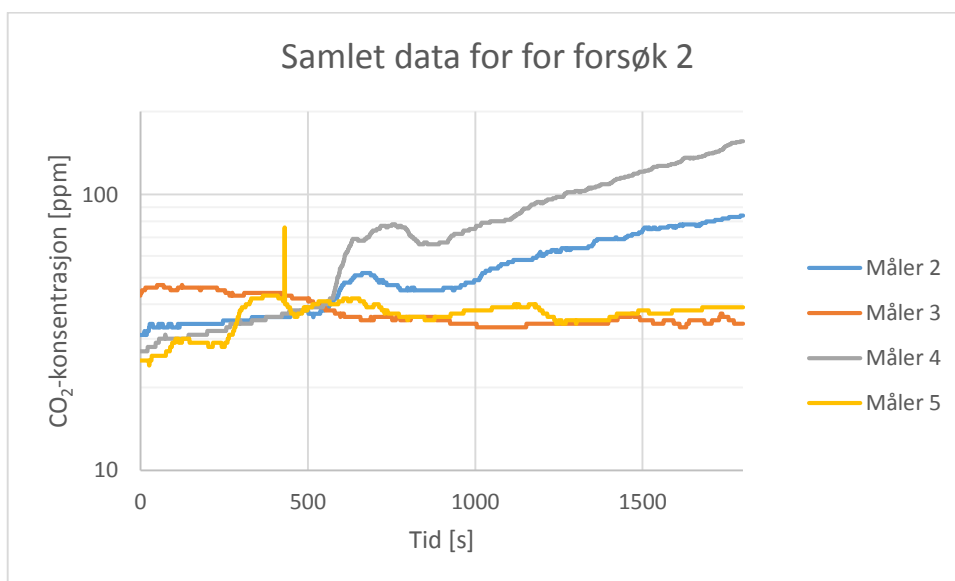
4:9 CO₂-ENDRINGER FOR MÅLER 5.

| <i>Forsøk</i> | <i>C_{slutt} – C_{start} [ppm]</i> | <i>Oppnådd CO₂-endring [ppm]</i> |
|---------------------------|---|--|
| <i>Forsøk nr. 1:</i> | 18-17 | 1 |
| <i>Forsøk nr. 2:</i> | 39-25 | 14 |
| <i>Forsøk nr. 3:</i> | 29-26 | 3 |
| <i>Snittverdi:</i> | $\frac{1 + 14 + 3}{3}$ | 6 |

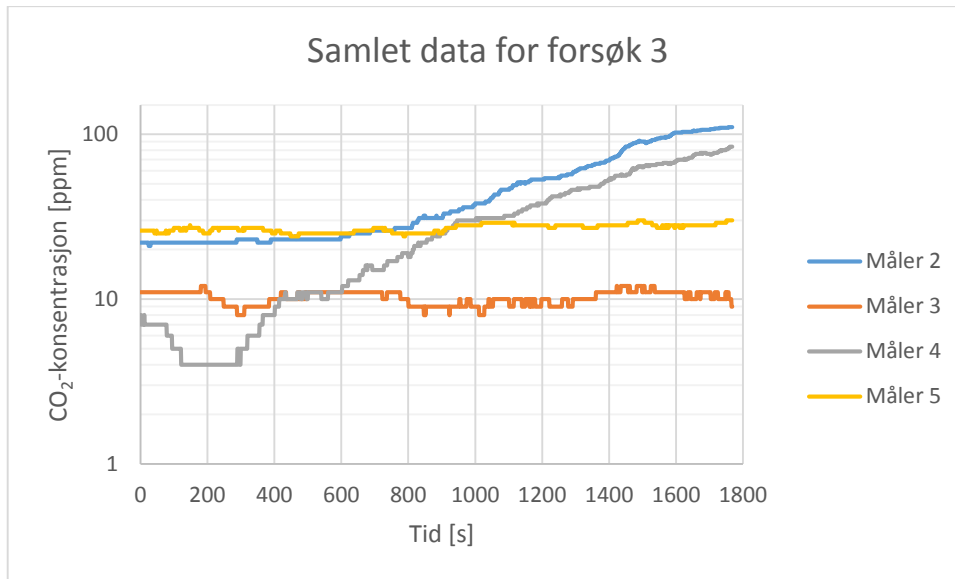
4.2.6 Samlet data for hvert forsøk i naboileilighetene



FIGUR 4-11: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING, FORSØK 1.



FIGUR 4-12: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING, FORSØK 2.



FIGUR 4-13: SAMLET DATA FOR CO₂-ENDRING, FORSØK 3.

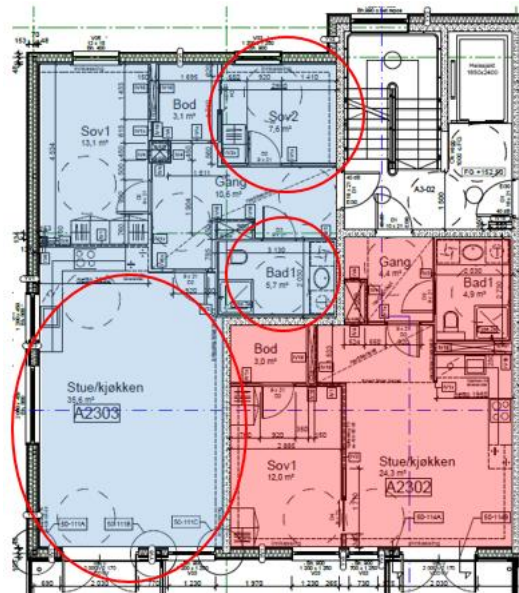
Kommentar:

Ved å samle de ulike målerens data i en felles graf for hvert respektive forsøk, kommer det tydeligere frem hvilke målere som hører til i samme leilighet. Grafene viser sammenheng mellom måler nummer 2 og 4 sitt stigningstall. Det samme gjelder for måler nummer 3 og 5.

4.3 Resultater ved hjelp av matematiske formler: Tidsgrenser

Dette kapittelet tar for seg oppgavens sluttresultater. Med sluttresultater menes opptredende tidsgrenser før et valgt volum har nådd kritiske CO₂-konsentrasjoner. Resultatene beregningsgrunnlag gjennomgås grundig i kapittel 5, Utregninger.

Estimerte tidsgrenser for de ulike brannfasene er presenter i tabellene 4:10 – 4:16. I tillegg til å estimere tiden det tar før hele leiligheten har nådd kritiske CO₂-konsentrasjoner, er det valgt å studere enkelte rom. Alle benyttede volumer er arealer hentet fra figur 4-14, og multiplisert med en høyde på 2,55 m. Dette er et bevisst valg for å presisere konsekvensen av lokal branngasstransport direkte



FIGUR 4-14: ILLUSTRASJON AV UTVALGTE AREALER.

inn i små rom, eksempelvis soverom. Videre baserer alle tidsgrenser seg på formel nummer 12.

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Når det gjelder opptredende CO-konsentrasjon i testrommet/brannrommet (C_{brannrom}), er kun de mest kritiske verdiene tatt høyde for.

Forklaring til tabellene:

- C_1 beskriver ønsket oppnådd CO-konsentrasjon i naboileilighet.
- C_{brannrom} er opptredende CO-konsentrasjon i brennende leilighet.
- t_0 er tiden det vil ta å oppnå samme konsentrasjon i naboileilighet som i den brennende.
- t_1 er tid, inkludert forholdsfaktor, for oppnåelse av ønsket konsentrasjonsnivå i naboileilighet.
- Luftmengde beskriver mengde luft transportert over branncelleveggen per time. Dette gitt at 1,14 % av lekkasjeluftmengden i testrommet/brannrommet går over branncelleveggen.

Samtlige tabeller leses på følgende måte:

1. Velg et ønsket areal, men tilhørende volum.
2. Valgt volum tilføres en konstant lekkasjeluftmengde, ved et forhåndsbestemt trykk.
3. Hvis det ønskes samme konsentrasjon i begge leiligheter/rom, vil estimert tidsgrense være t_0 .
4. For å oppnå ønsket CO-konsentrasjon i naboileilighet/rom, multipliseres t_0 med forholdsfaktoren f (Denne er oppgitt i overskriften til hver tabell).
5. Etter multiplikasjon av forholdsfaktoren, oppnås opptredende tidsgrense, t_1 .

Ulmebrann

Beregningene i samtlige tabeller er utført under betingelsen:

- Opptredende trykkdifferanse: 50 Pa.

Tabell 4:10:

Tabellen viser estimerte tidsgrenser der det er valgt å studere et tenkt branntilfelle hvor opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet er 2000 ppm, og ønsket konsentrasjon i naboileiligheten er 1400 ppm.

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

4:10 TIDSGRENSER FOR DANNELSE AV KRITISKE CO-KONSENTRASJONER NÅR $F = 0,70$, ULMEBRANN.

| <i>ULMEBRANN, $f = 1400/2000$</i> | | | | | | |
|--|----------------------------------|---|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Omtalt areal</i> | <i>Volum [m³]</i> | <i>Luftmengde [m³/h]</i> | <i>t₀ [h]</i> | $f = \frac{C_1}{C_{brannrom}}$ | <i>t₁ [h]</i> | <i>Spesifisert t₁</i> |
| <i>Hele leiligheten</i> | 193 | 3,32 | 58,1 | 0,70 | 40,7 | 40 h 4 min |
| - <i>Soverom</i> | 19,4 | 3,32 | 5,84 | 0,70 | 4,09 | 4 h 5 min |
| - <i>Stue</i> | 90,8 | 3,32 | 27,3 | 0,70 | 19,1 | 19 h 6 min |
| - <i>Bad</i> | 14,5 | 3,32 | 4,37 | 0,70 | 3,06 | 3 h 4 min |

Tabell 4:11:

Tabellen viser estimerte tidsgrenser der det er valgt å studere et branntilfelle hvor opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet er 10 000 ppm, og ønsket konsentrasjon i naboileiligheten er 1400 ppm.

4:11 TIDSGRENSER FOR DANNELSE AV KRITISKE CO-KONSENTRASJONER NÅR $F = 0,14$, ULMEBRANN.

| <i>ULMEBRANN, $f = 1400/10\ 000$</i> | | | | | | |
|---|----------------------------------|---|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Omtalt areal</i> | <i>Volum [m³]</i> | <i>Luftmengde [m³/h]</i> | <i>t₀ [h]</i> | $f = \frac{C_1}{C_{brannrom}}$ | <i>t₁ [h]</i> | <i>Spesifisert t₁</i> |
| <i>Hele leiligheten</i> | 193 | 3,32 | 58,1 | 0,14 | 8,13 | 8 h 8 min |
| - <i>Soverom</i> | 19,4 | 3,32 | 5,84 | 0,14 | 0,82 | 49 min |
| - <i>Stue</i> | 90,8 | 3,32 | 27,3 | 0,14 | 3,82 | 3 h 49 min |
| - <i>Bad</i> | 14,5 | 3,32 | 4,37 | 0,14 | 0,61 | 37 min |

Tabell 4:12:

Tabellen viser estimerte tidsgrenser der det er valgt å studere et branntilfelle hvor opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet er 2000 ppm, og ønsket konsentrasjon i naboileiligheten er 2000 ppm.

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

4:12 TIDSGRENSER FOR DANNELSE AV KRITISKE CO-KONSENTRASJONER NÅR F = 1,00, ULMEBRANN.

| <i>ULMEBRANN, f = 2000/2000</i> | | | | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Omtalt areal</i> | <i>Volum [m³]</i> | <i>Luftmengde [m³/h]</i> | <i>t₀ [h]</i> | $f = \frac{C_1}{C_{brannrom}}$ | <i>t₁ [h]</i> | <i>Spesifisert t₁</i> |
| <i>Hele leiligheten</i> | 193 | 3,32 | 58,1 | 1,00 | 58,1 | 58 h 6min |
| - <i>Soverom</i> | 19,4 | 3,32 | 5,84 | 1,00 | 5,84 | 5 h 50 min |
| - <i>Stue</i> | 90,8 | 3,32 | 27,3 | 1,00 | 27,3 | 27 h 18 min |
| - <i>Bad</i> | 14,5 | 3,32 | 4,37 | 1,00 | 4,37 | 4 h 22 min |

Tabell 4:13:

Tabellen viser estimerte tidsgrenser der det er valgt å studere et branntilfelle hvor opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet er 10 000 ppm, og ønsket konsentrasjon i naboileiligheten er 2000 ppm.

4:13 TIDSGRENSER FOR DANNELSE AV KRITISKE CO-KONSENTRASJONER NÅR F = 0,20, ULMEBRANN.

| <i>ULMEBRANN, f = 2000/10 000</i> | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Omtalt areal</i> | <i>Volum [m³]</i> | <i>Luftmengde [m³/h]</i> | <i>t₀ [h]</i> | $f = \frac{C_1}{C_{brannrom}}$ | <i>t₁ [h]</i> | <i>Spesifisert t₁</i> |
| <i>Hele leiligheten</i> | 193 | 3,32 | 58,1 | 0,20 | 11,6 | 11 h 36 min |
| - <i>Soverom</i> | 19,4 | 3,32 | 5,84 | 0,20 | 1,17 | 1 h 10 min |
| - <i>Stue</i> | 90,8 | 3,32 | 27,3 | 0,20 | 5,46 | 5 h 28 min |
| - <i>Bad</i> | 14,5 | 3,32 | 4,37 | 0,20 | 0,87 | 52 min |

Brann under utvikling

Beregningene i tabellen er utført under betingelsen:

- Opptredende trykkdifferanse: 550 Pa.

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Tabell 4:14:

Tabellen viser estimerte tidsgrenser der det er valgt å studere et branntilfelle hvor opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet er 5000 ppm, og ønsket konsentrasjon i naboileiligheten er 5000 ppm.

4:14 TIDSGRENSER FOR DANNELSE AV KRITISKE CO-KONSENTRASJONER NÅR $F = 1,00$, BRANN UNDER UTVIKLING.

| BRANN UNDER UTVIKLING, $f = 5000/5000$ | | | | | | |
|--|-----------------------------------|--|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--|
| <i>Omtalt areal</i> | <i>Volum</i> [m ³] | <i>Luftmengde</i> [m ³ /h] | <i>t₀</i> [h] | $f = \frac{C_1}{C_{brannrom}}$ | <i>t₁</i> [h] | <i>Spesifisert</i> <i>t₁</i> |
| <i>Hele leiligheten</i> | 193 | 13,9 | 13,9 | 1,00 | 13,9 | 13 h 54 min |
| - <i>Soverom</i> | 19,4 | 13,9 | 1,40 | 1,00 | 1,40 | 1 h 24 min |
| - <i>Stue</i> | 90,8 | 13,9 | 6,53 | 1,00 | 6,53 | 6 h 32 min |
| - <i>Bad</i> | 14,5 | 13,9 | 1,04 | 1,00 | 1,04 | 1 h 2 min |

Fullt utviklet brann

Beregningene i samtlige tabeller er utført under betingelsen:

- Opptredende trykkdifferanse: 550 Pa.

Tabell 4:15:

Tabellen viser estimerte tidsgrenser der det er valgt å studere et branntilfelle hvor opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet er 50 000 ppm, og ønsket konsentrasjon i naboileiligheten er 6000 ppm.

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

4:15 TIDSGRENSER FOR DANNELSE AV KRITISKE CO-KONSENTRASJONER NÅR $F = 0,12$, FULLT UTVIKLET BRANN.

| FULLT UTVIKLET BRANN, $f = 6000/50\ 000$ | | | | | | |
|--|----------------------------------|---|---------------------------------|--|---------------------------------|---|
| Omtalt areal | Volum [m³] | Luftmengde [m³/h] | t_0 [h] | $f = \frac{C_1}{C_{brannrom}}$ | t_1 [h] | Spesifisert t_1 |
| Hele leiligheten | 193 | 13,9 | 13,9 | 0,12 | 1,67 | 1 h 40 min |
| - Soverom | 19,4 | 13,9 | 1,40 | 0,12 | 0,17 | 10 min |
| - Stue | 90,8 | 13,9 | 6,53 | 0,12 | 0,78 | 47 min |
| - Bad | 14,5 | 13,9 | 1,04 | 0,12 | 0,12 | 7 min |

Tabell 4:16:

Tabellen viser estimerte tidsgrenser der det er valgt å studere et branntilfelle hvor opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet er 50 000 ppm, og ønsket konsentrasjon i naboileiligheten er 12 000 ppm.

4:16 TIDSGRENSER FOR DANNELSE AV KRITISKE CO-KONSENTRASJONER NÅR $F = 0,24$, FULLT UTVIKLET BRANN.

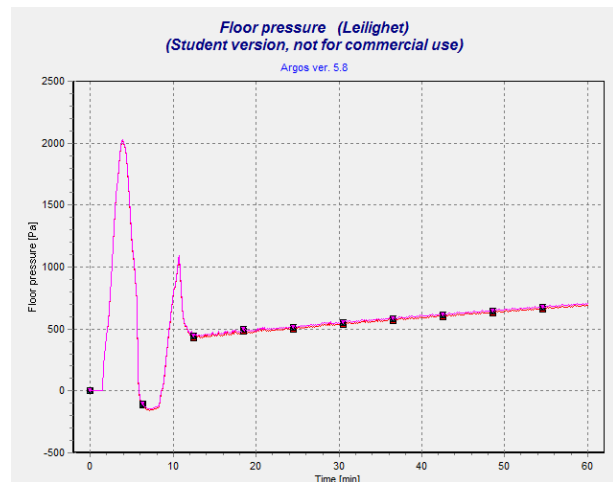
| FULLT UTVIKLET BRANN, $f = 12\ 000/50\ 000$ | | | | | | |
|---|----------------------------------|---|---------------------------------|--|---------------------------------|---|
| Omtalt areal | Volum [m³] | Luftmengde [m³/h] | t_0 [h] | $f = \frac{C_1}{C_{brannrom}}$ | t_1 [h] | Spesifisert t_1 |
| Hele leiligheten | 193 | 13,9 | 13,9 | 0,24 | 3,34 | 3 h 20 min |
| - Soverom | 19,4 | 13,9 | 1,40 | 0,24 | 0,34 | 20 min |
| - Stue | 90,8 | 13,9 | 6,53 | 0,24 | 1,57 | 1 h 34 min |
| - Bad | 14,5 | 13,9 | 1,04 | 0,24 | 0,25 | 15 min |

5 Utregninger

Det er dette kapittelets hensikt å gi et utfyllende beregningsgrunnlag for resultater presentert i kapittel 4.3, Resultater oppnådd ved bruk av matematiske formler: Tidsgrenser. Kapittelet tar for seg en grundig gjennomgang av alle forutsetninger og valg underveis i beregningene.

5.1 Valg av opptredende trykkdifferanser

For å muliggjøre beregning av opptredende tidsgrense, før naboileiligheten har nådd dødelige CO-konsentrasjoner, er det nødvendig å fastslå et konstant trykk for hver av de respektive brannfasene. Ettersom simulert trykkgraf (Se figur 5-1) viser kraftig økning i utviklingsfasen, før den så får en betydelig lavere og langsommere økning, er det nødvendig å begrense trykkvariasjonene.



FIGUR 5-1: TRYKKSIMULERINGER FRA ARGOS.

Da tidsintervaller i utviklingsfasen er to minutter, (trykket begynner å øke etter ca. to minutter, og avtar etter ca. fire minutter), hvor trykket akselererer kraftig i løpet av perioden, er det valgt å benytte et gjennomsnittstrykk for hele simuleringen. Trykkdifferansen er bestemt ved å ta utgangspunkt i perioden 12 – 60 minutter, hvor trykkvariasjonen er betydelig lavere. I den omtalte perioden varierer trykket fra 400 Pa til 700 Pa. Dette gir en gjennomsnittlig trykkdifferanse på 550 Pa.

Ved studie av ulmebranner hvor varmeutviklingsraten og temperaturøkningen er beskjeden, vil det antas en konstant trykkdifferansen på 50 Pa. Det kan diskuteres om denne trykkøkningen er for høy for fasen, men for å kunne anta at volumstrømmen beveger seg fra testleiligheten til naboileiligheten anses dette som nødvendig.

5.2 Gjennomsnittlig lekkasjeluftmengde

En sentral og gjennomgående faktor under hele oppgaven er den gjennomsnittlige lekkasjeluftmengden. Ettersom det velges å benytte to ulike trykkdifferanser for å besvare oppgavens problemstilling, er det nødvendig med to ulike lekkasjeluftmengdetilfeller. Ved beregning av lekkasjeluftmengder er det vanlig å benytte en gjennomsnittsverdi av leilighetens

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

lekkasjeluftmengde ved overtrykk og undertrykk (Holøs & Aurlien 2014). Alle verdier i tabell 5:1 - 5:2 for C_L og n er hentet fra rapport om luftlekkasjemålinger i leilighet nummer 2 (Iden & Sandeggen 2015). Se vedlegg B.

Formel for volumstrøm (lekkasjeluftmengde):

$$\dot{V}_L = C_L \cdot \Delta P^n \quad (1)$$

5:1 BENYTTETE VERDIER FOR BEREGNING AV LEKKASJELUFTMENGDE, 50 PA.

| | <i>Overtrykk</i> | <i>Undertrykk</i> |
|----------------------|---|---|
| ΔP | 50 Pa | 50 Pa |
| C_L | $28,7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ | $27,7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ |
| n | 0,600 | 0,594 |
| \dot{V}_L | $300 \text{ m}^3/\text{h}$ | $283 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| $\dot{V}_{Snitt,50}$ | $\frac{300+283}{2} = 291 \text{ m}^3/\text{h}$ | |

5:2 BENYTTETE VERDIER FOR BEREGNING AV LEKKASJELUFTMENGDE, 550 PA.

| | <i>Overtrykk</i> | <i>Undertrykk</i> |
|-----------------------|---|---|
| ΔP | 550 Pa | 550 Pa |
| C_L | $28,7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ | $27,7 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ |
| n | 0,600 | 0,594 |
| \dot{V}_L | $1265 \text{ m}^3/\text{h}$ | $1175 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| $\dot{V}_{Snitt,550}$ | $\frac{1265 + 1175}{2} = 1220 \text{ m}^3/\text{h}$ | |

5.3 Beregning: Prosentandel luftlekkasje over branncellevegg

For å svare på oppgavens problemstilling er det nødvendig å kartlegge hvor mye av den opptredende gjennomsnittlige lekkasjeluftmengden i testleiligheten går over branncelleveggen til hver respektive naboileilighet. Utregningene omfatter begge målemetodene.

SPORGASSMETODEN

Det antas en uniform gasstilværelse i testrommet, slik at det kan forventes en uniform luftmengdetransport over de respektive branncelleveggene. På grunn av antakelsen, kan det tillates å forvente at CO₂-økningen detektert i naborommene er en gitt prosentdel av CO₂-mengden som har «forlatt» testrommet.

Gjennomsnittlig CO₂-endring for målere i hver leilighet er definert som:

$$\bar{C}_{\text{leil. nr. } z} = \frac{\bar{C}_{\text{måler } x,z} + \bar{C}_{\text{måler } y,z}}{2} \quad (8)$$

Verdiene $\bar{C}_{\text{måler } x,z}$ og $\bar{C}_{\text{måler } y,z}$, hentes fra målerens tilhørende tabell i kapittel 4,2, Resultater fra målinger. Her er x og y målnummer og z er leilighetsnummer.

For leilighet nummer 1, med tilhørende målere nummer 2 og 4, er gjennomsnittlig CO₂-endring:

$$\bar{C}_{\text{måler } 2,1} = 59,0 \text{ ppm og } \bar{C}_{\text{måler } 4,1} = 98,3 \text{ ppm, (Hentet fra tabell 4:6 og 4:8)}$$

Dette gir en sammenlagt gjennomsnittlig konsentrasjonsendring på:

$$\bar{C}_{\text{leil. nr. } 1} = \frac{59,0 + 98,3}{2} = 78,7 \text{ ppm}$$

Prosentandelen lekkasjeluftmengde over branncelleveggen er definert som:

$$\% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow z} = \frac{\bar{C}_{\text{leil. nr. } z}}{\bar{C}_{\text{testrom}}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Her er \bar{C}_{testrom} den gjennomsnittlige CO₂ endringen i testrommet. Denne hentes fra tabell 4:4, og er $\bar{C}_{\text{testrom}} = 6896$ ppm.

Innsetting i formel nummer 9, gir en prosentandel på:

$$\% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow 1} = \frac{\bar{C}_{\text{leil. nr. } 1}}{\bar{C}_{\text{testrom}}} \cdot 100\% = \frac{78,7}{6896} \cdot 100\% = 1,14 \%$$

For leilighet nummer 3, med tilhørende målere nummer 3 og 5, er gjennomsnittlig CO₂-endring:

$$\bar{C}_{\text{måler } 3,3} = -4,0 \text{ ppm og } \bar{C}_{\text{måler } 5,3} = 6,0 \text{ ppm, (Hentet fra tabell 4:7 og 4:9)}$$

Ettersom måler nummer 3 viser negativ verdi, benyttes kun verdier for måler 5. Begrunnelse for målerens negative verdi er gitt i kapittel 6.3, Diskusjon av data presentert ved hjelp av grafer.

Innsetting i formel nummer 9, gir en prosentandel på:

$$\% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow 3} = \frac{\bar{C}_{\text{leil. nr. 3}}}{\bar{C}_{\text{testrom}}} \cdot 100\% = \frac{6}{6896} \cdot 100\% = 0,09 \%$$

LUFTLEKKASJEMÅLINGER

For beregning av prosentandel lekkasjeluftmengder ved hjelp av lekkasjemålinger, er alle verdier hentet fra Iden og Sandeggens (2015) luftlekkasjerapporter (Se vedlegg B-F). Målingene er utført ved å måle luftlekkasjer i leilighet nummer 1 og 3, hvor støttetrykksviften er plassert i leilighet nummer 2 (testleiligheten). Det ble benyttet 50 Pa undertrykk under alle målinger med støttetrykk. Under beregningene antas det at lekkasjene er gjennomgående. Det innebærer en forutsetning om at lekkasjearealet og lekkasjeluftmengden fra leilighet 1→2 og 2→1 er den samme.

Fremgangsmåte for beregning av lekkasjeluftmengde i prosent, ved luftlekkasjemålinger med støttetrykk:

For leilighet nummer 1:

$$\dot{V}_{\text{differanse, } x \rightarrow y} = \dot{V}_{\Delta P, \text{leil. } x} - \dot{V}_{\Delta P, \text{støttetrykk, } x} \quad (10)$$

Luftlekkasjemengden målt i leilighet nummer 1 uten støttetrykk er (Vedlegg E):

$$\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. } 1} = 348 \text{ m}^3/\text{h}$$

Luftlekkasjemengden målt i leilighet nummer 1 med støttetrykk er (Vedlegg F):

$$\dot{V}_{\Delta P, \text{støttetrykk, } 1} = 255 \text{ m}^3/\text{h}$$

Lekkasjeluftmengde antatt over branncelleveggen fra leilighet nummer 1 til 2:

$$\dot{V}_{\text{differanse, } 1 \rightarrow 2} = \dot{V}_{\Delta P, \text{leil. } 1} - \dot{V}_{\Delta P, \text{støttetrykk, } 1} = 348 - 255 = 93,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

Antar at lekkasjene er gjennomgående:

$$\dot{V}_{\text{differanse, } 1 \rightarrow 2} = \dot{V}_{\text{differanse, } 2 \rightarrow 1} = 93,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

Luftlekkasjemengden (undertrykk) målt i leilighet nummer 2 uten støttetrykk er (Vedlegg B):

$$\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 2}} = 283 \text{ m}^3/\text{h}$$

Prosentandel over ønsket vegg blir da:

$$\% \dot{V}_{2 \rightarrow 1} = \frac{\dot{V}_{\text{differanse, 1} \rightarrow 2}}{\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 2}}} \cdot 100\% = \frac{\dot{V}_{\text{differanse, 2} \rightarrow 1}}{\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 2}}} \cdot 100\% = \frac{93}{283} \cdot 100\% = 32,8 \%$$

For leilighet nummer 3:

Luftlekkasjemengden målt i leilighet nummer 3 uten støttetrykk er (Vedlegg C):

$$\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 3}} = 251 \text{ m}^3/\text{h}$$

Luftlekkasjemengden målt i leilighet nummer 3 med støttetrykk er (Vedlegg D):

$$\dot{V}_{\Delta P, \text{støttetrykk, 3}} = 242 \text{ m}^3/\text{h}$$

Lekkasjeluftmengde antatt over branncelleveggen fra leilighet nummer 3 til 2:

$$\dot{V}_{\text{differanse, 3} \rightarrow 2} = \dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 3}} - \dot{V}_{\Delta P, \text{støttetrykk, 3}} = 251 - 242 = 9,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ved å anta at lekkasjene er gjennomgående er:

$$\dot{V}_{\text{differanse, 3} \rightarrow 2} = \dot{V}_{\text{differanse, 2} \rightarrow 3} = 9,0 \text{ m}^3/\text{h}$$

Luftlekkasjemengden (undertrykk) målt i leilighet nummer 2 uten støttetrykk er (Vedlegg B):

$$\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 2}} = 283 \text{ m}^3/\text{h}$$

Prosentandel over ønsket vegg blir da:

$$\% \dot{V}_{2 \rightarrow 3} = \frac{\dot{V}_{\text{differanse, 3} \rightarrow 2}}{\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 2}}} \cdot 100\% = \frac{\dot{V}_{\text{differanse, 2} \rightarrow 3}}{\dot{V}_{\Delta P, \text{leil. 2}}} \cdot 100\% = \frac{9,0}{283} \cdot 100\% = 3,2 \%$$

5.4 Grenseverdier for CO-konsentrasjoner i naboileilighet

Det er tatt høyde for fem ulike CO-konsentrasjoner. Disse er valgt på grunnlag av tabell 2:2. Konsentrasjonsverdiene er henholdsvis 1400 ppm og 2000 ppm for ulmebrann, 5000 ppm for fasen brann under utvikling, og 6000 ppm og 12 000 ppm for fasen fullt utviklet brann.

Konsentrasjonsbegrensningene er kritiske på hver sin måte, og kan få dødelige følger. Valg av lavere konsentrasjoner for ulmebranner skyldes ulmebrannens langsomme utvikling. En ulmebrann kan etter hvert oppnå CO-konsentrasjoner opp til 10 000 ppm (Quintiere et al. 1982), men ettersom CO-konsentrasjonen ifølge Penney (2000) er estimert til å ligge mellom 100 – 2000 ppm, velges lavere konsentrasjonsmengder og høyere eksponeringstid (30 minutter). Da

Penneys (2000) høyeste ppm-konsentrasjon er 2000, må benyttet konsentrasjon til estimering av ønskede CO-verdier i naboileiligheten reduseres fra 2500 ppm til 2000 ppm.

Ved en CO-konsentrasjon på ca. 6000 ppm vil rømningsevnen hemmes, og etter 5 minutter kan konsekvensen være bevisløshet (Penney 2000). Dette innebærer at en person som blir utsatt for et konsentrasjonsnivå på 6000 ppm vil være avhengig av å bli reddet av brannpersonell. En eksponeringstid på 10-15 minutter, av den samme konsentrasjonen, kan få dødelige følger (Njå & Nilsen 2004). I likhet med benyttede konsentrasjonsgrenser for ulmebrann, må ønsket CO-grense reduseres til 5000 ppm i tilfellet brann under utvikling. Dette da det ikke er mulig å oppnå en høyere CO-konsentrasjon i naboileiligheten, enn produsert i brannrommet.

Hvis en person utsettes for en konsentrasjon på 12 000 ppm, kan døden inntreffe i løpet av fem minutter (Penney 2000). Dette innebærer umiddelbart hemmet rømningsevne, hvor selv utestående som ønsker å hjelpe en person i nød, kan miste livet.

5.5 Beregning av estimerte tidsgrenser

Ettersom prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen til leilighet nummer 3 (0,09%) anses som tilnærmet neglisjerbar, velges det å ta utgangspunkt i prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleleiligheten til leilighet nummer 1 (1,14%).

Estimert tidsgrense før et gitt volum har nådd ønsket CO-konsentrasjon, er gitt ved formelen:

$$t_{\Delta P} = \frac{V}{\dot{V}_{\Delta P} \cdot \% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow z}} \cdot f \quad (12)$$

Testleilighetens gjennomsnittlige lekkasjeluftmengde ved 50 Pa er målt til (Vedlegg B):

$$\dot{V}_{50} = 291 \text{ m}^3/\text{h}$$

Testleilighetens gjennomsnittlige lekkasjeluftmengde ved 550 Pa er beregnet til:

$$\dot{V}_{550} = 1220 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ved å anta at 1,14 % av lekkasjeluftmengden går over til leilighet nummer 1, vil opptredende lekkasjeluftmengde være:

$$\dot{V}_{50} \cdot \% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow 1} = 291 \cdot 0,0114 = 3,32 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{550} \cdot \% \dot{V}_{\text{testrom} \rightarrow 1} = 1220 \cdot 0,0114 = 13,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

Forholdstallet f defineres av brannrommets opptredende CO-konsentrasjon og ønsket oppnådd CO-konsentrasjon i naboileiligheten.

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

$$f = \frac{C_1}{C_{\text{brannrom}}} \quad (13)$$

Følgende betingelser gjelder for hver fase:

5:3 OVERSIKT OVER BENYTTETE VERDIER FOR BEREGNING AV TIDSGRENSE FØR NABOLEILIGHETEN NÅR KRITISKE CO-KONSENTRASJONER.

| <i>Brannfase:</i> | <i>Trykkdifferanse</i> | <i>Alternativer for C₁</i> | <i>Alternativer for C_{brannrom}</i> |
|--------------------------------|------------------------|---------------------------------------|--|
| <i>Ulmebrann</i> | 50 Pa | 1400 ppm 2000 ppm | 2000 ppm 10 000 ppm |
| <i>Brann i utviklingsfasen</i> | 550 Pa | 5000 ppm | 5000 ppm |
| <i>Fullt utviklet brann</i> | 550 Pa | 6000 ppm 12 000 ppm | 50 000 ppm |

Ved innsettelse av ønskede betingelser i formel nummer 12, oppnås tidsgrensene presentert i kapittel 4.3, Resultater ved hjelp av matematiske formler: Tidsgrenser.

6 Diskusjon

Dette kapittelet tar for seg drøfting av oppnådde resultater underveis i oppgavens utførelsesperiode. For å skape orden i drøfteprosessen er det valgt en systematisk inndeling av de ulike resultatene og deres tilhørende diskusjoner. Avslutningsvis er det utarbeidet en oppsummering av funn i oppgaven. Det er også tatt med et par punkter til ettertanke.

6.1 Argos

I resultatene fra Argos-simuleringene kommer det frem flere faktorer som bekreftes av brannteorien innledningsvis. Som belyst av Penney (2000), er utviklingsfasen ofte svært kort, før brannen går over til å bli ventilasjonskontrollert. Trykkgrafene (Figur 4:4) viser også en kraftig økning i startfasen, noe som bekrefter Hagens (2004) teori om trykkscenarier hvor trykkøkningen kan være drastisk. Selv om den simulerte grafen avviker noe fra Karlsson og Quintieres (2000) teori om trykkøkning i en leilighet med luftlekkasjer, er det likhetstrekk mellom teorien og resultatene. Deriblant forsvarer teorien den kraftige trykkøkningen i startfasen. Videre kan trykkets oppførsel i tidsintervallet 12-60 minutter minne om Karlsson og Quintiere (2000) konstante trykkforløp. Se figur 2-9.

Det presiseres at trykkdifferanser er ulike fra branntilfelle til branntilfeller. Under bearbeidelse av denne oppgavens teorigrunnlag, viste det seg å være utfordrende å finne eksakte verdier på tidligere estimerte, samt simulerte, trykkdifferanser. Dette gjør det utfordrende å sammenlikne simulert trykkdifferanse opp mot tidligere branntilfeller. På grunnlag av dette, er det dersom ønskelig, tilrettelagt for valg av andre trykkdifferanser i samtlige beregninger. Prinsippet bak fremgangsmåten og utregningene forblir det samme.

6.2 Tolkning av grafer

Ved nøyere observasjon av fremstilte grafer, kommer det frem negative verdier i tabell 4:7. Det kan tenkes at disse skyldes stabilisering av CO₂-konsentrasjonen i rommet, hvor målerverdien ved start er noe høyere enn referansekonsentrasjonen. Videre kommer det frem at ppm-differansen over branncelleveggen til leilighet nummer 3 er minimal. Dette kan tolkes som at tilført lekkasjeluftmengde er begrensende slik at måleapparatene ikke klarer å plukke opp konsentrasjonsendringen. Det kan også tenkes at de opptredende lekkasjene er lokale, og utenfor målerens rekkevidde. Eksempelvis kan lekkasjene ha vært lokalisert i baderommet til

leilighet nummer 3. Hvis dette er tilfellet, vil det være svært vanskelig for målerne å detektere gassendringen.

For grafer som representerer forsøk nummer 2 (Figur 4-12), kommer det frem en tydelig konsentrasjonsendring underveis i forsøket. Ettersom det var nødvendig å entre naboileilighetene underveis i forsøk nummer 2, kan det tenkes at avviket er menneskeskapt.

Ved å se på figur 4-7, måler nummer 2, kan det ved første øyekast virke som det er en feilkilde under forsøk nummer 1. Ved å studere forsøk nummer 1 og 3 nærmere, kommer det frem at grafene har tilnærmet likt stigningstall under hele tidsforløpet. En forklaring til ulikhetene (den blå grafens tre toppunkt), kan være målerens evne til å detektere CO₂-endringer. Som belyst i forsøkets feilkilder, ble måler nummer 2 flyttet nærmere branncelleveggen etter mistanke om svekket detekteringsevne. Dette grunnet rommets store volum. Ettersom grafen blir betydelig jevnere under forsøk nummer 3, der også målerens ppm-endring går fra 36 ppm til 88 ppm (Tabell 4:6), kan det tyde på at mistanke om svekket detekteringsevne var riktig. En annen forklaring til forsøk nummer 1 sine tre toppunker kan være at tilført luftmengde beveger seg i virvler når den entrer naboileiligheten.

Ved å studere resultatene gitt i de ulike tabellene i kapittel 4.2, Resultater fra målinger, kan det fastslås at CO₂-endringen er størst i leilighet nummer 1, med tilhørende målere 2 og 4.

Som nevnt i kapittel 3.5, Et kritisk syn: Sporgassmetoden, kan det tenkes at målte gjennomsnittlige CO₂-verdier er noe lavere enn faktisk opptredende verdier. Dette innebærer mulighet for at benyttet prosentandel lekkasjeluftmengde, over begge branncellevegger, er lavere enn faktisk opptredende. En variasjon i målerens målte verdier kommer spesielt frem ved sammenlikning av målte CO₂-differanser for forsøk nummer 1 g 3, måler nummer 2 (Tabell 4:6). Under forsøk nummer 1 viser måleren en CO₂-differanse på 36 ppm, mens den etter flytting viser 88 ppm (Tabell 4:6). Likevel har måler nummer 2 og nummer 4 tilnærmet likt stigningstall (Figur 4-11 – 4-13), noe som kan tyde på at målerne er enige om gassens endringsrate.

Måler nummer 2 og 4s likheter i de tilhørende grafenes stigningstall kan tyde på at lekkasjearealene er fordelt over branncelleveggen, og ikke samlet i et lokalt lekkasjeareal. Dette da begge målerne detektere tydelige CO₂-endringer.

Grunnet leilighet nummer 3, med tilhørende målere nummer 3 og 5, sin tilnærmet neglisjerbare CO₂-endring (gjennomsnittlig endring på (-4)-6 ppm), omhandler presenterte tidsgrenser kun måler 2 og 4. Til tross for måler nummer 3 og 5s beskjedne CO₂-endringer, kan Jensens (2002)

teori om at branngasser alltid finner en vei ut, uavhengig av hvor tett bygget er, gjenkjennes i resultatene.

6.3 Valg av CO-konsentrasjoner

Kritiske CO-konsentrasjoner i naboileiligheter

En svært viktig faktor som nevnes i teorien, men som neglisjeres i beregningene (Penney 2000), er at alle individer vil reagere ulikt ved eksponering av CO. I denne oppgaven tas det ikke høyde for sentrale og viktige påvirkningsfaktorer som individers størrelse, fysisk aktivitet og helsetilstand. Valgte neglisjeringer betraktes som mulige feilkilder, men anses som nødvendig for å svare på oppgavens problemstilling. Ikke alle de omtalte konsentrasjonsgrensene blir ansett som akutt dødelige, jamfør tabell 2:1 Oversikt over kritiske CO-konsentrasjoner (Njå & Nilsen 2004). Likevel velges de omtalte verdiene, da de enten fører til bevisstløshet eller død etter kort tid. Med dette nevnt, anses konsentrasjonsgrensene som et godt grunnlag for beregning av tidsgrenser.

Valg av opptredende CO-konsentrasjoner i brennende leilighet (testleilighet)

For valg av opptredende CO-konsentrasjoner i testleiligheten er det benyttet verdier anslått av Penney (2000). Et slikt beregningsgrunnlag generaliserer antatt CO-dannelse. Et alternativ kan være å på forhånd avklare hva og hvor mye som brenner. Eksempelvis møbler. For så deretter vurdere hvor store CO-konsentrasjoner møblene til sammen vil gi. Det finnes også matematiske modeller som kan bistå i slike estimat (Karlsson & Quintiere 2000). På denne måten oppnås en mer spesifikk CO-konsentrasjon for vurdert tilfelle. Denne type vurdering er ikke omtalt i denne oppgaven.

6.4 Beregningsgrunnlag

Alle beregninger er utført under forutsetning at fortynnelse av naboileilighetens oppnådde CO-konsentrasjon ikke oppstår. Med bakgrunn i Jensens (2002) teori om at gasser alltid finner en vei ut av leiligheter, kan det tenkes at naboileilighetens luftlekkasjer vil bidra til en fortykning av CO-konsentrasjonen, slik at estimert tidsgrense forlenges.

Å løse oppgavens problemstilling på en god måte, der det tas hensyn til mulig fortykning av naboileilighetens CO-konsentrasjoner, er utfordrende og vil bidra til flere forhold som må tas hensyn til. Deriblant opptredende trykkdifferanser i naboileilighetene. Det er i likhet med

fastslåelse av opptredende trykkdifferanse i testleiligheten, utfordrende å forutsi trykkøkning i naboileilighetene under en brann. Årsaken til påstand om trykkøkning i naboileilighetene, spores tilbake til branncelleveggens dimensjoneringskrav, EI 60 A2-s1,d0, der det stilles krav til isolasjon for begrensning av temperaturøkning i naboileiligheter (Standard Norge 2012b). Dette innebærer at det tillates en temperaturøkning i naboileilighetene som antakeligvis vil bidra til en trykkøkning. Videre er det uklart i hvilken grad tidsgrensene påvirkes av naboileilighetenes luftlekkasjer og hvordan disse skal inkluderes i beregningene.

6.5 Tidsgrenser

Ulmebrann

Ut fra tabell 4:10 - 4:13 varierer resultatene med valg av opptredende CO-konsentrasjon i brannrommet. Som det kommer frem i tabellene 4:10 og 4:12, der $C_{\text{brannrom}} = 2000$ ppm, kan Gann et al. (1994) sin teori der ulmebranner i første omgang er mest kritiske for personer som oppholder seg i nær tilknytning til brannen, gjenkjennes. Dette med tanke på høy tidsgrense før kritiske CO-nivåer har oppstått i naboileilighetene. På den annen side samsvarer resultatene i tabell 4:11 og til dels tabell 4:13, der $C_{\text{brannrom}} = 10\,000$ ppm, med Karlsson og Quintieres (2000) teori der ulmebrann kan få uheldige konsekvenser hvis brannen ikke oppdages. Det er for eksempel ikke påkrevd med røykvarslere i alle soverom (Lovdata 2002). Dette innebærer at hvis branntilfellet tilsvarende forutsetningene for tabell 4:11, der branngasslekkasjen er en lokal lekkasje direkte inn i et soverom, kan konsekvensene bli kritiske.

Brann under utvikling

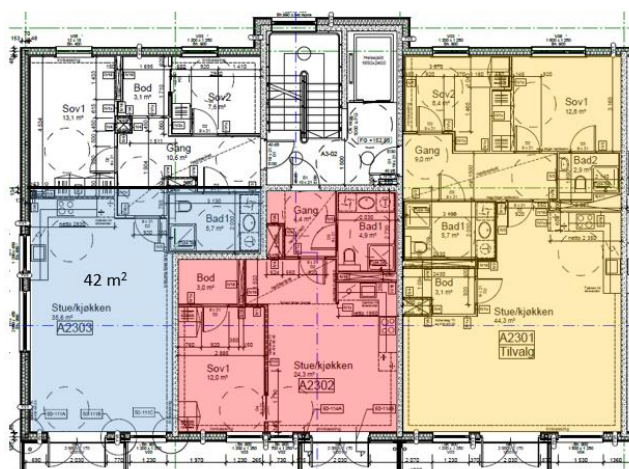
Ut fra tabell 4:14 kan det virke som en branns utviklingsfase ikke er kritisk med tanke på tid før kritiske CO-nivåer er oppnådd i naboileiligheten. Dette stemmer i midlertid ikke, og det påpekes at tabellens tidsgrenser kan være misvisende. Det er viktig å huske at utviklingsfasen ofte er en svært kort fase med en høy trykkdifferanse. Jamfør resultater fra Argos simuleringer. Brannens tilgang på oksygen, samt om den slukkes, er avgjørende for videre produksjon av opptredende CO-konsentrasjoner. Resultatene i tabell 4:14 bør anses som et resultat av en «stoppet» brann, som har vært under utvikling. Dette da det antas at brannen ikke får en høyere CO-konsentrasjon enn 5000 ppm.

Fullt utviklet brann

Ut fra oppnådde tidsgrensene totalt, kommer det frem at scenarioet fullt utviklet brann er den mest kritiske brannfasen. Dette gjenspeiles også i Gann et al. (1994) sin teori, der fasen er

vurdert til å stå for flest tap av menneskeliv grunnet branngassforgiftning. Ut i fra tabell 4:15 vil en person som oppholder seg i et lite soverom på 7,6 m² sannsynligvis miste sin rømningsevne etter kun ti minutter. Dette gitt at all opptredende transport av lekkasjeluftmengder er lokalisert i soverommet. For samme rom, vil CO-konsentrasjonen etter ca. 20 minutter, være svært dødelig (Tabell 4:16). I tabell 4:15 kommer det også frem at fasen kan være svært kritisk selv for arealer opp mot 35 m² (Stue).

Ved å sammenlikne tabellene 4:10 – 4:16, kan det trekkes en fellesnevner. Fellesnevneren for tabellene er en tydelige sammenhengen mellom tidsgrense og volum. En slik sammenheng åpner for drøfting av situasjonen: Hva hvis naboleiligheten er en liten leilighet på 42 m²?



FIGUR 6-1: ILLUSTRASJON AV LEILIGHET PÅ 42 M².

Ved å studere opptredende tidsgrense i henhold til trykkdifferanser benyttet i Standard Norges' metode for testing av branncellers integritet, NS-EN 1336-1:2012, vil der imot personsikkerheten være godt bevart. En trykkdifferanse tilsvarende Standard Norges' tester, innebærer benyttelse av en trykkdifferanse på 20 Pa (Standard Norge 2012b). Ved å benytte en trykkdifferanse på 20 Pa, vil opptredende tidsgrense øke til 6 timer og 40 minutter, før en leilighet på 42 m² er fylt med en CO-konsentrasjon på 6000 ppm.

Med dette nevnt, gir oppnådde tidsgrenser grunnlaget for følgende spørsmål:

- Hvor stor prosentandel lekkasjeluftmengde over en brannskillende bygningskonstruksjon kan tillates?
- Er det tilstrekkelig å benytte en trykkdifferanse på 20 Pa ved branntesting?

6.6 Sammenlikning: Luftlekkasjemålinger og sporgassmålinger

Ettersom deler av oppgaven er basert på luftlekkasjemålinger utført på forhånd, er det interessant å sammenlikne de aktuelle delene av de respektive måleresultatene.

Lekkasjetall

Da denne oppgavens forsøk er utført med et konstant overtrykk på 50 Pa, er verdiene sammenliknet opp mot $n_{50, \text{overtrykk}}$ i Iden og Sandeggens (2015) luftlekkasjerapport. Se vedlegg B. Dog verdiene avviker noe fra hverandre velges det, i dette tilfellet, å vurdere lekkasjetallet for de respektive testene til å være innenfor tolerert avvik. Årsaker til avviket kan være ukjente feilkilder under utførelse av målingene. Det kan eksempelvis tenkes at CO₂-gassen har beveget seg utenfor målerens rekkevidde, men ikke nødvendigvis ut av leiligheten. På en annen side bør det utføres flere tilsvarende tester, i ulike leiligheter, for å kunne fastslå med sikkerhet at sporgassmålinger og luftlekkasjemålinger gir samme lekkasjetall.

6:1 SAMMENLIKNING AV LEKKASJETALL VED 50 PA, OVERTRYKK.

| <i>Luftlekkasjemålinger (n_{50})</i> | <i>Sporgassmålinger (n_{50})</i> |
|---|---|
| 2,39 h ⁻¹ | 2,58 h ⁻¹ |

Prosentandel luftlekkasjemengde over respektive branncelleveggen

Ved sammenlikning av oppnådd lekkasjeluftmengdetransport, ved bruk av sporgassmålinger og ved bruk av luftlekkasjemålinger, kommer det frem to interessante observasjoner og en hypotese som avkreftes.

Observasjon nummer 1:

Begge målemetodene registrer en minimal prosentandel lekkasjeluftmengde transportert over branncelleveggen til leilighet nummer 3.

Observasjon nummer 2:

Måleresultatene avviker kraftig i respektiv prosentandel lekkasjeluftmengde transportert over branncelleveggen til leilighet nummer 1. Ved å benytte formel nummer 8 og 9 kommer det frem, ved bruk av sporgassmetoden, at 1,14 % av all lekkasjeluftmengde i testleiligheten vil gå over branncelleveggen. Dersom det tas utgangspunkt i luftlekkasjemålinger, kommer det frem at 32,8 % av alle luftlekkasjer i testleiligheten vil gå over branncelleveggen.

Hypotese:

Ved kartlegging av årsaker til avviket i observasjon nummer 2, var det en tanke å se på forholdstallet til de omtalte branncelleveggene for hver respektive målemetode. Dette ble gjort i et forsøk på å finne en mulig sammenheng mellom målemetodene. Hypotesen går ut på at

forholdstallene for hver respektiv test, ville samsvare. Hvis dette er tilfellet, kan muligens en teori være: begge målemetodene viser hvor mye de respektive branncelleveggene lekker i forhold til hverandre. Forholdsberegningenes avvik anses derimot som for høyt. I tillegg konkluderes det med at grunnlaget, da med tanke på antall utførte tester hvor begge metode er benyttet, er for tynt. Hypotesen blir dermed forkastet. En illustrasjon av tankegangen er oppført i tabell 6:2.

6:2 OPPNÅDD LEKKASJELUFTMENNGDE I PROSENT OVER BRANNCELLEVEGG TIL RESPEKTIV LEILIGHET.

| <i>Testmetode</i> | <i>Leilighet nr. 1</i> | <i>Leilighet nr. 3</i> | $\frac{\text{Leilighet nr. 3}}{\text{Leilighet nr. 1}}$ |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|---|
| <i>Luftlekkasjemålinger</i> | 32,8 % | 3,20 % | 0,10 |
| <i>Sporgassmålinger</i> | 1,14 % | 0,09 % | 0,08 |

Ved nærmere studie av oppnådde måleresultater, kan avviket i prosentandel over leilighet nummer 1, muligens redegjøres. En forklaring kan være at ettersom leiligheten består av et stort volum (219 m³), som blir tilført en liten luftmengde (9 m³/h), vil det være vanskelig for CO₂-målerne å detektere CO₂-endringer.

Det er utfordrende å fastslå hva som kan være årsaken til det store avviket i prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen til leilighet nummer 2. En forklaring kan være at målemetodene tar for seg to ulike fenomen. Tidsbegrensninger, samt begrenset mulighet til undersøkelse av veggen, begrenser avvikets forklaring. Likevel er dette et interessant tema som fortjener videre studie.

6.7 Oppsummering

Ulmebranner er i hovedsak størst trussel for individer i nær tilknytning til brannen. Men som resultatene viser, og teorien belyser, kan ulmebranner ta livet av personer i naborommet (Karlsson & Quintiere 2000). Utfallet blir spesielt uheldig hvis branngasslekkasjene er samlet i en lokal lekkasje direkte inn i naboens soverom. Dette er spesielt kritisk i tilfeller der det ikke er røykvarslere i soverom, og dersom vedkommende oppholder seg i rommet over en lenger tidsperiode. Eksempelvis hvis ulmebrannen foregår i løpet av natten.

Brannens utviklingsfase er ofte en svært kort fase, som rasket kan gå over til fullt utviklet brann. Dette gjør det utfordrende å gi et konkret estimat på opptredende tidsgrense før naboileiligheten

når kritiske CO-konsentrasjoner. Likevel er fasen kritisk, spesielt da videre utvikling av brannen kan resultere i høye CO-konsentrasjoner.

Av oppgaven kommer det frem at fasen fullt utviklet brann er den mest kritiske fasen med tanke på opptredende CO-konsentrasjoner. Fasen produserer høye CO-konsentrasjoner, hvor tid til rådighet er spesielt avhengig av volumet som skal fylles, prosentandel lekkasjeluftmengde transportert over branncelleveggen og om branngasslekkasjen er lokal eller jevnt fordelt over branncelleveggen. Ved en lokal branngasslekkasje, vil for eksempel et lite soverom, i verste tenkelige tilfelle, nå en kritisk CO-konsentrasjon i løpet av kun 10 minutter.

Ved å gjøre mennesket oppmerksom på betydningen av å lukke branncelledøren ved rømning, kan CO-spredningen begrenses. Dette spesielt med tanke på spredning av branngasser til rømningsvei.

6.8 Til ettertanke

Det er denne oppgavens ønske å skape en generell illustrasjon av branngassers viktighetsgrad. Dog all data gjelder spesifikt for leiligheter i Finstad Park, viser oppgaven flere punkter som er merverdige å ta med seg videre, og som kan knyttes opp mot andre leiligheter som bygges etter dagens standard.

- Alvorlighetsgraden, med tanke på dannelse av dødelige CO-konsentrasjoner i naboileiligheten, er spesielt avhengig av tre faktorer. Disse er volumet som ønskes fylt, prosentandel luftlekkasjevolum som går over veggen og lokal lekkasje vs. jevnt fordelt lekkasje.
- I denne oppgaven er det kun tatt hensyn til CO. I en reell brann vil det dannes betydelig flere gasser, med varierende giftighetsgrad. En kombinasjon av de ulike branngassene vil bidra til ytterligere svekkelse av menneskers rømningsevne. Røykens økte giftighetsgrad vil redusere estimert tidsgrense før naboileilighetene når dødelige branngasskonsentrasjoner.
- Finstad Park er prosjektert og bygd etter mål om lavenergileiligheter. Dette innebærer blant annet en tettere bygningskropp (Skanska AS 2015). Ved å sammenlikne leilighetene i Finstad Park med andre leiligheter, både fra samme byggeår og eldre (Forutsettes bygd etter TEK10), kan det tenkes at luftlekkasjetransporten mellom leiligheter er høyere andre steder.

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

- Intern bygningstetthet mellom leiligheter er muligens viktigere enn tetthet over bygningens klimaskjerm. Dette spesielt med tanke på personsikkerhet ved brann.

7 Konklusjon

På grunnlag av denne oppgavens utførte målinger, beregninger og forutsetninger, konkluderes det med følgende:

Intern bygningstetthet er av stor betydning for personsikkerhet ved brann. CO-spredning påvirkes i stor grad av prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggene, der utfallet kan bli svært kritisk. Dette gjelder spesielt for rom med små volumer. Ved lokal gasstransport inn i små soverom, er tidsgrensen før dødelige CO-konsentrasjoner oppstår, begrensende. For utførte målinger, er disse estimeres til å variere mellom 10 – 50 minutter, avhengig av tilhørende brannfase. For større volumer, eksempelvis leiligheter på 70 - 80 m², er estimerte tidsgrenser tilfredsstillende. Dette med hensyn på tidsgrensen i brannmotstandskravet EI 60 A2-s1,d0.

8 Videre arbeider

Fra aktuelle målinger kommer det frem en betydelig forskjell i prosentandel lekkasjeluftmengde over branncelleveggen til leilighet nummer 1, kontra leilighet nummer 3. Dette gir grunnlag til videre studie av branncellevegger, samt kartlegging av hva årsaken til dette kan være.

Beregningene i denne oppgaven er forenklet til antakelser der transportert CO-konsentrasjon inn i naboileilighetene ikke har mulighet til å bli fortynnet. Til videre arbeider kan det være et alternativ å utbedre beregningsmetoden slik at mulige fortynningspåvirkninger, som for eksempel naboileilighetens luftlekkasjer, tas høyde for. Alternativt kan det arbeides med kartleggelse av i hvor stor grad naboileilighetenes luftlekkasjer påvirker tidsgrensene for oppnådde CO-konsentrasjoner.

På grunn av tidsbegrensninger, omhandler denne oppgaven kun tre utvalgte leiligheter i Finstad Park. Å utarbeide et bredere referansegrunnlag, der tilsvarende målinger er utført i flere leiligheter, samt å muliggjøre referering til landsdekkende datainnsamling, kan bidra til bedre oppfølging av branngass-spredning og internbygningstetthet. Eventuelt kan det arbeides mot krav, eller oppfordring, til etterprøving av boliger. Et forslag kan være å benytte sporgassmålinger i kombinasjon med røyk (slik at eventuelle lekkasjer kan ses) til etterkontroll av bygningsinterntetthet.

9 Litteraturliste

- Babrauskas, D. V. (2010). Glass breakage in fires. *Fire Science and Technology Inc.*
- Bahr, R. (2008). *Aktivitetshåndboken - Fysisk aktivitet i forebygging og behandling*. Oslo, Norway: Helsedirektoratet.
- Blom, P. & Uvsløkk, S. (2012). Bygg tett - og ventiler rett!
- Brødrene Dahl. (2009). *Utvalgte brannsikringsprodukter* Tilgjengelig fra: <http://dahl.no/Documents/Kataloger/VVS/brannsikring.pdf> (lest 24.04.15).
- Dalland, O. (2012). *Metode og oppgaveskriving*. Oslo, Norway: Gyldendal Akademisk.
- Deibjerg, T., Husted, B. P., Bygbjerg, H. & Westerman, D. (2003). *ARGOS Theory Manual*. Copenhagen, Denmark: Danish Institute of Fire and Security Technology (DIFT).
- DIBK. (2014a). Direktoratet for byggkvalitet - Veiledning om tekniske krav til byggverk, §11-2. Risikoklasser.
- DIBK. (2014b). Direktoratet for byggkvalitet - Veiledning om tekniske krav til byggverk, kap 11. Sikkerhet ved brann.
- DIBK. (2015). Direktoratet for byggkvalitet - Veiledning om tekniske krav til byggverk, §11-3. Brannklasser.
- Dickinson, J. B. & Feustel, H. E. (1989). Seasonal Variations in Effective Leakage Area. s. 144-160.
- Direktoratet for Arbeidstilsynet. (2012). Veiledning om Administrative normer for forurensning
- DSB. *Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap - Disse rømningsveiene må du ha*. Tilgjengelig fra: <http://www.sikkerhverdag.no/brann/romningsveier/disse-romningsveiene-ma-du-ha/> (lest 06.05.15).
- DSB. (2013a). *Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap - Bygningsbranner*. Tilgjengelig fra: <http://www.dsb.no/no/Statistikk/Statistikk1/Branner/Bygningsbranner/> (lest 23.04.15).
- DSB. (2013b). *Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap - Omkomne i brann*. Tilgjengelig fra: <http://www.dsb.no/no/Statistikk/Statistikk1/Branner/Utvikling-av-antall-brannomkomne/> (lest 23.04.15).
- Ernst, A. & Zibrak, J. D. (1998). Carbon Monoxide Poisoning. *New England Journal of Medicine*, 339 (22): 1603-1608.
- Evensen, S. A. (2009). *Hemoglobin*. Store medisinske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/hemoglobin> (lest 1. april 2015).
- Gann, R. G., Babrauskas, V., Peack, R. D. & Hall, J. R. (1994). Fire Conditions for Smoke Toxicity Measurement. *Fire and materials*, 18: s. 193-199.
- Hadjisophocleous, G. V. & Benichou, N. (1999). Performance criteria used in fire safety design. *Automation in Construction*, 8: s. 489-501.
- Hagen, B. C. (2004). *Grunnleggende brannteknikk*. Haugesund, Norway: Hagens forlag.
- Haraldsen, H. (2015). *Karbondioksid*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/karbondioksid> (lest 23.04.15).
- Hartin, E. (2008). Fire Development and Fire Behavior Indicators. *Compartment Fire Behavior Training (CFBT)*.
- Helsebiblioteket. (2011). *Karbonmonoksid - behandlingsanbefaling ved forgiftning* Tilgjengelig fra: <https://www.helsebiblioteket.no/forgiftninger/gasser-og-kjemikalier/karbonmonoksid-behandlingsanbefaling-ved-forgiftning#> (lest 09.04.15).

Intern bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

- Holøs, S. & Aurlien, T. (2014). Luftlekkasjemålinger av bygninger: Hensikt og vurderinger. *Byggforskserien 474.624*.
- Høgskolen i Sør-Trøndelag. *Grunnleggende brannteori*. Tilgjengelig fra: <https://www.hist.no/content/55739/Grunnleggende-brannteori> (lest 23.04.15).
- Iden, H. & Sandeggen, O. (2015). Building Leakage Test - Finstad.
- IF Skadeforsikring. (2011). *Tror vi takler brannrøyk (Se video)*. Tilgjengelig fra: <http://www.if.no/web/no/om/sistenytt/pages/trorvitaklerbrannroyk.aspx> (lest 26.04.15).
- International Standard. (1999). *Fire - resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. ISO 834-1: 1999. Genève, Switzerland.
- Jensen, L. (2002). Brandgassspredning via ventilationssystem. Lund, Sweden: Institutionen för byggande och arkitektur.
- Karlsson, B. & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. Florida, USA: CRC Press LLC.
- Kraniotis, D. (2014). *Dynamic characteristics of wind-driven air infiltration in buildings - The impact of wind gusts under unsteady wind conditions*. Phd Thesis. Ås, Norway: Norwegian University of Life Sciences.
- Krohn, J. C. (2013). Brannteknisk oppdeling av bygninger. *Byggforskserien 321.030*.
- Kåss, E. (2009). *Inkontinens: Store medisinske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://sml.snl.no/inkontinens> (lest 03.05.15).
- Lovdata. (2002). *Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn, § 2-5*.
- Lovdata. (2010). *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift) - § 11-8*.
- Meland, Ø. & Lønvik, L. E. (1991). Detection of Smoke: Full-Scale Tests with Flaming and Smouldering Fires. *Fire Safety Science - Proceedings of the Third International Symposium*: s. 975-984.
- Moseng, E. & Klewe, M. (2010). *Brannvern* [jpg]: Norsk brannvernforening,.
- Nasjonalt folkehelseinstitutt. (2013). Luftkvalitetskriterier, Virkninger av luftforurensning på helse. 9.
- Nelson, J. H. K. H. E. (1997). Smoke Movement in Buildings. *Building and Fire Research Laboratory*: s. 93 -104.
- Njå, O. & Nilsen, A. R. (2004). Bruk av risikoanalyser i planlegging og drift av vegtunneler. Stavanger, Norway.
- Norges Arktiske Universitet. (2011). *Informasjon brannvern*. Tilgjengelig fra: <http://uit.no/Content/218714/10.01.11%20Brannvern.pdf> (lest 23.04.15).
- Norsk Helseinformatikk. (2013). *Kullosforgiftning*. Tilgjengelig fra: <http://nhi.no/forside/forstehjelp/akuttmedisin/kullosforgiftning-29201.html?page=all> (lest 24.04.15).
- Næringslivets sikkerhetsorganisasjon. (2011). Brannvern.
- Ohlemiller, T. J. (1995). Smoldering combustion. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*: s. 171-179.
- Overtenning: brann*. (2009). Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/overtenning%2Fbrann> (lest 31.mars 2015).
- Penney, D. G. (2000). *Carbon monoxide toxicity*. USA: CRC Press LLC.
- Pisupati, S. (2014). *Mechanisms of Heat Loss or Transfer*: The Pennsylvania State University. Tilgjengelig fra: <https://www.e-education.psu.edu/egee102/node/2053> (lest 29.04.15).
- Pyrolyse*. (2009). Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/pyrolyse> (lest 31. mars 2015).

Inter bygningstetthet og personsikkerhet ved brann

- Quintiere, J., Birkly, M., McDonald, F. & Smith, G. (1982). An Analysis of Smoldering Fires in Closed Compartments and Their Hazard Due To Carbon Monoxide. *U.S Department of Commerce*.
- RDH Building Engeneering Ltd. (2013). Air Leakage Control in Multi Unit Residential Buildings.
- Relander, T. O. (2012). Fremgangsmåte ved luftlekkasjemålinger av bygninger. *Byggdetaljer* 474.621.
- ROTRONIC. (2014). CP11. Tilgjengelig fra: <http://www.rotronic.com/humidity-measurement-feuchtemessung-temperaturmessung/co2-1/handheld-instruments/cp11.html> (lest 10.04.15).
- Sesseng, C. (2012). Rapport: Røykvarslere for bruk i bolig, Kartlegging av forskningsfront. I: AS, S. N. (red.). Trondheim, Norway: Brannutvikling og slokking.
- Skanska AS. (2015). Selveierleiligheter Finstad Park Bt2 og Bt3 - Leveransebeskrivelse. Oslo, Norway.
- Soffar, H. (2015). *The ways of heat transfer through different media* [jpg]. Online Sciences.
- Stabell, E. (2007). Brannvernundervisning. *Oslo brann- og redningsetat*.
- Standard Norge. (2012a). *Bygningers og byggematerialers termiske egenskaper-Bestemmelse av spesifikk luftmengde i bygninger - Sporgassmetoden*. NS-EN ISO 12569:2012.
- Standard Norge. (2012b). *Prøving av brannmotstand, Del 1: Generelle krav*. NS-EN 1363-1:2012.
- Stensaas, J. P. (2007). Røykproduksjon ved branner offshore - Rev. 1. Trondheim, Norway: SINTEF NBL As.
- Särdqvist, S. (1993). Initial fires: RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests, 1102-8246. Lund, Sweden: Institute of Technology, Lund University.
- The Energy Conservatory. *Minneapolis Blower Door System* [jpg].
- The Energy Conservatory. (2012). *Minneapolis Blower Door, Operation Manual for Model 3 and Model 4 Systems*. Minneapolis, USA.
- Åsberg, A. & Stakkestad, J. (2004). *Blod-CO-Hemoglobin (HbCO)*. Brukerhåndbok i klinisk kjemi 2004 - Analyser: Ullevål universitetssykehus. Tilgjengelig fra: <http://www.uus.no/brukerhandbok/index.asp?Bok=2&Kap=9&Par=258&Boknavn=Brukerh%E5ndbok%20i%20klinisk%20kjemi%202004> (lest 1.april 2015).

Vedlegg A: Kontroll av effektivt lekkasjeareal

Formel for volumstrøm (lekkasjeluftmengde):

$$\dot{V}_L = C_L \cdot \Delta P^n \quad (1)$$

BEREGNING AV LEKKASJELUFTMENGDE VED 10 PA. C_L OG n HENTES FRA VEDLEGG B.

| | <i>Overtrykk</i> | <i>Undertrykk</i> |
|----------------------|---|---|
| ΔP | 10 Pa | 10 Pa |
| C_L | 28,7 m ³ /(h·Pa ⁿ) | 27,7 m ³ /(h·Pa ⁿ) |
| n | 0,600 | 0,594 |
| $\dot{V}_{L,10}$ | 114,26 m ³ /h | 108,76 m ³ /h |
| $\dot{V}_{Snitt,10}$ | $\frac{114,26+108,76}{2} = 111,51 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0310 \text{ m}^3/\text{s}$ | |

BEREGNING AV LEKKASJELUFTMENGDE VED 4 PA. C_L OG n ER HENTES FRA VEDLEGG B.

| | <i>Overtrykk</i> | <i>Undertrykk</i> |
|---------------------|--|---|
| ΔP | 4 Pa | 4 Pa |
| C_L | 28,7 m ³ /(h·Pa ⁿ) | 27,7 m ³ /(h·Pa ⁿ) |
| n | 0,600 | 0,594 |
| $\dot{V}_{L,4}$ | 65,93 m ³ /h | 63,11 m ³ /h |
| $\dot{V}_{Snitt,4}$ | $\frac{65,93+63,11}{2} = 64,52 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0179 \text{ m}^3/\text{s}$ | |

Effektivt lekkasjeareal i henhold til CGSB 149.10:

$$ELA_{10} = \frac{\dot{V}}{C_d} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \quad (3)$$

Effektivt lekkasjeareal i henhold til ASTM E779:

$$ELA_4 = \frac{\dot{V}}{C_d} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \quad (4)$$

Benyttet effektivt lekkasjeareal:

$$ELA_{\text{middel}} = \frac{ELA_{10} + ELA_4}{2} \quad (5)$$

Hvor:

KONTROLL AV ELA OPP MOT VEDLEGG B.

| <i>ELA₁₀: I henhold til CGSB 149.10</i> | | <i>ELA₄: I henhold til ASTM E779</i> | |
|---|--|--|---|
| $\dot{V}_{\text{Snitt,10}}$ | 0,0310 m ³ /s | $\dot{V}_{\text{Snitt,4}}$ | 0,0179 m ³ /h |
| C_d | 0,61 | C_d | 1,0 |
| ρ | 1,2 kg/m ³ | ρ | 1,2 kg/m ³ |
| ΔP | 10 Pa | ΔP | 4 Pa |
| ELA_{10} | 0,01244 m ² = 124,4 cm ² | ELA_4 | 0,00694 m ² = 69,4 cm ² |
| ELA_{middel} | $\frac{124,4 + 69,4}{2} = 96,9 \text{ cm}^2$ | | |

Vedlegg B: Luftlekkasjemålinger i testleilighet

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 25.02.2015

Technician: Sandeggen og Iden

Test File: Finstad_E2202__snitt_uten_støtte

Customer: Skanska

Building Address: Blokk E
Midtskogen 3
E2202
Ski, Akershus 1400

Phone:
Fax:

| | <u>Depressurization</u> | <u>Pressurization</u> | <u>Average</u> |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Test Results at 50 Pascals: | | | |
| V50: Airflow (m ³ /h) | 283 (+/- 0.1 %) | 300 (+/- 0.1 %) | 291 |
| n50: Air Changes per Hour (1/h) | 2.25 | 2.39 | 2.32 |
| w50: m ³ /(h*m ² Floor Area) | 5.74 | 6.10 | 5.92 |
| q50: m ³ /(h*m ² Surface Area) | 1.55 | 1.65 | 1.60 |
| Leakage Areas: | | | |
| Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²) | 121.3 (+/- 0.7 %) | 127.5 (+/- 0.8 %) | 124.4 |
| cm ² /m ² Surface Area | 0.67 | 0.70 | 0.68 |
| LBL ELA @ 4 Pa (cm ²) | 67.9 (+/- 1.1 %) | 70.9 (+/- 1.2 %) | 69.4 |
| cm ² /m ² Surface Area | 0.37 | 0.39 | 0.38 |
| Building Leakage Curve: | | | |
| Air Flow Coefficient (Cenv) | 27.1 (+/- 1.8 %) | 28.4 (+/- 1.9 %) | |
| Air Leakage Coefficient (CL) | 27.7 (+/- 1.8 %) | 28.7 (+/- 1.9 %) | |
| Exponent (n) | 0.594 (+/- 0.004) | 0.600 (+/- 0.005) | |
| Correlation Coefficient | 0.99977 | 0.99974 | |

Test Standard: EN 13829

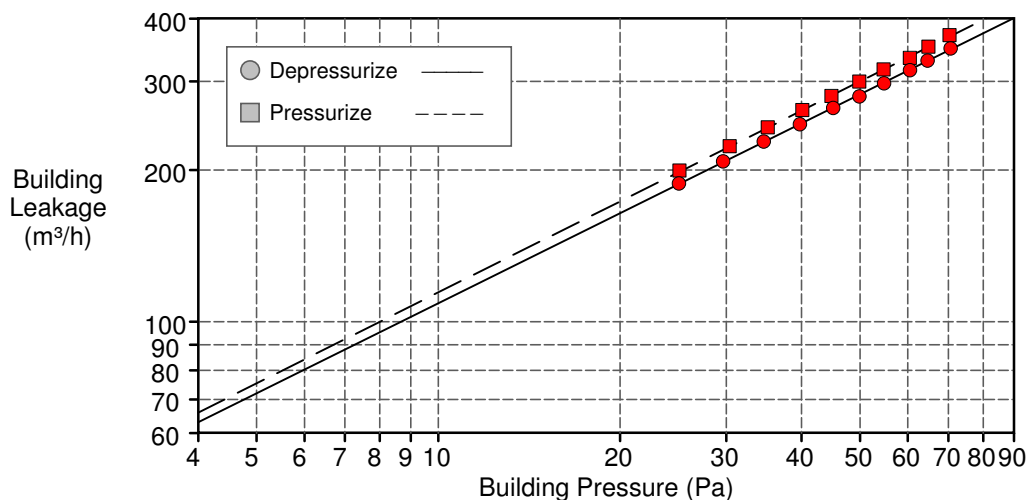
Regulation complied with:

Type of Test Method: B

Equipment: Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

Inside Temperature: 13 °C
Outside Temperature: 3 °C
Barometric Pressure: 101325 Pa
Wind Class: 2 Light Breeze
Building Wind Exposure: Partly Exposed Building
Type of Heating:
Type of Air Conditioning:
Type of Ventilation: None

Volume: 126 m³
Surface Area: 182 m²
Floor Area: 49 m²
Uncertainty of
Building Dimensions: %
Year of Construction: 2015



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 25.02.2015 Test File: Finstad_E2202__snitt_uten_støtte

Comments

Data Points: Depressurization:

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m ³ /h) | Temperature Adjusted Flow (m ³ /h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|------------|-------------------|
| 0.4 | n/a | | | | |
| -70.5 | 286.6 | 357 | 349 | 0.5 | Ring C |
| -64.5 | 257.5 | 338 | 330 | 0.3 | Ring C |
| -60.3 | 236.1 | 323 | 316 | -0.2 | Ring C |
| -54.6 | 210.5 | 305 | 297 | -0.3 | Ring C |
| -49.7 | 187.4 | 287 | 280 | -0.7 | Ring C |
| -44.9 | 169.0 | 272 | 266 | -0.1 | Ring C |
| -39.5 | 146.2 | 252 | 247 | -0.0 | Ring C |
| -34.4 | 125.6 | 233 | 228 | 0.4 | Ring C |
| -29.5 | 105.2 | 213 | 208 | 0.4 | Ring C |
| -24.9 | 86.6 | 193 | 188 | 0.3 | Ring C |
| -0.1 | n/a | | | | |
| Test 1 Baseline (Pa): | p01- = 0.0 | p01+ = 0.4 | p02- = -0.1 | p02+ = 0.0 | |

Data Points: Pressurization:

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m ³ /h) | Temperature Adjusted Flow (m ³ /h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|------------|-------------------|
| 0.0 | n/a | | | | |
| 70.3 | 298.7 | 365 | 371 | 0.6 | Ring C |
| 64.9 | 269.9 | 346 | 352 | 0.2 | Ring C |
| 60.4 | 243.9 | 329 | 334 | -0.8 | Ring C |
| 54.6 | 220.4 | 312 | 317 | 0.1 | Ring C |
| 49.8 | 198.1 | 295 | 300 | 0.2 | Ring C |
| 44.8 | 174.3 | 276 | 281 | -0.1 | Ring C |
| 40.1 | 153.7 | 259 | 263 | 0.1 | Ring C |
| 35.1 | 131.9 | 239 | 243 | 0.2 | Ring C |
| 30.4 | 111.4 | 219 | 223 | 0.2 | Ring C |
| 25.0 | 89.8 | 196 | 199 | 0.6 | Ring C |
| -0.2 | n/a | | | | |
| Test 1 Baseline (Pa): | p01- = -0.0 | p01+ = 0.0 | p02- = -0.3 | p02+ = 1.1 | |

Vedlegg C: Luftlekkasjemålinger i leilighet nr. 3

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 25.02.2015
Test File: Finstad_E2201_snitt_uten_støtte

Technician: Sandeggen og Iden

Customer: Skanska

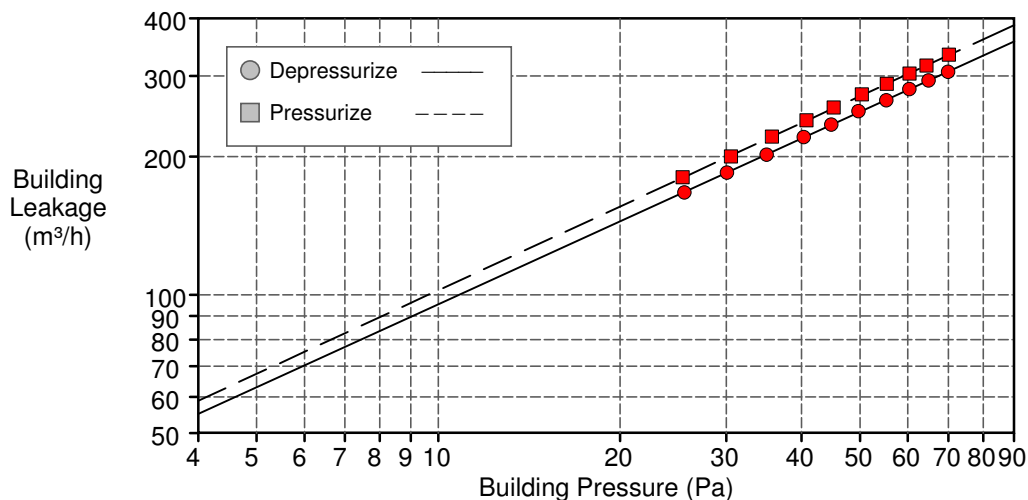
Building Address: Blokk E
Midtskogen 3
E2201
Ski, Akershus 1400

Phone:
Fax:

| | <u>Depressurization</u> | <u>Pressurization</u> | <u>Average</u> |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Test Results at 50 Pascals: | | | |
| V50: Airflow (m ³ /h) | 251 (+/- 0.1 %) | 271 (+/- 0.1 %) | 261 |
| n50: Air Changes per Hour (1/h) | 1.14 | 1.23 | 1.19 |
| w50: m ³ /(h*m ² Floor Area) | 2.91 | 3.15 | 3.03 |
| q50: m ³ /(h*m ² Surface Area) | 0.89 | 0.96 | 0.92 |
| Leakage Areas: | | | |
| Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²) | 106.5 (+/- 0.5 %) | 114.3 (+/- 0.5 %) | 110.4 |
| cm ² /m ² Surface Area | 0.38 | 0.40 | 0.39 |
| LBL ELA @ 4 Pa (cm ²) | 59.3 (+/- 0.7 %) | 63.3 (+/- 0.7 %) | 61.3 |
| cm ² /m ² Surface Area | 0.21 | 0.22 | 0.22 |
| Building Leakage Curve: | | | |
| Air Flow Coefficient (Cenv) | 23.4 (+/- 1.2 %) | 25.2 (+/- 1.2 %) | |
| Air Leakage Coefficient (CL) | 24.0 (+/- 1.2 %) | 25.4 (+/- 1.2 %) | |
| Exponent (n) | 0.600 (+/- 0.003) | 0.605 (+/- 0.003) | |
| Correlation Coefficient | 0.99990 | 0.99991 | |

Test Standard: EN 13829 Regulation complied with:
Type of Test Method: B
Equipment: Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

| | |
|---|----------------------------------|
| Inside Temperature: 13 °C | Volume: 220 m ³ |
| Outside Temperature: 3 °C | Surface Area: 283 m ² |
| Barometric Pressure: 101325 Pa | Floor Area: 86 m ² |
| Wind Class: 2 Light Breeze | Uncertainty of |
| Building Wind Exposure: Partly Exposed Building | Building Dimensions: % |
| Type of Heating: | Year of Construction: 2015 |
| Type of Air Conditioning: | |
| Type of Ventilation: None | |



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 25.02.2015 Test File: Finstad_E2201_snitt_uten_støtte

Comments

Data Points: Depressurization:

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m³/h) | Temperature Adjusted Flow (m³/h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|------------|-------------------|
| 0.1 | n/a | | | | |
| -69.9 | 222.6 | 313 | 306 | -0.2 | Ring C |
| -64.9 | 205.1 | 301 | 293 | 0.1 | Ring C |
| -60.3 | 188.2 | 287 | 281 | 0.1 | Ring C |
| -55.2 | 168.8 | 272 | 265 | -0.3 | Ring C |
| -49.7 | 151.7 | 257 | 251 | 0.6 | Ring C |
| -44.8 | 133.3 | 241 | 235 | 0.1 | Ring C |
| -40.3 | 118.1 | 226 | 221 | 0.2 | Ring C |
| -35.0 | 99.6 | 207 | 202 | -0.1 | Ring C |
| -30.1 | 83.6 | 189 | 185 | -0.1 | Ring C |
| -25.6 | 69.0 | 171 | 167 | -0.2 | Ring C |
| -0.0 | n/a | | | | |
| Test 1 Baseline (Pa): | p01- = -0.1 | p01+ = 0.8 | p02- = -0.0 | p02+ = 0.0 | |

Data Points: Pressurization:

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m³/h) | Temperature Adjusted Flow (m³/h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|------------|-------------------|
| -0.0 | n/a | | | | |
| 70.1 | 243.3 | 328 | 333 | 0.1 | Ring C |
| 64.4 | 219.3 | 311 | 316 | -0.1 | Ring C |
| 60.3 | 202.9 | 299 | 303 | -0.2 | Ring C |
| 55.3 | 183.7 | 284 | 288 | -0.0 | Ring C |
| 50.3 | 165.5 | 269 | 273 | 0.3 | Ring C |
| 45.2 | 146.0 | 252 | 256 | 0.4 | Ring C |
| 40.7 | 128.9 | 236 | 240 | 0.3 | Ring C |
| 35.7 | 109.7 | 218 | 221 | -0.1 | Ring C |
| 30.5 | 90.5 | 197 | 200 | -0.5 | Ring C |
| 25.4 | 74.1 | 178 | 180 | 0.3 | Ring C |
| -0.1 | n/a | | | | |
| Test 1 Baseline (Pa): | p01- = -0.1 | p01+ = 0.0 | p02- = -0.1 | p02+ = 0.0 | |

Vedlegg D: Luftlekkasjemålinger i leilighet nr.3, med støtetrykk

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 25.02.2015

Technician: Sandeggen og Iden

Test File: Finstad_E2201_med_støtte

Customer: Skanska

Building Address: Blokk E
Midtskogen 3
E2201
Ski, Akershus 1400

Phone:

Fax:

Test Results at 50 Pascals:

V50: Airflow (m³/h) 242 (+/- 0.1 %)
n50: Air Changes per Hour (1/h) 1.10
w50: m³/(h*m² Floor Area) 2.81
q50: m³/(h*m² Surface Area) 0.86

Leakage Areas:

105.1 cm² (+/- 0.5 %) Canadian EqLA @ 10 Pa or 0.37 cm²/m² Surface Area
59.2 cm² (+/- 0.8 %) LBL ELA @ 4 Pa or 0.21 cm²/m² Surface Area

Building Leakage Curve:

Air Flow Coefficient (Cenv) = 23.7 (+/- 1.2 %)
Air Leakage Coefficient (CL) = 24.3 (+/- 1.2 %)
Exponent (n) = 0.588 (+/- 0.003)
Correlation Coefficient = 0.99996

Test Standard:

EN 13829 Test Mode: Depressurization

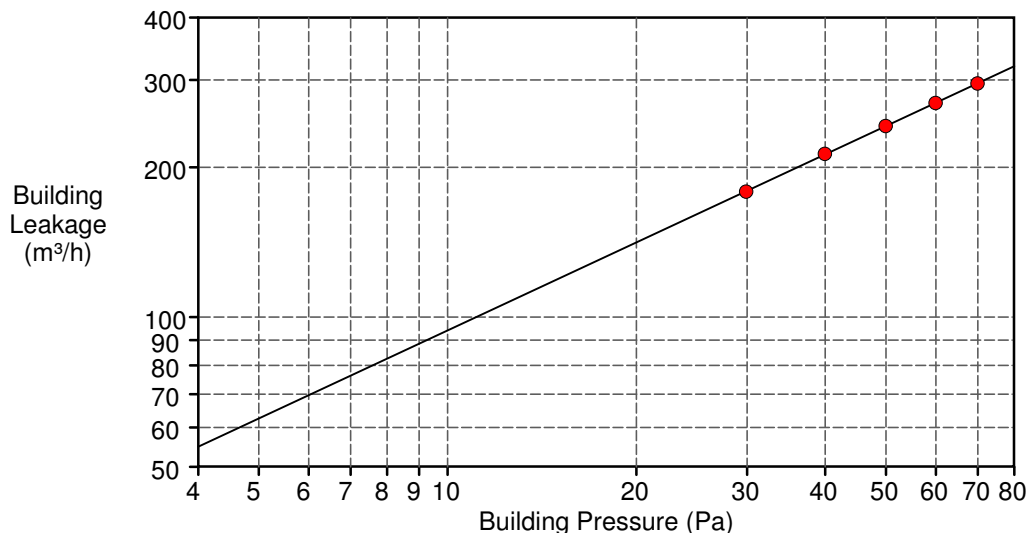
Type of Test Method:

B Regulation complied with:

Equipment:

Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

| | | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| Inside Temperature: | 13 °C | Volume: | 220 m ³ |
| Outside Temperature: | 3 °C | Surface Area: | 283 m ² |
| Barometric Pressure: | 101325 Pa | Floor Area: | 86 m ² |
| Wind Class: | 2 Light Breeze | Uncertainty of | |
| Building Wind Exposure: | Partly Exposed Building | Building Dimensions: | % |
| Type of Heating: | | Year of Construction: | 2015 |
| Type of Air Conditioning: | | | |
| Type of Ventilation: | None | | |



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 25.02.2015 Test File: Finstad_E2201_med_støtte

Comments

Data Points: Depressurization - Data Entered Manually

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m ³ /h) | Temperature Adjusted Flow (m ³ /h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|------------|-------------------|
| 0.1 | n/a | | | | |
| -70.0 | 207.1 | 302 | 295 | -0.1 | Ring C |
| -60.0 | 173.9 | 276 | 270 | 0.0 | Ring C |
| -50.0 | 141.3 | 248 | 242 | 0.0 | Ring C |
| -40.0 | 110.1 | 218 | 213 | 0.3 | Ring C |
| -30.0 | 78.4 | 183 | 179 | -0.3 | Ring C |
| -0.2 | n/a | | | | |
| Test 0 Baseline (Pa): | p01- = -0.1 | p01+ = 0.2 | p02- = -0.8 | p02+ = 0.4 | |

Vedlegg E: Luftlekkasjemålinger i leilighet nr. 1

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 25.02.2015
Test File: Finstad_E2203_snitt_uten_støtte

Technician: Sandeggen og Iden

Customer: Skanska

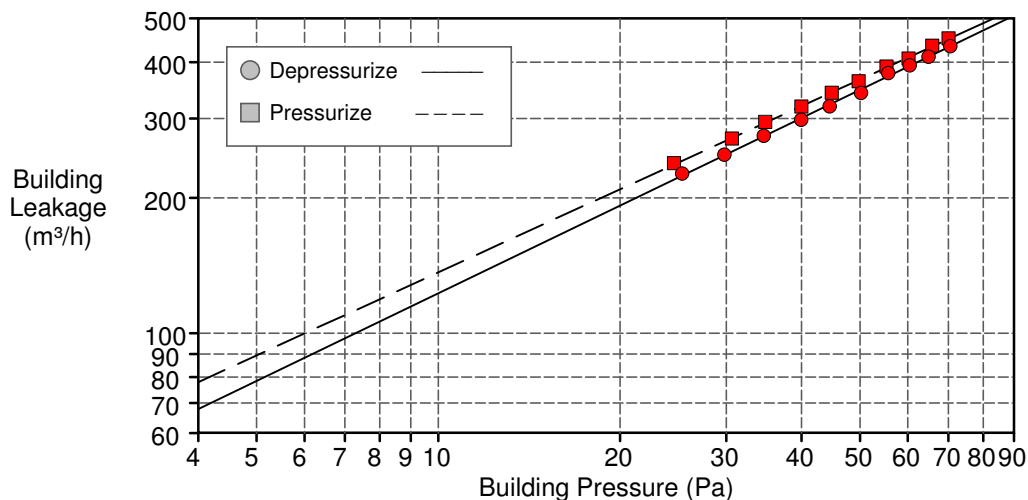
Building Address: Blokk E
Midtskogen 3
E2203
Ski, Akershus 1400

Phone:
Fax:

| | <u>Depressurization</u> | <u>Pressurization</u> | <u>Average</u> |
|--|-------------------------|-----------------------|----------------|
| Test Results at 50 Pascals: | | | |
| V50: Airflow (m ³ /h) | 348 (+/- 0.3 %) | 366 (+/- 0.2 %) | 357 |
| n50: Air Changes per Hour (1/h) | 1.80 | 1.90 | 1.85 |
| w50: m ³ /(h*m ² Floor Area) | 4.60 | 4.84 | 4.72 |
| q50: m ³ /(h*m ² Surface Area) | 1.34 | 1.41 | 1.37 |
| Leakage Areas: | | | |
| Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²) | 137.2 (+/- 1.8 %) | 152.3 (+/- 0.9 %) | 144.8 |
| cm ² /m ² Surface Area | 0.53 | 0.59 | 0.56 |
| LBL ELA @ 4 Pa (cm ²) | 73.2 (+/- 2.8 %) | 83.8 (+/- 1.4 %) | 78.5 |
| cm ² /m ² Surface Area | 0.28 | 0.32 | 0.30 |
| Building Leakage Curve: | | | |
| Air Flow Coefficient (Cenv) | 27.2 (+/- 4.2 %) | 33.0 (+/- 2.1 %) | |
| Air Leakage Coefficient (CL) | 27.8 (+/- 4.2 %) | 33.3 (+/- 2.1 %) | |
| Exponent (n) | 0.646 (+/- 0.011) | 0.613 (+/- 0.005) | |
| Correlation Coefficient | 0.99889 | 0.99968 | |

Test Standard: EN 13829 Regulation complied with:
Type of Test Method: B
Equipment: Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

| | | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| Inside Temperature: | 13 °C | Volume: | 193 m ³ |
| Outside Temperature: | 3 °C | Surface Area: | 260 m ² |
| Barometric Pressure: | 101325 Pa | Floor Area: | 76 m ² |
| Wind Class: | 2 Light Breeze | Uncertainty of | |
| Building Wind Exposure: | Partly Exposed Building | Building Dimensions: | % |
| Type of Heating: | | Year of Construction: | 2015 |
| Type of Air Conditioning: | | | |
| Type of Ventilation: | None | | |



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 25.02.2015 Test File: Finstad_E2203_snitt_uten_støtte

Comments

Data Points: Depressurization:

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m³/h) | Temperature Adjusted Flow (m³/h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|-------------|-------------------|
| 0.2 | n/a | | | | |
| -70.4 | 30.4 | 445 | 434 | -0.2 | Ring B |
| -64.8 | 27.3 | 422 | 411 | -0.2 | Ring B |
| -60.3 | 25.0 | 404 | 393 | 0.0 | Ring B |
| -55.6 | 23.1 | 388 | 378 | 1.4 | Ring B |
| -50.1 | 277.6 | 351 | 342 | -1.9 | Ring C |
| -44.4 | 242.5 | 328 | 319 | -1.1 | Ring C |
| -39.8 | 212.5 | 306 | 298 | -0.9 | Ring C |
| -34.5 | 181.2 | 282 | 275 | 0.1 | Ring C |
| -29.7 | 150.1 | 256 | 249 | 0.1 | Ring C |
| -25.3 | 124.8 | 233 | 226 | 0.9 | Ring C |
| 0.1 | n/a | | | | |
| Test 1 | Baseline (Pa): | p01- = -0.2 | p01+ = 0.2 | p02- = -0.1 | p02+ = 0.1 |

Data Points: Pressurization:

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m³/h) | Temperature Adjusted Flow (m³/h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|-------------|-------------------|
| 0.1 | n/a | | | | |
| 70.2 | 30.4 | 445 | 451 | 0.3 | Ring B |
| 66.0 | 28.2 | 429 | 435 | 0.4 | Ring B |
| 60.3 | 24.7 | 402 | 407 | -0.6 | Ring B |
| 55.4 | 22.7 | 386 | 391 | 0.4 | Ring B |
| 49.9 | 286.8 | 357 | 362 | -0.7 | Ring C |
| 45.0 | 256.1 | 337 | 342 | -0.2 | Ring C |
| 40.1 | 223.8 | 314 | 319 | -0.0 | Ring C |
| 34.9 | 191.9 | 290 | 295 | 0.5 | Ring C |
| 30.8 | 162.9 | 267 | 271 | -0.2 | Ring C |
| 24.7 | 127.5 | 235 | 239 | 0.7 | Ring C |
| 0.1 | n/a | | | | |
| Test 1 | Baseline (Pa): | p01- = -0.0 | p01+ = 0.1 | p02- = -0.0 | p02+ = 0.1 |

Vedlegg F: Luftlekkasjemålinger i leilighet nr. 1, med støttetrykk

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 25.02.2015

Technician: Sandeggen og Iden

Test File: Finstad_E2203_med_støtte

Customer: Skanska

Building Address: Blokk E
Midtskogen 3
E2203
Ski, Akershus 1400

Phone:

Fax:

Test Results at 50 Pascals:

V50: Airflow (m³/h) 255 (+/- 0.1 %)
n50: Air Changes per Hour (1/h) 1.32
w50: m³/(h*m² Floor Area) 3.37
q50: m³/(h*m² Surface Area) 0.98

Leakage Areas:

106.9 cm² (+/- 0.7 %) Canadian EqLA @ 10 Pa or 0.41 cm²/m² Surface Area
59.1 cm² (+/- 1.0 %) LBL ELA @ 4 Pa or 0.23 cm²/m² Surface Area

Building Leakage Curve:

Air Flow Coefficient (Cenv) = 23.1 (+/- 1.5 %)
Air Leakage Coefficient (CL) = 23.6 (+/- 1.5 %)
Exponent (n) = 0.608 (+/- 0.004)
Correlation Coefficient = 0.99994

Test Standard:

EN 13829 Test Mode: Depressurization

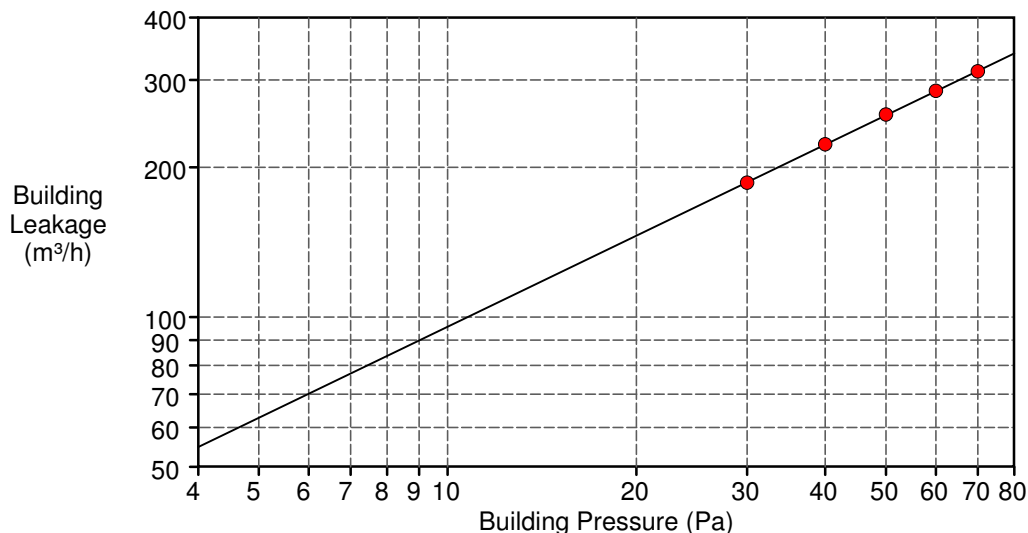
Type of Test Method:

B Regulation complied with:

Equipment:

Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

| | | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| Inside Temperature: | 13 °C | Volume: | 193 m ³ |
| Outside Temperature: | 3 °C | Surface Area: | 260 m ² |
| Barometric Pressure: | 101325 Pa | Floor Area: | 76 m ² |
| Wind Class: | 2 Light Breeze | Uncertainty of | |
| Building Wind Exposure: | Partly Exposed Building | Building Dimensions: | % |
| Type of Heating: | | Year of Construction: | 2015 |
| Type of Air Conditioning: | | | |
| Type of Ventilation: | None | | |



BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 25.02.2015 Test File: Finstad_E2203_med_støtte

Comments

Data Points: Depressurization - Data Entered Manually

| Nominal Building Pressure (Pa) | Fan Pressure (Pa) | Nominal Flow (m ³ /h) | Temperature Adjusted Flow (m ³ /h) | % Error | Fan Configuration |
|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|---|------------|-------------------|
| 0.0 | n/a | | | | |
| -70.0 | 231.7 | 320 | 312 | -0.2 | Ring C |
| -60.0 | 194.0 | 292 | 285 | 0.1 | Ring C |
| -50.0 | 157.2 | 262 | 256 | 0.3 | Ring C |
| -40.0 | 120.1 | 228 | 223 | -0.0 | Ring C |
| -30.0 | 85.2 | 191 | 186 | -0.2 | Ring C |
| 0.0 | n/a | | | | |
| Test 0 Baseline (Pa): | p01- = -0.2 | p01+ = 0.2 | p02- = -0.1 | p02+ = 0.1 | |



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no