

BRAVENT

Storskala branntester (del 2)

**Effekt av ventilasjonsstrategi på
røykspredning og trykkontroll i en mock-up
skolebygning**

RISE RAPPORT 2024:38

Christoph Meraner

Janne Siren Fjærestad

RISE Fire Research

BRAVENT – Storskala branntester (del 2):
Effekten av ventilasjonsstrategi på
røykspredning og trykkontroll i en mock-up
skolebygning

Christoph Meraner, Janne Siren Fjærestad

Abstract

BRAVENT – Large-scale fire tests (part 2): The effect of the ventilation strategy on smoke dispersion and pressure control in a mock-up school building

In the overall BRAVENT project, the goal is to generate answers and documentation on current issues related to ventilation and fire by examining these with experimental fire tests. The present study aimed to evaluate how different failure mechanisms identified in sub-report 1, "Fire performance for non-fire rated ventilation components" [5], affect the pressure conditions and possible smoke spread in the building. In order to investigate the ventilation system's ability to control pressure balance and smoke spread in the event of a fire, 14 large-scale fire tests with different fuel types were carried out. The tests were conducted in a test building with several rooms representing a classroom, an office and a corridor. The fire tests were designed to investigate relevant fire scenarios for school buildings, but the findings from the tests may also be relevant for other purpose-built buildings. The building was equipped with a full-fledged damper-optimized ventilation system which was sized to serve a total of 450 m² and thus provide a realistic basis for the fire tests.

In sub-report 1, a number of component failures were uncovered when the system was exposed to hot smoke. The failure mechanisms led to the system losing its status and control over the dampers, thus also losing the overview of which air volumes passed through the dampers. The failure of the dampers then led to an imbalance in the ventilation system, also in rooms other than the fire room. In the extreme, this can lead to challenges in connection with escape by making it difficult or impossible to open doors. Smoke spread via the supply air ducts can occur due to smoke backflow if the pressure in the fire compartment exceeds the pressure in the supply air duct. In the experiments, the ventilation system increased to the maximum design airflow rate (V_{\max}) upon fire detection, and no smoke spread due to backflow of fire smoke in the supply air ducts was observed. It was not tested whether a backflow of smoke could have also been prevented at lower airflow rates than V_{\max} . Whether the ventilation system maintains sufficiently high pressure in the supply air duct to prevent backflow depends on, among other things, the capacity of the supply air fans, the density of the fire compartment and how quickly the fire develops.

The smoke from the fire caused the filter in the unit to gradually clog. In three tests, the filter was clogged so much that the air handling unit could not extract enough air, which created an imbalance in the ventilation system. The new BRAVENT tests show that the size of the fire in relation to the air handling unit's capacity plays an important role in how long the exhaust airflow can be maintained. An air handling unit serving several small fire cells with limited available fuel will be able to maintain the required exhaust air volume longer than an aggregate serving a few large fire cells as the ratio between smoke volume and total air volume changes. Other factors that affect how long the unit can compensate for filter clogging are:

- whether the air handling unit is designed for 100% or less simultaneity, i.e. the proportion of rooms that can have the maximum amount of airflow at the same time,

- the condition of the filter at the start of the fire, completely new filters were used in each of the fire tests,
- whether the ventilation system operates with V_{\max} or less airflow when a fire alarm is triggered.

No smoke spread between the rooms via the exhaust duct was observed. However, since the exhaust airflow rate in one of the tests was significantly reduced to around 50% of the maximum design airflow rate, it is concluded that gradual clogging of the exhaust filter will increase the risk of smoke spreading via the exhaust duct. Clogging of the filters can be avoided by establishing a bypass. Nevertheless, it must then still be documented that all other functions of the ventilation system are safeguarded in the event of a fire.

The tests carried out showed that the failure mechanism of some components (measurement errors in dampers, short circuits and clogging of the exhaust filters) can lead to the whole system no longer being able to maintain its function.

Key words: Compartment fires, smoke spread, smoke ventilation, pressure balance, large scale experiments

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2024:38

ISBN: 978-91-89896-95-6

Prosjektnummer: 20573

Kvalitetssikring: Andreas Sæter Bøe

Finansiert av: Norges forskningsråd, program SAMRISK-2-Samfunnsikkerhet og risiko, prosjektnummer 321099 og prosjektpartnerne

Forsidebilde: RISE Fire Research

Trondheim 2024

Innhold

Abstract	1
Innhold	4
Forord	5
Sammendrag	6
1 Innledning	8
1.1 Om BRAVENT	8
1.2 Bakgrunn	8
1.3 Målsetning.....	9
1.4 Begrensninger	9
1.5 Rapportens oppbygning.....	10
2 Branntester	11
2.1 Testoppsett	11
2.2 Utførte tester.....	14
2.2.1 Tester med elsparesykkel – Test 1-6	16
2.2.2 Tester i kontoret – Test 7-11	16
2.2.3 Tester i klasserommet – Test 12-14	18
3 Resultater og diskusjon	19
3.1 Test 2.....	20
3.2 Test 5.....	23
3.3 Test 7.....	27
3.4 Test 8.....	32
3.5 Test 10.....	39
3.6 Test 11	45
3.7 Test 12.....	51
3.8 Test 13	58
3.9 Test 14.....	63
4 Det større bilde	71
4.1 Metodekritikk.....	71
4.2 Røykspredning	72
4.3 Trykkbalanse.....	73
4.4 Luftmengde ved brannalarm	74
5 Konklusjoner	76
6 Referanser	78
Vedlegg A – Brannromstemperaturer	i

Forord

BRAVENT er et Innovasjonsprosjekt finansiert av Norges forskningsråd, program SAMRISK-2-Samfunnssikkerhet og risiko, prosjektnummer 321099, samt av prosjektpartnerne. Prosjektet pågår i perioden 2021-2024. Prosjekteier er Oslobygg KF, prosjektleder er RISE Fire Research og de andre partnerne i prosjektet er SINTEF Community, GK Norge, TROX Auranor, Bergen Kommune og Trondheim Eiendom (2021-2022).

Oppbygging av forsøksoppsett og gjennomføring av forsøkene i denne studien er gjort i samarbeid med prosjektet «Rømning ved brann i litium-ion batteri i elsparkesykkel», som er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). Vi ønsker å takke for samarbeidet.

Prosjektet fikk også god støtte fra Interfil og Autronica Fire and Security som ikke var prosjektpartnerne, men som likevel donerte filter og brannvarslingsanlegg til testene.

Til slutt vil vi takke referansegruppens medlemmer Trond S Andersen (DiBK), Stefan Andersson (Norconsult), Arne Pihl Bordi (Norconsult), Tomas Fagergren (Brandskyddslaget Sverige), Arnstein Fedøy (Igneus AS), Finn Volla Karlsen (Rambøll), Kjell Ivar Moe (Multiconsult), Vegard Ervik Olsen (Multiconsult), Lasse Kvalheim Stølen (Sweco), Tommy Ueland (DSB) og Barbro Westlund-Storm (HRP) for nyttige innspill og gode diskusjoner underveis i prosjektet.

Trondheim, mai 2024

Christoph Meraner

Prosjektleder

Sammendrag

I det overordnede BRAVENT-prosjekt er målet å generere svar og dokumentasjon på aktuelle problemstillinger knyttet til ventilasjon og brann, ved å undersøke disse med eksperimentelle brannforsøk. Målet med denne studien var å evaluere hvordan forskjellige feilmekanismer som ble identifisert i delrapport 1 «Brannytelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter» [5] påvirker trykkforholdene og mulig røykspredning i bygget. For å undersøke ventilasjonsanleggets evne til å kontrollere trykkløst og røykspredning ved en brann, ble 14 storskala branntester med forskjellig type brensel gjennomført. Testene ble gjennomført i et testbygg med flere rom som er representative for klasserom, kontor og korridor. Branntestene ble designet for å undersøke relevante brannscenarier for skolebygg, men funnene fra testene kan også være relevante for andre formålbygg. Bygget var utstyrt med et fullverdig spjeldoptimalisert ventilasjonsanlegg som var dimensjonert for å betjene totalt 450 m² og dermed gi et realistisk grunnlag for branntestene.

I delrapport 1 ble det avdekket en rekke feil som oppstod på komponentene når systemet ble eksponert for varm brannrøyk. Feilmekanismene som oppstod førte til at systemet mistet statusen og kontrollen over spjeldene, og dermed også mistet oversikten over hvilke luftmengder som gikk gjennom spjeldene. Feilen på spjeldene førte deretter til ubalanse i ventilasjonsanlegget også i andre rom enn brannrommet. I ytterste konsekvens kan dette føre til utfordringer i forbindelse med rømning ved at det blir vanskelig eller umulig å åpne dører. Røykspredning via tilluftskanaler kan skje ved tilbakeslag av røyk dersom trykket i brannrommet overstiger trykket i tilluftskanalen. I de utførte forsøkene giret ventilasjonsanlegget opp til maksimalt prosjektert luftmengde (V_{\max}) ved deteksjon av brann, og det ble ikke observert røykspredning i tilluftskanaler som følge av tilbakeslag av brannrøyk. Det ble ikke testet om tilbakeslag av røyk kunne vært forhindret også ved lavere luftmengder enn V_{\max} . Om ventilasjonsanlegget klarer å opprettholde tilstrekkelig høyt trykk i tilluftskanalen for å forhindre tilbakeslag er avhengig av blant annet kapasiteten til tilluftsvifter, tettheten av brannrommet og hvor raskt brannen utvikler seg.

Røyken fra brannen førte til at filteret i aggregatet tettet seg gradvis. I tre tester ble filteret tettet så mye at aggregatet ikke klarte å trekke ut en tilstrekkelig mengde luft, noe som skapte ubalanse i ventilasjonsanlegget. De nye BRAVENT-testene viser at brannstørrelsen i forhold til aggregatets kapasitet spiller en viktig rolle for hvor lenge avtrekksluftmengden kan opprettholdes. Et aggregat som betjener flere små brannceller med begrenset tilgjengelig brensel, vil klare å opprettholde den nødvendige avtrekksluftmengden lenger enn et aggregat som betjener få store brannceller, ettersom forholdet mellom røykmengde og total luftmengde endres. Andre faktorer som påvirker hvor lenge aggregatet kan kompensere for at filter tettes er:

- om aggregatet er prosjektert for 100 % eller mindre samtidighet, dvs. andelen rom som kan ha maksimal luftmengde samtidig,
- filterets tilstand ved brannstart, i disse branntestene ble det brukt helt nye filter i hver test,
- om ventilasjonsanlegget opererer med V_{\max} eller mindre luftmengde ved utløst brannalarm.

Det ble ikke observert røykspredning mellom rommene via avtrekkskanalen, men siden avtrekksluftmengden i en av testene ble kraftig redusert til rundt 50 % av den maksimale prosjekterte luftmengden, konkluderes det med at gradvis tetting av avtrekksfilteret vil øke

risikoen for røykspredning via avtrekkskanalen. Tetting av filtrene kan unngås ved etablering av et bypass. Likevel må det da fortsatt dokumenteres at alle andre funksjoner av anlegget er ivaretatt ved brann.

De utførte testene viste at enkelte komponenters feilmekanisme (målefeil i enkle spjeld, kortslutninger og tetting av avtrekksfiltrene) kan føre til at hele systemet ikke lenger klarer å opprettholde sin funksjon.

1 Innledning

1.1 Om BRAVENT

Denne rapporten er en del av en serie som omhandler brann og røykspredning i ventilasjonsanlegg som går under fellesnavnet BRAVENT (Brann- og røykspredning i ventilasjonskanaler). Følgende rapporter er publisert i denne serien til nå:

- 2019 BRAVENT - Rapport 1 - Teori og kunnskapssammenstilling [1]
- 2019 BRAVENT - Rapport 2 - Brannspredning i ventilasjonskanaler [2]
- 2021 BRAVENT - Tetting av ventilasjonsfilter med brannrøyk [3]
- 2022 BRAVENT - Brannforløp og ventilasjon i skoler [4]
- 2024 BRAVENT - Storskala branntester (del 1): Brannytelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter [5]
- 2024 BRAVENT – Storskala branntester (del 2): Effekt av ventilasjonsstrategi på røykspredning og trykkontroll i en mock-up skolebygning (denne rapporten)
- 2024 BRAVENT – Veileder for brannteknisk prosjektering av ventilasjonsanlegg i skolebygg [6]
- 2024 BRAVENT – Kontrollplan: Ventilasjonsanleggets funksjon under brann [7]

1.2 Bakgrunn

BRAVENT-prosjektet har som mål å utforske muligheten for å utvikle og dokumentere en løsning for trykk- og røykkontroll for mindre branner ved skoler. Mindre branner er her definert som branner som ikke sprer seg utenfor arnestedsrommet og ikke fører til overtenning i rommet. Denne løsningen skal være generell og kostnadseffektiv og tar utgangspunkt i å ta i bruk det eksisterende ventilasjonssystemet (komfortventilasjon) ved skolene. Komfortventilasjon er en generell beskrivelse av et ventilasjonssystem som styres etter komfortparametere f.eks. temperatur og CO₂, for å gi et godt inn klima. Behovsstyrt ventilasjon som VAV (variable air volume = varierende luftmengde etter behov) eller DCV (directional control valve = behovsstyrt luftmengde) er eksempler på komfortventilasjon.

Ved brann er det primært to strategier for styring av ventilasjonsanlegget, såkalt «trekk ut»- og «steng inne»-strategi. «Trekk ut» baserer seg på at ventilasjonsanlegget fortsetter å gå i normal drift eller girer opp til maksimalt prosjektert luftmengde (tilluft og avtrekk) ved deteksjon av brann, avhengig av det eksisterende brannkonseptet i bygget. «Steng inne», derimot, stenger ned ventilasjonsanlegget og har brannspjeld som stenger brannrøyken inne i de rommene som brenner. Mer utfyllende informasjon om disse konseptene kan finnes i en tidligere BRAVENT-rapport [1].

Den «vanlige» trekk ut-strategien beskrives i Byggforskserien [8] med bypass, et system som leder røyken utenom filteret slik at det ikke skal tettes. I de fleste skolene er komfortventilasjonsanleggene ikke utstyrt med et bypass som brukes ved brann. Kartleggingsarbeid for et utvalg av skoler i Oslo, Bergen og Trondheim viste at 10 av de 15 undersøkte skolene ikke hadde brannspjeld eller kun delvis brannspjeld installert. Kun to av skolene hadde et bypass-system installert, hvorav en av disse hadde bypass-system for kun ett av ni aggregater [4].

Dette BRAVENT-prosjektet vil derfor utforske en alternativ "trekk ut"-strategi som bare er avhengig av eksisterende system for komfortventilasjon. Strategien skal bidra til å kontrollere røykspredning ved at røyken trekkes ut av bygget via ventilasjonskanalene, uten bruk av by-pass. Denne strategien kan være spesielt egnet for de vanligste skolebrannene, som kjennetegnes av små branner med moderat varmeutvikling. Dersom alternativ strategi lar seg gjennomføre vil dette være kostnadsbesparende for eldre anlegg som ikke må bygges om via kanalnett eller styringsfunksjoner. I delrapport 1 «Brannytelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter» [5] ble det funnet at kritiske komponenter i et ventilasjonsanlegg uten bypass og med ikke-brannklassifiserte DVC-spjeld ikke opprettholder tilstrekkelig funksjonalitet i 30 eller 60 minutter for relevante brannscenarier. For å likevel kunne bruke det eksisterende ventilasjonsanlegget til "trekk ut"-strategien, må det dokumenteres at feil av enkle komponenter ikke påvirker ventilasjonsanleggets ytelse ved brann og evnen til å opprettholde sin funksjonalitet i påkrevd tid.

1.3 Målsetning

Målet med delrapport 2 er å vurdere hvordan feilmekanismer som ble identifisert i delrapport 1 «Brannytelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter» [5] påvirker mulig røykspredning og trykkforholdene i bygget.

Studien undersøker relevante brannscenarier for skolebygg, men funnene fra testene kan også være relevante for andre formålsbygg.

1.4 Begrensninger

Testbygget var utstyrt med et spjeldoptimalisert ventilasjonssystem. Spjeldoptimaliserte ventilasjonssystemer er mest energieffektive og er derfor ofte den foretrukne løsningen i nyere bygg. Det antas at slike systemer er mer sårbare for brannpåvirkning på grunn av deres komplekse styringssystem. Trykkoptimaliserte eller andre ventilasjonssystemer (inkludert spesialavtrekk eller kjøkkenavtrekk) ble ikke undersøkt.

Branntestene er begrenset til branner som ikke går til overtenning og som ikke sprer seg utover arnestedsrommet, som er hoveddelen av alle registrerte branner på norske skoler.

I de utførte testene er helt nye spjeld og filter benyttet. Det er derfor ikke studert hvordan deres funksjon ved brann påvirkes av evt. støvansamling som over tid vil skje ved vanlig drift.

Branntestene ble gjennomført i et testbygg på en etasje. Det ble derfor ikke undersøkt hvordan skorsteinseffekten muligens påvirker ventilasjonsanlegget når det brukes trekk-ut løsning ved brann.

En stor andel av luften til og fra aggregatet gikk til det frie som omtales i rapporten som «resten av skolen».

Det ble ikke gjennomført branntester med bypass.

1.5 Rapportens oppbygning

Denne rapporten «BRAVENT – Storskala branntester (del 2): Effekt av ventilasjonsstrategi på røykspredning og trykkontroll i en mock-up skolebygning» er den andre av to deler som beskriver funnene fra de 14 storskala branntestene utført i dette BRAVENT prosjektet. I denne delen fokuseres det på hvordan feilmekanismer som oppstod i testene vil påvirke driften og funksjonaliteten til ventilasjonsanlegget.

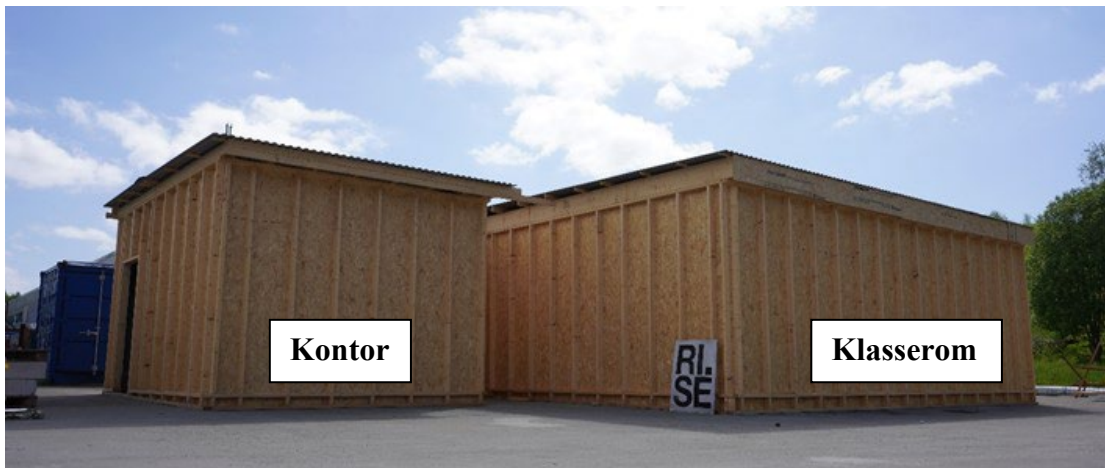
Den første delrapporten «BRAVENT - Storskala branntester (del 1): Brannytelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter [5]» fokuserer på hvordan ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter fungerer ved en brann. I løpet av brannen vil også ventilasjonsanlegget kunne bli forurenset av sotpartikler, noe som kan ha negativ innvirkning på inneklime og helse når bygget tas i bruk igjen etter brannen. Derfor studeres det også i hvilken grad sot avsettes ulike steder i ventilasjonsanlegget. Del 1 gir også en beskrivelse av alle de utførte testene, og i vedlegg B presenteres måledata fra alle testene.

2 Branntester

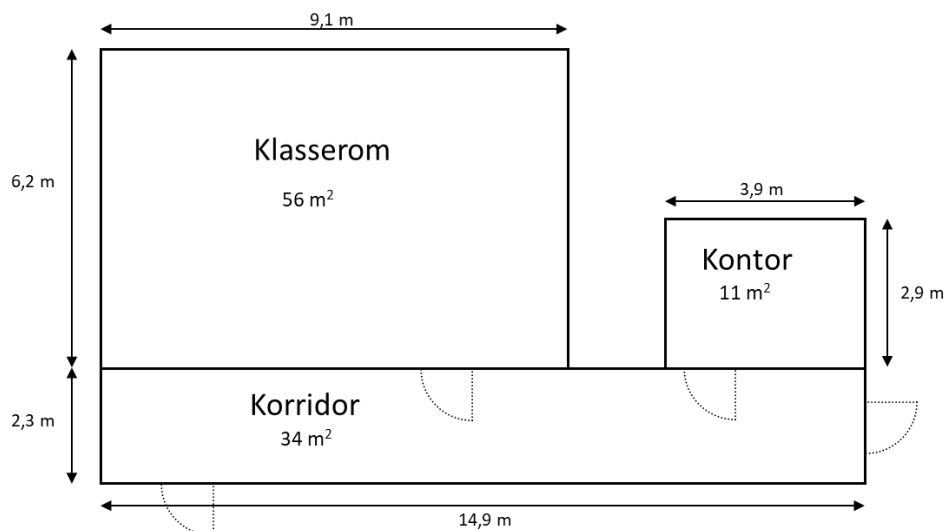
Dette kapitlet gir en kort beskrivelse av de utførte branntestene. For en mer detaljert beskrivelse av testoppsettet, andre testparametere og feilmekanismene som oppstod på grunn av brannbelastningen de ulike komponentene ble utsatt for, henvises det til delrapport 1 «BRAVENT – Storskala branntester (del 1): Brannytelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter» [5].

2.1 Testoppsett

Branntestene ble utført i bygget som er vist i Figur 2-1 og skissert i Figur 2-2. Bygget bestod av et klasserom, en korridor og et kontor, og hadde et fullverdig spjeldoptimalisert komfort-ventilasjonsanlegg.



Figur 2-1: Bilde av testbygning utvendig. Kontoret vises til venstre og klasserommet vises til høyre. Døra til venstre går inn i korridoren som ligger i bakkant på bildet. Foto: RISE Fire Research.

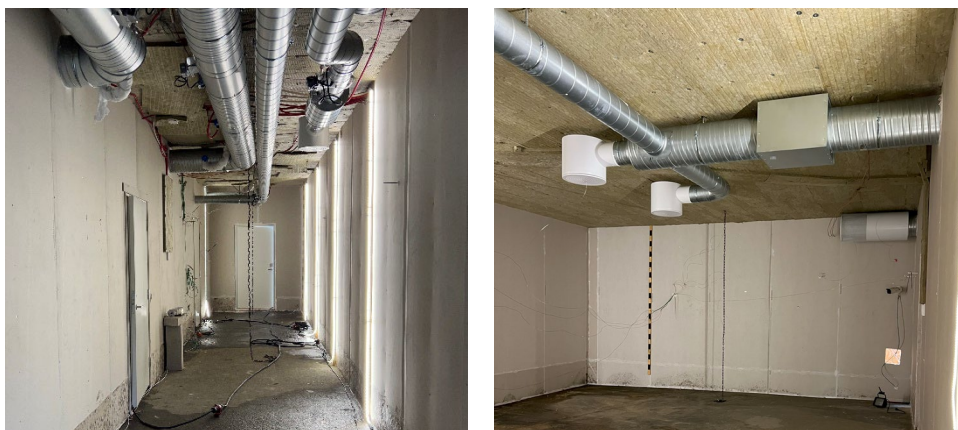


Figur 2-2: Målsatt skisse av testbygningen.

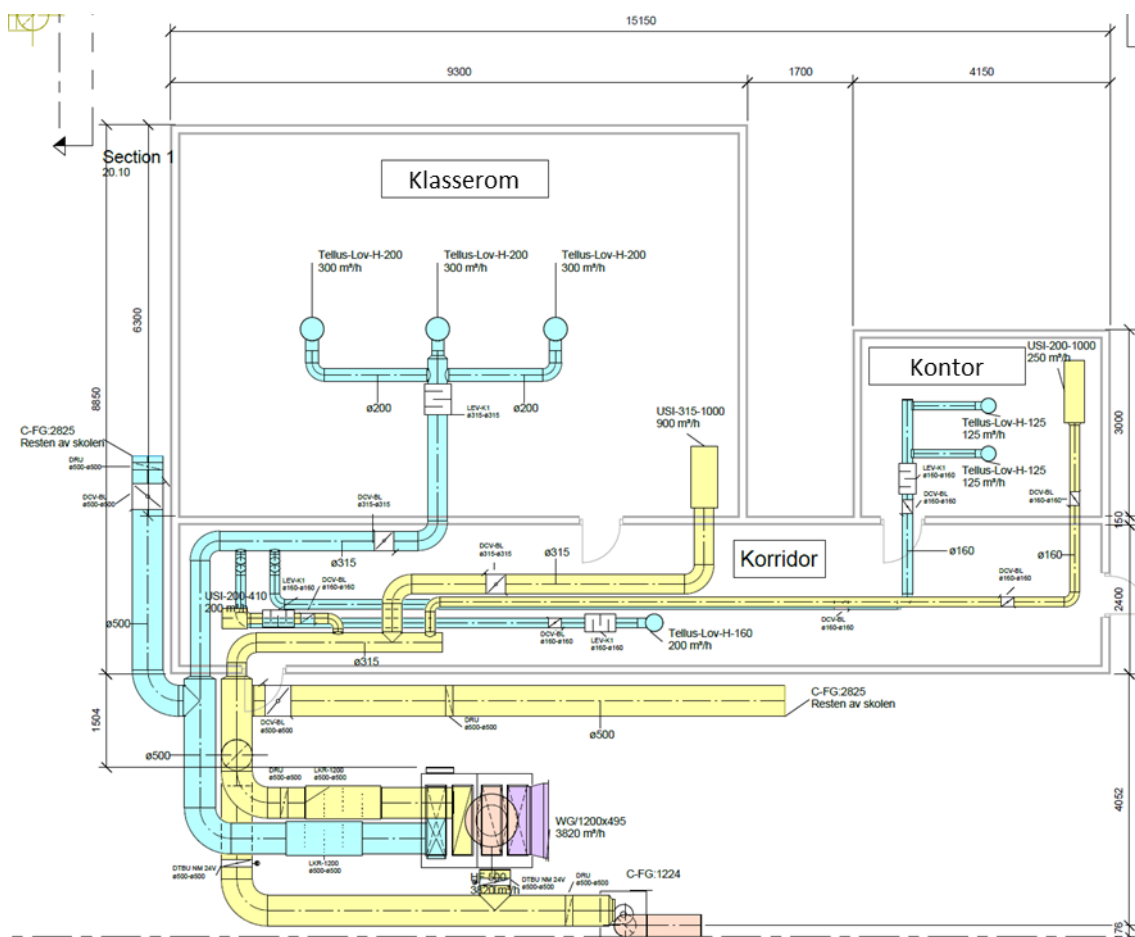
Klasserommet og kontoret ble plassert slik at de ikke hadde en felles innervegg for å forhindre direkte røykspredning mellom disse rommene via eventuelle utettheter. Dermed kan røyken kun spres via korridoren eller ventilasjonskanalene. Dette ble gjort for å ha muligheten for å skille mellom mulige røykspredningsmekanismer.

Byggets lufttetthet ble målt før den første branntesten ble gjennomført. Lufttetthetstestene ble gjennomført ved å montere et viftesystem i dørkarm og skape et over- eller undertrykk på 50 Pa i rommet. Lekkasjeareal per overflateareal i testbygget ble, avhengig av rom, målt til å være mellom $0,25 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ og $0,56 \text{ cm}^2/\text{m}^2$. For å etablere referanseverdier ble lignende lekkasjetester gjennomført i utvalgte rom på to skoler i Oslo. En av skolene var fra 2015 og hadde et lekkasjeareal per overflateareal på mellom $0,98 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ og $1,24 \text{ cm}^2/\text{m}^2$. Den andre skolen var fra 1963 og hadde et lekkasjeareal per overflateareal på mellom $2,26 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ og $4,78 \text{ cm}^2/\text{m}^2$. Dette indikerer at det kan være store forskjeller mellom skoler avhengig av hvilken periode skolene ble bygd. Testbygget er mer representativt for et nytt bygg og ble bevisst bygget veldig tett, ved for eksempel å ikke installere vinduer. Dette ble gjort for å få størst mulig trykkoppbygging i brannrommet og dermed utfordre ventilasjonsanleggets evne til å opprettholde tilstrekkelig tilluft.

Figur 2-3 viser ventilasjonskanalene i korridoren og Figur 2-4 gir en oversikt over oppbygging av hele ventilasjonsanlegget. Som vist i figuren var det installert to ulike bypassløsninger. Den første varianten skulle lede avtrekkslufta forbi filteret og varmegjenvinneren og så inn i ventilasjonsaggregatet igjen. Her ble det imidlertid gjort en feil under installasjonen, som gjorde at bypass-løsningen ikke fungerte etter hensikten. Denne løsningen ble derfor ikke benyttet i noen av testene. Den andre varianten ledet avtrekkslufta forbi hele ventilasjonsaggregatet og rett til en dedikert brannvifte (C-FG:1224 i Figur 2-3). Denne bypassløsningen ble aktivert ved testslutt og brukt for å ventilere brannrøyk ut fra bygningen mellom testene.



Figur 2-3: Ventilasjonskanaler og -ventiler i korridoren (venstre) og klasserommet (høyre).



Figur 2-4: Skisse av ventilasjonsanlegget som var montert. Avtrekkskanalene er vist i gult, og tilluftskanalene er vist i blått.

Branntester i tidligere BRAVENT studier viste at temperatuene i kanalnettet raskt synker når luft og røyk fra brannrommet blandes med kald luft fra andre rom [2] og at avtrekksfiltrene kan tettes raskt hvis det er kun røyk fra brannrommet som trekkes gjennom filtrene [3]. For å få realistiske temperaturer og sotmengder i avtrekkskanalen ved aggregatet, ble det brukt et aggregat som var dimensjonert for å betjene mer enn de tre rommene i testbygningen. I tillegg til bygningens 106 m² ble ventilasjonsanlegget dimensjonert for å betjene ytterligere 300 m² som

skulle representere «resten av skolen». Luften til resten av skolen gikk til frie omgivelser utenfor bygningen. De maksimale (V_{\max}) og minimale (V_{\min}) prosjekterte luftmengdene gis i Tabell 2-1.

Tabell 2-1: Prosjekterte luftmengder for de ulike rommene i testbygningen.

Rom	Areal (m ²)	Luftmengde tilsvarende antall personer	Tilluft		Avtrekk	
			V_{\max} (m ³ /h)	V_{\min} (m ³ /h)	V_{\max} (m ³ /h)	V_{\min} (m ³ /h)
Kontor	11	7	250	100	250	100
Klasserom	56	28	900	300	900	300
Korridor	34		200	200	200	200
Resten av skolen	300	92	3 200	1 100	3 200	1 100
Totalt	401		4 550	1 700	4 550	1 700

2.2 Utførte tester

Det ble utført i alt 14 branntester. Det ble utført seks tester i klasserommet, fem tester i kontoret og tre tester i korridoren. I seks av testene var brenselet en elsparkesykkel, mens det i de resterende testene var enten propan, skumgummimadrass eller en kombinasjon av propan og skumgummimadrass. Tabell 2-2 viser oversikt over hvilket brensel som ble brukt i hvilken test og hvilket rom som ble brukt som brannrom. I tillegg vises informasjon om hvilken luftmengde anlegget leverte ved brannstart, hvilken type spjeld som ble brukt i tillufts- og avtrekkskanalene til brannrommet og om disse spjeldene var plassert inne i eller utenfor brannrommet. I alle testene var anlegget konfigurert slik at den giret opp til V_{\max} (maksimal prosjektert luftmengde) når brannalarmen ble utløst.

Tabell 2-2: Oversikt over utførte test. Type spjeld og posisjon spjeld beskriver type og posisjonen til spjeldene som var montert på tillufts- og avtrekkskanalene for brannrommet.

#	Type brensel	Brannrom	Type spjeld brannrom	Plassering av spjeld	Ventilasjon ved start
Test 1	Elsparkesykkel	Klasserom	LEO ¹	Utenfor brannrom	V_{max}
Test 2	Elsparkesykkel	Klasserom	LEO	Utenfor brannrom	V_{max}
Test 3	Elsparkesykkel	Klasserom	LEO	Utenfor brannrom	V_{max}
Test 4	Elsparkesykkel	Korridor	LEO	I brannrom	V_{min}
Test 5	Elsparkesykkel	Korridor	LEO	I brannrom	V_{min}
Test 6	Elsparkesykkel	Korridor	LEO	I brannrom	V_{min}
Test 7	Gass	Kontor	LEO	Utenfor brannrom	V_{max}
Test 8	Madrass	Kontor	LEO	Utenfor brannrom	V_{max}
Test 9	Gass + madrass	Kontor	LEO	Utenfor brannrom	V_{min}
Test 10	Gass + madrass	Kontor	LEO	I brannrom	V_{min}
Test 11	Gass + madrass	Kontor	TVE ²	I brannrom	V_{min}
Test 12	Gass + madrass	Klasserom	LEO	Utenfor brannrom	V_{min}
Test 13	Gass + madrass	Klasserom	LEO	Utenfor brannrom	Nattmodus (av)
Test 14	Gass + madrass	Klasserom	LEO	Utenfor brannrom	V_{min}

¹⁾ LEO er en produktnavnet for et DCV-spjeld med målekryss.

²⁾ TVE er produktnavnet for et DCV-spjeld med målesensor i spjeldbladet.

2.2.1 Tester med elsparkesykkel – Test 1-6

Test 1-6 ble utført med en helt ny elsparkesykkel med fulladet litium-ion batteri som brensel. Brannen ble igangsatt ved å fremprovosere *thermal runaway*¹ i batteriet. Dette ble gjort ved å varme det opp fra undersiden med en liten flamme. Test 1-3 ble utført klasserommet og test 4-6 i korridoren. Som beskrevet i delrapport 1, utviklet testene med elsparkesykkel lite varme, og det ble heller ikke observert at sotproduksjonen fra disse brannene påvirket funksjonen til ventilasjonsanlegget. Disse testene inngikk også som en del av prosjektet «Rømning ved brann i litium-ion batteri i elsparkesykkel». Nærmere beskrivelser av disse testene, og hvordan brannforløp, varmeutvikling, røyk- og gassproduksjon vil kunne påvirke rømningsforholdene finnes i en egen rapport [9].

2.2.2 Tester i kontoret – Test 7-11

Test 7-11 ble utført i kontoret med propan, en skumgummimadrass eller både propan og skumgummimadrass som brensel. Grunnen til at to typer brensel ble brukt i kombinasjon var for å kunne justere mengde røyk/sot og varme som ble avgitt fra brannen. Propan ble brent i en 10 cm x 10 cm x 9 cm (LxBxH) stor gassbrenner helt fylt med lecakuler for jevn fordeling av gass over brennerens overflateareal. For madrassbrannen ble oksygentilførselen begrenset ved å bygge madrassen inn i ubrennbare lettbetongblokker (Siporex) som vist i Figur 2-5. Madrassen ble lagt på høykant mellom Siporex-blokkene. På langsiden var blokkene plassert i en avstand på 1 cm fra madrassoverflaten og på kortsidene stod blokkene helt inntil madrassen. Over madrassen var det 15 cm opp til undersiden av blokkene som ble lagt over, som vist i Figur 2-5 (b). På langsiden var det i nedre kant en avstand på 16 cm mellom gulvet og blokkene. Ved å begrense oksygentilførselen økte røykmengden mens varmeenergien som ble avgitt ble redusert. Madrassbrannen avga også en mengde uforbrente gasser som også gjorde at gassbrannen fikk for lite oksygen og sloknet 14 minutter ut i test 9. Testen ble da avbrutt og er ikke med i analysene i denne rapporten. For å redusere effekten de to brannkildene hadde på hverandre ble det for test 10 og 11 satt opp en 60 cm høy vegg av Siporex-blokker mellom madrassoppsettet og gassbrenneren.



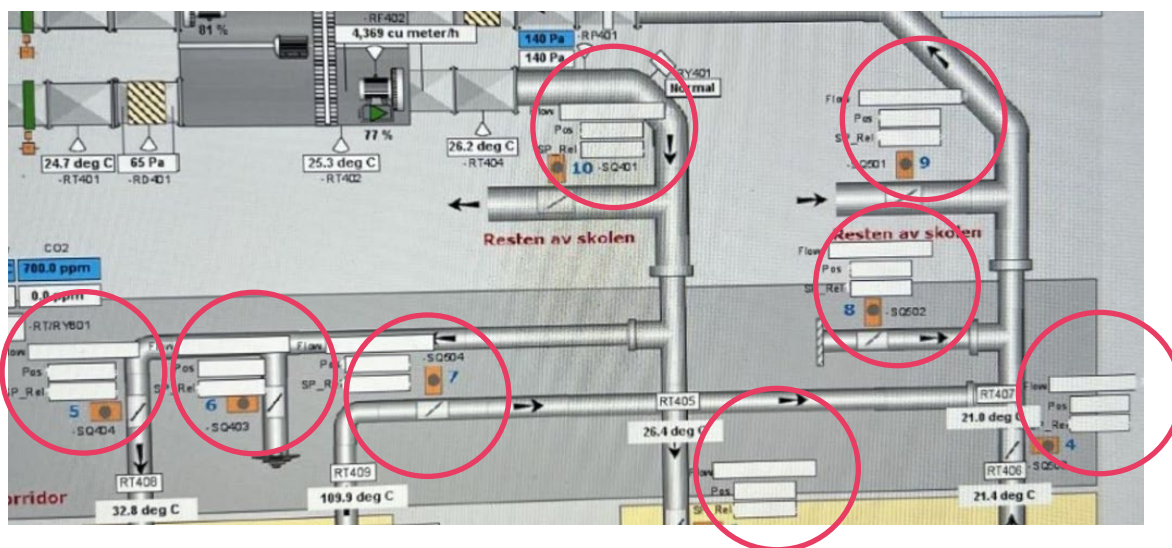
Figur 2-5: Madrassoppsett for test 8. I (a) er en blokk løftet bort for å vise madrassens posisjon, i (b) er lokket av blokker også på plass.

¹ En thermal runaway er en ukontrollerbar nedbryting av anoden, katoden og elektrolytten i en battericelle som fører til en rask varmeutvikling og produksjon av brennbare gasser.

I tillegg til variasjonen i brensel, ble det i testene i kontoret variert både hvilken type DCV-spjeld som ble benyttet og også hvilken fysisk plassering de hadde. To ulike typer DCV-spjeld ble brukt i testene, LEO og TVE². For spjeldene av type LEO måles luftmengdene med et målekryss. For spjeldene av type TVE måles luftmengdene via trykkmåling i selve spjeldbladet. I testene 7-9 var både avtrekks- og tilluftsspjeld for kontoret plassert i korridoren, dvs. utenfor brannrommet. I test 10 og 11 var begge disse spjeldene plassert i kontoret, dvs. inne i brannrommet.

Både i testen med kun propan og i testene med propan og skumgummimadrass som brensel medførte varmepåkjenningen fra de varme røykgassene i avtrekkskanalen til skader på spjeldet. For spjeldene med målekryss (LEO) smeltet plastslanger knyttet til spjeldets målesensorer og for spjeldtypen med målesensoren integrert i spjeldbladet (TVE) smeltet hele spjeldbladet da dette var laget av et plastmateriale. Når spjeldene var plasserte inne i brannrommet oppstod det i tillegg skader på tilluftsspjeldet. For spjeldtypen LEO smeltet igjen plastslanger slik at spjeldet lukket seg grunnet feilmåling av luftmengdene. TVE-spjeldet klarte måle riktige luftmengder, men motor og styringsboks på utsiden av spjeldet ble deformert som følge av varmebelastningen.

I tillegg til skadene på spjeldene i test 10 brant 24 V strømforsyningen til spjeldene opp og sikringen gikk til 24 V strømforsyningen i styreskapet. Dette resulterte i at systemet mistet kontakten med alle spjeldene. Som vist i Figur 2-6 forsvant da all informasjon om alle spjeldene fra SD-anlegget.



Figur 2-6: Utsnitt av skjermbilde fra SD anlegget i Test 10 etter systemet hadde mistet kontakten med alle spjeldene. At informasjonen er borte kan gjenkjennes ved at feltene inne i de røde sirklene er tomme.

² Både LEO og TVE spjeld ble levert av TROX Auranor Norge. Se datablad i Delrapport 1 [5].

2.2.3 Tester i klasserommet – Test 12-14

Test 12-14 ble utført med brannen plassert i klasserommet. I alle tre testene ble det brukt en kombinasjon av propan og skumgummimadrass som brensel. I Test 12 og 13 ble det brukt én skumgummimadrass, i test 14 ble det brukt to skumgummimadrasser. Madrassoppsettet ble i disse testene ikke lukket igjen med blokker over madrassen. I tillegg ble to blokker på hver av langsiden satt på høykant helt inntil madrassen for å støtte den bedre opp. De resterende blokkene ble plassert i en avstand på 1 cm fra madrassen. For test 14 ble madrassoppsettet forlenget slik at de to madrassene stod etter hverandre. Propan ble brent i en 70 cm x 30 cm x 29 cm (LxBxH) stor brenner fylt omtrent 2/3 full med lecakuler for jevn fordeling av gass over brennerens overflate.

I test 14 var det de første 10 minuttene av testen bare propan som brant. Etter disse 10 minuttene ble døra til brannrommet åpnet og begge madrassene ble antent i hver sin ende, før døra igjen ble lukket.

På samme måte som for testene i kontoret, medførte varmepåkjeningen fra den varme røykgassen i avtrekkskanalene at plastslanger knyttet til avtrekksspjeldets luftmengdemåling smeltet. Dette skjedde selv om avtrekksspjeldet i alle disse tre testene var plassert i korridoren, altså utenfor brannrommet.

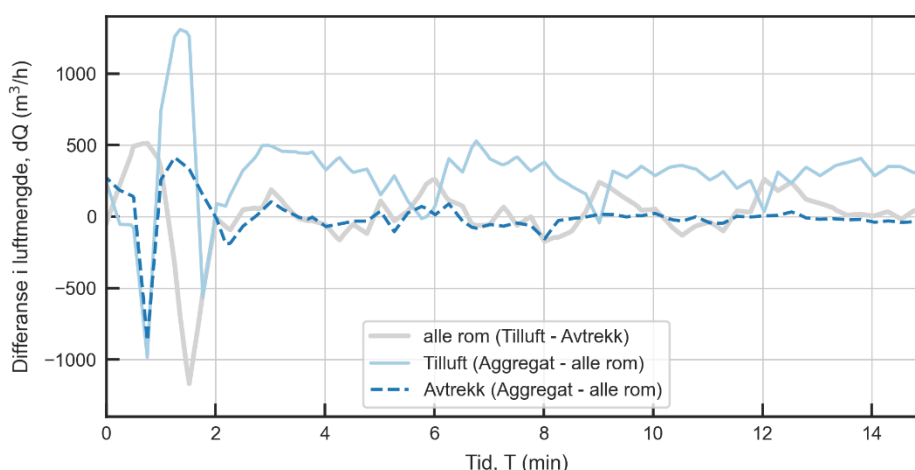
3 Resultater og diskusjon

Dette kapitlet presenterer de mest relevante resultatene fra branntestene for å evaluere røykspredningen i testbygget og trykkforholdene som oppstod under brannene. Branntestene og komponentfeilene som ble identifisert i testene er beskrevet i detalj i delrapport 1, «Brannytelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter» [5].

Alle figurene viser tiden normalisert med tidspunktet ved branneteksjon. Det vil si brannalarmen ble utløst og ventilasjonsanlegget begynner å reagere i henhold til alarmen på tidspunktet 0, mens brannen ble startet litt før det.

For å evaluere mulige trykkubalanser mellom rommene er det viktig å skille mellom ubalanser som oppstår på grunn av 1) feil luftfordeling inne i bygget og 2) ubalansert lufttilførsel og avtrekk til og fra hele bygget. Før de første branntestene ble det oppdaget at luftmengdene som ble rapportert fra aggregatet ikke var helt i balanse. Summen av luftmengdene til alle rom og summen av luftmengdene fra alle rom var derimot i balanse.

Figur 4-1 viser eksempelvis differansen mellom tilluft og avtrekk til bygget i test 12. Tidsperioden som vises er fra brannen detekteres og før spjeldene blir ødelagt, målingene fra spjeldene anses derfor som korrekte. Differansen mellom luftmengdene som rapporteres fra avtrekks- og tilluftsspjeldene fluktuierer rundt null (grå linje), bygget er altså i balanse. Differansen mellom luftmengdene som ble rapportert fra aggregatet og spjeldene, viste imidlertid at tilluftsmengden fra aggregatet var for høy (lyseblå linje). Dette skyldtes sannsynligvis en lekkasje i tilluftskanalen på utsiden av bygningen. Det var ikke mulig å utføre dypere feilsøking innenfor tilgjengelig tidsrom, og siden bygget selv var i balanse ble branntestene gjennomført uten videre modifikasjon på tilluftssiden. Det vil si, at figurene i denne rapporten som viser luftmengden til og fra aggregatet anses som balansert så lenge differansen mellom tilluft og avtrekk ved konstant nominell luftmengde ikke endres over tid.



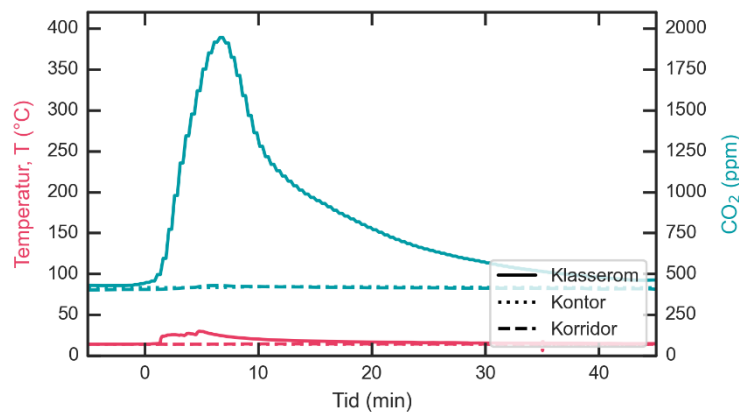
Figur 4-1: Differanse mellom tilluft og avtrekk basert på summen av luftmengdene rapportert fra alle rom (grå linje), mellom tilluftsmengden rapportert fra aggregatet og alle rommene (blå linje), og mellom avtrekksluftmengden rapportert fra aggregatet og alle rommene (stiplet linje) etter branneteksjon og før spjeldene ble ødelagt i test 12.

De første seks branntestene består av tre repetisjoner med brann i en elsparkesykkel i klasserommet og tre repetisjoner med brann i en elsparkesykkel i korridoren. Resultatene var veldig like. Derfor brukes kun test 2 og test 5 for å representere disse testene i klasserommet og korridoren. For mer informasjon om branntestene med elsparkesyklene henvises til rapport «Rømning ved brann i litium-ion batteri i elsparkesykkel» [9].

3.1 Test 2

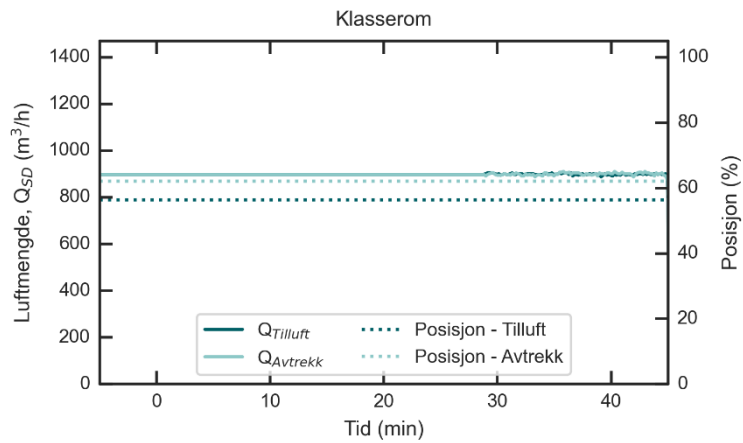
Figur 4-2 viser temperatur og konsentrasjon av karbondioksid (CO₂), i rommene i test 2. Sensorene som målte CO₂ var installert for å ivareta et godt inneklime. Målområdet er derfor begrenset oppad til 2 000 ppm og gir ingen informasjon om røykkonsentrasjonen i et rom utgjør en personrisiko. Disse målingene er derfor kun brukt som en indikasjon på om røyken begynte å spre seg til andre rom.

Temperaturøkningen er liten, noe som kan forklares med at en elsparkesykkelbrann er relativt liten i forhold til romstørrelsen og luftmengdene som skiftes ut. Økningen i CO₂ var tydelig i brannrommet, men det ble ikke registret noen tydelig økning i andre rom.

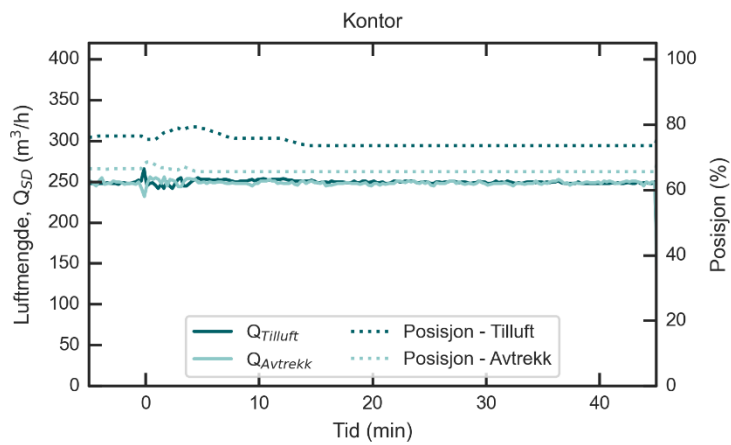


Figur 4-2: Temperatur (rød) og CO₂ konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD anleggets veggensorer for test 2. Øvre målegrensen for CO₂ var 2000 ppm. Heltrukken linje representerer klasserommet, prikket linje representerer kontoret og stiplet linje representerer korridoren.

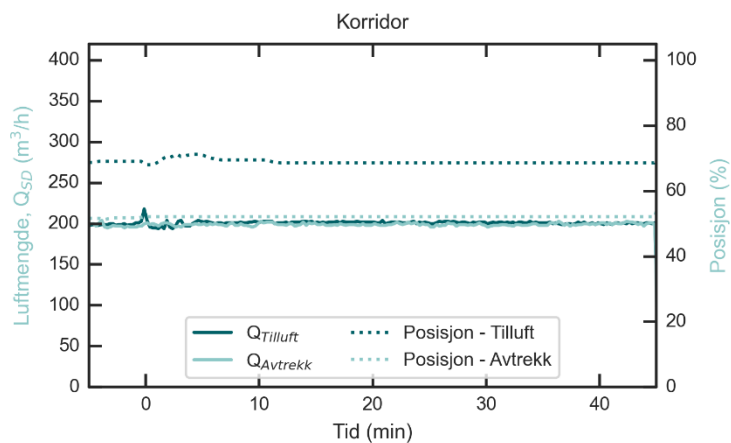
Brannen i elsparkesyklene var karakterisert av mange korte intense branner i de enkelte battericellene. Det vil si at energien ble frigjort i korte intervaller fordelt over lengre tid. I tillegg var brannenergien forholdsvis liten sammenlignet med de andre branntestene. Ventilasjonsanlegget ble derfor kun i liten grad påvirket, og klarte å levere korrekte luftmengder gjennom hele brannforløp (se Figur 4-3, Figur 4-4 og Figur 4-5).



Figur 4-3: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i klasserommets tilluft og avtrekk for test 2. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.

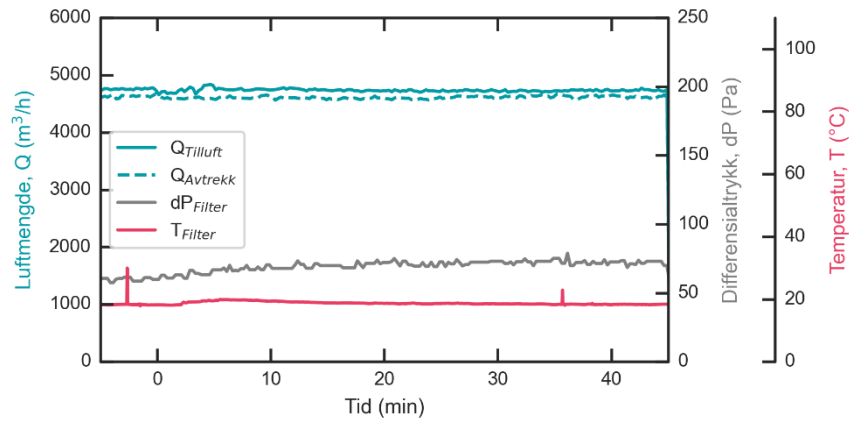


Figur 4-4: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i kontorets tilluft og avtrekk for test 2. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.

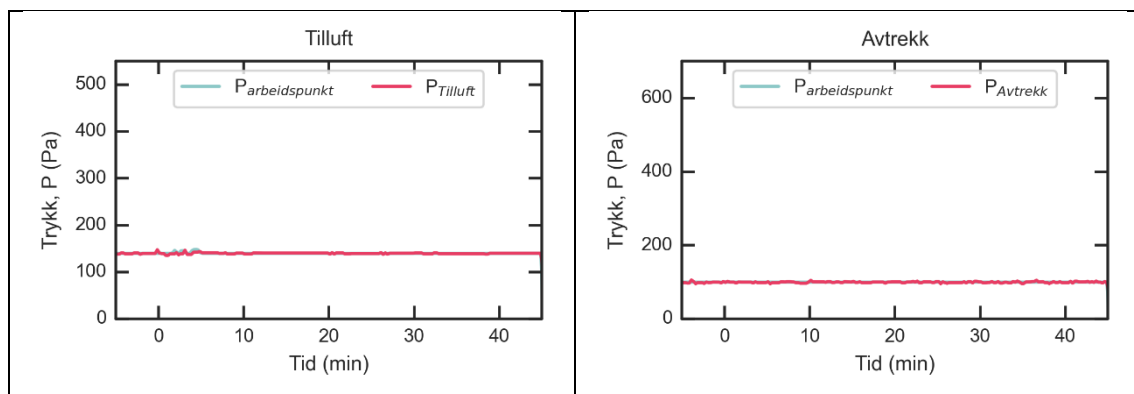


Figur 4-5: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 2. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.

Figur 4-6 viser at trykktapet over avtrekksfilteret i svært liten grad øker i løpet av brannen. Aggregatet klarer derfor å levere og trekke ut riktig luftmengde gjennom hele brannforløpet, og trykket på tillufts- og avtrekkssiden følger arbeidstrykket tett (se Figur 4-7).

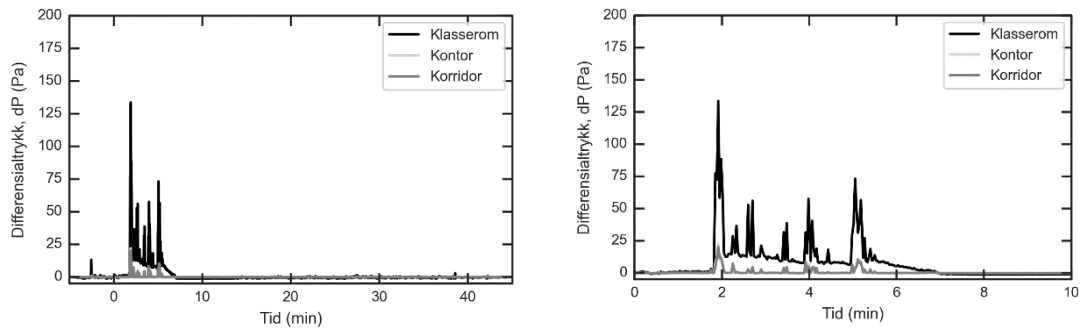


Figur 4-6: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 2.

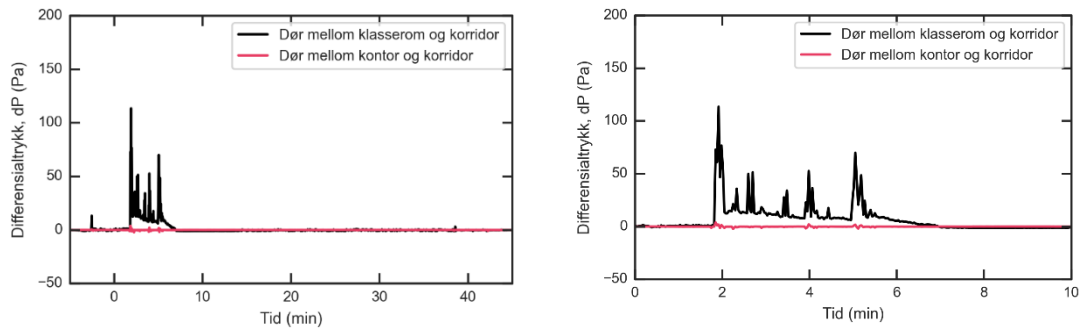


Figur 4-7: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekkssiden (høyre) for test 2. Maksimums- og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.

Det ble registrert flere trykktopper i brannrommet i løpet av de første minuttene av brannen (se Figur 4-8). Disse indikerer fasen av brannen hvor den termiske reaksjonen i battericellene, *thermal runaway*, bidro til brannen. Resten av tiden var det kun pilotflammen og eventuelle plastmaterialer fra sparkesykkelen som bidro til brannen. En *thermal runaway* i en litium-ion-battericelle fører til en eksplosjonsaktig frigjøring av brennbare gasser som kan forklare de relativt store trykktoppene. I perioden mellom disse toppene var romtrykket i brannrommet under 25 Pa. Trykktoppene i brannrommet påvirker også trykket i både korridoren og kontoret, men fører ikke til noen signifikant trykkforskjell mellom disse to rommene, altså over døren som ikke fører til brannrommet (se Figur 4-9).



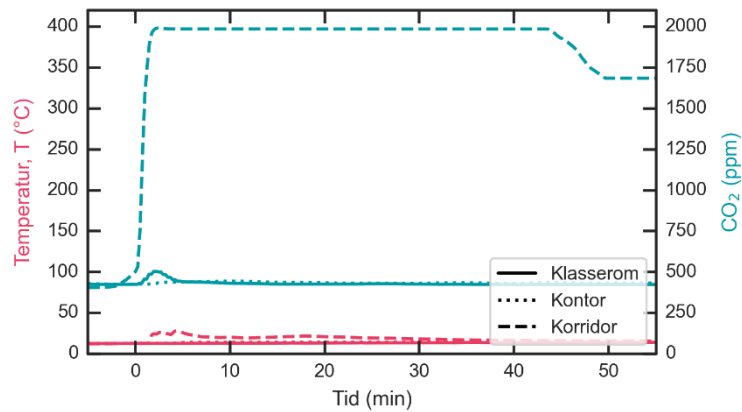
Figur 4-8: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget i hele testperioden (venstre) og i fasen med *thermal runaway* i batteriet (høyre) for test 2.



Figur 4-9: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 2. Trykkdifferansen over dør mellom klasserom og korridor ($P_{\text{klasserom}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med svart og trykkdifferansen over dør mellom kontor og korridor ($P_{\text{kontor}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med rødt.

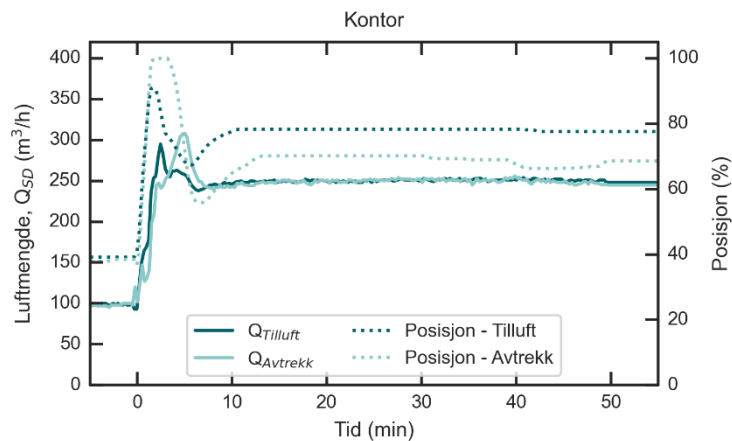
3.2 Test 5

Sammenlignet med brannen i test 2 resulterte brannen i test 5 til en større økning av CO_2 -konsentrasjonen i brannrommet (se Figur 4-10). Nøyaktig mengde er ikke kjent ettersom nivået oversteg maksimalt måleområde (2000 ppm). Den store økningen skyldes at romvolumet og tillufts- og avtrekksluftmengdene er mindre i korridoren sammenlignet med klasserommet. Det ble også registrert en minimal økning i CO_2 -konsentrasjonen i klasserommet. I kontoret, som også er et tilstøtende rom til korridoren, ble det imidlertid ikke registrert noen CO_2 -økning.

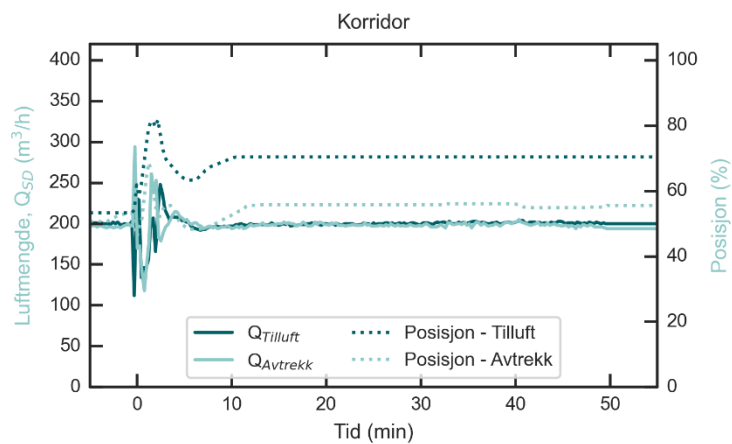


Figur 4-10: Temperatur (rød) og CO₂ konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD anleggets veggsensorer for test 5. Målegrensen for CO₂ var 2000 ppm. Heltrukken linje representerer klasserommet, prikket linje representerer kontoret og stiplet linje representerer korridoren.

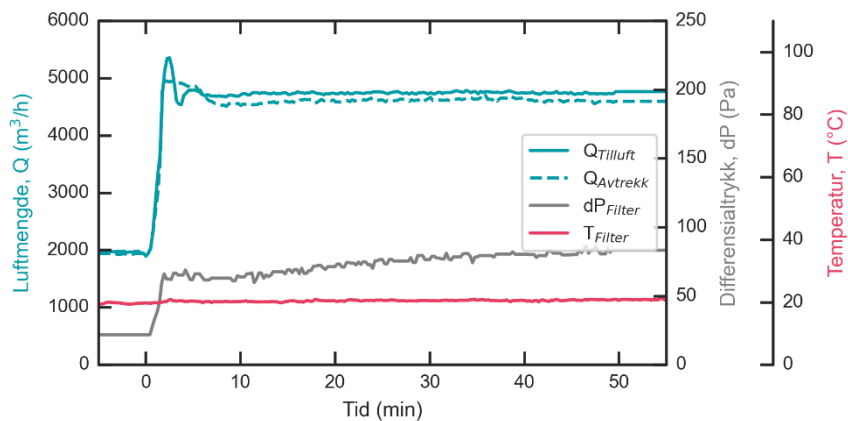
Som i test 2, klarte ventilasjonsanlegget også i test 5 å levere riktig luftmengder, men økningen fra den laveste prosjekterte luftmengden, V_{\min} , til den maksimale prosjekterte luftmengden, V_{\max} , var mer krevende for anlegget og førte til fluktuasjoner i løpet av de første minuttene etter branndeteksjon (se Figur 4-12 og Figur 4-13). Dette gjelder også for aggregatet som leverer riktige luftmengder, selv om trykktapet øker litt over tid når sot tetter filteret (se Figur 4-14). Videre ser man kun lite fluktuasjoner i arbeidstrykket som er knyttet til økningen fra V_{\min} til V_{\max} etter brannalarmen er utløst (ref. Figur 4-15).



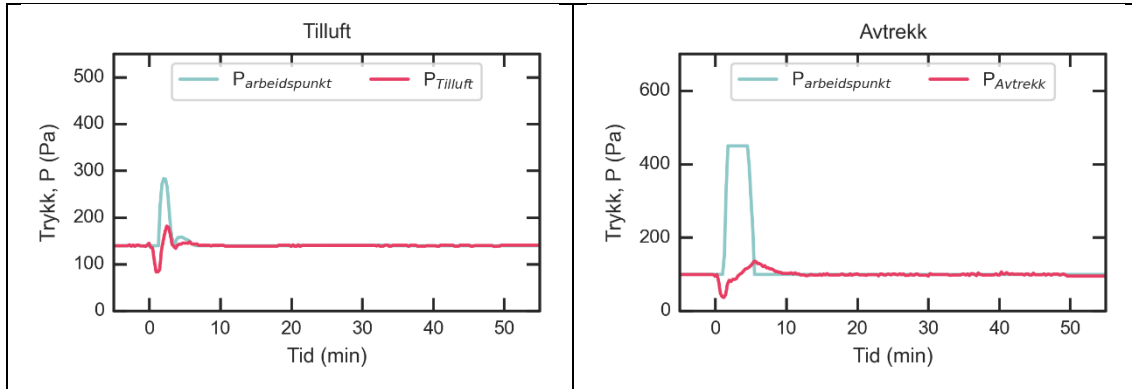
Figur 4-11: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i kontorets tilluft og avtrekk for test 5. For denne testen var brannen plassert i korridoren.



Figur 4-12: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 5. For denne testen var brannen plassert i korridoren.

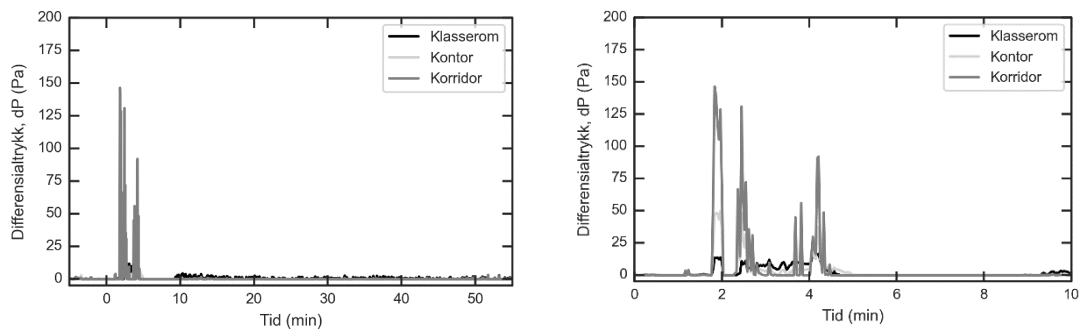


Figur 4-13: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 5.

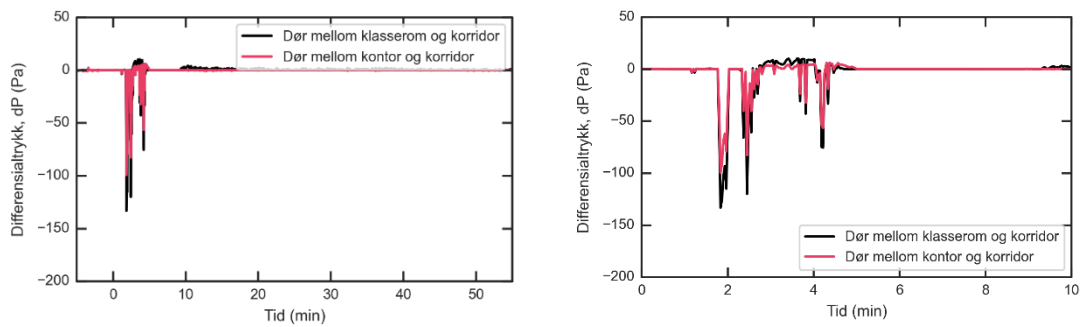


Figur 4-14: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekkssiden (høyre) for test 5. Maksimums- og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.

Som for i test 2 var batteribrannen i test 5 begrenset til noen få minutter. Videre hadde også denne brannen flere karakteristiske trykktopper, se Figur 4-16, som kan forklares ved propagering av brannen til nye battericeller. Trykkoppbyggingen i korridoren påvirket trykkforskjellen over begge de innvendige dørene, da begge dørene ledet inn til brannrommet (se Figur 4-17). På det meste var trykkdifferansen ca. 130 Pa, men varigheten av trykket over 100 Pa, som kan anses som kritisk [10], var kort.



Figur 4-15: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 5. Venstre figuren viser hele testforløpet. Høyre figuren viser perioden med høyest trykkøkningene.



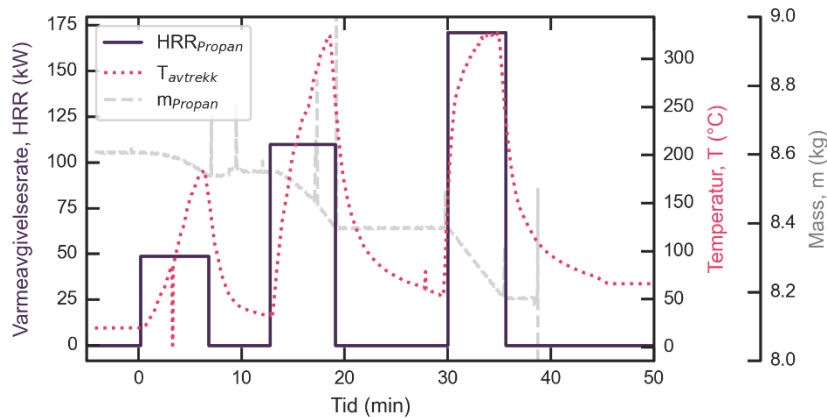
Figur 4-16: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 5. Tykkdifferansen over dør mellom klasserom og korridor ($P_{\text{klasserom}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med svart og trykkdifferansen over dør mellom kontor og korridor ($P_{\text{kontor}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med rødt. Venstre figuren viser hele testforløpet. Høyre figuren viser perioden med høyest trykkøkningene.

3.3 Test 7

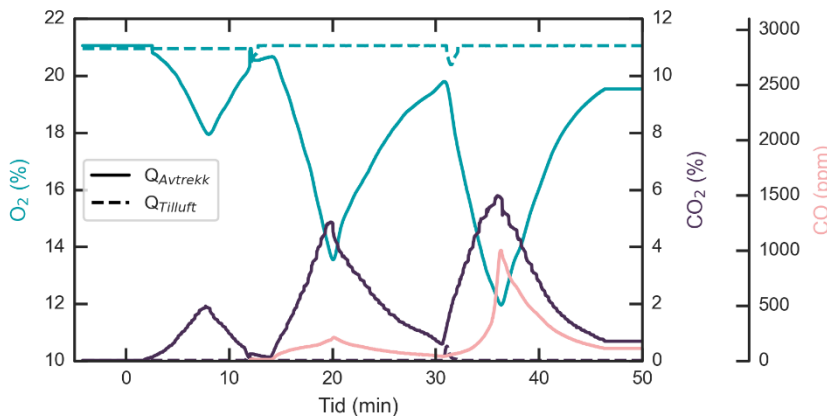
Test 7 benyttet kun propan som brensel og hadde tre etterfølgende branner med økende varmeavgivelse, se Figur 4-18.

Oksygenkonsentrasjonen i rommet er vist i Figur 4-19. Konsentrasjonen sank i løpet av testen til ca. 14 % under brann nr. 2 og til litt under 12 % under brann nr. 3. Dette kan forklares av at en større brann krever en større mengde oksygen, og at luftutskiftingen gjennom ventilasjonsanlegget ikke klarer å levere nok frisk luft til å opprettholde konsentrasjonen på 21 %.

Det lave oksygenivået bidro også til en mer ufullstendig, underventilert forbrenning, karakterisert av økende konsentrasjon av CO_2 . Siden avtrekksventilen var plassert under taket, er det målte oksygenivået ikke direkte representativt for oksygentilgangen til gassbrenneren som var plassert på gulvet. Likevel gir test 7 en indikasjon på hvilken brannstørrelse som er mulig å oppnå i kontoret ved de gitte forholdene før brannen blir underventilert og potensielt kveles etter hvert.



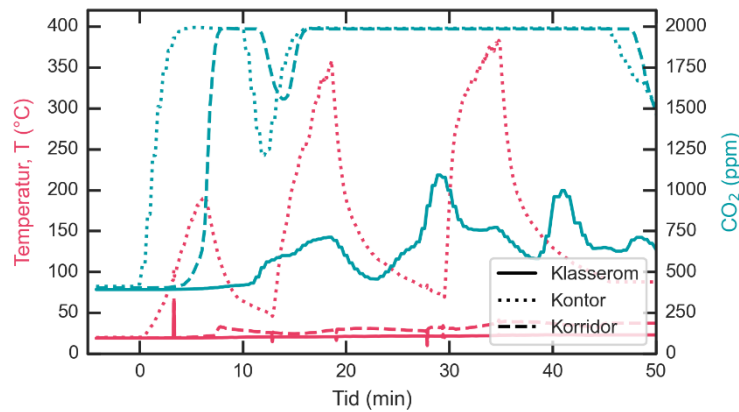
Figur 4-17: Temperatur, T , målt i avtrekk og varmeavgivelsesrate, HRR, for gass i test 7. Den grå kurven viser gassmassen i gassbeholderen.



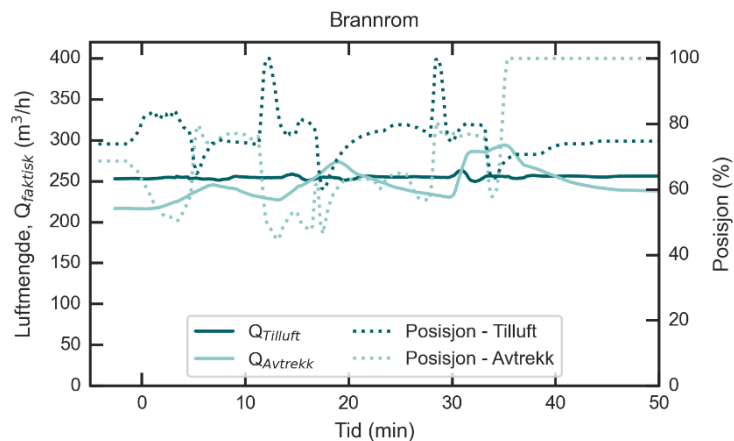
Figur 4-18: Konsentrasjon av O_2 (turkis), CO_2 (svart) og CO (rød) målt i tilluft (stiplet linje) og avtrekk (heltrukken linje) for test 7. OBS! gass-sensorene i tilluft og avtrekk ble byttet etter den første brannen fordi CO sensoren i avtrekket var ødelagt. Derfor vises avtrekksmålingene som måling tilluft og omvendt i første brannen.

Figur 4-20 viser temperatur- og CO_2 i alle tre rommene. Gassmålingene viser at røyk spredte seg fra kontoret til korridoren omtrent fem minutter etter branneteksjon av den første brannen. Ventilasjonsanlegget klarte å levere den prosjekterte luftmengden under hele brannforløpet som det vises i Figur 4-21. Røykspredningen fra brannrommet til korridoren skjedde altså ikke via tilbakeslag i tilluftskanalen. Det vil si at røyken må ha spredd seg enten via avtrekkskanalen, eller utettheter i vegg mellom kontoret og korridoren. Disse to mulige spredningsmekanismene vil bli diskutert i de påfølgende avsnittene (se Figur 4-22 og Figur 4-23 samt tilhørende diskusjon).

Konsentrasjonen av CO og CO_2 sank igjen mellom den første og andre brannen, når dørene ble åpnet for en kortere periode. På grunn av åpningen av dørene mellom brannene er det ikke mulig å evaluere spredningen av røyk til korridoren etter den første brannen.

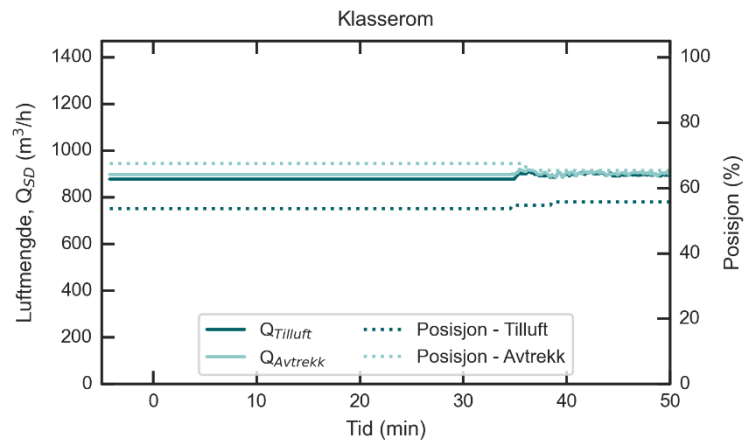


Figur 4-19: Temperatur (rød) og CO₂ konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD anleggets veggensensorer for test 7. Målegrensen for CO₂ var 2000 ppm. Heltrukken linje representerer klasserommet, prikket linje representerer kontoret og stiplet linje representerer korridoren.

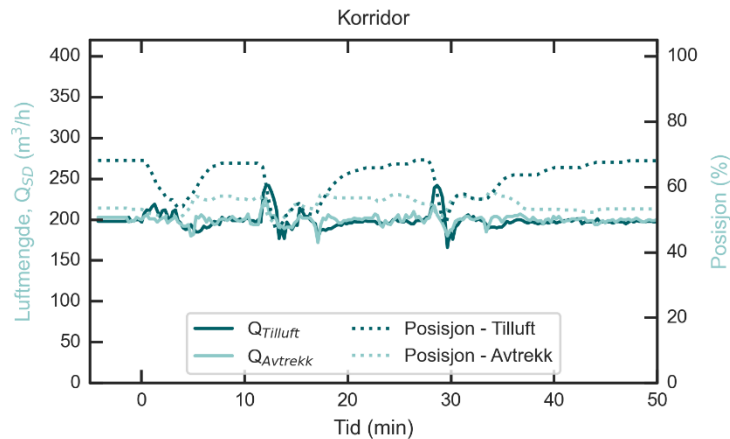


Figur 4-20: Faktiske luftmengder, Q, og spjeldposisjoner i brannrommets tilluft og avtrekk for test 7.

Figur 4-22 viser tillufts- og avtrekksluftmengdene i klasserommet og Figur 4-23 viser luftmengdene til og fra korridoren. Avtrekket fra disse to rommene befinner seg nedstrøms av kontorets avtrekk i kanalnettet (se Figur 2-4). Siden ventilasjonsanlegget klarte å opprettholde den prosjekterte avtrekksluftmengden fra klasserommet og kontoret, tyder det på at røykspredningen til korridoren heller ikke skjedde via avtrekkskanalen. Dermed er spredningen via utettheter i vegg mellom kontor og korridor, spesiell døren, den eneste mulige vei for røykspredningen. Spredningen via utettheter rund døren diskuteres nærmere i forbindelse med test 8, hvor denne spredningsmekanismen ble tydelig observert (se kapittel 3.4). Figur 4-23 viser at tillufts- og avtrekksposisjon i korridoren endres under hele testforløpet for å kompensere for fluktuierende luftmengder, mens spjeldene i klasserommet ikke ble berørt av brannen i kontoret, frem til ca. 35 minutter, da avtrekksposjeldet i kontoret feilet og åpnet helt. Se del 1 av rapporten [5] for mer informasjon om feilen som oppstod.

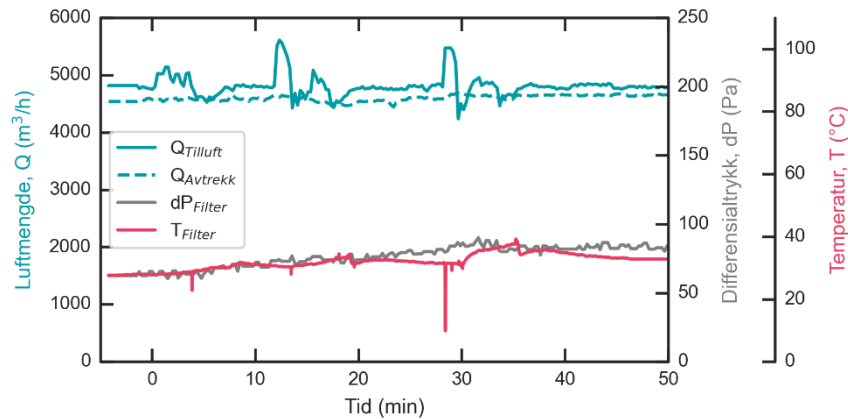


Figur 4-21: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i klasserommets tilluft og avtrekk for test 7. For denne testen var brannen plassert i kontoret.

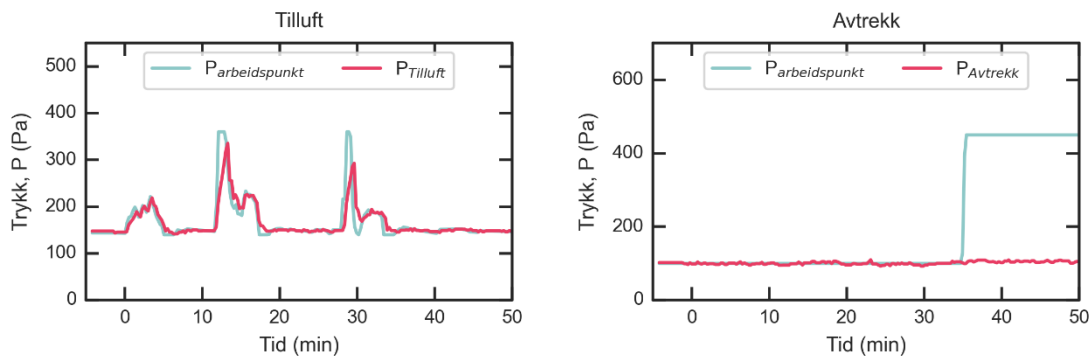


Figur 4-22: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 7. For denne testen var brannen plassert i kontoret.

Tilsvarende som for test 1-6 med brann i elsparkesykkel, var trykktapet over avtrekksfilteret godt under 100 Pa også i test 7 (se Figur 4-24). I motsetning til test 1-3, som også startet med maksimale prosjekterte luftmengder (V_{max}), ser man større endringer i arbeidstrykket på tilluftssiden i test 7 (se Figur 4-25). Arbeidstrykket økte tydelig for hver av de tre brannene i testen. Endringen på avtrekksiden etter rundt 35 minutter er på grunn av spjeldfeilen som førte til at anlegget målte null luftmengde i avtrekket fra kontoret, selv om spjeldet var helt åpent.

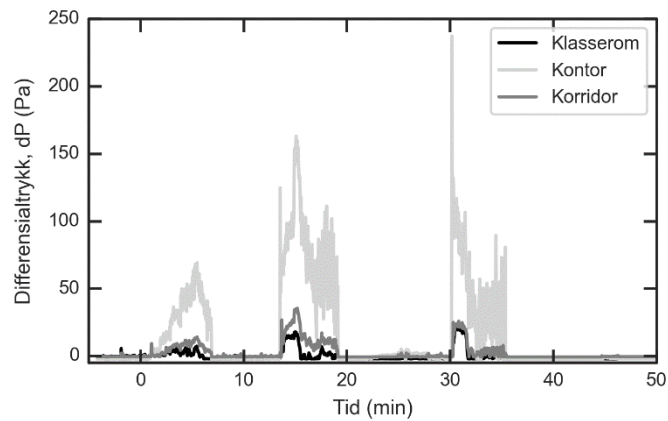


Figur 4-23: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 7.

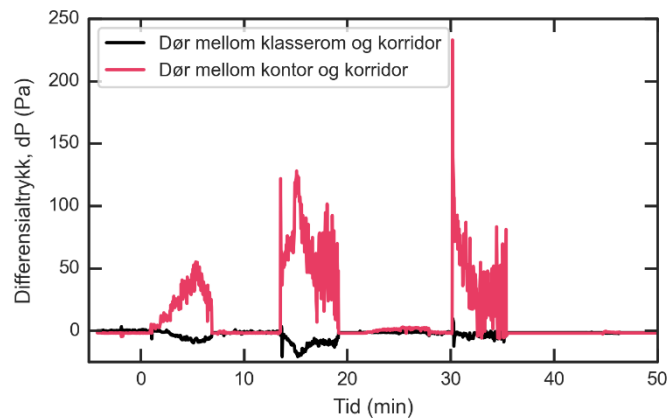


Figur 4-24: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekksiden (høyre) for test 7. Maksimums og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.

Figur 4-26 viser at alle de tre brannene førte til en trykkøkning i brannrommet som økte proporsjonalt med den økende brannstørrelsen og i starten av den siste og største brannen ble et maksimalt trykk på 237 Pa oppnådd. Trykket økte også i de andre rommene, men holdte seg under henholdsvis 25 Pa og 35 Pa i klasserommet og kontoret. Når trykket i klasserommet og korridoren økte like mye ble ikke døren mellom disse to rommene påvirket, men spesielt ved den andre brannen i test 7 økte trykket i korridoren mer enn i klasserommet, noe som førte til en trykkdifferanse på litt under 20 Pa som presset mot dørens åpningsretning (se Figur 4-27).



Figur 4-25: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 7.

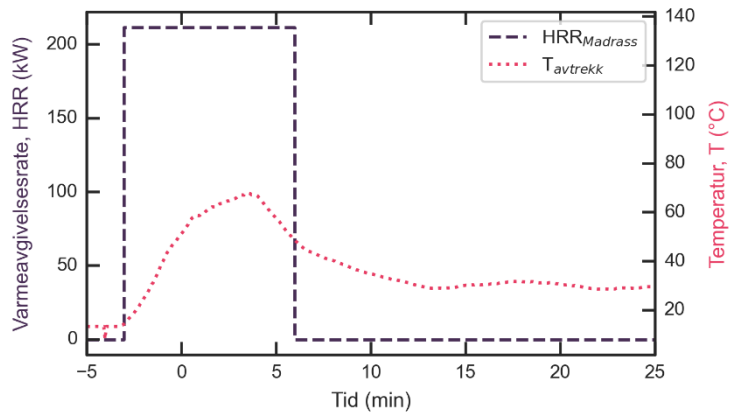


Figur 4-26: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 7. Trykkdifferansen over dør mellom klasserom og korridor ($P_{\text{klasserom}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med svart og trykkdifferansen over dør mellom kontor og korridor ($P_{\text{kontor}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med rødt.

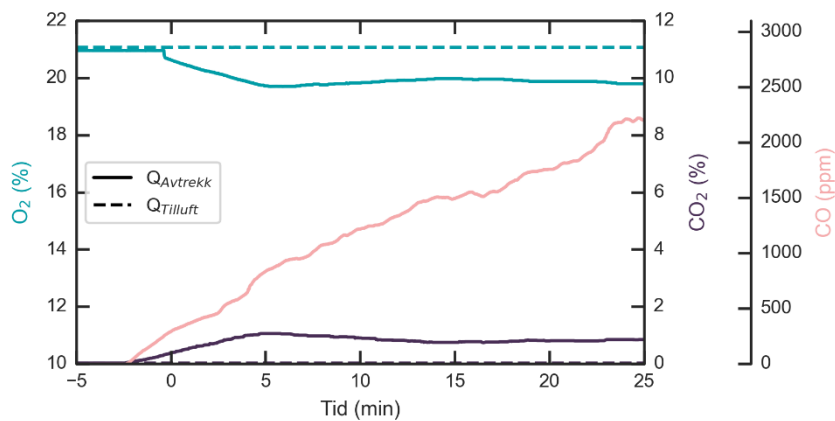
3.4 Test 8

I test 8 ble en skumgummimadrass brukt som brensel, og som beskrevet i kapittel 2.2.2 ble oksygentilgangen til madrassens overflate begrenset (se også delrapport 1 [5]). Varmeavgivelsesraten i Figur 4-28 er basert på gjennomsnittlig massetap beregnet av totalt massetap dividert på varighet av flammebrannen funnet gjennom videoanalyse. På grunn av svært dårlig sikt i rommet er det mulig at varigheten er undervurdert, og dermed varmeavgivelsesraten overvurdert. For å sammenligne test 8 med andre branner i kontoret er det derfor anbefalt å se på temperaturutviklingen i rommet som også vises i Figur 4-28. Fra figuren er det mulig å identifisere to faser i brannforløpet. Den første fasen varte til ca. fem minutter etter branddeteksjon og er karakterisert av økende temperatur, mens i den andre fasen sank temperaturen før den etter hvert stabiliserte seg på ca. 30 °C. En tilsvarende trend ble observert for O₂- og CO₂-konsentrasjonene i avtrekket som vist i Figur 4-29. CO-konsentrasjonen, derimot, økte kontinuerlig under hele brannforløpet, som tyder på en kraftig underventilert forbrenning. Dette skjedde til tross for at oksygenivået i avtrekket kun ble redusert med ca. 1

%. En forklaring kan være at forbrenningsgassene spredte seg mer langs gulvet, mens en del av tilluften ble sugd direkte inn i avtrekket uten å ha bidratt til forbrenningen. I tillegg ble oksygentilførselen til madrassen naturlig mindre etter hvert som madrassen brant opp, siden den resterende madrassen da var mer innestengt.

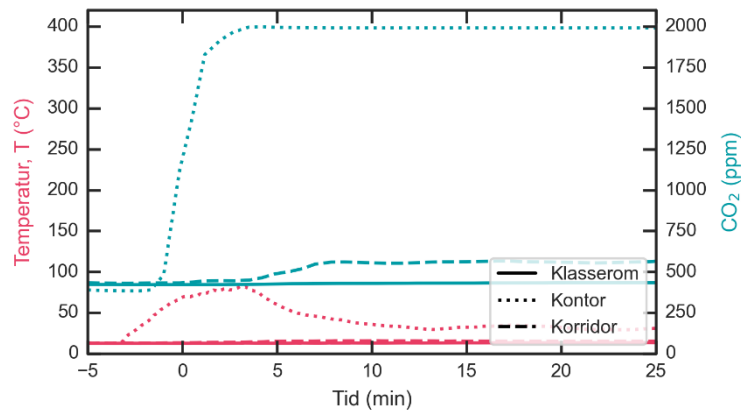


Figur 4-27: Temperatur, T , målt i avtrekk og varmeavgivelsesrate, HRR, fra madrassen i test 8.



Figur 4-28: Konsentrasjon av O_2 (turkis), CO_2 (svart) og CO (rød) målt i tilluft (stiplet linje) og avtrekk (heltrukken linje) for test 8.

Figur 4-30 viser at røyken klarte å spre seg fra brannrommet (kontoret) til korridoren. Økningen av CO i korridoren var imidlertid liten, og det var ingen signifikant røykspredning videre til klasserommet. Økningen av CO i korridoren sammenfalt med en avtakende temperatur i brannrommet, som indikerer økt CO-produksjon på grunn av mindre effektiv forbrenning.

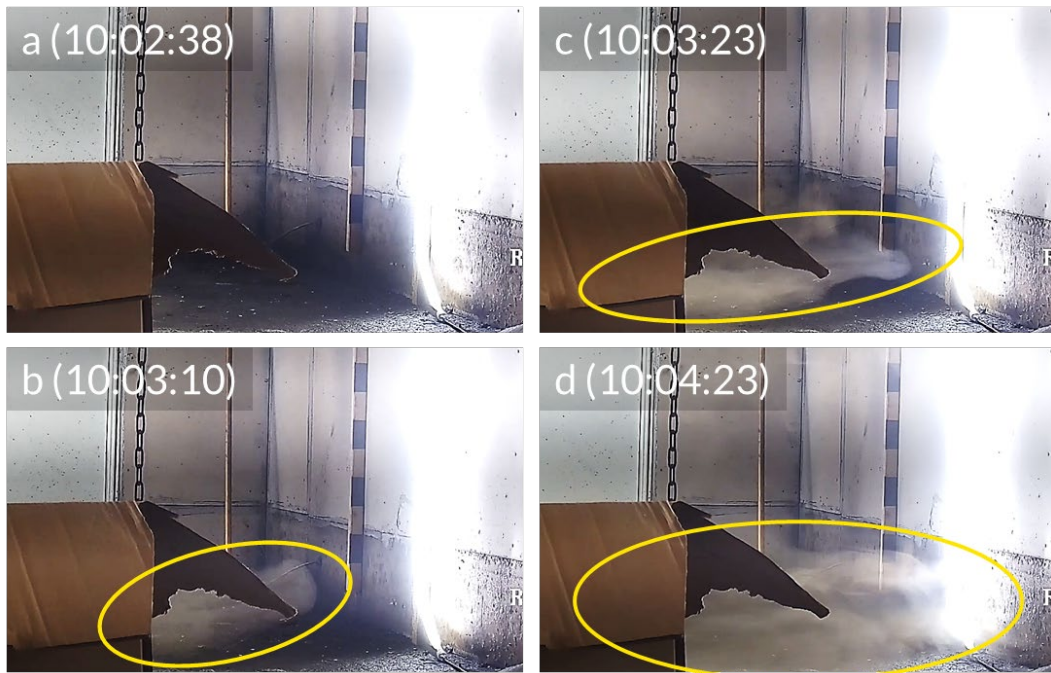


Figur 4-29: Temperatur (rød) og CO₂-konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD-anleggets veggsensorer for test 8. Målegrensen for CO₂ var 2000 ppm. Heltrukken linje representerer klasserommet, prikket linje representerer kontoret og stiplet linje representerer korridoren.

Figur 4-31 viser en serie av stillbilder tatt fra overvåkningskameraene i brannrommet og korridoren. Her vises brannstarten (-03:00), brannen ved deteksjon (00:00) og overgangen fra en klar synlig flammebrann til en mer avtakende brann i et helt røykfullt kontor (02:00 og 05:00). Ut fra disse bildene ser man at CO₂ økningen i korridoren (Figur 4-29) samsvarer med tidspunktet da hele brannrommet, helt ned til dørstokken, var røykfyllt. Selv om røyken sprer seg til korridoren, er sikten der fortsatt tilstrekkelig for å se hele lengden av korridoren, altså 15 meter. I en senere bildesekvens, som vist i Figur 4-32, fra et kamera som var plassert nærmere kontordøren, rettet mot utdøren ser man tydelig at røyken presses ut fra kontoret og spres langs gulvet på tvers av korridoren.

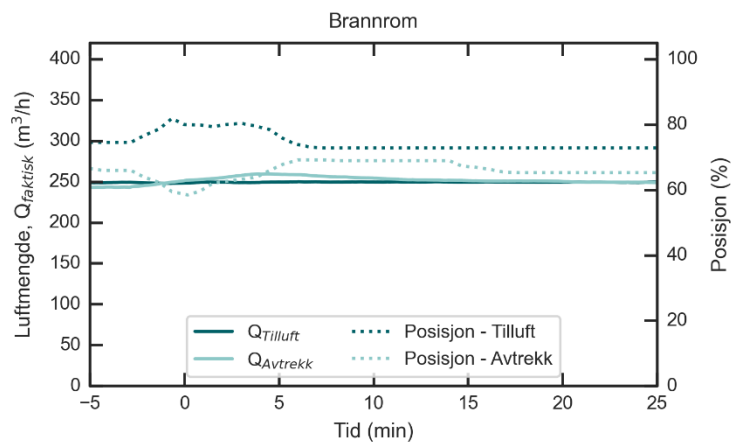


Figur 4-30: Bilde fra kontoret (venstre) og korridoren (høyre) ved brannstarten (-03:00), brannen ved deteksjon (00:00) og overgangen fra en klar synlig flammebrann til en mer avtakende brann i et helt røykfullt kontor (02:00 og 05:00).

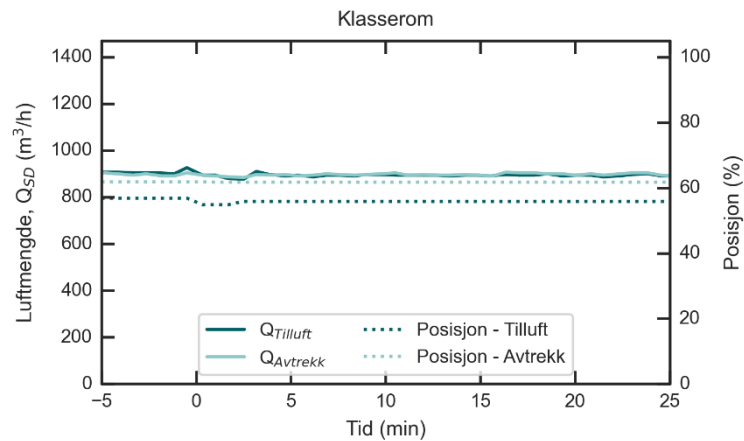


Figur 4-31: Bildeserie (a til d) fra test 8 som viser røykspredning langs korridoren. Døren som vises i bildene er utedøren. Kontoret befinner seg til venstre av bildet. Bildene er delvis oppstruert av en pappeske som sto utenfor kontoret. Område med mest røykspredningen er markert med et gult sirkel. Tid oppgitt som hh:mm:ss.

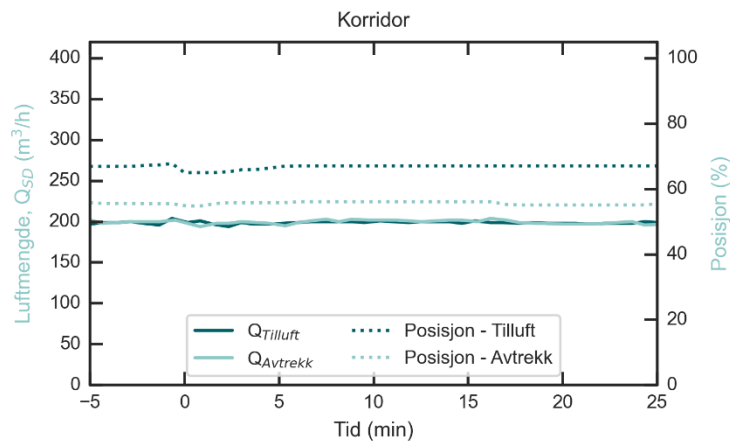
Figur 4-33 viser tillufts- og avtrekksluftmengden i brannrommet. Ventilasjonsanlegget klarte å opprettholde den prosjekterte luftmengden under hele testperioden. Det vil si at røyken ikke spredte seg via tilbakeslag i tilluftskanalen. Dette underbygges også av Figur 4-34 og Figur 4-35, som viser at ventilasjonsanlegget klarte å opprettholde de prosjekterte luftmengdene under hele testperioden både i klasserom og korridor.



Figur 4-32: Faktiske luftmengder, Q , og spjeldposisjoner i brannrommets tilluft og avtrekk for test 8.



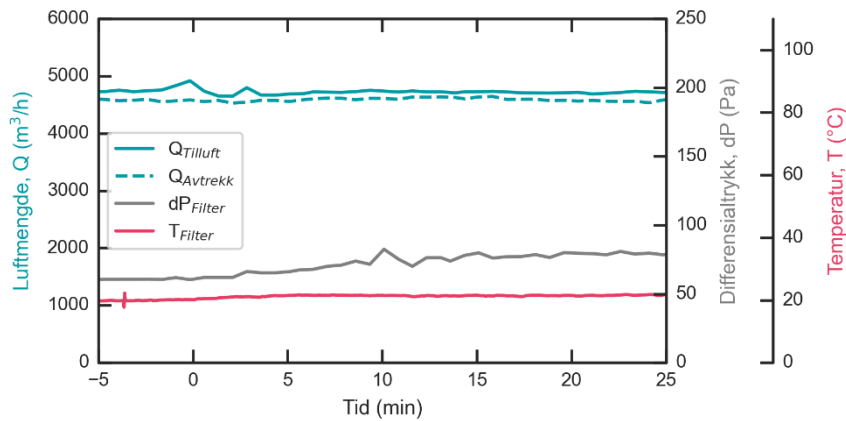
Figur 4-33: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i klasserommets tilluft og avtrekk for test 8. For denne testen var brannen plassert i kontoret.



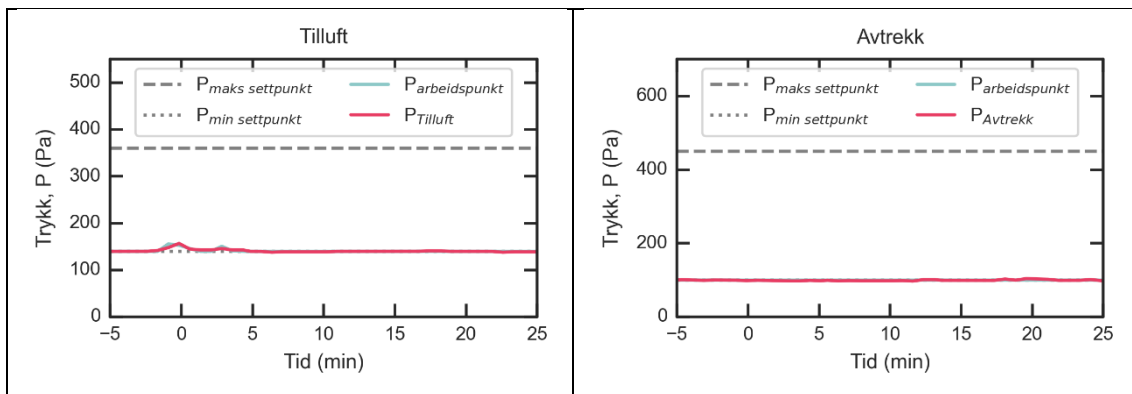
Figur 4-34: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 8. For denne testen var brannen plassert i kontoret.

Av alle³ testene i kontoret førte test 8 til den største økningen i filtervekten med 84 g, og trykktapet over filteret økte jevnt i løpet av brannen (se Figur 4-36). Likevel klarte ventilasjonsanlegget å holde tilluft og avtrekk i balanse. Økningen av trykktapet over avtrekksfilter var sammenlignbart med økningen som ble observert i de tidligere testene. Trykket på tilluftssiden var relativt konstant med kun noen små økninger i det aggregatet giret opp fra minimal til maksimal prosjektert luftmengde (se Figur 4-37).

³ I test 7 ble filtervektet ikke logget.

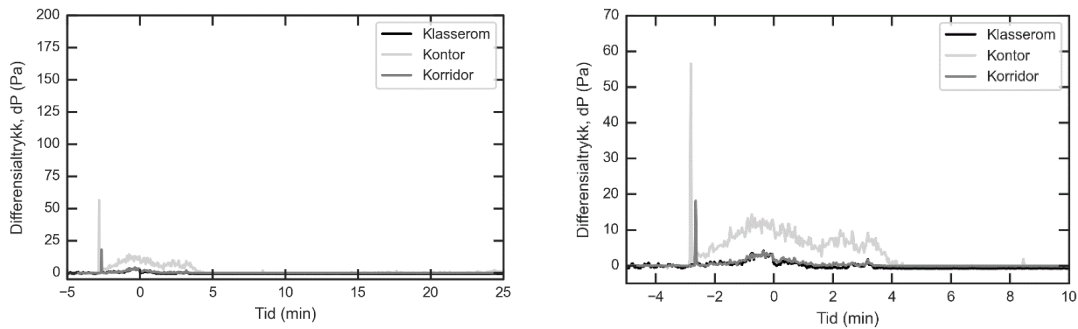


Figur 4-35: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 8.

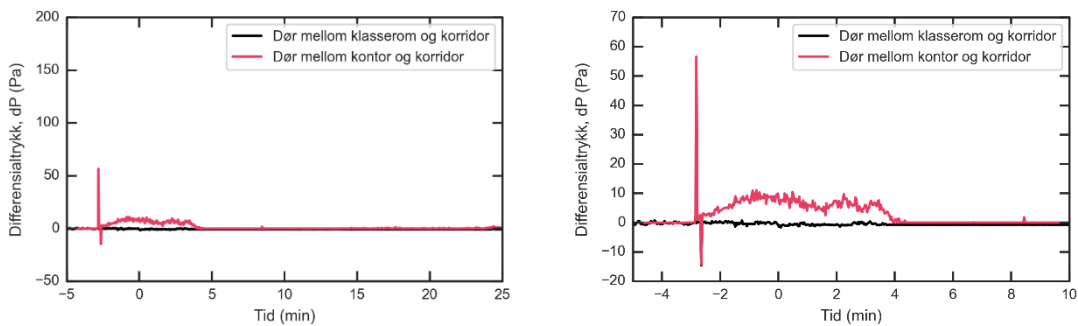


Figur 4-36: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekksiden (høyre) for test 8. Maksimums og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.

Figur 4-38 viser trykkoppbyggingen i rommene på grunn av brannen. Den første trykktoppen er sannsynligvis relatert til tennkilden som inneholdte 120 ml heptan (se delrapport 1 [5]). Deretter økte trykket saktere på grunn av selve madrassbrannen. Trykket i brannrommet holdt seg i hele denne fasen under 20 Pa og ventilasjonsanlegget klarte å kompensere for trykkoppbyggingen ved å åpne tilluftsspjeldet og lukke avtrekksspjeldet noe (se Figur 4-33). Figur 4-39 viser trykkdifferansen over de to innvendige dørene. Kun døren til brannrommet viser en målbar trykkforskjell. Det vil si at brannen ikke påvirket dørmiljøet i resten av bygget.



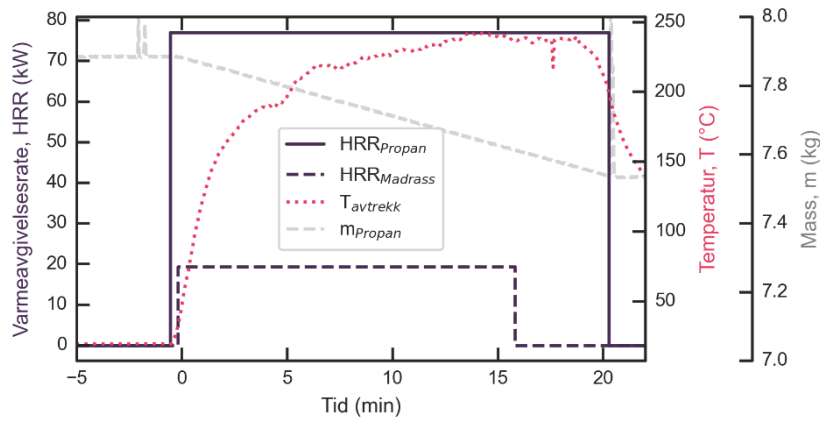
Figur 4-37: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 8. Venstre figuren viser hele testforløpet. Høyre figuren viser perioden med høyest trykkøkningene.



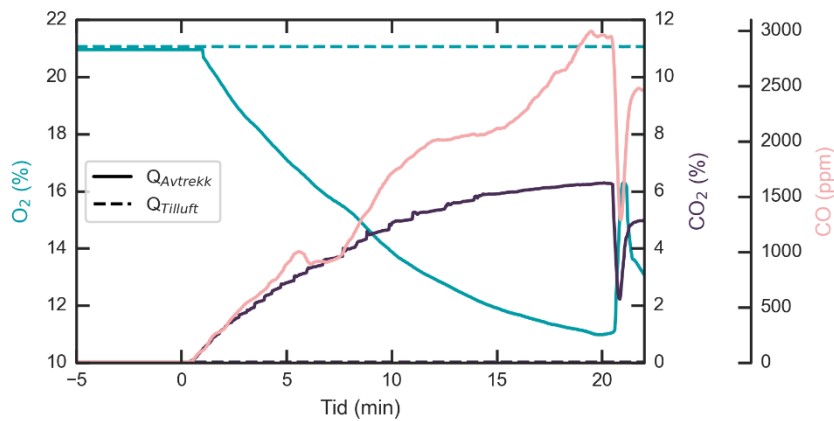
Figur 4-38: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 8. Den venstre figuren viser hele testforløpet, mens den høyre figuren viser perioden med de høyeste trykkøkningene.

3.5 Test 10

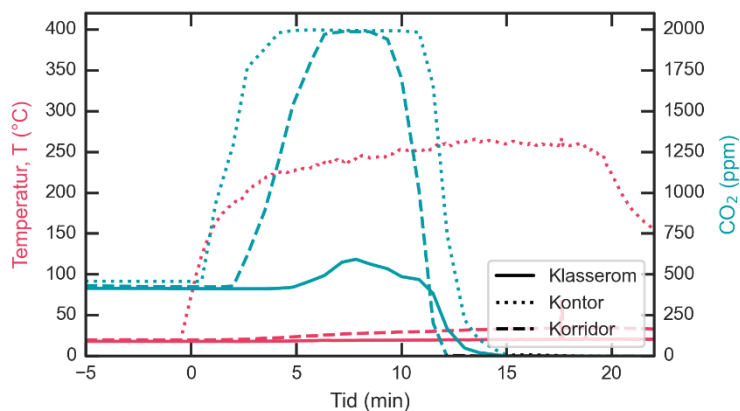
Test 10 brukte en kombinasjon av madrass og propangass som brensel. Figur 4-40 viser individuelle estimater av varmeavgivelsesraten for begge typer brensel. Summen av begge brenslene gir en brann som er i samme størrelsesorden som den andre brannen i test 7, men med en lengre varighet. I test 10 førte brannen til at både tillufts- og avtrekksspjeldet feilet. Tilluftspjeldet lukket seg helt på grunn av feilen, mens avtrekksspjeldet åpnet seg helt (se Figur 4-44). Dette skjedde ca. syv minutter etter branddeteksjon. Dette samsvarer med tidspunktet når CO/CO₂-forholdet begynte å endre seg betydelig (se Figur 4-41), som tyder på en overgang til en mer underventilert brann. Da tilluften ble lukket ble oksygentilførselen og dermed brannstørrelsen begrenset til den gjenværende luftmengden i rommet. Figur 4-42 viser at brannen førte til en målbar økning av CO₂ i både korridor og klasserommet. Økningen i klasserommet var imidlertid minimal. Tilsvarende som i andre tester var mengden røyk som ble observert ikke nok til å endre sikten i korridoren.



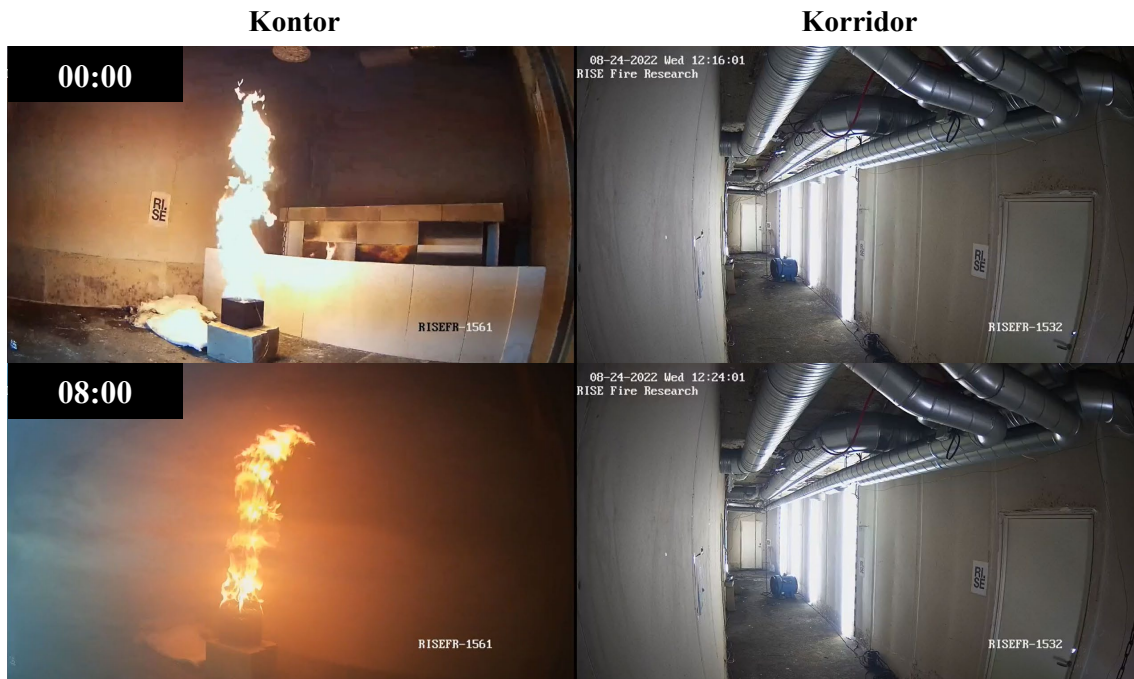
Figur 4-39: Temperatur, T , målt i avtrekk og varmeavgivelsesrate, HRR, for gass (heltrukken linje) og madrass (stiplet linje) i test 10. Den grå kurven viser gassmassen i gassbeholderen.



Figur 4-40: Konsentrasjon av O_2 (turkis), CO_2 (svart) og CO (rød) målt i tilluft (stiplet linje) og avtrekk (heltrukken linje) for test 10.

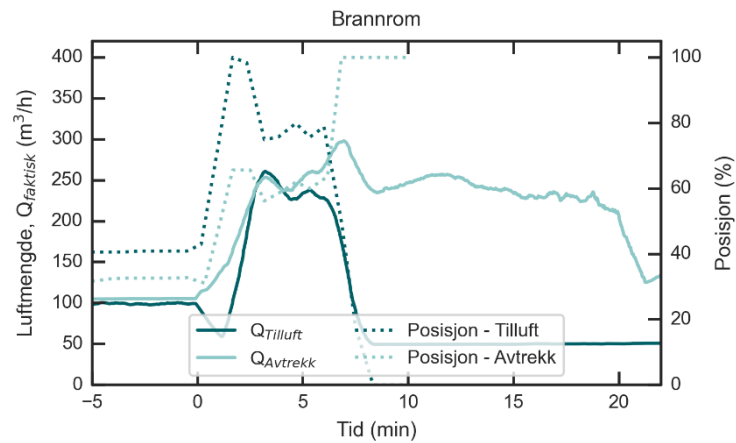


Figur 4-41: Temperatur (rød) og CO_2 konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD-anleggets veggensorer for test 10. Målegrensen for CO_2 var 2000 ppm.

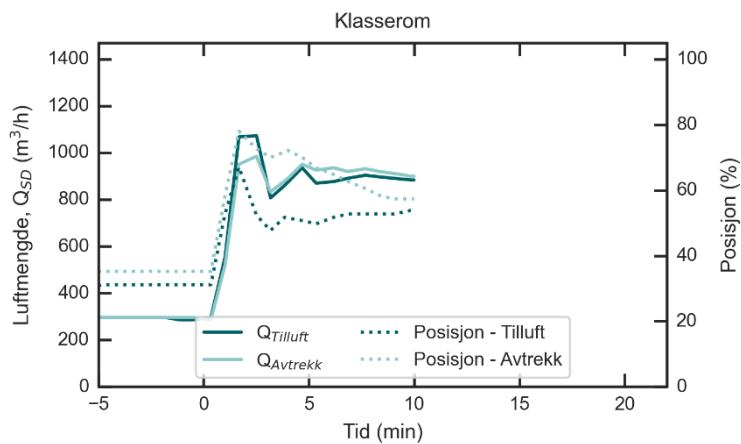


Figur 4-42: Bilde fra kontoret (øvre venstre) og korridoren (øvre høyre) ved branddeteksjon i test 10 og kontoret (nedre venstre) og korridoren (nedre høyre) 8 minutter etter deteksjon.

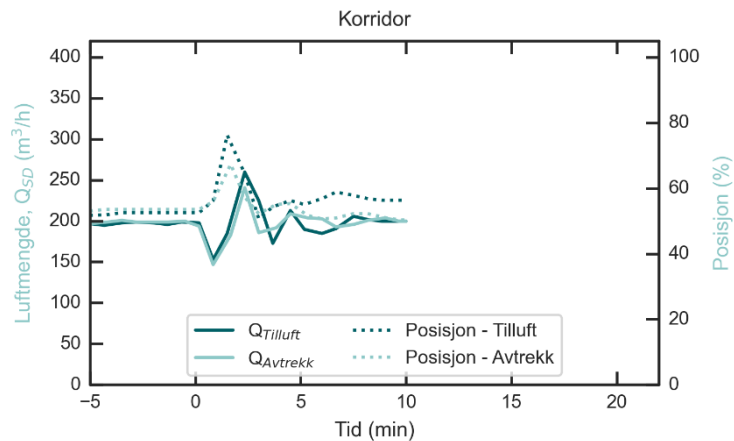
Figur 4-44 viser luftmengdene til brannrommet før og etter at tilluftspjeldet stengte og avtrekkspjeldet åpnet på grunn av feil. Etter at spjeldene feilet, kortsluttet 24V strømforsyningen. Figuren viser derfor ingen spjeldposisjon etter kortslutningen. Siden tilluftskanalen fortsatt var trykksatt var det ingen røykspredning via tilluftskanalen. En nøyaktig vurdering av situasjonen, utenom at funksjonen av ventilasjonsanlegget ikke lenger er ivaretatt, er utfordrende, siden målingene fra spjeldene etter kortslutningen mangler (se Figur 4-45 og Figur 4-46).



Figur 4-43: Faktiske luftmengder, Q , og spjeldposisjoner i brannrommets tilluft og avtrekk for test 10. OBS! Etter at strømforsyningen ble kortslettet mistet SD-systemet kommunikasjonen med spjeldene.

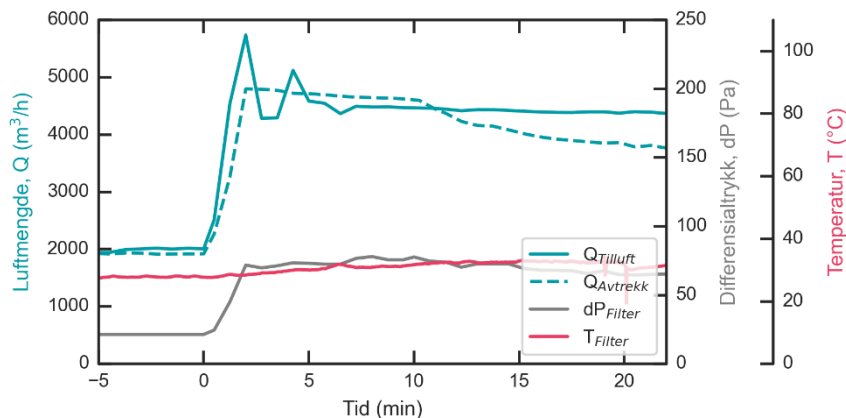


Figur 4-44: Luftmengder målt med SD-anleggets sensorer og spjeldposisjoner i klasserommets tilluft og avtrekk for test 10. For denne testen var brannen plassert i kontoret. OBS! Etter at strømforsyningen ble kortslettet mistet SD-systemet kommunikasjonen med spjeldene.



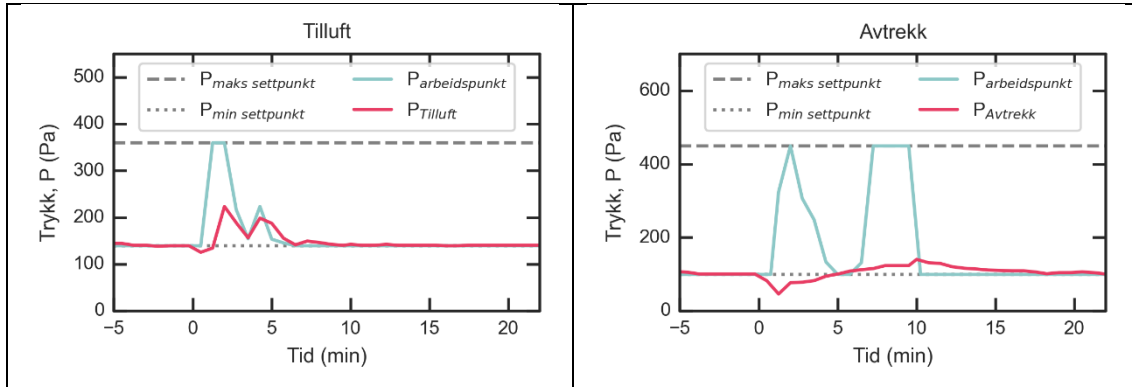
Figur 4-45: Luftmengder målt med SD-anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 10. For denne testen var brannen plassert i kontoret. **OBS!** Etter at strømforsyningen ble kortsluttet mistet SD-systemet kommunikasjonen med spjeldene.

Trykktapet over avtrekksfilteret viste ingen vesentlig økning etter at aggregatet hadde giret opp luftmengden tilsvarende V_{max} (se Figur 4-47). Dette betyr imidlertid ikke at filteret ikke har samlet opp sot fra brannrøyken, siden trykktapet også varierer avhengig av strømningshastigheten. Etter ca. 10 minutter var det en tydelig reduksjon i avtrekksluftmengden, som antageligvis skyldes spjeldfeilene, kortslutningen og tap av kommunikasjonen, og ikke direkte på grunn av tettingen av filteret. Vektøkningen av filteret var på 11 g, og den minste økningen sammenlignet med de andre målte testene.



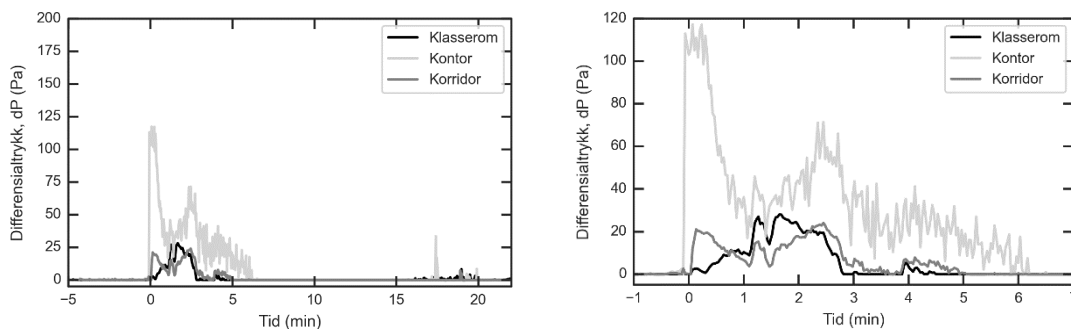
Figur 4-46: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP, over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 10.

Figur 4-48 viser hvordan aggregatet påvirkes av de forskjellige feilmekanismene. Da målingene i avtrekks-spjeldet feilet på grunn av brudd på slanger, trodde systemet at det ikke lenger ble trukket luft fra brannrommet og responderte ved å øke arbeidspunktet til maks settpunkt. Arbeidspunktet fortsatte på maks fram til kommunikasjonen med spjeldene forsvant fullstendig etter rundt 10 minutter.

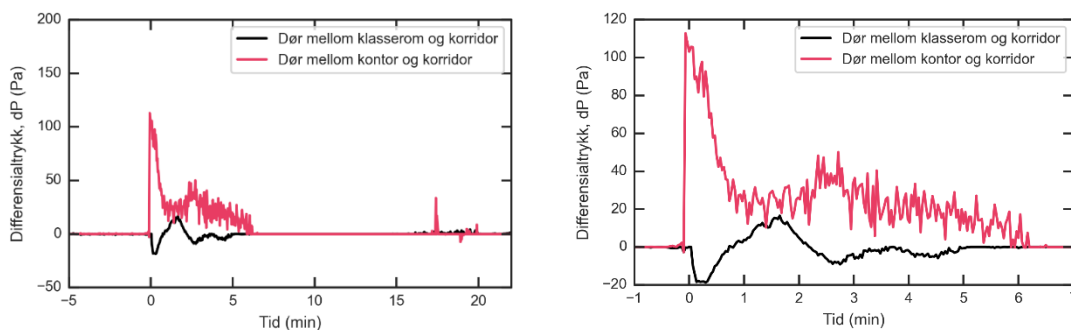


Figur 4-47: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekksiden (høyre) for test 10. Maksimums og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.

Figur 4-49 viser trykkfordelingen i bygget og Figur 4-50 viser den resulterende trykkdifferansen over de to innvendige dørene. I kontoret, altså i brannrommet, økte trykket veldig raskt til rundt 110 Pa etter brannstart og holdt seg der i ca. ett minutt før trykket ble redusert igjen. Trykket økte også i klasserommet og korridoren, men først etter branneteksjon. Det vil si at trykkøkningen i rommene utenom brannrommet falt samtidig med oppgiringen av ventilasjonssystemet. På grunn av de forskjellige trykkendringene i klasserommet og korridoren, endret trykkdifferansen seg over døren til klasserommet, men oversteg aldri en absoluttverdi på 20 Pa. Etter at spjeldene feilet, altså stenging av tilluftspjeldet og åpning av avtrekkspjeldet, ble trykket i bygget balansert mot omgivelsestrykket utenfor.



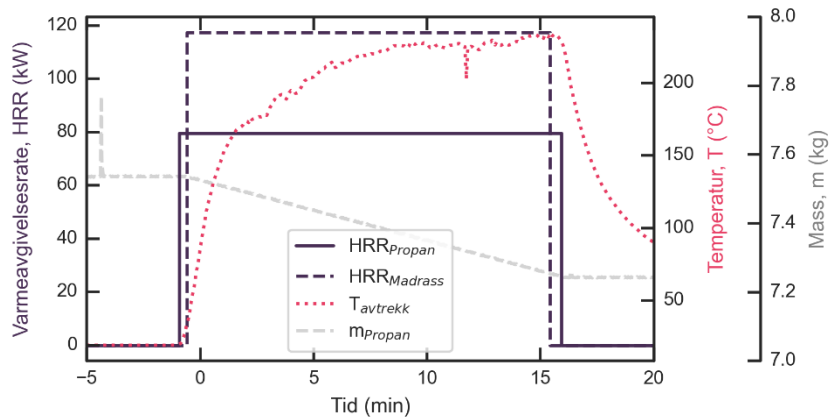
Figur 4-48: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 10. Venstre figuren viser hele testforløpet. Høyre figuren viser perioden med høyest trykkøkningene.



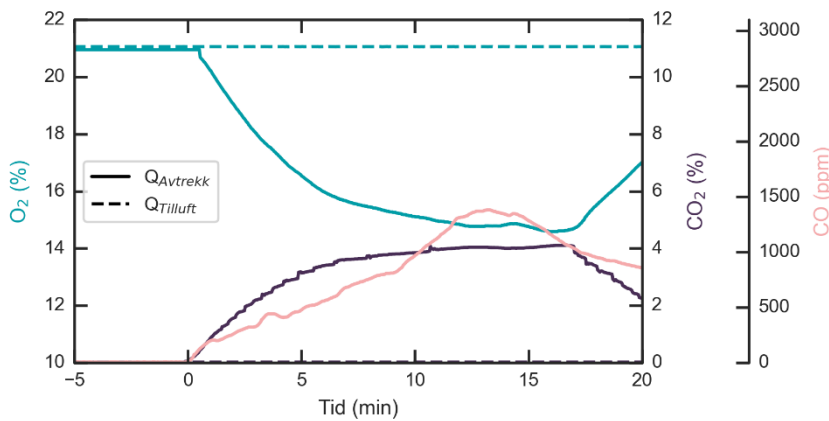
Figur 4-49: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 10. Venstre figur viser hele testforløpet. Høyre figur viser perioden med høyest trykkøkningene.

3.6 Test 11

Test 11 var en repetisjon av test 10 (gass + madrass), men med et annet type spjeld (TVE istedenfor LEO) (se kapittel 2.2 og delrapport 1 [5]). Selv om mengden propan som ble forbrent var identisk i de to testene, brant madrassene ulikt og førte til en noe større brann i test 11 (se Figur 4-51). Årsaken til at mer av madrassen brant opp skyldes trolig at tilluftsspjeldet i test 11 ikke feilet, selv om den ble skadet. På grunn av dette ble oksygennivået bedre opprettholdt i test 11 (se Figur 4-52) enn i test 10 (se Figur 4-41).

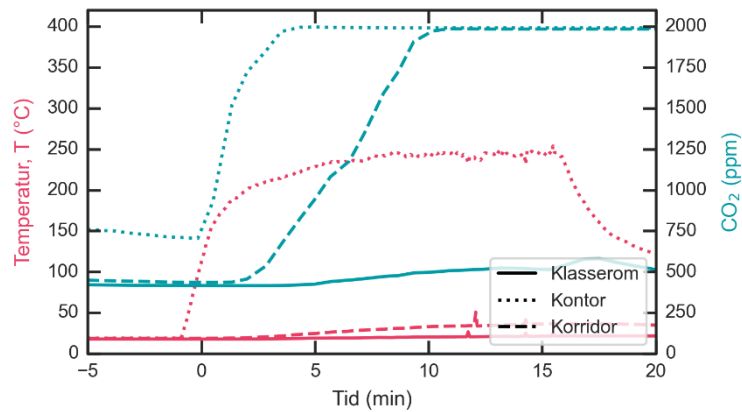


Figur 4-50: Temperatur, T , målt i avtrekk og varmeavgivelsesrate, HRR, for gass (heltrukken linje) og madrass (stiplet linje) i test 11. Den grå kurven viser gassmassen i gassbeholderen.



Figur 4-51: Konsentrasjon av O_2 (turkis), CO_2 (svart) og CO (rød) målt i tilluft (stiplet linje) og avtrekk (heltrukken linje) for test 11.

Brannen i kontoret førte til en økning i CO_2 -nivået i korridoren (Figur 4-53). Økningen i klasserommet var neglisjerbar. Bildene fra overvåkningsvideoene bekrefter røykspredning til korridoren, men siktforholdene ble ikke påvirket i vesentlig grad. Det var fortsatt mulig å se døra på motsatt side av korridoren (Figur 4-54).

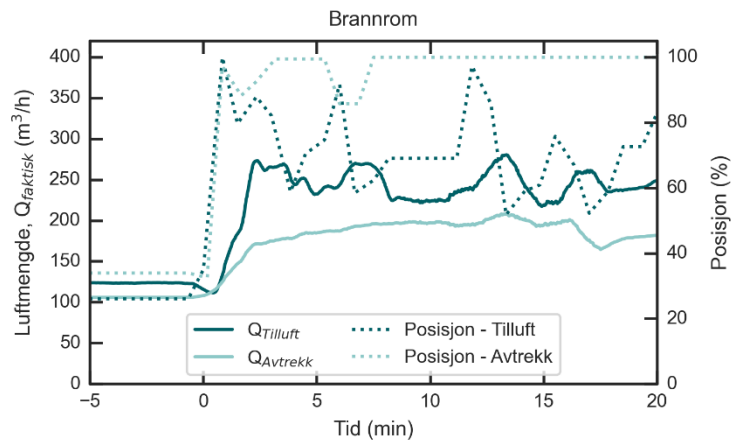


Figur 4-52: Temperatur (rød) og CO₂ konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD anleggets veggsensorer for test 11. Målegrensen for CO₂ var 2000 ppm.

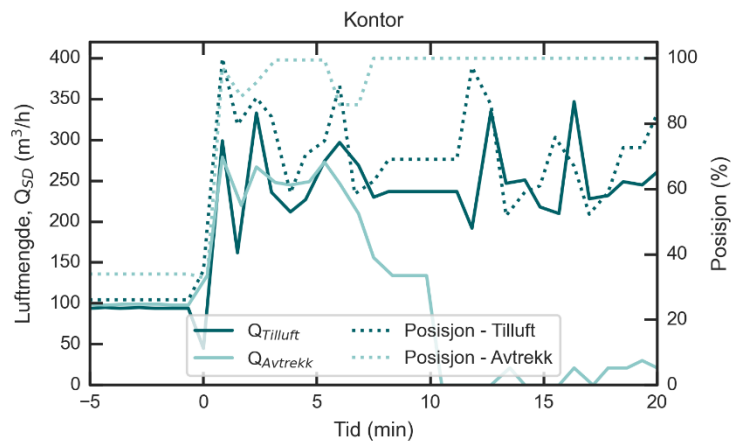


Figur 4-53: Bilde fra kontoret (øvre venstre) og korridoren (øvre høyre) 1 minutt etter start av test 11 og kontoret (nedre venstre) og korridoren (nedre høyre) etter 16 minutter.

Figur 4-55 viser tillufts- og avtrekksluftmengden i brannrommet, altså kontoret. Figuren viser en liten ubalanse, allerede før brannstart, som ikke samsvarer med SD-målingene fra kontoret, vist i Figur 4-56. Algoritmen som ble brukt for å kalibrere luftmålingene er basert på SD-målingene før spjeldene ble påvirket av brannen. Spjeldtypen som ble brukt i test 11 førte til større fluktuasjoner i det ventilasjonsanlegget giret opp, spesielt i avtrekkspjeldet (se Figur 4-56). Dette førte til et dårligere datagrunnlag for kalibreringen og dermed en for høy måling av avtrekksluftmengde i Figur 4-55. Likevel ser man fra målingene (Figur 4-55) at ventilasjonsanlegget opprettholdt tilluften til brannrommet under hele testforløpet, selv etter at spjeldbladet smeltet. At spjeldbladet smeltet førte for øvrig til at SD-anlegget rapporterte luftmengden lik null (Figur 4-56). Ettersom tilluften ble opprettholdt førte ikke trykkoppbyggingen i brannrommet til røykspredning via tilbakeslag i tilluftskanalen.

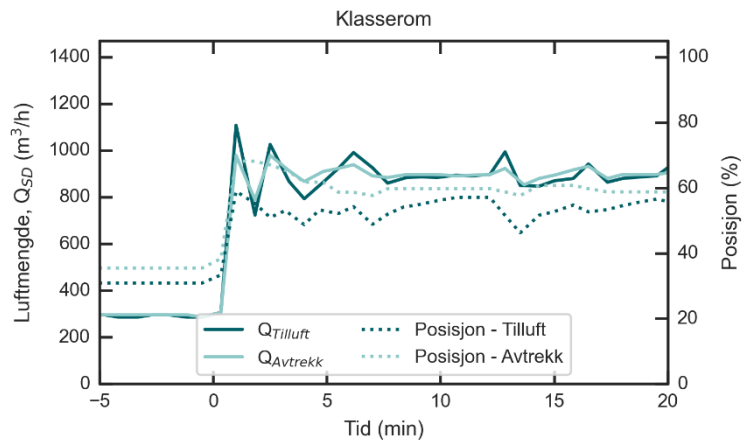


Figur 4-54: Faktiske luftmengder, Q , og spjeldposisjoner i brannrommets tilluft og avtrekk for test 11.

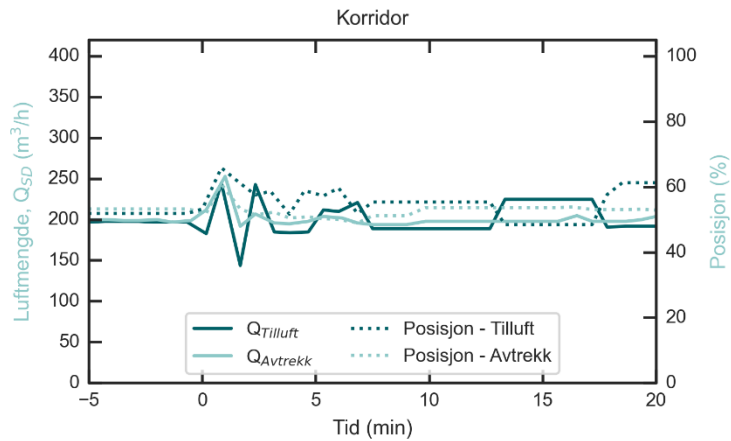


Figur 4-55: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i kontorets tilluft og avtrekk for test 11. For denne testen var brannen plassert i kontoret.

Ventilasjonsanlegget opprettholdt en balansert luftmengde både i klasserommet og i korridoren, som man ser fra målingene vist henholdsvis i Figur 4-57 og Figur 4-58.

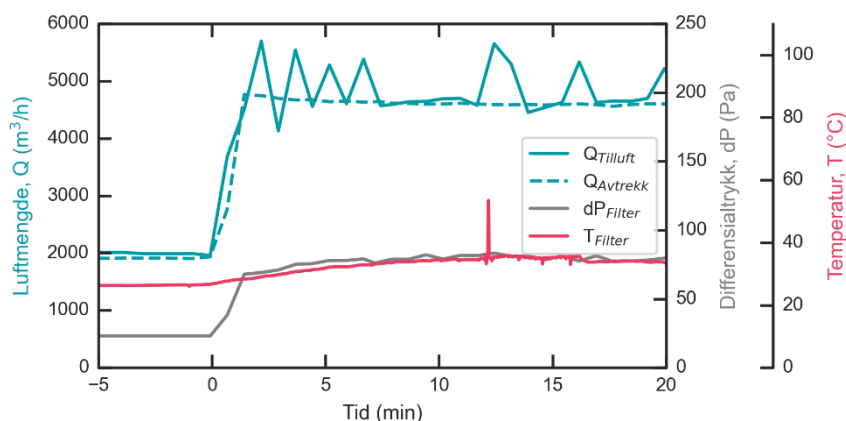


Figur 4-56: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i klasserommets tilluft og avtrekk for test 11. For denne testen var brannen plassert i kontoret.

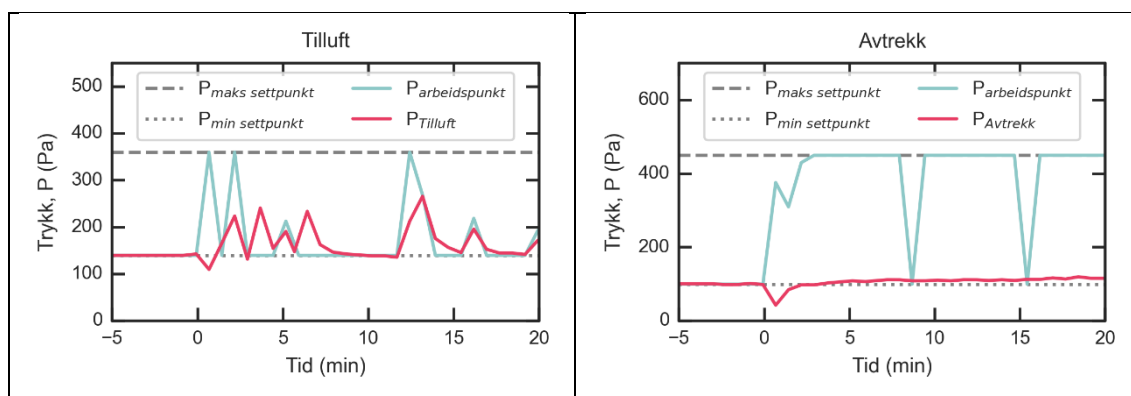


Figur 4-57: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 11. For denne testen var brannen plassert i kontoret.

Aggregatet klarte å levere en balansert luftmengde under hele testforløpet med et relativt konstant trykktap over avtrekksfilteret. Figur 4-60 viser arbeidstrykkene på tilluft- og avtrekksiden.

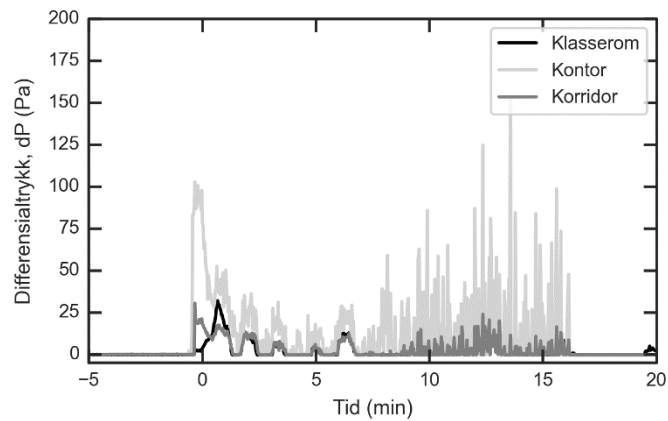


Figur 4-58: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 11.

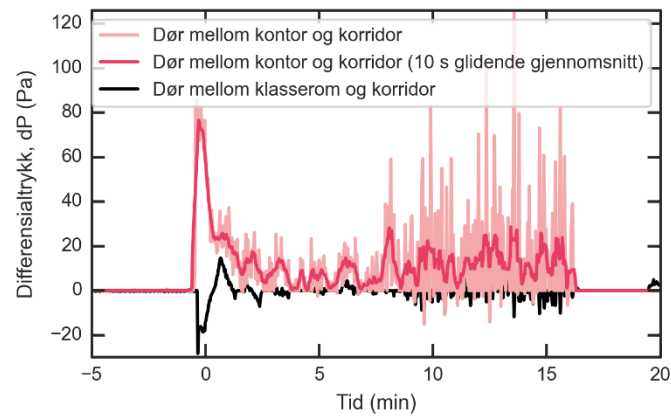


Figur 4-59: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekksiden (høyre) for test 11. Maksimums og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.

Figur 4-61 viser trykkfordelingen i bygget og Figur 4-62 viser den resulterende trykkdifferansen over de to innvendige dørene. I kontoret, altså i brannrommet, og i korridoren, økte trykket veldig raskt til rundt 100 Pa etter brannstart og holdt seg der i ca. ett minutt før trykket sank igjen. I korridoren, altså et tilstøtende rom, økte trykket også umiddelbart etter brannstarten. I klasserommet begynte trykket å øke ved brannstart. Trykktoppene som man ser i alle rom i løpet av de første fem til syv minuttene, og som ligger stort sett under 25 Pa, samfaller med fluktuasjonene som man også ser i målingene fra aggregatet. Gjennom mesteparten av testforløpet ble det registrert kun en minimal trykkdifferanse over døren til klasserommet, med unntak av i innreguleringsfasen da ventilasjonsanlegget giret opp. Men selv denne trykkdifferansen var mindre enn 20 Pa.



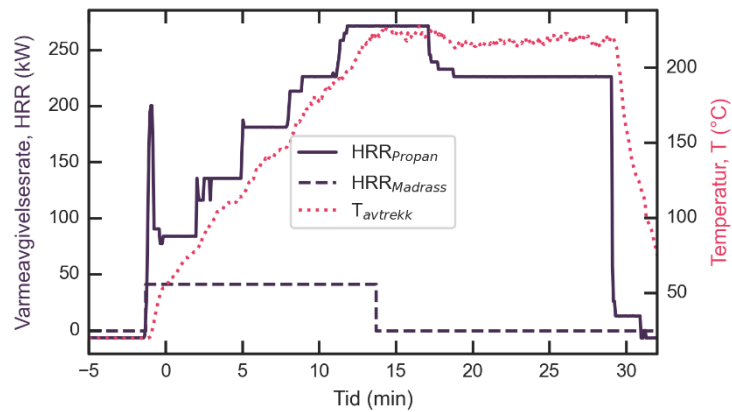
Figur 4-60: Trykddifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 11.



Figur 4-61: Trykddifferanse over de innvendige dørene for test 11.

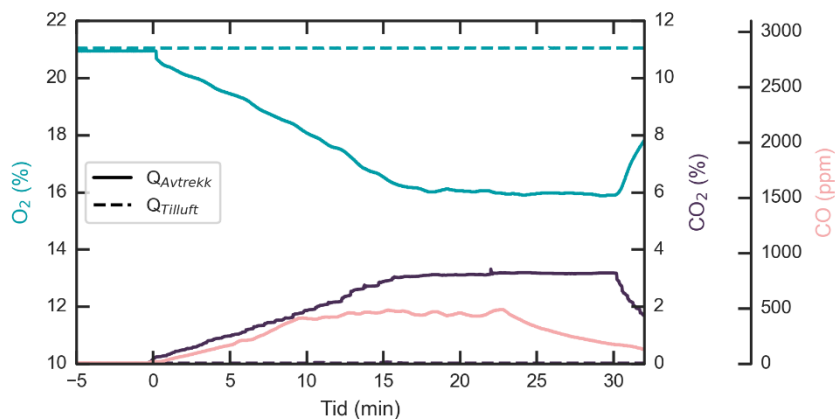
3.7 Test 12

I test 12 var brannen plassert i klasserommet og brannstørrelsen ble økt trinnvis fram til en maksimal varmeavgivelsesrate av 272 kW fra gassbrenneren. Etter 18 minutter ble gasstilførselen redusert for å begrense temperaturøkningen i aggregatet. Dette ble gjort for å forhindre skade på aggregatet. Temperaturen vises i Figur 4-70.



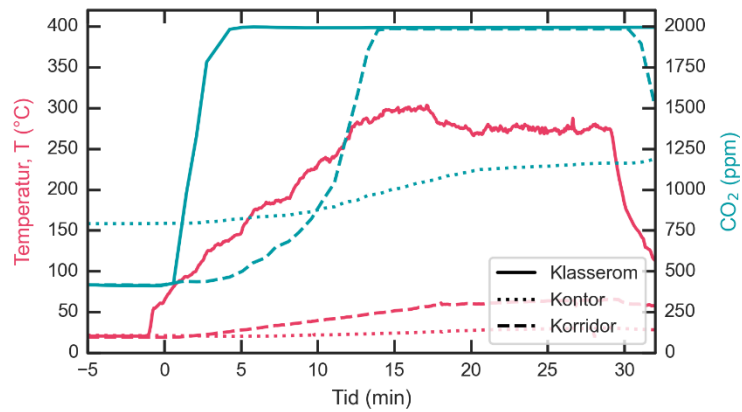
Figur 4-62: Temperatur, T , målt i avtrekk og varmeavgivelsesrate, HRR, for gass (heltrukken linje) og madrass (stiplet linje) i test 12.

Gasskonsentrasjonene i avtrekk og tilluft er gitt i Figur 4-64. O_2 -konsentrasjonen i avtrekksluften sank med økende brannstørrelse og stabiliserte seg på en verdi rundt 16 %. CO -konsentrasjonen stabiliserte seg tidligere, ca. 10 minutter, altså før gasstilførselen ble holdt konstant. Dette tyder på at forbrenningen av madrassen har en stor påvirkning på CO -konsentrasjonen.



Figur 4-63: Konsentrasjon av O_2 (turkis), CO_2 (svart) og CO (rød) målt i tilluft (stiplet linje) og avtrekk (heltrukken linje) for test 12.

CO_2 -konsentrasjonen, vist i Figur 4-65, viser at røyken sprer seg til korridoren og fører også til en marginal økning i kontoret. Figur 4-66 viser at døren på andre siden av korridoren fortsatt er synlig etter 25 minutter, selv om sikten er noe redusert på grunn av røyklekkasjen fra klasserommet.



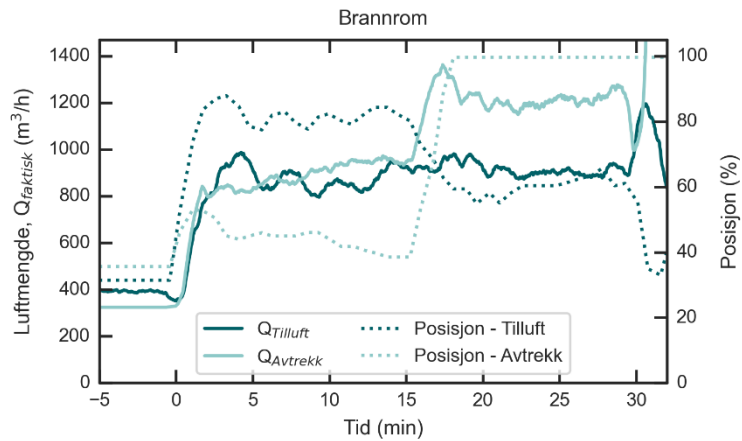
Figur 4-64: Temperatur (rød) og CO₂ konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD anleggets veggsensorer for test 12. Målegrensen for CO₂ var 2000 ppm..



Figur 4-65: Bilde fra korridoren ved start av test 12 (øvre) og etter 30 minutter (nedre).

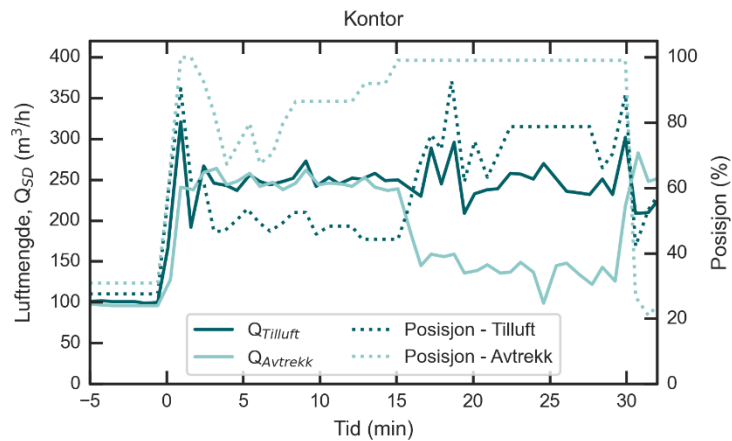
Figur 4-67 viser tillufts- og avtrekksluftmengden i brannrommet, altså klasserommet, for test 12. Gjennom hele testforløpet leverte ventilasjonsanlegget en luftmengde nært den maksimale projekserte verdien til klasserommet. Røykspredningen skjedde altså ikke via tilluftskanalen. Imidlertid klarte ikke ventilasjonsanlegget å opprettholde balanserte luftmengder

til klasserommet etter at avtrekksspjeldet feilet rundt ca. 15 minutter etter brannalarmen ble utløst.

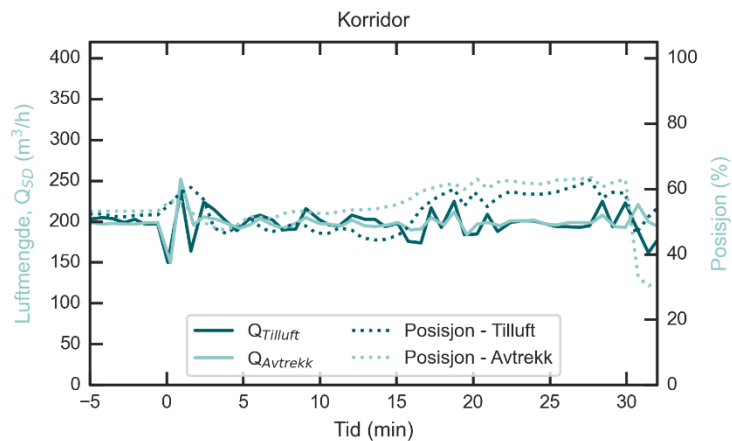


Figur 4-66: Faktiske luftmengder, Q , og spjeldposisjoner i brannrommets tilluft og avtrekk for test 12.

Feilen av avtrekksspjeldet i brannrommet påvirket også resten av bygget. På grunn av feilen klarte ventilasjonsanlegget tilsynelatende ikke å opprettholde høy nok avtrekksluftmengde i kontoret selv om avtrekksspjeldet i kontoret ble åpnet til 100% (se Figur 4-68). Dette var ikke tilfelle i korridoren, hvor anlegget klarte å kompensere ved å åpne spjeldene litt mere (se Figur 4-69).

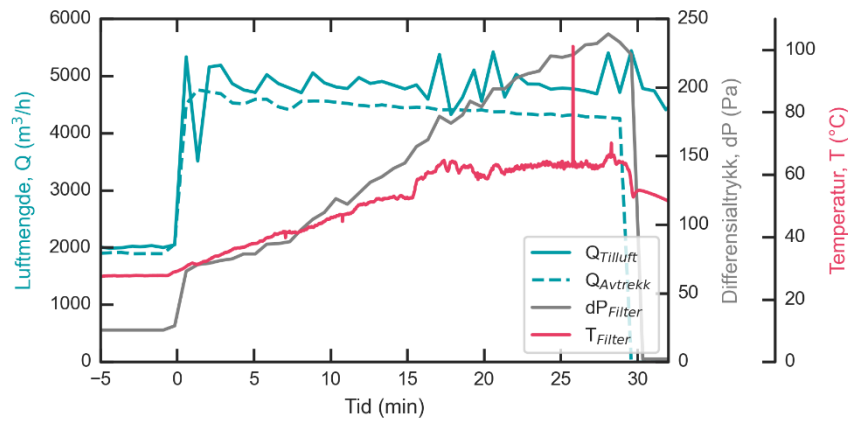


Figur 4-67: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i kontorets tilluft og avtrekk for test 12. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.

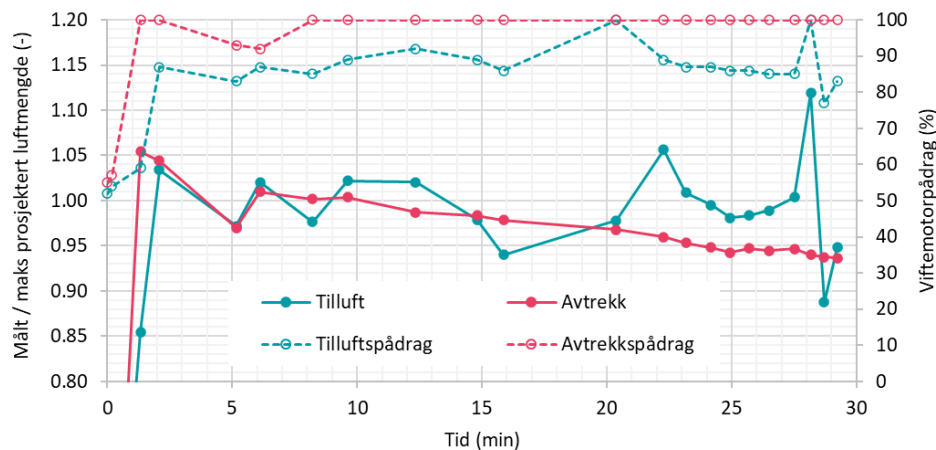


Figur 4-68: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 12. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.

I tillegg til spjeldfeilen, ble avtrekket også påvirket av et økende trykktap over avtrekksfilteret. Rett før testen ble avsluttet (og bypass aktivert), økte trykket betydelig og endte på 239 (se Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 12.). Dette førte til at aggregatet ikke klarte å trekke den ønskede luftmengden V_{max} av 4 550 m³/h. Figur 4-71 viser luftmengdene til og fra aggregatet i forholdet til V_{max} i tillegg til pådraget av viftemotorene. Datapunktene er lest av fra SD-anleggets grafiske brukergrensesnitt. Fra anlegget økte luftmengden fra V_{min} til V_{max} , tok det ca. fem minutter før anlegget var balansert. Fra åtte minutter etter brannalarmen ble aktivert hadde avtrekksvifte 100 % pådrag og hadde dermed ingen ytterlig kapasitet for å kompensere for tettingen av avtrekksfilteret. Avtrekksluftmengden begynte å synke etter 10 minutter og sank i løpet av testen til under 95 % og 94 % av V_{max} , basert på henholdsvis trykkmålingene i aggregatet og luftmengdemålingene i alle avtrekksspjeldene.

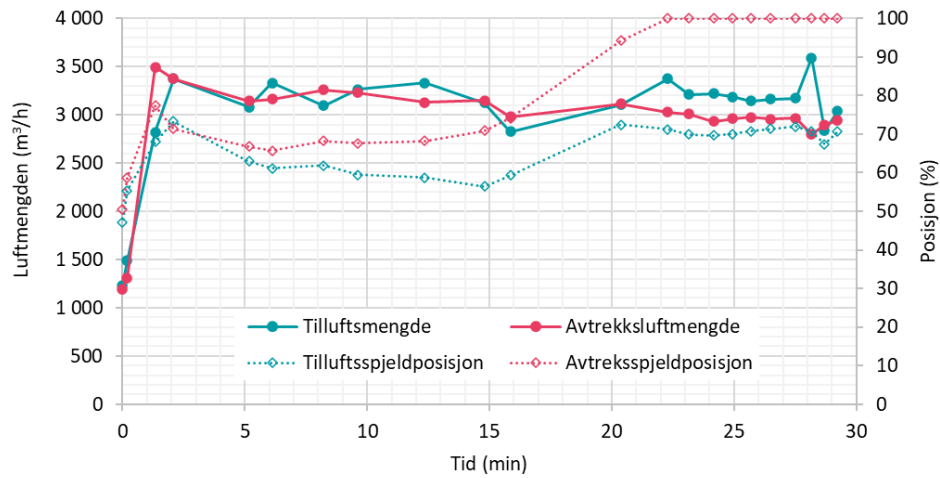


Figur 4-69: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 12.

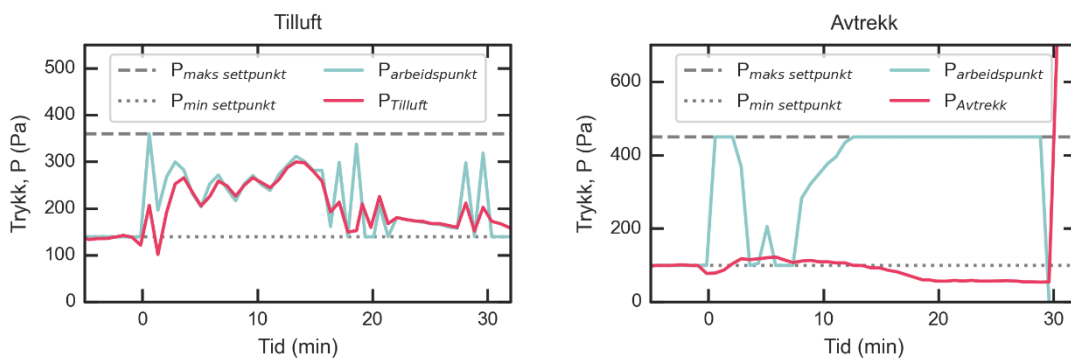


Figur 4-70: Forholdet mellom rapporterte og maksimalt prosjektert luftmengde, avvik i luftmengden, til og fra aggregatet, og pådraget av viftemotorene for test 12.

Mesteparten av luften til og fra aggregatet gikk til «resten av skolen», altså den delen av ventilasjonsanlegget som skulle simulere at et reelt anlegg ville betjene flere enn tre rom. Figur 4-72 viser tilluft- og avtrekksluftmengden for resten av skolen i tillegg til spjeldposisjonen av spjeldene. Etter at ventilasjonsanlegget hadde oppnådd den prosjekterte luftmengden ved brannalarm på $3\,200\text{ m}^3/\text{h}$ til resten av skolen, åpnet avtrekkspjeldet seg gradvis og tilluftsspjeldet lukket seg. Etter spjeldfeilen i brannrommet åpnet begge spjeldene seg for resten av skolen mer opp og avtrekkspjeldet åpnet til 100 % etter ca. 22 minutter. Dette betyr at innen 30 minutter etter brannstartet hadde tre avtrekksspjeld åpnet seg helt og pådraget på avtrekksviftemotoren var 100%. Dermed hadde ventilasjonsanlegget ingen flere muligheter for å øke avtrekksluftmengden til disse rommene. Disse utfordrende forholdene gjenspeiles også i arbeidstrykket som vises i Figur 4-73. Trykket i avtrekket falt til under minimums- settpunktet, selv om arbeidspunktet lå på det maksimale settpunktet.

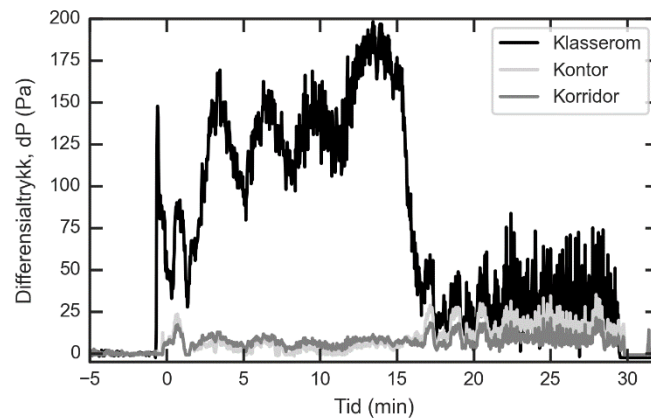


Figur 4-71: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i «resten av skolen» tilluft og avtrekk for test 12.

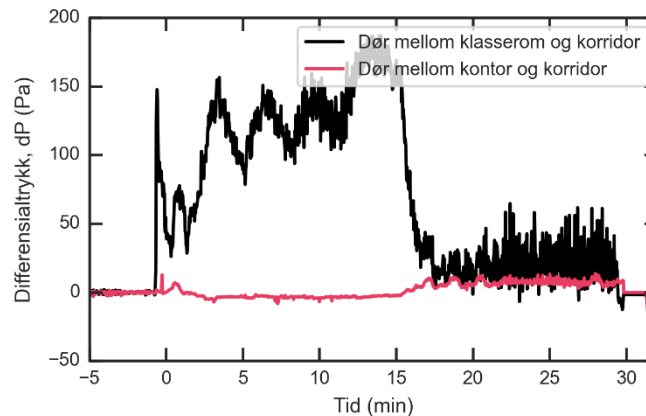


Figur 4-72: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekksiden (høyre) for test 12. Maksimums og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.

Figur 4-74 viser trykkforholdene i klasserommet, kontoret og korridoren. Trykkprofilene viser to distinkte perioder. Den første perioden fra brannstart fram til spjeldfeilen i brannrommet var karakterisert av høyt trykk i brannrommet, som oppnådde 200 Pa og veldig moderate fluktuasjoner i de andre to rommene. Etter at avtrekkspjeldet fra brannrommet ble åpnet på grunn av feilen i trykkmålingen sank trykket i brannrommet til under 75 Pa. I denne fasen økte trykket i kontoret og korridoren. I kontoret var trykket stort sett under 30 Pa og i korridoren var trykket under 20 Pa. Trykkforskjellen mellom disse to rommene var mellom 5 Pa og 10 Pa etter at spjeldet i brannrommet feilet (se Figur 4-75).



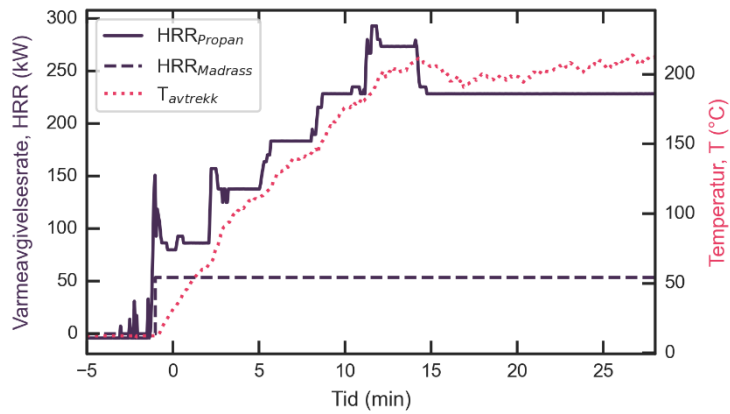
Figur 4-73: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 12.



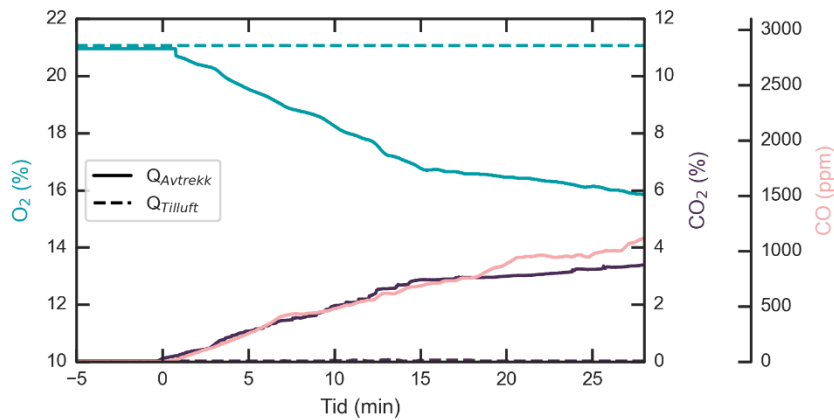
Figur 4-74: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 12.

3.8 Test 13

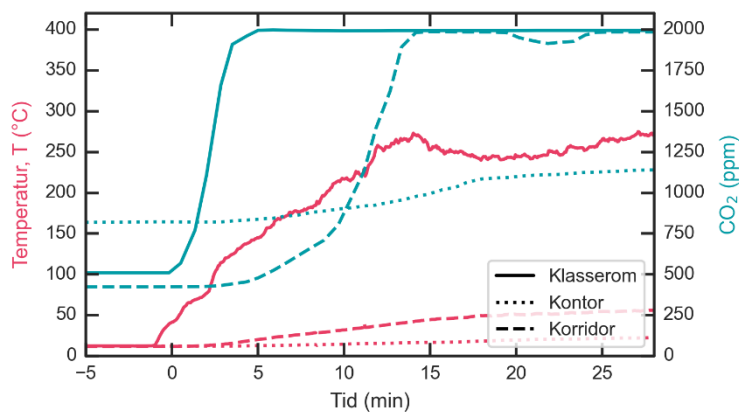
Test 13 var en repetisjon av test 12, men startet fra nattmodus, dvs. med avslått ventilasjonsanlegg, i motsetning til test 12 som startet fra V_{\min} . Figur 4-79 viser imidlertid for høye luftmengder i starten av testen før aggregatet starter opp. Dette henger sannsynligvis sammen med kalibreringen av nullpunktet. Testforløpet av test 13 og test 12 var kvalitativt sammenlignbart, selv om det var enkelte kvantitative forskjeller. Derfor presenteres tilsvarende figurer som i test 12 uten en videre beskrivelse av brannforløpet. At testene var så like skyldes trolig at anlegget begynte å stabilisere seg rundt V_{\max} i begge testene. De forskjellige startbetingelse hadde derfor liten effekt på resultatet. Hvor raskt et ventilasjonsanlegg stabiliserer seg etter en økning til V_{\max} er imidlertid prosjektavhengig. I testbygget var det relativt få spjeld installert som forenklet kommunikasjonen. Videre var det i tillegg en stor del av lufta som gikk til og fra omgivelsene og dermed reduserte muligheten for store trykkfluktasjoner ved endringen av luftmengdene.



Figur 4-75: Temperatur, T , målt i avtrekk og varmeavgivelsesrate, HRR, for gass (heltrukken linje) og madrass (stiplet linje) i test 13.



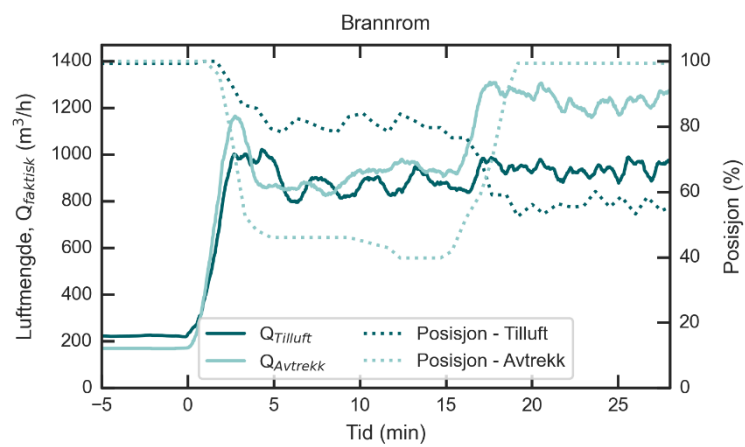
Figur 4-76: Konsentrasjon av O_2 (turkis), CO_2 (svart) og CO (rød) målt i tilluft (stiplet linje) og avtrekk (heltrukken linje) for test 13.



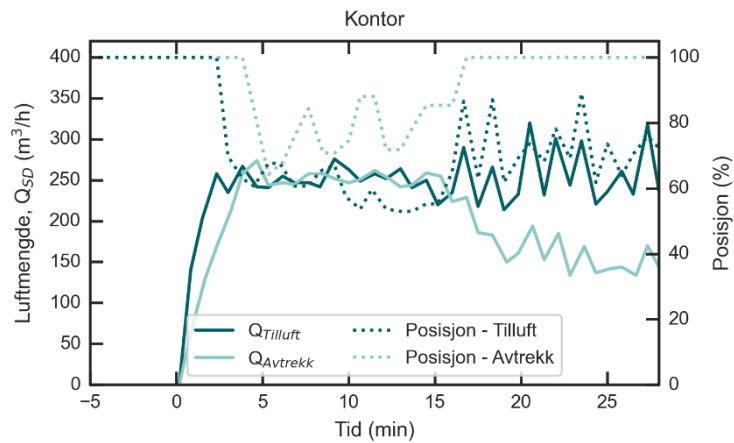
Figur 4-77: Temperatur (rød) og CO_2 konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD anleggets veggsensorer for test 13. Målegrensen for CO_2 var 2000 ppm.



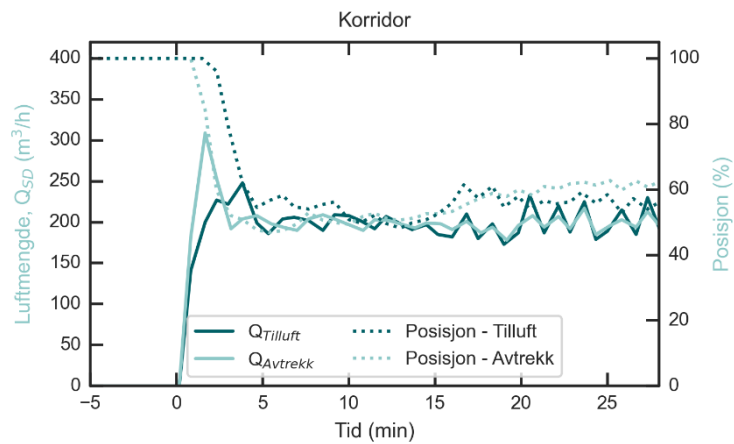
Figur 4-78: Bilde fra korridoren ved start av test 13 (øvre) og etter 25 minutter (nedre). Tid (mm:ss) etter teststart.



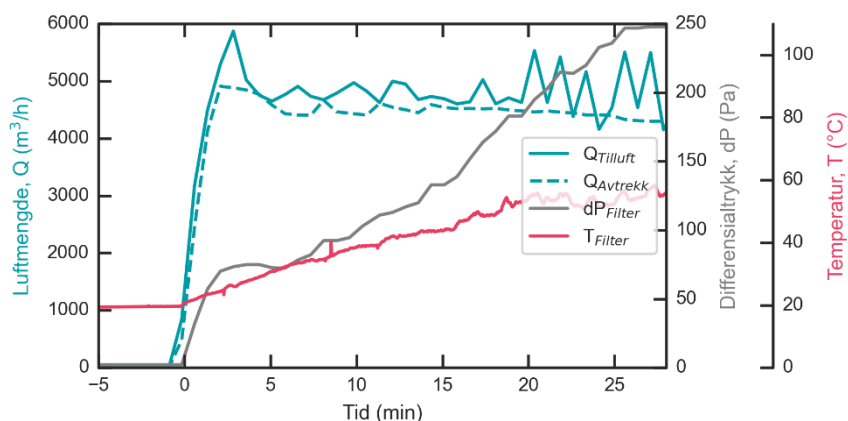
Figur 4-79: Faktiske luftmengder, Q , og spjeldposisjoner i brannrommets tilluft og avtrekk for test 13.



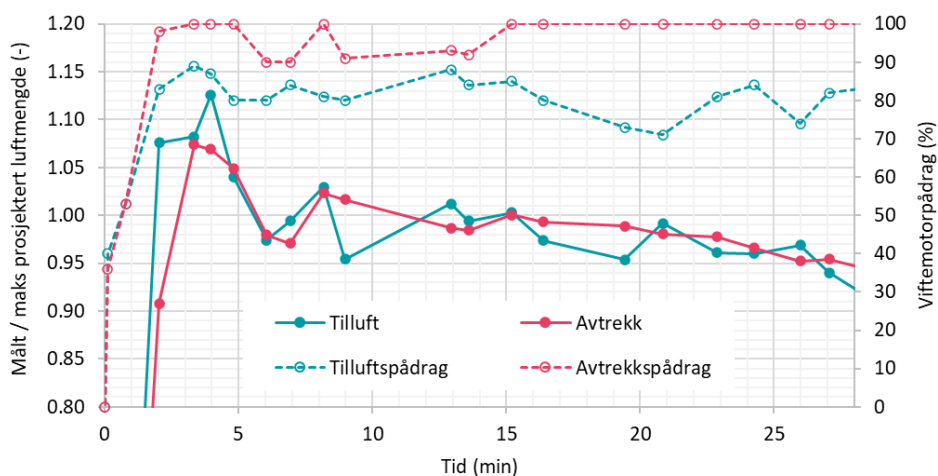
Figur 4-80: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i kontorets tilluft og avtrekk for test 13. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.



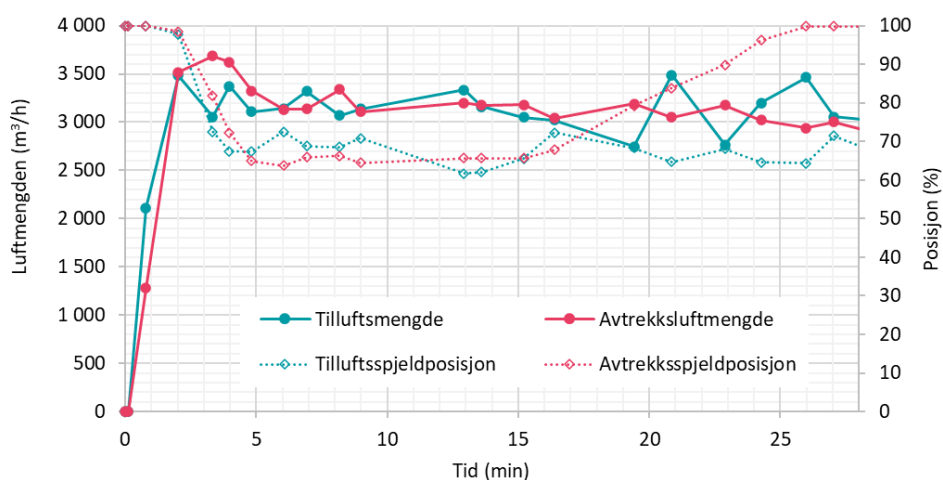
Figur 4-81: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 13. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.



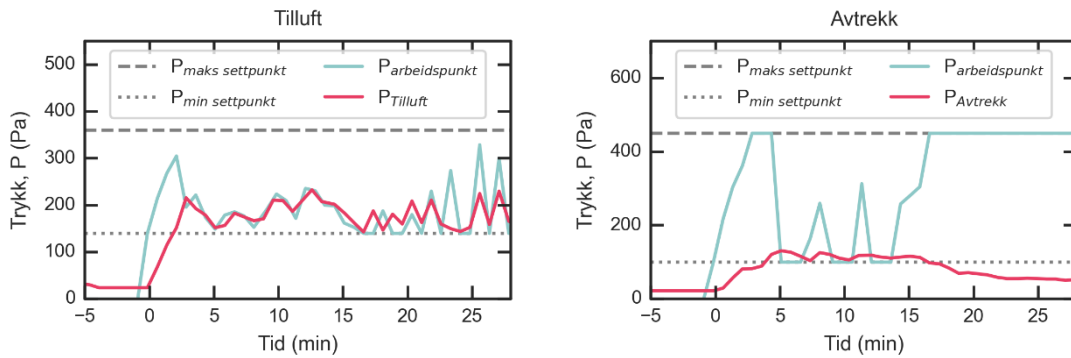
Figur 4-82: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 13.



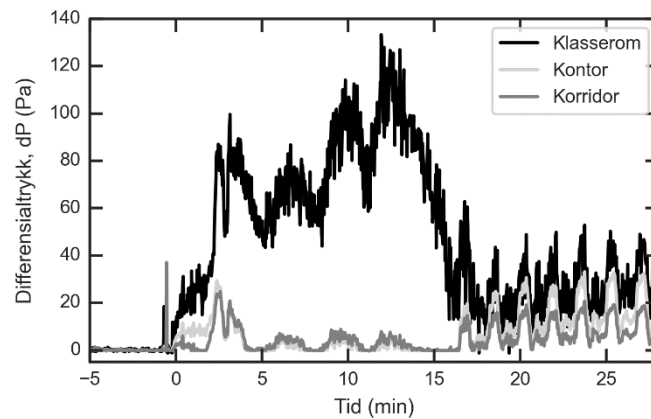
Figur 4-83: Forholdet mellom rapporterte og maksimalt prosjektert luftmengde, avvik i luftmengden, til og fra aggregatet, og pådraget av viftemotorene for test 13.



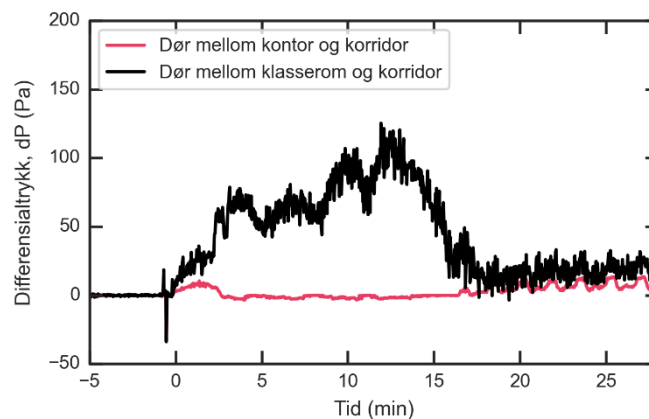
Figur 4-84: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i «resten av skolen» tilluft og avtrekk for test 13.



Figur 4-85: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekkssiden (høyre) for test 13. Maksimums og minimumssettpunktene er vist med henholdsvis stiplet og prikket linje.



Figur 4-86: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 13.

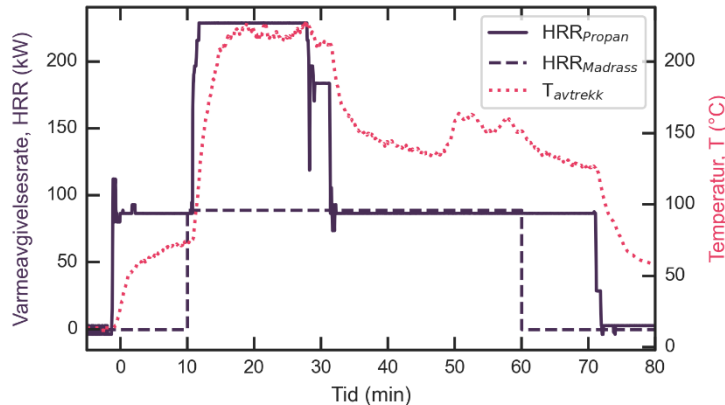


Figur 4-87: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 13.

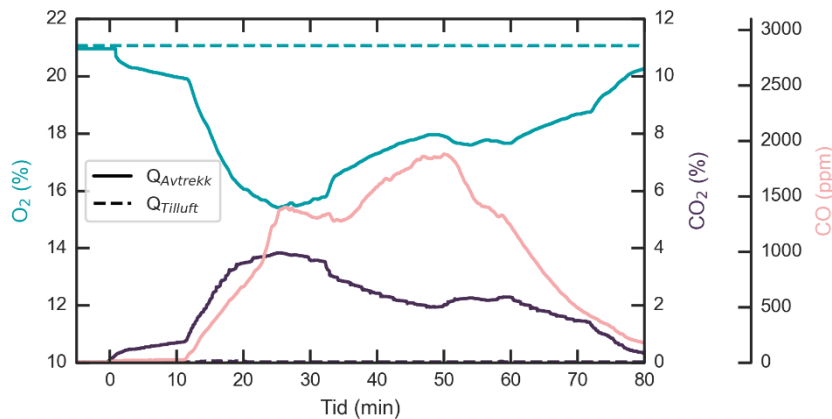
3.9 Test 14

Test 14 var den eneste testen som hadde mer enn en time varighet, selv om spjeldet allerede feilet innen 30 minutter. I de første 10 minuttene av denne testen ble det kun brukt gassbrenner. Deretter ble to madrasser antent og gassmengden økt. Etter 30 minutter ble gassmengden

redusert igjen for å unngå at brannen ble kvelt før det hadde gått en time. Disse tre fasene i brannen gjenspeiles også i gasskonsentrasjonen målt i avtrekket. Gassbrannen i de første ti minutter førte til en forholdsvis liten økning i CO₂-konsentrasjonen, men ingen målbar økning i CO-konsentrasjonen. Når begge madrassene brant og varmeavgivelsesraten fra gassbrenneren oversteg 200 kW økte både CO og CO₂-nivået, mens O₂-nivået sank kraftig og nådde etter hvert et minimum på ca. 16 %. Like før 30 minutter ble gassbrannen redusert ved å begrense mengden gass. Dette førte til at O₂-nivået økte igjen og CO₂-nivået sank. Samtidig fortsatte CO-nivået å øke. Madrassene ble estimert å ha brent opp etter ca. 60 minutter.

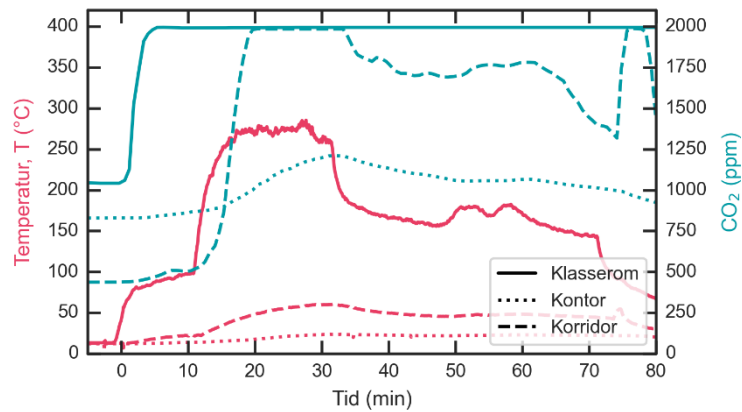


Figur 4-88: Temperatur, T, målt i avtrekk og varmeavgivelsesrate, HRR, for gass (heltrukken linje) og madrass (stiplet linje) i test 14.



Figur 4-89: Konsentrasjon av O₂ (turkis), CO₂ (svart) og CO (rød) målt i tilluft (stiplet linje) og avtrekk (heltrukken linje) for test 14.

Tilsvarende som i test 12 og 13 var røykproduksjonen i klasserommet stor nok til at røyk spredte seg til både korridor og kontor. I kontoret var det kun en mindre økning, mens i klasserommet var nivået høyere enn sensorens måleområde på 2000 ppm (se Figur 4-91). Røyken påvirket også siktforholdene noe i korridoren som vist i Figur 4-92. I test 14 ble døren til brannrommet åpnet midlertidig etter 10 minutter for å antenne madrassene. Dette bidro til å påvirke røykspredningen til korridoren. Imidlertid viste overvåkningsvideoene at sikten i korridoren forverret seg mest etter at døren hadde blitt lukket igjen.



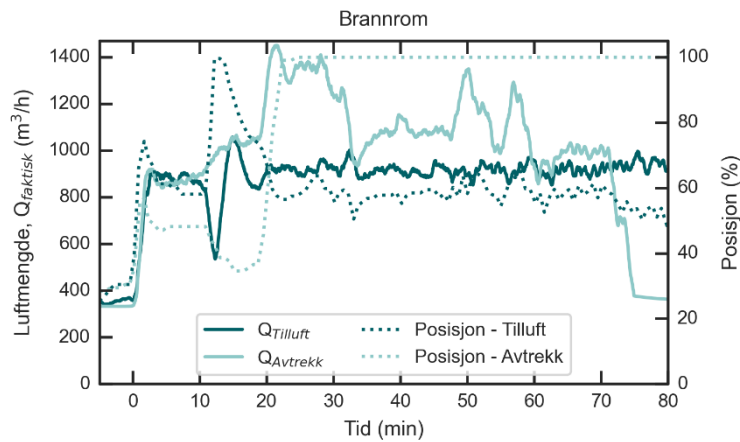
Figur 4-90: Temperatur (rød) og CO₂ konsentrasjon (turkis) i de ulike rommene målt med SD anleggets veggsensorer for test 14. Målegrensen for CO₂ var 2000 ppm.



Figur 4-91: Bilde fra korridoren ved start av test 14 (øvre) og etter en time (nedre). Tid (mm:ss) etter teststart.

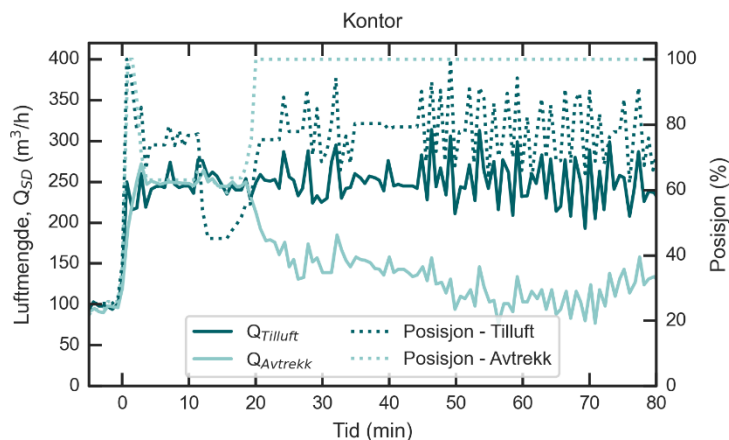
Ventilasjonsanlegget opprettholdt en tilluftsmengde nær V_{max} under hele testperioden (se Figur 4-93). Røykspredningen skjedde altså ikke via tilluftskanalen. Imidlertid, mistet anlegget

kontrollen over avtrekksspjeldet fra brannrommet allerede innen 20 minutter etter brannstart. Avtrekks- og tilluftsmengde til brannrommet var derfor ikke i balanse etter dette.



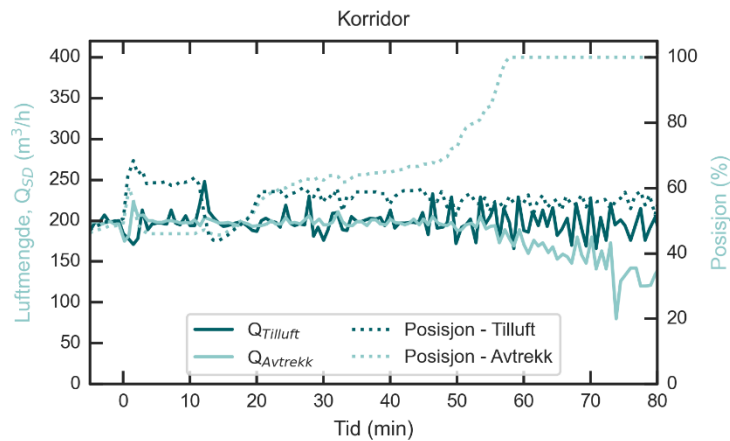
Figur 4-92: Faktiske luftmengder, Q , og spjeldposisjoner i brannrommets tilluft og avtrekk for test 14.

Spjeldfeilen i brannrommet hadde også en stor påvirkning på kontoret, hvor anlegget feilet i å opprettholde avtrekksluftmengden, selv etter at kontorets avtrekksspjeld åpnet helt (se Figur 4-94).



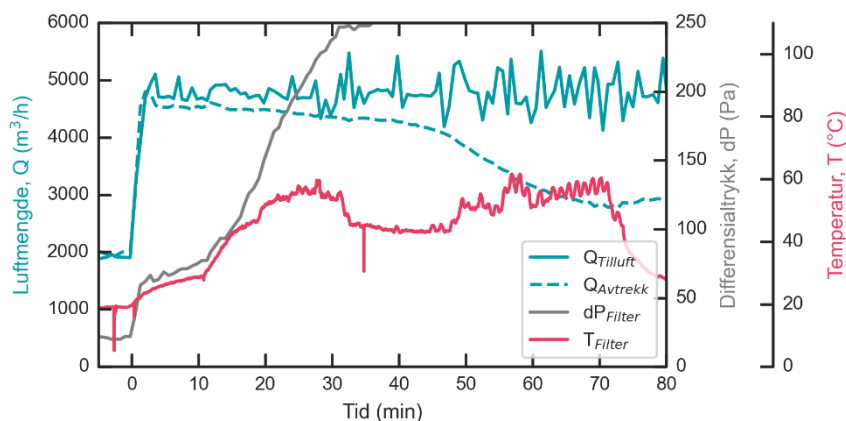
Figur 4-93: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i kontorets tilluft og avtrekk for test 14. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.

I motsetning til kontoret klarte ventilasjonsanlegget i korridoren å kompensere for spjeldfeilen ved å åpne avtrekksspjeldet gradvis etter at spjeldet i brannrommet feilet (se Figur 4-95). Til tross for dette, feilet ventilasjonsanlegget i å opprettholde avtrekksluftmengden etter 55 minutter på grunn av tetting av filteret. Avtrekksspjeldposisjonen i korridoren gikk til 100 %, men dette var ikke nok til å kompensere for det avtagende trykket i aggregatet (se Figur 4-99). Konsekvensen av dette var at det ble en for lav avtrekksmengde og dermed ubalanse i korridoren.

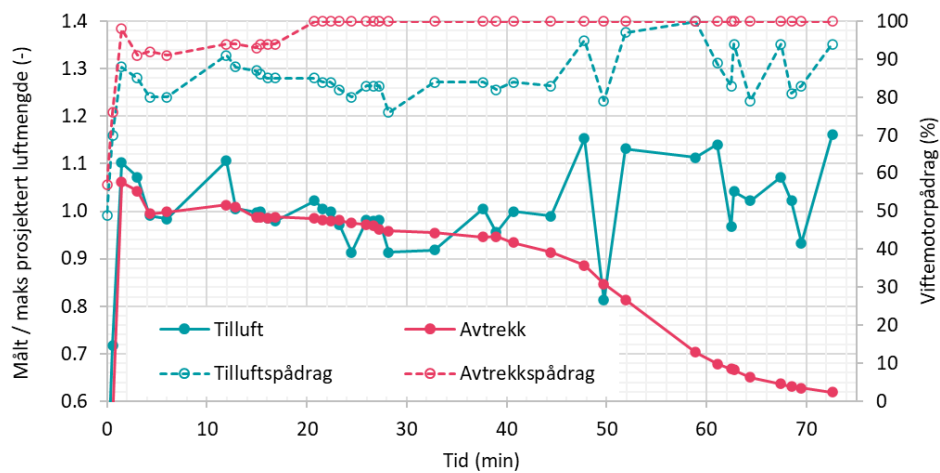


Figur 4-94: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i korridorens tilluft og avtrekk for test 13. For denne testen var brannen plassert i klasserommet.

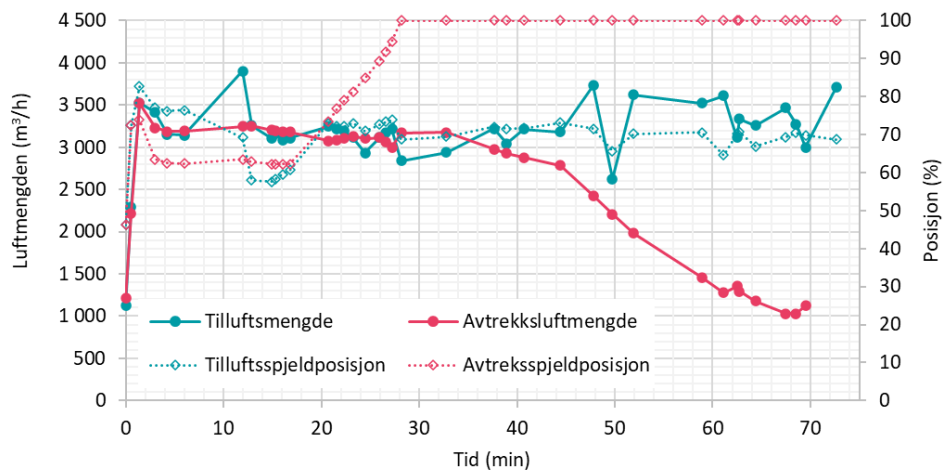
Tetting av filteret var også klart synlig i trykktapmålingene over avtrekksfilteret, som vises i Figur 4-96. Trykkfallet oppnådde målegrensen til trykksensoren (250 Pa) etter ca. 35 minutter. Det faktiske trykktapet etter dette tidspunkt var sannsynligvis betydelig høyere, siden avtrekksluftmengden i aggregatet falt kraftig en stund etter dette. Pådraget på avtrekksviftemotoren var allerede på 100 % etter 20 minutter (se Figur 4-97). På tidspunktet testen ble avsluttet hadde avtrekksluftmengden som aggregatet rapporterte falt til nesten 60 % av maksimalt prosjektert luftmengde. Den totale avtrekksluftmengden fra alle rommene var på 50% av maksimalt prosjektert luftmengde. Dette hadde også en stor påvirkning på resten av skolen. Etter 28 minutter hadde avtrekkspjeldet til resten av skolen åpnet seg helt (se Figur 4-98). Når spjeldet var helt åpent og aggregatets pådrag var på 100% hadde ikke ventilasjonsanlegget lenger mulighet for å kompensere for tettingen av filteret. Dette førte til at luftmengden fra resten av skolen falt til 1 000 m³/h, omtrent en tredjedel av den ønskede luftmengden på 3 200 m³/h.



Figur 4-95: Luftmengder, Q , til og fra aggregatet, trykktap, dP , over avtrekksfilteret i avtrekket og temperatur, T , i avtrekket oppstrøms av aggregatet for test 14.

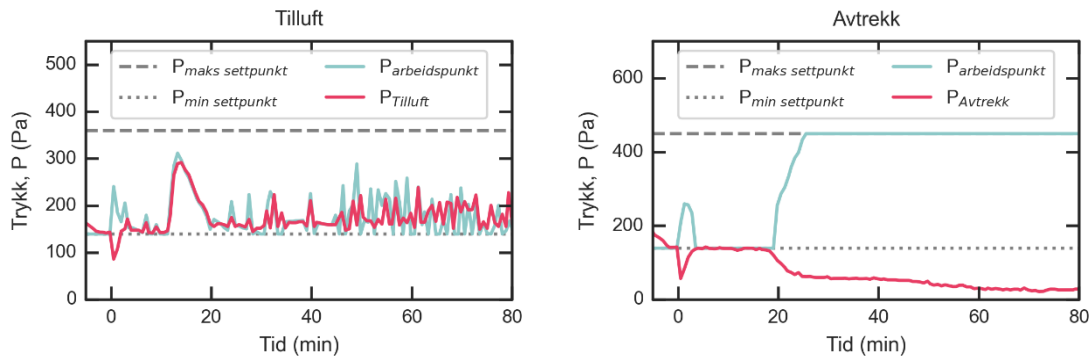


Figur 4-96: Forholdet mellom rapporterte og maksimalt prosjektert luftmengde, avvik i luftmengden, til og fra aggregatet, og pådraget av viftemotorene for test 14.



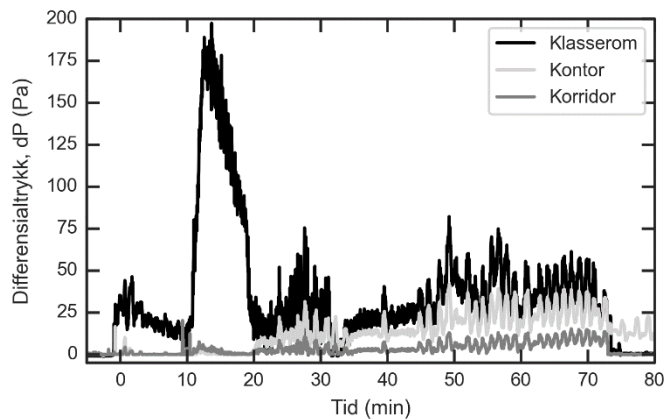
Figur 4-97: Luftmengder målt med SD anleggets sensorer og spjeldposisjoner i «resten av skolen» tilluft og avtrekk for test 14.

Test 14 viser at tettingen av filteret hadde en stor effekt. Likevel mistet ventilasjonsanlegget allerede sin funksjon før filteret ble tett, siden aggregatet ikke klarte å opprettholde trykket på avtrekksiden, etter at spjeldet feilet (se Figur 4-99).

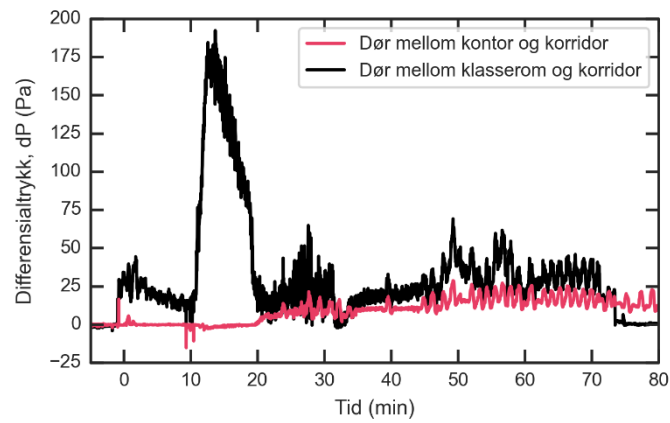


Figur 4-98: Arbeidspunkt (turkis) og faktisk trykk (rødt) i aggregatet på tilluftssiden (venstre) og avtrekkssiden (høyre) for test 14.

Trykket i brannrommet økte raskt i starten av brannen og når varmeavgivelsesraten, altså brannstørrelsen, ble økt etter 10 minutter (se Figur 4-100). Etter økningen falt trykket gradvis mens brannstørrelsen ble holdt konstant. Tilsvarende som resultatene fra de andre tester falt trykket raskt etter at avtrekksspjeldet ble fullt åpnet på grunn av feil luftmålingen. Etter dette tidspunkt ble ventilasjonsanlegget ubalansert og det oppstod trykkøkninger også i kontoret og korridoren. I perioden mellom 20 og 30 minutter oppstod det relativt store trykkfluktasjoner i alle rom. Disse ble mindre da brannstørrelsen ble redusert etter 30 minutter, men økte igjen mot 50 minutter. Ved dette tidspunktet var det ubalansert i tillufts- og avtrekksluftmengden i alle rom, på grunn av tettingen av filteret. Trykkubalansen over dørene var i løpet av de første 20 minutter i hovedsak begrenset til brannrommet. Etter det ble det observert en trykkdifferanse opp til 25 Pa mellom kontor og korridoren (se Figur 4-101).



Figur 4-99: Trykkdifferansen mellom hvert av rommene og omgivelsestrykk utenfor bygget for test 14.



Figur 4-100: Trykkdifferanse over de innvendige dørene for test 14. Trykkdifferansen over dør mellom klasserom og korridor ($P_{\text{klasserom}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med svart og trykkdifferansen over dør mellom kontor og korridor ($P_{\text{kontor}} - P_{\text{korridor}}$) er vist med rødt.

4 Det større bilde

4.1 Metodekritikk

Branntestene ble utført i et testbygg designet for å simulere en ekte skole. Som med alle modeller, innebærer dette visse forenklinger. Et aggregat ble valgt med kapasitet til å betjene et bygg med et teoretisk areal på 401 m². Imidlertid utgjorde det totale gulvarealet i testbygget kun 101 m², inkludert alle rom. Luftstrømmen, som normalt ville ha blitt distribuert til andre rom i en faktisk bygning, ble i testoppsettet utvekslet med omgivelsene. Dette ble gjort for å opprettholde et realistisk forhold mellom brannstørrelse, og dermed soteksponering, og tilgjengelig filterareal – en vesentlig faktor for å evaluere hvor raskt filteret tettes. Denne tilnærmingen betyr at en mulig ubalanse mellom tilluft og avtrekk, som ble utvekslet med omgivelsen, ikke fører til en trykkubalanse. Dette er i motsetning til en situasjon der luften hadde blitt utvekslet med ett eller flere lukkede rom, noe som ville resultert i trykkubalanser. For resultatene fra branntestene betyr dette at økningen i trykktapet over avtrekksfilteret og tiden det tok før ventilasjonsanlegget ikke lenger klarte å kompensere for det, ved å åpne spjeldene og øke viftemotorens pådrag, er realistisk i forhold til aggregatet og brenselet som ble brukt i branntestene. Imidlertid gir trykkubalansene som ble målt mellom rommene i testbygget kun kvalitativ informasjon etter tidspunktet da tilluft og avtrekk i resten av skolen er i ubalanse. Det kan derfor antas at det periodevis ville vært utfordrende å åpne enkelte dører og dermed evakuere i andre deler av skolen, da de forventede trykkdifferansene er høyere enn det som ble målt i branntestene.

Målingene basert på de bidireksjonale probene ble kalibrert mot spjeldenes luftmengdemålinger i startfasen av testene. Det er derfor ikke mulig å se om temperaturøkningen til over vanlig driftstemperatur i spjeldene fører til feil luftmengdemåling allerede før spjeldene feiler fullstendig. Dette gjelder likevel kun for spjeldene til og fra brannrommet. Dersom en mulig målefeil i spjeldene til og fra brannrommet hadde påvirket ventilasjonsanleggets funksjon i sin helhet, hadde dette vært synlig i luftmengde- og trykkmålingene i resten av bygget.

I noen av målingene nådde målingen utstyrets grenseverdi. Dette gjaldt differensialtrykkmålingen i test 14 og CO₂-målingene med romsensorene. Romsensorene ble brukt for vanlig drift av ventilasjonsanlegget før brannalarmen ble utløst. Hensikten med sensoren, var altså ikke å måle konsentrasjoner som oppnås kun ved brann. Målingene ble derfor kun brukt som indikasjon for røyklekkasjer mellom rommene og ble alltid bekreftet visuelt gjennom videoovervåking i alle rom. Differensialtrykkmålingen nådde grenseverdien kun i test 14. Dermed var det faktiske trykktapet over avtrekksfilteret ukjent etter ca. 35 minutter. På grunn av at alle luftmengdene, spjeldposisjonene og viftepådraget ble målt er det likevel mulig å estimere effekten av den gradvise tettingen av filteret.

Beregningen av luftmengden kan ved å måle trykkdifferansen over viftene kan gi en feil verdi hvis filteret nedstrøms av viften er helt tett, slik at viften skaper et vakuum. For å utelukke en slik feilkilde i analysen, ble aggregatets rapporterte luftmengder sammenlignet med summen av luftmengden rapportert fra spjeldene. Målingene fra de ødelagte spjeldene ble erstattet av luftmengdene fra de bidireksjonale probene. Basert på dette ble det konkludert med at filteret ikke var helt tett i noen av de gjennomførte testene, og at det fortsatt gikk en viss mengde luft gjennom, til tross for at trykkfallet hadde økt betraktelig i flere testester.

Testbygget ble bygget uten vinduer, bortsett fra to små åpninger plassert lavt i sideveggen og dekket med pleksiglass. Dette ble gjort for å ha de mest krevende forholdene for trykkoppbygging i brannrommet. Videre er det for små branner mindre sannsynlig at vinduer knuser sammenlignet med større branner. En endring i ventilasjonsforholdene på grunn av en eller flere vindusruter knuses på grunn av brannbelastningen ville ha en stor effekt på brannodynamikken, siden det ville være mer oksygen tilgjengelig. Samtidig vil en åpning mot omgivelsen hjelpe å avlaste trykket i brannrommet. Knusing av vinduer eller annen form for endring i ventilasjonsforholdene (eks, åpning av dør) vil for øvrig være en forutsetning hvis en brann skal kunne utvikle seg fra en liten lokal brann til en større fullt utviklet brann.

Branntestene ble gjennomført med tre forskjellige startbetingelser, minimalt prosjektert luftmengde, maksimalt prosjektert luftmengde og nattmodus (dvs. anlegg stengt av). Ventilasjonsanlegget var programmert for å gå opp til maksimalt prosjektert luftmengde ved utløst brannalarm fra brannsentralen. Det er ikke gitt at et ventilasjonsanlegg på en tilfeldig skole alltid kan oppnå den maksimalt prosjekterte luftmengde i alle rom samtidig.

I alle rom var det videoovervåkning installert som ble brukt for en visuell evaluering av brannutviklingen og røykspredning til andre rom. Lysforholdene i rommene og kameraenes lyssensitivitet var ikke kontrollert. Det ble heller ikke målt røyktettheten. Dermed gir videomaterialet kun en indikasjon over siktforholdene.

4.2 Røykspredning

Denne studien fokuserer på mindre branner, som defineres som branner som ikke sprer seg utenfor arnestedsrommet og ikke fører til overtenning i rommet. Dette fokuset ble valgt siden de fleste branner ved skoler er relativt små. Selv når brannen er begrenset til arnestedsrommet og alle dører og vinduer er lukket, er det mulig at brannrøyk kan spre seg til andre rom. Dermed kan selv mindre branner føre til store skader [4].

Det finnes i hovedsak to mekanismer for røyken til å spre seg. Uavhengig av ventilasjonsstrategien kan røyk fra brannrommet lekke til tilstøtende rom via utettheter i rommets omhyllende flater, som for eksempel sprekker rundt dører eller gjennomføringer. For trekk-ut strategien er tilluft- og avtrekkskanalene åpen under hele brannforløpet. Røyken kan derfor spre seg via kanalnettet hvis ventilasjonsanlegget ikke er trykksatt nok. Dette kan være tilfelle, når systemet er slått av og ikke starter opp ved brannalarm, noe som ble observert i kartlegging av eksisterende skoler [4]. Røyken kan også spre seg via kanalnettet når anlegget er slått på, hvis trykket i brannrommet overstiger trykket i tilluftskanalen, eller hvis trykket i avtrekkets hovedkanal overstiger romtrykket, for eksempel hvis filteret er tett. Sannsynligheten for spredning i tilluftskanalen er høyest for branner med rask vekstfase og ved svært lufttette bygg [10].

Branntestene med elsparkesyklene (test 1 – 6) var de eneste testene hvor røykspredning til andre rom var neglisjerbar. Disse brannene hadde minst brannenergi og førte til den laveste temperaturøkningen (+30 °C) i brannrommet. I tillegg hadde trykktoppene i brannrommet relatert til thermal runaway i individuelle battericeller kun kort varighet. Test 8 førte til en temperaturøkning i brannrommet på rundt 100 °C og en målbar, men liten økning av CO₂-konsentrasjonen i det tilstøtende rommet. Alle de andre testene førte til en høyre temperaturøkning på rundt 230 °C, med unntak av test 7 som førte til en økning på rundt

280 °C. Alle disse testene førte videre til en røyklekkasje fra brannrommet som økte CO-konsentrasjonen i det tilstøtende rommet til over 2 000 ppm og resulterte i en synlig røykspredning. Testbygget var bygget relativt lufttett sammenlignet med eksisterende bygg, spesielt eldre bygg. Et større lekkasjeareal mellom rommene er da forventet å gi en større røyklekkasje enn det som ble observert i testbygget.

Trekk-ut strategiene som ble testet, hvor tilluft og avtrekk skal være i balanse, bidrar ikke til å redusere trykket i brannrommet siden samme mengde luft tilføres og trekkes ut av rommet. Dermed har denne strategien liten innvirkning på å redusere lekkasjer fra brannrommet til tilstøtende rom. Imidlertid vil trekk-ut strategien hjelpe med røykventilering i de rommene røyken sprer seg til, siden frisk luft kontinuerlig tilføres de røykfylte rommene, og røykfull luft trekkes ut. Dette er ikke tilfelle ved bruk av steng-inn strategien. Røykspredning via lekkasjer kan reduseres ved å redusere overtrykket i brannrommet. Den mest effektive måten å gjøre dette på er ved å trekke av mer luft fra rommet enn det tilføres, altså en styrt ubalanse av brannrommet [10].

Ingen av testene⁴ resulterte i endring av strømningsretningen i hverken tilluft- eller avtrekksspjeldene. Med andre ord klarte ventilasjonsanlegget å opprettholde overtrykk eller undertrykk i tillufts- og avtrekksspjeldene i forhold til romtrykkene. Imidlertid førte alle testene med temperaturøkning over 200 °C til spjeldfeil av forskjellig art [5]. Branntestene har derfor vist at til og med små branner med en spesifikk brannenergi av rund 7 MJ/m² gulvareal og en maksimal varmeavgivelseshastighet av 313 kW (i test 12) kan ødelegge DCV spjeldene slik at man mister kontroll over luftmengdene. I de fleste tilfellene førte skade på spjeldet til at det gikk til full åpning, men det ble også observert at det lukket seg (test 10). I test 10 var det tilluftsspjeldet, men siden tilluft og avtrekksspjeldet er av samme type er det også mulig at avtrekksspjeldet kan lukkes og tilluftspjeldet åpnes. Fra litteraturen er det rapportert at den beste ventilasjonsstrategien for å redusere trykket i brannrommet er å åpne avtrekksspjeldet og samtidig stenge tilluften [10]. En spjeldfeil som fører til motsatt effekt, dvs. å stenge avtrekk og holde tilluft åpen, vil altså bidra til å øke trykket i brannrommet og dermed øke risikoen for at brannrøyken kan spre seg via tilluftskanalen. Hvor mange rom røyken vil spre seg i en slik situasjon er avhengig av brannlokasjon i forhold til ventilasjonsanleggets utforming. I tillegg til feil regulering av DCV spjeldene bidrar også den gradvise tettingen av filteret til en økt sannsynlighet for at røyken kan spre seg via kanalnett. I test 14 sank aggregats trykk på avtrekksiden i løpet av testen til kun 22 Pa, som er under 16 % av minimums-settpunktet. Dette viser hvor viktig et bypass er for å opprettholde den prosjekterte avtrekksluftmengde gjennom hele brannforløpet. På grunn av de observerte reguleringsfeilene av DCV spjeldene ved brann er et bypass i seg selv likevel ikke nok for å opprettholde tilstrekkelig ytelse av ventilasjonsanlegget i sin helhet.

4.3 Trykbalanse

En brann i et lukket rom kan føre til en trykkøkning av flere hundre Pascal. Brohez og Caravita [11] rapporterte basert på eksperimenter trykktopper på 870 - 2 035 Pa fra tester med steng-inn strategien, og 420 - 750 Pa fra tester med påslått ventilasjon (uten DCV spjeld). Hostikka et al. [10] rapporterte trykktopper basert på simuleringer fra 46 - 2 316 Pa med påslått ventilasjon og

⁴ Test 10 regnes ikke med her siden retningen på luftstrømmen er ukjent etter at strømforsyningen kortsluttet.

72 - 7 069 Pa for steng-inn strategien. Den store variasjonen i trykket skyldtes forskjellige brannvekstrater og lufttetthetsgrader. Studiene viste altså at det er mulig å oppnå trykkdifferanser som ligger vel over 100 Pa, og dermed kan gjøre det umulig å åpne en dør som åpner mot overtrykket [10]. Det høyeste trykket målt i branntestene i BRAVENT var 197 Pa i test 14, som førte til en trykkdifferanse over døren til brannrommet i mer enn 100 Pa i over fem minutter.

Elsparkesykkeltestene genererte trykktopper opp til rundt 150 Pa, men varigheten av toppene var forholdsmessig korte. Alle testene med gassbrenneren viste en rask trykkøkning etter antennelsen og når gassmengden ble økt trinnvis. Etter trykktoppen var nådd avtok trykket ved konstant gassmengde igjen. I de testene som førte til feilstyring av avtrekksspjeldet ble det observert at trykket i brannrommet falt raskt etter at avtrekksspjeldet hadde åpnet seg. Samtidig førte spjeldfeilene til at ventilasjonsanlegget ble ubalansert. Dette førte til at andre rom enn brannrommet ble ubalansert, som førte til oppbygging av en trykkdifferanse over døren. I ytterste konsekvens kan dette medføre at det blir vanskelig eller umulig å åpne dører. Trykkoppbyggingen i andre rom enn brannrommet var i de fleste testene størst etter at spjeldene feilet. Hvilke rom som påvirkes mest av ubalansen vil påvirkes av byggets og ventilasjonsanleggets utforming i tillegg til lokasjonen av brannrommet. Feilreguleringen av avtrekksspjeldet i klasserommet i test 12 – 14 førte for eksempel til ubalanse i kontoret, mens ventilasjonsanlegget klarte å opprettholde balansen i korridoren ved å gradvis åpne avtrekksspjeldet fra korridoren. Det var ikke tilstrekkelig måledata til å konkludere om økt temperatur, og dermed lavere tetthet av lufta i avtrekket, kan føre til feil måling av luftmengder i spjeldet, og dermed ubalansert ventilasjon.

En annen viktig faktor som påvirker trykkbalansen i bygget og i rommene er den gradvise tettingen av avtrekksfilteret når det ikke er et bypass-system aktivert. Når trykktapet over filteret økes på grunn av tettingen kompenseres ventilasjonsanlegget ved å åpne spjeldene og øke viftemotorens pådrag. Avhengig av brannscenarioet vil filteret etter hvert være så tett at avtrekksluftmengden synker under den prosjekterte luftmengden. Dette ble observert i test 12 – 14. Under slike forhold vil tettingen av filteret også påvirke trykkbalansen i bygget. Et godt eksempel er forholdene som ble observert i korridoren i test 14. Ventilasjonsanlegget klarte å opprettholde en balansert ventilasjon av korridoren, selv etter at avtrekksspjeldet i brannrommet feilet etter ca. 20 minutter. I perioden mellom 40 og 60 minutter måtte avtrekksspjeldet i korridoren øke åpningsgraden betydelig for å opprettholde avtrekksluftmengde, selv om ikke flere spjeld feilet, og luftmengden begynte å falle etter spjeldet hadde åpnet seg helt. Dette samsvarer med at avtrekksfiltertet ble mer og mer tett i samme periode. Effekten av den for lave avtrekksluftmengden førte til en økning av trykket og trykkfluktuasjoner i alle rom. Branntestene har altså vist at selv små branner har potensiale for å føre til en ubalansert tilluft og avtrekk innen 30 minutter. I test 14 kom alle rom i ubalanse i løpet av 60 minutter.

4.4 Luftmengde ved brannalarm

Ved utløst brannalarm i alle branntestene reagerte ventilasjonsanlegget i alle branntestene ved å gire opp luftmengden til V_{\max} , eller fortsette på V_{\max} hvis den allerede var innstilt på dette. Branntestene ga derfor ingen grunnlag for å evaluere effektiviteten av ventilasjonsanlegget ved mindre luftmengder. Dette avsnittet diskuterer derfor kun hypotetiske fordeler og ulemper ved å bruke andre luftmengder enn V_{\max} .

Når ventilasjonsanlegget går til V_{\max} ved utløst brannalarm oppnås det størst luftutskifting i bygget. Det trekkes derfor maksimal mengde røyk ut fra brannrommet. I tillegg vil dette også bidra til fjerne røyk, og dermed rense luften i tilstøtende rom hvis det har lekket røyk inn til disse. Dette vil dermed bidra til å forbedre rømningsforholdene i disse rommene. Dette gjelder kun for rom som øker luftmengden når anlegget går fra V_{\min} til V_{\max} . Rom som ikke øker luftmengden, kan for eksempel være rom som ikke er beregnet for varig opphold. I testbygget hadde korridoren en konstant nominell luftmengde, mens kontoret og klasserommet endret luftmengden for V_{\min} og V_{\max} . Siden det trekkes mer røyk ut fra et brannrom når ventilasjonsanlegget opererer på V_{\max} kan det, for anlegg uten bypass, antas at den gradvise filtertettingen vil skjer raskere ved V_{\max} enn V_{\min} .

Økning til V_{\max} påvirker ikke trykkoppbygging i et brannrom direkte, så lenge avtrekk og tilluft er i balanse, men det vil gi ekstra tilførsel av oksygen som vil kunne gi økt brannutvikling. Dersom det i brannrommet ikke knuses et vindu eller åpnes en dør, vil tilgangen på frisk luft via ventilasjonsanlegget i stor grad bestemme hvor stor en brann kan bli.

Mulige ulemper ved å bruke V_{\max} er at økning av luftmengden i seg selv kan føre til midlertidige ubalanser i bygget [4]. En mulig strategi for å unngå at ventilasjonsanlegget introduserer ubalanser er at ventilasjonsanlegget fortsetter å levere samme luftmengde. Dette gjelder imidlertid ikke hvis anlegget er slått av. Da er det viktig at anlegget starter opp for å trykksette kanalnettet for å hindre fri røykspredning gjennom kanalnettet.

Brannforsøkene har vist at feil av en eller flere brannspjeld og gradvis tetting av avtrekksfilteret kan føre til et ubalansert ventilasjonsanlegg. Om og hvor lenge et ventilasjonsanlegg kan kompensere for de forskjellige feilene og opprettholde balansen er blant annet avhengig av den resterende kapasiteten i anlegget. Opererer anlegget på V_{\max} ved brann, brukes mye av kapasiteten allerede for å forsyne bygget med den maksimalt prosjekterte luftmengde. Det vil derfor være mindre restkapasitet igjen til å respondere på feil som krever økt pådrag. Det er også viktig å nevne at ikke alle bygg er prosjektert for 100 % samtidighet (dvs. at alle rom skal kunne ha maksimal luftmengde samtidig [12]).

Å redusere luftmengden ved brann vil også redusere oksygentilførsel til brannen og øke den resterende kapasiteten som er tilgjengelig til anlegget. Dermed har anlegget en større frihetsgrad for å respondere på feil i anlegget og motvirke trykkoppbygging i brannrommet.

Som nevnt er disse vurderingene rent hypotetiske og ikke basert på funn i branntestene. I denne studien ble det heller ikke dokumentert at å bruke forskjellige luftmengder ved brannalarm løser problemstillingene som ble identifisert for trekk-ut strategien. Forfatterne anbefaler derfor å undersøke fordelene og ulempene med å bruke forskjellige luftmengder ved brann videre for å etablere ett tydeligere grunnlag for veiledning.

5 Konklusjoner

Det ble gjennomført totalt 14 storskala branntester i et testbygg med flere rom som er representative for klasserom, kontor og korridor. Bygget var utstyrt med et fullverdig spjeld-optimalisert ventilasjonsanlegg som var dimensjonert for å betjene totalt 450 m² og dermed gi et realistisk grunnlag for branntestene.

I løpet av testene ble det observert feil på DCV-spjeld, avtrekksfilter og temperatursensorer, der samtlige feil førte til en ubalansert ventilasjon. Videre er de identifiserte feilmekanismene av en type som øker risikoen for røykspredning via kanalnettet. Følgende resultater anses som de viktigste:

- Både feil regulering av DCV-spjeld og gradvis tetting av avtrekksfilteret, førte i relevante brannscenarier til ubalansert ventilasjon og resulterte i trykkubalanse mellom rommene i testbygget.
- Hvor raskt de identifiserte feilene påvirker et ventilasjonsanlegg er avhengig av brannscenarioet. I alle tester som førte til feil på avtrekksfilteret eller feil på minst ett DCV-spjeld, ble ventilasjonsanlegget påvirket innen 30 minutter.
- Branntestene viste sårbarhet for branneksporing både for avtrekks- og tillufts-DCV-spjeldene. I branntestene ble det ikke observert røykspredning via tilluftskanalen, men siden spjeldposisjonen kan åpnes og lukkes avhengig av type feilmekanisme er det mulig at feilreguleringen kan føre til røykspredning via tilluftskanalen. Det verste hypotetiske scenarioet er om avtrekksspjeldet lukkes, mens tilluftspjeldet åpnes helt.
- Branntestene bekreftet at brannrøyken fører til gradvis tetting av avtrekksfilteret. Hvor raskt dette påvirker ventilasjonsanleggets evne til å opprettholde en balansert ventilasjon er avhengig av mange faktorer som forholdet mellom brannstørrelse og aggregatets kapasitet, sammensetningen av brenselet, tilgjengelig filterareal og tilstanden av filteret før brannstarten. I branntestene ble det ikke observert røykspredning via avtrekkskanalen, men siden avtrekksluftmengden i en av testene ble kraftig redusert til rundt 50 % av den maksimale prosjekterte luftmengden, konkluderes det med at gradvis tetting av avtrekksfilteret vil øke risikoen for røykspredning via avtrekkskanalen.
- Det ble ikke undersøkt om det kan være fordelaktig å bruke en annen luftmengde enn V_{\max} ved brann. I et videre arbeid, anbefales det derfor å gjennomføre tester som belyser denne problemstillingen.

Konklusjon:

Feil regulering av ikke-brannklassifiserte DCV-sjeld og gradvis tetting av avtrekksfilteret på grunn av brannrøykeeksponering, fører i relevante brannscenarier for skoler til at ventilasjonsanlegget ikke klarer å opprettholde en balansert ventilasjon i påkrevd tidsperiode.

I branntestene ble det ikke observert røykspredning via kanalnettet, men resultatene indikerer at feilmekanismene øker risiko for røykspredning via kanalnettet.

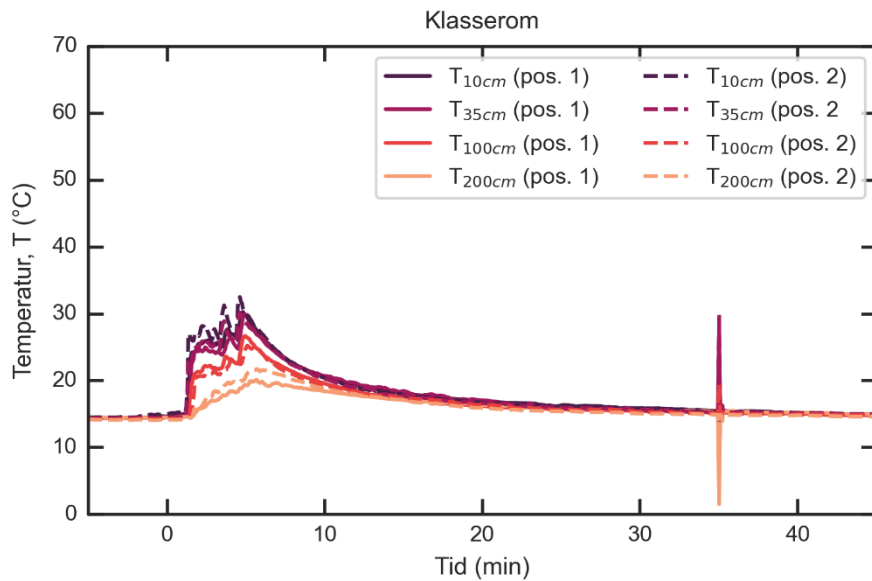
For prosjekter som likevel benytter trekk-ut strategien må det dokumenteres at alle komponenter og hele ventilasjonsanlegget i samspill vil opprettholde tilstrekkelig funksjonalitet i påkrevd tidsperiode.

Basert på branntestene, en omfattende kartlegging av eksisterende skoler [5], tilgjengelig litteratur og en rekke tidligere BRAVENT rapporter ble det utarbeidet en veileder «BRAVENT – Veileder for brannteknisk prosjektering av ventilasjonsanlegg i skolebygg» [8].

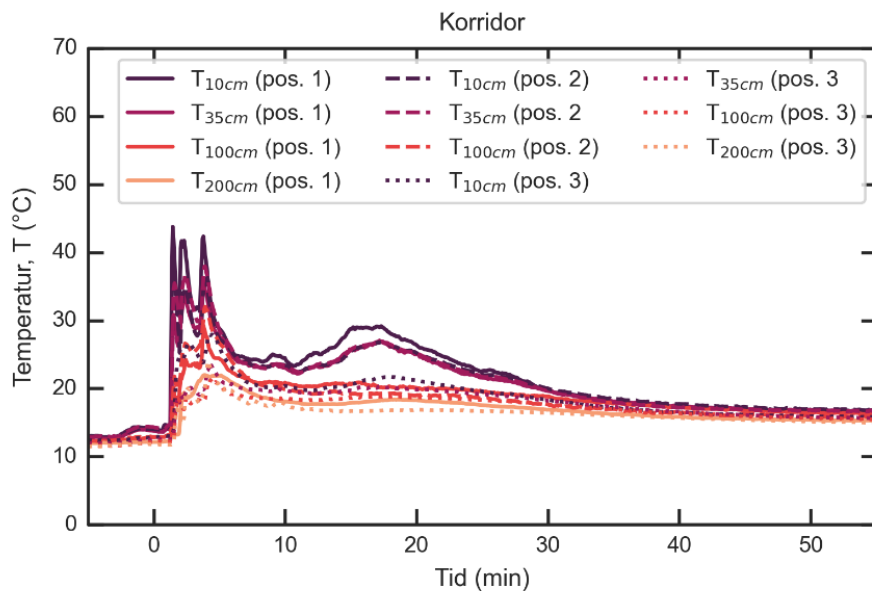
6 Referanser

- [1] A. S. Bøe, J. P. Stensaas, and C. Sesseng, “BRAVENT - Teori- og kunnskapssammenstilling,” RISE Fire Research, Trondheim, Norge, RISE-rapport 2019:11, 2019.
- [2] A. S. Bøe, K. Hox, and C. Sesseng, “BRAVENT - Brannspredning i ventilasjonskanaler,” RISE Fire Research, Trondheim, Norge, RISE-rapport 2019:12, 2019.
- [3] R. Stølen and A. S. Bøe, “BRAVENT – Tetting av ventilasjonsfilter med brannrøyk,” RISE Fire Research, Trondheim, Norway, 2021:32, Mar. 2021.
- [4] A.-M. Haukø, A. Yang, B. G. Olsø, and A. Aamodt, “BRAVENT - Brannforløp og Ventilasjon i Skoler,” 2022:00394, Oct. 2022.
- [5] J. S. Fjærestad, A. Yang, C. Meraner, F. Dovran, and J. Olsen, “BRAVENT – Storskala branntester (del 1): Branntestelse for ikke-brannklassifiserte ventilasjonskomponenter,” RISE Fire Research, RISE-rapport 2024:37, 2024.
- [6] A.-M. Haukø *et al.*, “BRAVENT - Veileder for brannteknisk prosjektering av ventilasjonsanlegg i skolebygg,” SINTEF, 2024:00588, 2024.
- [7] A.-M. Haukø *et al.*, “BRAVENT - Kontrollplan: Ventilasjonsanleggets funksjon under brann,” SINTEF, 2024:00062, 2024.
- [8] SINTEF, “SINTEF Byggforskserien 520.352 Brann- og røyksikring av ventilasjonsanlegg,” 2023.
- [9] J. S. Fjærestad, R. F. Mikalsen, and C. Meraner, “Rømning ved brann i litium-ion batteri i elsparkesykkel,” RISE Fire Research, RISE Rapport 2023:32, 2023.
- [10] S. Hostikka, R. K. Janardhan, U. Riaz, and T. Sikanen, “Fire-induced pressure and smoke spreading in mechanically ventilated buildings with air-tight envelopes,” *Fire Saf. J.*, vol. 91, pp. 380–388, 2017.
- [11] S. Brohez and I. Caravita, “Fire induced pressure in airtight houses: Experiments and FDS validation,” *Fire Saf. J.*, vol. 114, p. 103008, Jun. 2020.
- [12] Mats Mysen and Peter G. Schild, “Behovsstyrt ventilasjon, DCV – forutsetninger og utforming. Veileder for et energioptimalt og velfungerende anlegg,” SINTEF akademisk forlag, Oslo, 2013.

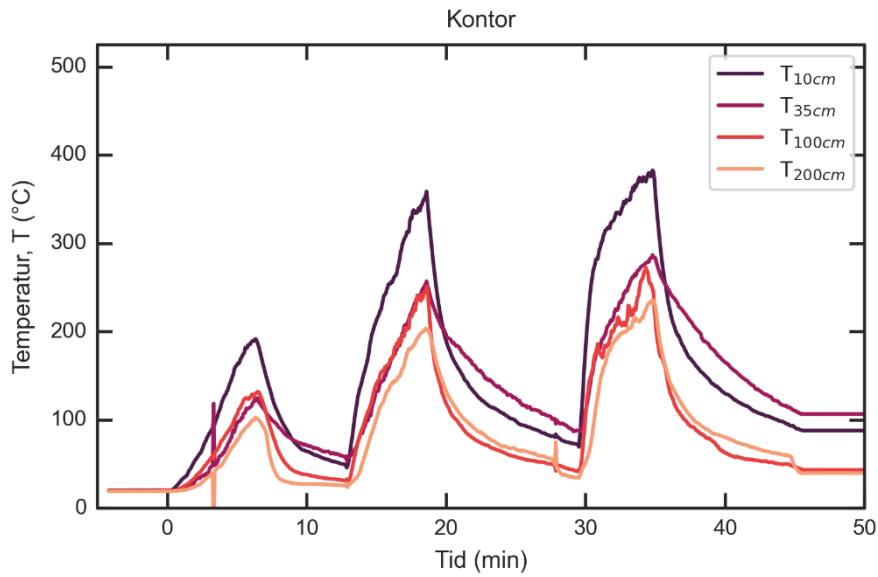
Vedlegg A – Brannromstemperaturer



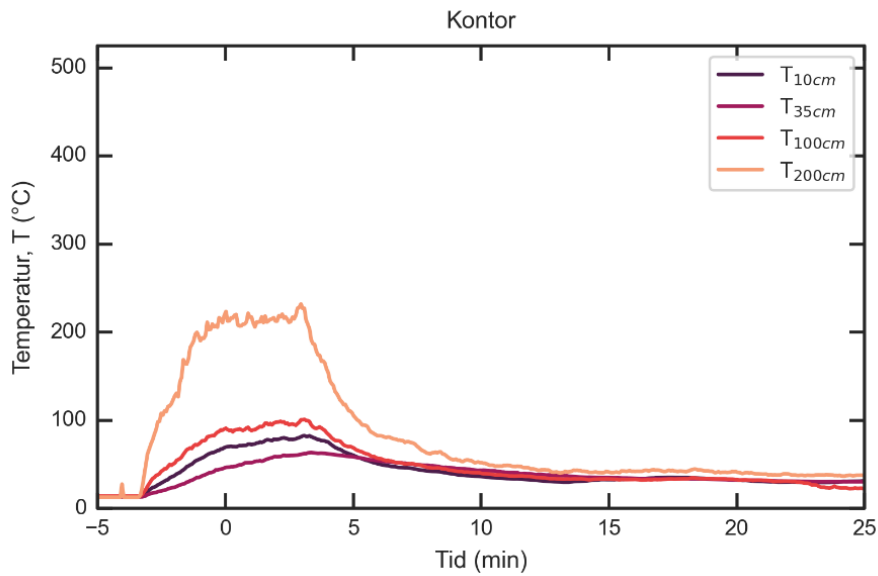
Figur A - 1: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket og to forskjellige posisjoner i rommet for i test 2. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



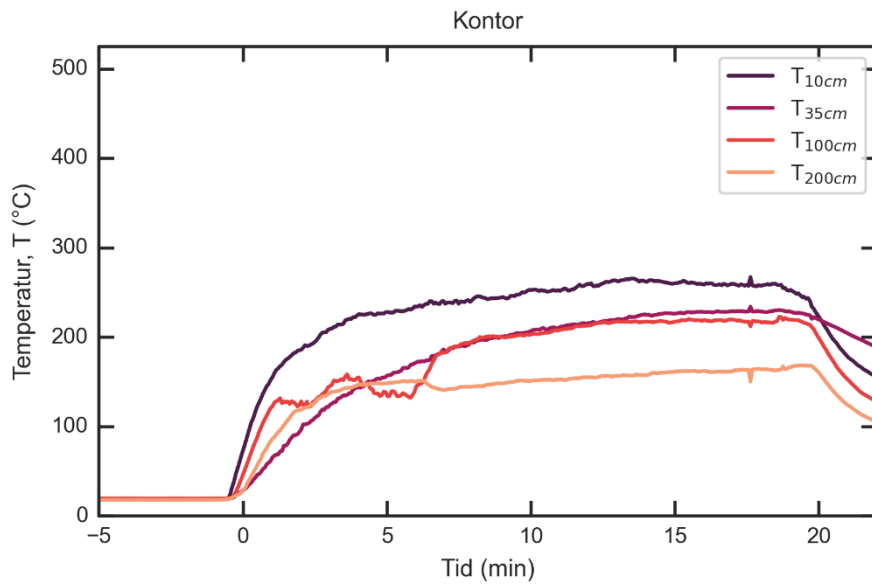
Figur A - 2: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket og tre forskjellige posisjoner i rommet for i test 5. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



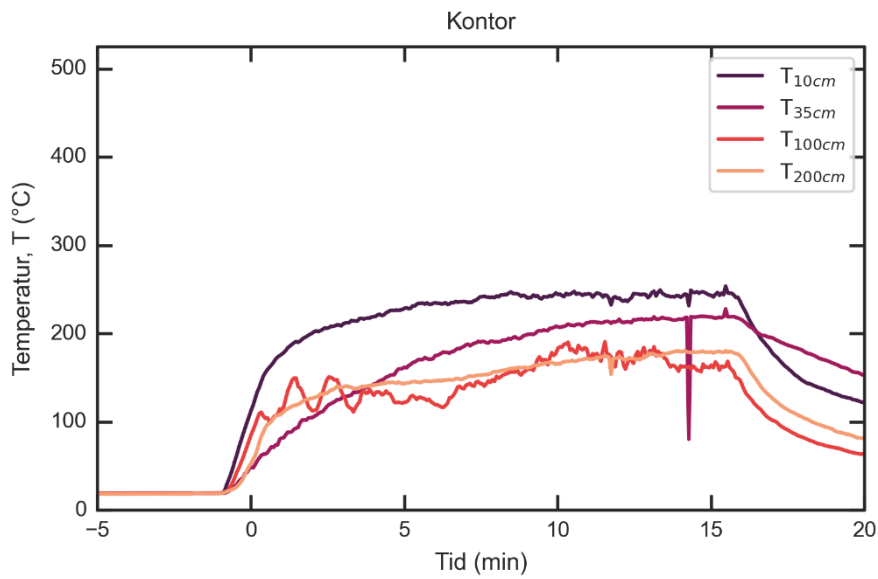
Figur A - 3: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket for i test 7. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



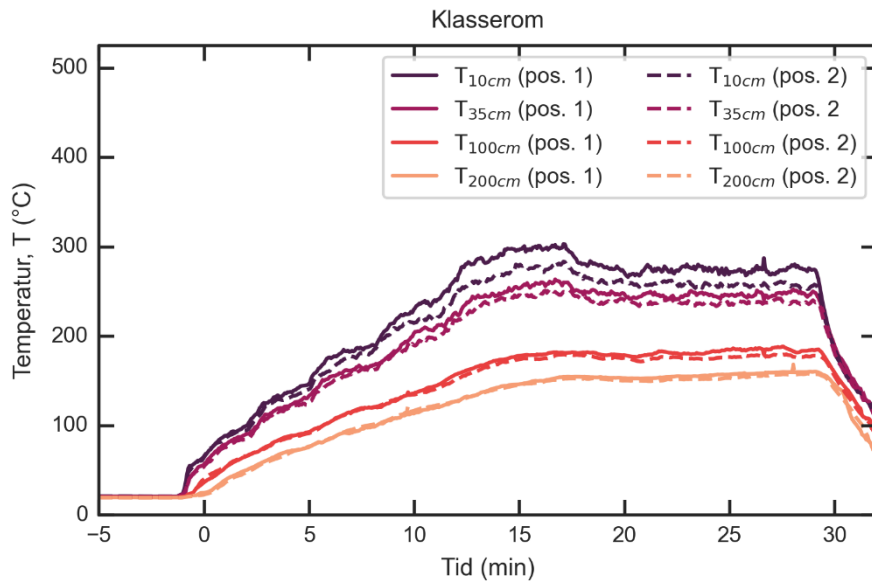
Figur A - 4: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket for i test 8. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



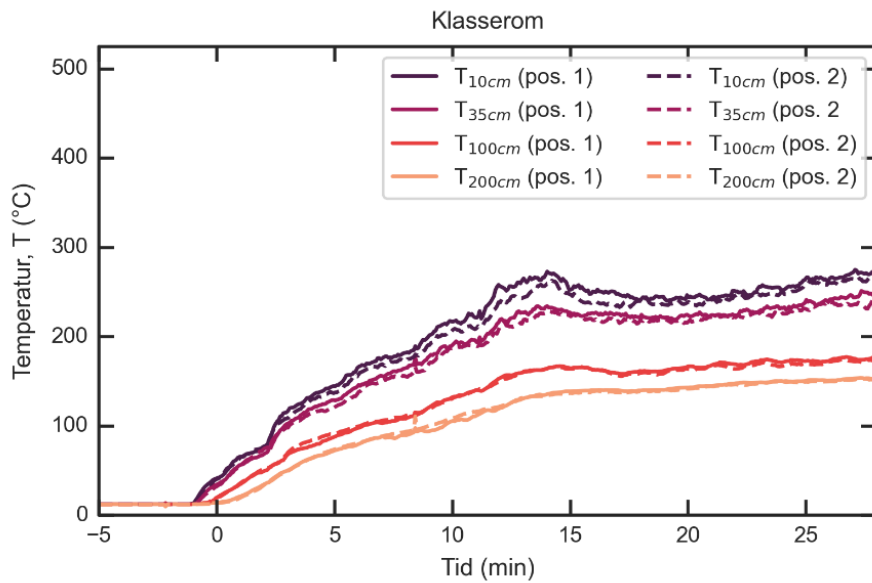
Figur A - 5: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket for i test 10. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



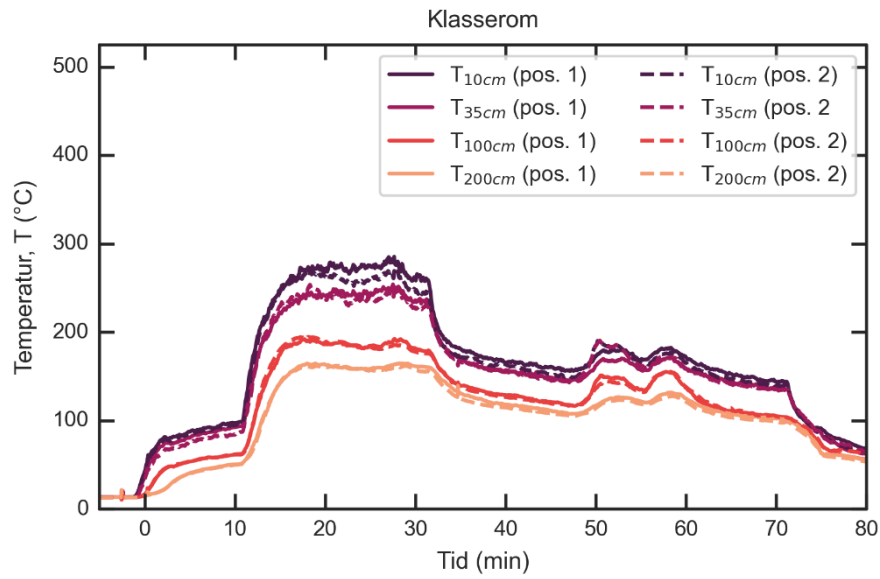
Figur A - 6: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket for i test 11. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



Figur A - 7: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket og to forskjellige posisjoner i rommet for i test 12. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



Figur A - 8: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket og to forskjellige posisjoner i rommet for i test 13. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.



Figur A - 9: Romtemperatur målt i brannrommet på forskjellige høyder oppgitt i cm fra taket og to forskjellige posisjoner i rommet for i test 14. Se delrapport 1 for nøyaktig måleposisjon.

RISE – Research Institutes of Sweden
ri.se / info@ri.se / post@risefr.no / (+47) 464 18 000 / risefr.no
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM

RISE Fire Research
RISE Rapport: 2024:38
ISBN: 978-91-89896-95-6

