

Avgassing fra litium-ion batterier i hjemmet

Christoph Meraner, Tian Li, Cristina Sanfeliu Meliá

Avgassing fra litium-ion batterier i hjemmet

Christoph Meraner, Tian Li, Cristina Sanfeliu Meliá

Abstract

Venting from lithium-ion batteries in homes

This study evaluates venting from lithium-ion batteries in homes and is commissioned by the Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) and the Norwegian Building Authority (DiBK). The main objective is to study the extent to which venting from a battery in a dwelling can pose a risk for people, focusing on the consequences associated with venting. The Norwegian fire statistics database BRIS was used to identify relevant scenarios. Based on these scenarios, a total of nine numerical simulations of gas dispersion in a generic dwelling were carried out. Boundary conditions, such as gas quantity and composition, were based on a literature study. The simulations were used to evaluate the potential for accumulation of an explosive gas mixture, exposure to toxicity-related gases (both asphyxiants and irritants) and the possibility of detection of carbon monoxide (CO).

Electric car batteries, electric bikes, electric scooters, electric hoverboards and larger, stationary battery energy storage systems are found to be the lithium-ion batteries with the highest energy content, which are most common in homes. Other electrical appliances – consumer products make up a larger share in the fire statistics, but these have a lower energy content and thus less potential to pose a major risk for people. Electric cars that are charged in the garage and larger batteries used for energy storage contain the most energy and therefore have the potential for the most severe consequences. However, these batteries are not stored or charged/discharged in living areas, while electric bikes/ scooters/ balancing boards are often stored and charged in the living room, hallway and bedroom. Electric bikes and similar batteries are also subjected to more mechanical and thermal loads compared with battery energy storage systems. It is therefore assumed that the frequency of incidents involving these batteries will be larger than the frequency of incidents involving battery energy storage systems. Therefore, the simulations in this study focused on venting from an electric bike battery (from a single cell and from an entire pack) in the hallway to a generic dwelling. A quantitative risk analysis of the risk associated with electric bike batteries compared with the risk associated with battery energy storage systems was not carried out.

Lithium-ion batteries undergoing a thermal event typically emits 1-3 litres of gas per ampere-hour (Ah) at 26 °C and 3.7 volts (V), depending on battery chemistry and state of charge (SOC). Venting from lithium-ion batteries contains carbon dioxide, flammable components such as carbon monoxide, various hydrocarbons, methanol and hydrogen, as well as toxic components such as hydrogen fluoride, hydrogen chloride and hydrogen cyanide. The relatively large proportion of flammable gases (e.g. around 30% hydrogen) makes venting from lithium-ion batteries an explosion hazard. Although batteries with a low state of charge emit less gas than batteries with a high state of charge, the risk of explosion of batteries with a low state of charge may be larger, since the likelihood of late ignition is larger. There are many different types of lithium-ion batteries on the market and several methods for battery safety tests. Today, there is no unified, public system or database with an overview of data for venting from thermal events in lithium-ion batteries. Such a system would be useful, to cover knowledge gaps and to provide data that can be used in risk evaluations.

The results show that the largest amount of flammable gas mixture, 26 litres, was accumulated by venting from a 400 watt-hour (Wh) electric bike battery pack, which was placed on a shelf in a

small hallway of 3.5 square meters. When the thermal event was limited to a single battery cell, 3.6 litres of flammable gas were formed. Moreover, the results show that the location of the battery plays an important role in the accumulation of flammable gas. When the battery is stored in a partially enclosed area, such as a shelf, the gas can accumulate. The results also show that, especially for venting from a battery pack, it is best to store the batteries in large and well-ventilated rooms. No explosion risk analysis was performed related to the accumulated flammable gas clouds.

Fire gases from lithium-ion battery fires are generally not significantly more toxic compared with comparable plastic fires, but have the potential for low concentrations of more harmful gases, such as hydrogen fluoride (HF), to be released. The results of the simulations carried out in this study show that the limits for health-hazardous or fatal gas concentrations are exceeded by a thermal event in a lithium-ion battery. Toxic gases can have an asphyxiating and an irritating effect on humans. The results show that the critical value of irritating gases obtained before the limit value of asphyxiating gases. Hydrogen chloride (HCl) and hydrogen fluoride (HF) reached most rapidly health-hazardous or fatal gas concentrations, and these gases also spread most in the room.

Furthermore, the results show that risks for people associated with exposure to toxic gases are primarily relevant when the entire battery pack is involved in the thermal event. When the thermal event is limited to a single cell, the simulations show that critical gas concentrations are reached only nearby the battery. If, on the other hand, a thermal event spreads to the entire battery pack, it leads to critical levels of toxic gases throughout the room after about 1 minute for a small room (3.5 m²), and in the entire upper half of a large room (43.5 m²) after about 4 minutes.

To reduce the risk of toxic gas venting, the same measures are recommended as for the reduction of the risk of accumulated flammable gas. Larger lithium-ion batteries should be charged and stored in well-ventilated rooms that are not living areas or part of the escape route, ideally in external buildings. This is consistent with NELFO's recommendations for battery energy storage systems in residential buildings. However, costs/ benefits must be considered, especially for electric bikes and smaller batteries containing less energy than battery energy storage systems. Furthermore, closed doors are good physical barriers to prevent or delay gas and smoke spread in the dwelling.

Another important barrier recommended to reduce the risk associated with venting from or fire in a lithium-ion battery is early detection. It is especially important since a thermal runaway develops very quickly, compared with, for example, a fire that starts as a smouldering fire. In this study, only a coarse analysis of the possibility of early detection of increased concentration of carbon monoxide was carried out. The results suggest that combination detectors near the battery may be a good measure to ensure early detection.

Recommendations for further work identified in this study are the validation of the simulations by conducting battery fire tests of relevant electric bike batteries and conducting large-scale experiments for validation of gas dispersion and detection. It is also recommended to evaluate the potential overpressure that a delayed ignition (explosion) of gas can generate. Furthermore, it should be considered conducting a similar study for battery energy storage systems or other scenarios with significantly higher energy content than electric bike batteries.

Key words:

Lithium-ion batteries, Li-ion batteries, e-bike, BESS, thermal runaway, venting, explosion risk, toxic gas, exposure, dwelling, numerical simulation, CFD.

Litium-ion batterier, Li-ion batterier, elsykkel, energilagringssystem, termisk hendelse, avgassing, eksplosjons risiko, giftig gas, eksponering, bolig, numerisk simulering.

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2021:17

ISBN: 978-91-89385-01-6

Prosjektnummer: 20500

Kvalitetssikring: Ragni Fjellgaard Mikalsen

Finansiert av: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK)

Forsidebilde: Konsentrasjon av HF-gass, fra numerisk simulering utført i prosjektet. Bilde:

RISE Fire Research

Trondheim 2021

Innhold

Abstract	2
Innhold	5
Sammendrag	7
1 Innledning	9
1.1 Bakgrunn.....	9
1.2 Målsetting.....	10
1.3 Omfang og begrensninger.....	10
1.4 Metodebeskrivelse.....	10
1.5 Forkortelser og definisjoner.....	11
2 Litium-ion batteriers egenskaper og utfordringer	12
2.1 Feilmekanismer og thermal runaway.....	12
2.2 Gassmengder og sammensetning.....	12
2.3 Menneskers tålegrense og beregning av tiden til kritisk eksponering.....	14
2.4 Deteksjon.....	15
3 Statistikk, relevante batterihendelser	17
4 Scenarier	21
5 Planløsning i simuleringer	23
6 Oppbygging av den numeriske modellen	25
6.1 Avgassingsprofil og gass-sammensetning.....	25
6.2 Grid-sensitivitetsanalyse.....	27
6.3 Beregning av brennbar gasskyvolum.....	30
7 Simuleringsresultater og diskusjon	32
7.1 Akkumulering av eksplosiv blanding i et rom.....	32
7.2 Eksponering for kvelende og irriterende gasser.....	36
7.3 Deteksjon.....	42
8 Konklusjoner og anbefalinger	44
8.1 Avgassingsmengde og -sammensetning.....	44
8.2 Utbredelsen av litium-ion batteribranner.....	44
8.3 Akkumulering av eksplosiv blanding i et rom.....	45
8.4 Eksponering for kvelende og irriterende gasser.....	45
8.5 Batteristørrelsens betydning.....	46
8.6 Deteksjon.....	46
8.7 Anbefalinger for videre arbeid.....	47
9 References	48
Vedlegg	51
A. Brennbar gassky størrelse	
B. Tid til 0,1 FED	
C. Tid til 0,1 FEC	

- D. IDLH CO-konsentrasjonen
- E. IDLH HCl-konsentrasjonen
- F. IDLH HF-konsentrasjonen
- G. 34 ppm CO-konsentrasjonen
- H. Oversikt over utvalgt litteratur

Sammendrag

Denne studien omhandler avgassing fra litium-ion batterier i boliger, og er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). Hovedmålet er å studere i hvilken grad avgassing fra et batteri i en bolig kan utgjøre en personrisiko, med fokus på konsekvensene knyttet til avgassing. Det ble gjennomført et søk i BRIS-databasen (brannstatistikk i Norge) for å identifisere relevante scenarier. Basert på disse scenariene ble totalt ni numeriske simuleringer av gassspredning i en generisk bolig gjennomført. Grensebetingelser, som gassmengde og -sammensetning er basert på en litteraturstudie. Simuleringene ble brukt til å evaluere potensialet for akkumuleringen av eksplosiv gassblanding, eksponering for giftige gasser (både kvelende og irriterende effekt) og muligheten for deteksjon av karbonmonoksid-avgassing (CO).

Elbil-batterier, elsykler, elsparkesykler, elbalansebrett og større, stasjonære batterier brukt til energilagring (energilagringsystemer) er funnet å være de litium-ion batterier med høyest energiinnhold, som er vanligst i boliger. Andre elektriske maskiner – forbrukerprodukter utgjør en større andel i brannstatistikken, men disse har lavere energiinnhold og dermed mindre potensiale for å utgjøre en stor personrisiko i seg selv. Elbiler som lades i garasjen og større batterier brukt til energilagring inneholder mest energi og har derfor potensial for de største konsekvensene. Imidlertid oppbevares og lades/utlades disse batteriene ikke i oppholdsrom, mens elsykler/-sparkesykler/balansebrett oppbevares og lades ofte i stue, gang og på soverom. Elsykkel og lignende batterier utsettes også for mer mekanisk og termisk belastning sammenlignet med energilagringssystemer. Det antas derfor at frekvensen av hendelser som involverer disse batteriene vil være større, enn frekvensen av hendelser som involverer energilagringssystemer. Derfor fokuserte simuleringene i denne studien på avgassing fra et elsykkel-batteri (fra en enkelt celle og fra en hel pakke) i gangen til en generisk bolig. Det ble ikke gjennomført en kvantitativ risikoanalyse av risikoen knyttet til elsykkel-batterier sammenlignet med risikoen knyttet til energilagringssystemer.

Litium-ion batteri som gjennomgår en termisk hendelse avgir typisk 1–3 liter gass per amperetime (Ah) ved 26°C og 3,7 volt (V), avhengig av batterikjemien og ladetilstand (*state of charge*, SOC). Avgassing fra litium-ion batterier inneholder karbondioksid, brennbare komponenter som karbonmonoksid, ulike hydrokarboner, metanol og hydrogen, samt giftige komponenter som hydrogenfluorid, hydrogenklorid og hydrogencyanid. Den relativ store andelen brennbare gasser (eksempelvis rundt 30% hydrogen) fører til at avgassing fra litium-ion batterier utgjør en eksplosjonsfare. Selv om batterier med lav ladetilstand avgir mindre gass enn batterier med høy ladetilstand, kan eksplosjonsrisiko for batterier med lav ladetilstand være større, siden sannsynligheten for sen antenning er større. Det fins mange forskjellige typer litium-ion batterier på markedet og flere testmetoder for batterisikkerhetstester. I dag mangler det et felles system eller database med oversikt over data for avgassing fra termiske hendelser i litium-ion batterier. Et slikt system ville være nyttig, for å dekke kunnskapshull og for å gi forventningsverdier som kan brukes i risikovurderinger.

Resultatene viser at den største mengde brennbar gassblanding, 26 liter, ble akkumulert ved avgassing fra en 400 watt-timer (Wh) elsykkel-batteripakke, som var plassert i en hylle i en liten gang på 3,5 kvadratmeter. Når den termiske hendelsen var begrenset til en enkelt batteri-celle ble 3,6 liter brennbar gass dannet. Videre viser resultatene at plasseringen av batteriet spiller en viktig rolle for akkumulering av brennbar gass. Når batteriet lagres i et delvis innelukket område, som

for eksempel en hylle, kan gassen akkumuleres. Resultatene viser også at, spesielt for avgassing fra en batteripakke, er det best å lagre/oppbevare batteriene i store og godt ventilert rom. Det ble ikke gjennomført en eksplosjonsrisikoanalyse knyttet til de akkumulerte brennbare gasskyene.

Branner av litium-ion batterier er generelt ikke signifikant mer giftig i forhold til sammenlignbare plast-branner, men har potensiale for at lave konsentrasjoner av mer skadelige gasser, som hydrogenfluorid (HF), frigjøres. Resultatene fra simuleringene gjennomført i denne studien viser at grenseverdier for helseskadelig eller dødelig gasskonsentrasjon overstiges ved en termisk hendelse i et litium-ion batteri. Giftige gasser kan ha en kvelende og en irriterende effekt på mennesker. Resultatene viser at grenseverdien for irriterende gasser oppnådd før grenseverdien for kvelende gasser. Det var hydrogenklorid (HCl) og hydrogenfluorid (HF) som raskest nådde helseskadelig eller dødelig gasskonsentrasjon, og disse gassene spredte seg også mest i rommet.

Resultatene viser videre at personrisiko knyttet til eksponering for giftige gasser er først og fremst relevant når hele batteripakken er involvert i den termiske hendelsen. Når den termiske hendelsen er begrenset til en enkel celle, viser simuleringene at kritiske gasskonsentrasjoner oppnås kun i nærheten av batteriet. Hvis derimot en termisk hendelse sprer seg til hele batteripakken, fører det til kritisk nivå av giftige gasser i hele rommet etter ca. 1 minutt for et lite rom (3,5 m²), og i hele øvre halvdel av et stort rom (43,5 m²) etter ca. 4 minutter.

For å redusere risikoen for avgassing av giftige gasser, anbefales de samme tiltakene som for å redusere risikoen for akkumulert brennbar gass. Større litium-ion batterier bør lades og oppbevares i godt ventilerte rom som ikke er oppholdsrom eller del av rømningsvei, ideelt i eksterne bygg. Dette samsvarer med NELFO sine anbefalinger for energilagringssystemer i boliger. Imidlertid, må kost/ nytte vurderes, spesielt for elsykkel og mindre batterier som inneholder mindre energi enn energilagringssystemer. Videre vil lukkede dører være gode fysiske barrierer for å forhindre eller forsinke gass- og røykspredning i boligen.

En annen viktig barriere som anbefales for å redusere risikoen knyttet til avgassing fra eller brann i et litium-ion-batteri er tidlig deteksjon. Det er spesielt viktig siden *thermal runaway* utvikler seg veldig rask, sammenlignet med for eksempel en brann som starter som en ulmebrann. I denne studien ble det kun gjennomført en grov analyse av muligheten for tidlig deteksjon av økt konsentrasjon av karbonmonoksid. Resultatene tyder på at kombinasjonsdetektor i nærheten av batteriet kan være et godt tiltak for sikkerstille tidlig deteksjon.

Anbefalinger for videre arbeid identifisert i denne studien er valideringen av simuleringene ved å gjennomføre batteri-branntester av relevante elsykkel-batterier og gjennomføring av storskala forsøk for validering av gasspredning og deteksjon. Det anbefales også å evaluere det potensielle overtrykket som en forsinket antenning (eksplosjon) av gass kan generere. Videre burde det vurderes å gjennomføre en lignende studie for energilagringssystemer eller andre scenarier med betydelig større energiinnhold enn elsykkel-batterier.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bruk av litium-ion-batterier i transport (for eksempel elbil, elsykler) og energilagring har økt i de siste årene. En klar fordel med litium-ion batterier er den høye energitettheten og mulighet for effektiv lading og utlading, sammenlignet med mange andre batteriteknologier, som blybatterier. Imidlertid innebærer litium-ion-batterier, i likhet med andre batterier, en fare for en såkalt *thermal runaway*, hvor det oppstår ukontrollerbare eksoterme reksjoner i batteriet som fører til en stadig temperaturøkning og etter hvert avgassing fra batteriet. I denne studien referer vi til en slik hendelse som *termisk hendelse* eller det engelske begrepet *thermal runaway*. Gassene som oppstår fra en slik termisk hendelse kan antenne og føre til en batteribrann.

I løpet av de siste årene har det vært en økning av antall elsykler, elsparkesykler m.m. i det norske samfunnet. Slike enheter bærer med seg en relativt stor mengde energi gjennom en litium-ion batteripakke. Det er ikke uvanlig å ta med batteriet inn etter endt bruk for oppbevaring og lading. Ved et søk i nasjonale og internasjonale nyhetsmedier er det kommet frem at forekomsten av branner i slike batterier er relativt høy, og utgjør en potensiell brannrisiko som mange privatpersoner ikke nødvendigvis er klar over. I tillegg er det en økende bruk av større, stasjonære batterier brukt til energilagring (*battery energy storage system*, BESS), i denne rapporten omtalt som *energilagringssystemer*. Disse kan være tilknyttet boliger og andre bygninger - enten som del av et solenergianlegg eller for utjevning av belastningstopper på strømmettet.

I tillegg til at batterier kan forårsake brann finnes det også flere eksempler der batterier har avgitt gass uten å begynne å brenne. Så langt har det vært fokus på eksplosive gasser som utvikles ved normal drift og det er mangelfull kunnskap om brannfare og spredning av farlige gasser ved feil i batterier og ladesystem i bygning og egnede tiltak. Gassene som avgis er giftige og utgjør en personrisiko ved innånding. I tillegg kan gassene være brennbare, og kan potensielt akkumuleres til en eksplosiv blanding. I installasjonsnormen NEK 400 - Elektriske lavspenningsinstallasjoner [2] angis at energilagringssystemer skal installeres ihht. produsentens anvisninger. Per i dag er det ukjent i hvilken grad disse anvisningene er dekkende nok, og om det er behov for ytterligere brannforebyggende tiltak og behov for ventilasjon.

Foreløpig finnes det få nasjonale retningslinjer om hvor og hvordan slike batterier bør oppbevares og lades for å minimere risikoen for brann. Dette gjelder spesielt elsykkel-batterier og andre batterier i denne størrelsesorden. For energilagringssystemer publiserte NELFO¹ nylig en veileder i samarbeid med Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), Drammensregionens brannvesen IKS (DRBV) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), med bidrag fra RISE [1]. I dette prosjektet ønsker vi å undersøke nærmere hvor farlig det er at et batteri avgir gass i et bolighus med personer til stede, og om det bør innføres en strengere regulering av oppbevaring og lading av batterier.

¹ NELFO er en landsforening i Næringslivets Hovedorganisasjon (NHO) som representerer bedrifter innen elektro, it, ekom, automatisering, systemintegrasjon og heis. <https://www.nelfo.no/>

1.2 Målsetting

Det overordnede målet for prosjektet er å studere i hvilken grad avgassing fra et batteri i en bolig kan utgjøre en personrisiko for personer som befinner seg i huset, med fokus på konsekvensene knyttet til avgassingene. Et prosessmål i prosjektet er å utvikle kompetanse på simuleringsprogrammet FDS.

Denne studien har som mål å belyse følgende:

- Utbredelsen av branner i batterier tilknyttet elsykler og elsparkesykler i Norge, og skadeomfanget av dem.
- Utbredelsen av branner i energilagringssystemer installert i bolig eller bygning brukt som energilager for solkraftanlegg og effektstyring.
- Hvilke gasser og hvor store mengder gass et litium-ion batteri kan produsere av gass med hensyn til størrelse.
- Om avgassing fra et batteri i en bolig utgjør en personrisiko pga.:
 - Giftighet
 - Mulighet for akkumulering til eksplosiv blanding i et rom
- Batteristørrelsens betydning
- Hvorvidt det bør stilles særskilte krav til oppbevaring, plassering og lading av li-ion batterier over en viss størrelse for å redusere faren om batteriene skulle begynne å brenne og / eller avgi farlig gass. Dette vil også være relevant for stasjonære energilagringssystemer.

1.3 Omfang og begrensninger

Omfanget av denne studien er begrenset til å omhandle avgassing (ikke-antent utslipp av gass) fra litium-ion-batterier. Litteraturstudien er begrenset av de økonomiske rammene i prosjektet. Den numeriske modellen er basert på tilgjengelig litteratur og det ble ikke gjennomført eksperiment for å validere modellen. Det er derfor fortsatt knyttet store usikkerheter til beregningene siden det ble ikke gjennomført eksperiment for å validere simuleringene.

1.4 Metodebeskrivelse

Det er gjennomført en litteraturstudie av faglitteratur relevant for numeriske simuleringer av avgassing i forskjellige lukkede rom.

Det ble gjennomført en gjennomgang av relevante hendelser i DSBs database for brannstatistikk, BRIS. Søkeordene som ble brukt er: «li-on», «litium», «batteri», «lader», «lading», «powerbank», «powerwall», «elbil», «elsykler». Søket omfatter perioden fra 01.01.2016 til 31.05.2020. Søket førte totalt til 45 treff registrert i kategori bygning og 114 treff registrert i kategori elbil.

Ut fra dette ble grensebetingelser for de numeriske simuleringene, samt relevante scenarioer valgt ut. Metodikk for simuleringene beskrives nærmere i kapittel 6.

1.5 Forkortelser og definisjoner

Her presenteres sentrale forkortelser og definisjoner av uttrykk som er brukt i denne rapporten. En del faguttrykk som er best uttrykt eller vanligst å bruke på engelsk vil bli presentert først på norsk, med engelsk oversettelse i parentes, underveis i rapporten.

Avgassing: Utslipp av gasser fra et batteri som undergår *thermal runaway*, som kan antenne på et senere tidspunkt.

AEGL: «*Access acute exposure guideline levels*». Akutt eksponeringsnivå.

CO: Gassen karbonmonoksid.

C-GS, C-GL, C-HS, C-HL: Ulike scenarier brukt i simuleringene, mer info i kapittel 4.

FEC: «*Fractional effective concentration*». Konsentrasjonen relevant for utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område som er eksponert til irriterende gasser.

FED: «*Fractional effective dose*». Dosen relevant for utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område som er eksponert til kvelende gasser.

HF: Gassen hydrogenfluorid.

HCl: Gassen hydrogenklorid.

IDLH: «*Immediately Dangerous to Life or Health*». Grenseverdi for eksponering til kjemikalier: konsentrasjonen som fører sannsynligvis til død, umiddelbar eller forsinket permanent skadelig helseeffekt eller forhindre rømning fra området [11].

Litium-ion batteri: Oppladbart batteri med bundet litium i katoden.

LFL: «*Lower flammable limit*». Nedre eksplosjonsgrense, laveste konsentrasjon av brennbar gass/damp i luft som er tilstrekkelig for antennelse med etterfølgende flammeutbredelse gjennom blandingen uten tilførsel av energi utenfra. Kalles også brennbarhetsgrense. [3]

LFP batteri: Litium-jern-fosfat batteri.

NMC batteri: Litium-nikkel-mangan-kobolt-oksid batteri.

P-GS, P-GL, P-HS, P-HL, P-GSL: Ulike scenarier brukt i simuleringene, mer info i kapittel 4.

SOC: «*State of charge*». Ladetilstand på batteri.

Thermal runaway: Ukontrollert eksoterm kjemisk reaksjon som bryter ned anode, katode og elektrolytt i en battericelle.

UFL: «*Upper flammable limit*». Øvre eksplosjonsgrense, høyeste konsentrasjon av brennbar gass/damp i luft som er tilstrekkelig for antennelse med etterfølgende flammeutbredelse gjennom blandingen uten tilførsel av energi utenfra. Kalles også brennbarhetsgrense. [3]

2 Litium-ion batteriers egenskaper og utfordringer

Dette kapittelet presenterer aktuell forskning på ulike aspekter av batteriegenskaper og utfordringer ved avgassing fra litium-ion batterier. Hovedpunktene som er belyst er mengde avgassing, tålegrense for mennesker som blir utsatt røykgassen.

2.1 Feilmekanismer og thermal runaway

En termisk hendelse som kan forekomme i batterier er *thermal runaway*. Dette er en ukontrollert eksoterm kjemisk reaksjon som bryter ned anode, katode og elektrolytt i en battericelle. Thermal runaway kan forekomme som resultat av ekstreme forhold, ledsaget av en feilfunksjon. Overlading, dyp-utlading eller kortslutning er de vanligste hendelsene som kan utløse overoppheting i et batteri (for flere detaljer, se avsnitt 4.3.2 i Mikalsen et. al. [4], eller avsnitt 2.3 i Bøe og Glansberg [5]). Et eksempel på en feilfunksjon kan være dersom systemet som normalt skal overvåke batteriets spenning, strøm, temperatur etc (*battery management system*, BMS), ikke fungerer som det skal. [6]

Generelt er battericeller stabile frem til temperaturen når 70-80°C, og det beskyttende laget på batteriets katode og anode begynner typisk å dekomponere eksotermt på temperaturer i området 90-120°C. Ved temperaturer over 120°C, kan elektrolytten reagere direkte med katoden og anoden [4]. Hvis temperaturene fortsetter å stige, vil den kontinuerlige økningen i temperatur føre til degenerering av katoden og anoden, og da vil ulike gasser og varme utvikles. Disse prosessene som foregår under en thermal runaway vil kunne føre til utslipp av store mengder giftige og brennbare gasser, varme gnister, og potensielt også jetflammer eller gasseksplosjon dersom gassene antennes.

2.2 Gassmengder og sammensetning

Det er mange ulike faktorer som avgjør gassmengder og sammensetning av gass ved en termisk hendelse i et litium-ion batteri. Batteritype og batterikjemi, inkludert kjemisk sammensetning av katode, anode og elektrolytt, størrelsen og kapasiteten på cellen, samt ladetilstand (*state of charge*, SOC) vil alle kunne medvirke. En annen faktor som påvirker hvilke typer gasser som frigjøres, og mengden av disse er utviklingen av thermal runaway med evt påfølgende brann. [7].

Den kjemiske sammensetning av et batteri varierer avhengig av batteritype og produsent. I transportsektoren er ofte litium-nikkel-mangan-kobolt-oksidd (NMC) batterier brukt på grunn av deres relativt store energitetthet. En annen mye brukt kjemi er litium-jern-fosfat (LFP) batterier. Energilagringssystemer kan bestå av gjenbrukte batterier for eksempel fra elbiler. Slik gjenbruk er en økende trend, og kalles ofte *second-life* batterier. Imidlertid, er kravene til energilagringssystemer ikke de samme som til batterier i transportsektoren. Avhengig av den fremtidige markeds- og teknologiutviklingen kan forskjellige batterityper og kjemier komme til å dominere disse to bruksområdene.

Videre vil størrelse og kapasiteten på cellene, samt antall celler i batteripakken, avhenge av anvendelsesområde. Et energilagringssystem i et hjem krever mer kapasitet enn en elsykkel eller elsparkesykkel, og består av et større antall celler. Energilagringssystemer har derfor potensiale til å frigjøre større gassmengder sammenlignet med batterier i elsykler og elsparkesykler.

Typiske gasser som kan oppstå ved avgassing fra litium-ion batterier er blant annet karbonmonoksid (CO), metan (CH₄), etan (C₂H₆), etylen (C₂H₄), benzen (C₆H₆), toluen (C₇H₈), etanol (C₂H₆O), metanol (CH₄O), hydrogen (H₂), hydrogenfluorid (HF) og hydrogenklorid (HCl). Flourider inne i cella kan også danne fosforoksyfluorid (POF₃). Sammensetning og mengde av de ulike gassene varierer, eksempelvis viste en studie av Andersson et. al. [8] at mengde POF₃ kan være 1:20 av mengde HF. Avgassing fra litium-ion batterier inneholder altså både giftige gasser og gasser som kan føre til dannelse av en brennbar atmosfære som gir fare for brann og eksplosjon.

Det er også forskjeller mellom batterikjemier på *når* ulike hendelser skjer, og *når* ulike gasstyper dannes i løpet av en termisk hendelse. Fernandes et. al. [9] utførte for eksempel en testserie med ni tester med overladdning av et batteri. I sju av testene ble thermal runaway med avgassing uten påfølgende antennelse observert. I to tester, da cellens overflatetemperatur steg til 300°C og 350°C, muligens på grunn av en intern kortslutning, førte det til eksplosjon. Studien har også dokumentert at det er ulike stadier med avgassing i løpet av en overladdingstest. Når først thermal runaway har startet, varierer type og mengde gass over tid. Type katode og elektrolytt i cella er sentrale for å kunne si noe om når, og hvilke mengder gasser som først vil slippe ut under en termisk hendelse.

For LFP batterier har Larsson et. al. [10–12] funnet at avgassing av HF som funksjon av tid er avhengig av ladetilstand på cella. Det ble dannet mer HF på et tidlig tidspunkt sammenlignet med lav ladetilstand. Men, lav ladetilstand (50% SOC), gav faktisk mer avgassing av HF totalt sett.

LFP batterier anses som tryggere, siden de er stabile ved høyere temperaturer og har mindre avgassing av giftige og brennbare komponenter, sammenlignet med NMC batterier. I en studie [7] hvor små husholdningsbatterier av typen 18650 av NMC og LFP ble sammenlignet, ble det funnet at NMC cellen avga mer farlige organiske gasser sammenlignet med LFP cellen. Derimot avga LFP cellen mer CO enn NMC cellen. Høyest avgassing skjedde ved høyest ladetilstand (100% SOC). Det ble funnet at CO konsentrasjonen steg raskere ved større cellekapasitet, og det ble også totalt avgitt mer CO ved større cellekapasitet. Det anmerkes at, selv om den totale avgassingsmengde for LFP batterier er funnet å være mindre enn for NMC batterier, så frigjøres det omtrent like mye HF fra begge batterityper [13,14]. En oversikt over andre relevante studier finnes i vedlegg H.

I tillegg til kjemi og batteritype, vil også metoden som anvendes for å igangsette *thermal runaway* påvirke avgassing fra litium-ion batterier. Videre kan forskjellige målemetoder og plassering av målepunkter føre til variasjon mellom forskjellige studier. Det er for eksempel stor variasjon mellom målinger av HF mellom ulike studier. Sturk *et al.* [14] brukte for eksempel to ulike metoder for å måle HF i batteritester med LFP og NMC celler som resulterte i HF-målinger som varierte med en faktor 2,3 for LFP og 3,8 for NMC cellene. Det er vanskelig å sammenligne forskjellige studier og man burde være forsikte å bruke ekstremverdiene fra litteraturen for vurderinger når det ikke foreligger eksperimentell data for scenarioene som vurderes. I denne studien ble derfor i stor grad gjennomsnittsverdier fra relevant litteratur brukt, som beskrevet i mer detalj i kapittel 6.1. Det fins mange forskjellige typer litium-ion batterier på markedet og flere testmetoder for batterisikkerhetstester. I dag mangler det et felles system eller database med oversikt over data for avgassing fra termiske hendelser i litium-ion batterier, noe som ville ha

vært nyttig med tanke på eksisterende kunnskapshull og for å gi forventningsverdier som kan brukes i risikovurderinger.

2.3 Menneskers tålegrense og beregning av tiden til kritisk eksponering

Branner av litium-ion batterier er generelt ikke signifikant mer giftig i forhold til sammenlignbare plast-branner, men har potensiale for at lave konsentrasjoner av mer skadelige gasser, som HF, frigjøres [15]. Som beskrevet ovenfor er det mange ulike faktorer som avgjør hvilke typer gasser som frigjøres, mengden av disse, og dermed også giftigheten til gasser avgitt under en termisk hendelse i et batteri.

For å vurdere effekten av eksponering for røykgass og avgassing kan forskjellige grenseverdier brukes. For eksempel brukes grenseverdien LC_{50} (*leathal concentration*) for å oppgi gasskonsentrasjonen over 30 minutter der 50 % av en eksponert populasjon dør. Tabell 2-1 viser LC_{50} grenseverdien for CO, HF og HCl.

Tabell 2-1 Dødelig gasskonsentrasjon, LC_{50} grenseverdi for 30 min eksponering gitt i ppm for karbonmonoksid, hydrogenfluorid og hydrogenklorid [16,17]. Verdiene i tabellen viser den største og minste verdi funnet i litteraturen [17].

	LC_{50} (ppm)
Karbonmonoksid (CO)	1 784 - 8 636
Hydrogenfluorid (HF)	1 276 - 4 327
Hydrogenklorid (HCl)	1 108 - 3 124

En annen veletablert grenseverdi for eksponering til kjemikalier er IDLH verdien (*immediately dangerous to life or health*) som defineres av NIOSH (*US National Institute for Occupational Safety and Health*). IDLH² oppgir konsentrasjonen som fører sannsynligvis til død, umiddelbar eller forsinket permanent skadelig helseeffekt eller som forhindrer rømning fra området [17]. IDLH grenseverdien er ikke knyttet til en bestemt eksponeringstid og har som formål å sørge for at personer klarer å rømme fra gasskonsponerte områder. Derfor er IDLH verdien lavere enn LC_{50} verdien og anses som mer relevant for denne studien enn LC_{50} verdiene. Tabell 2-2 viser IDLH grenseverdien for CO, HF og HCl.

Tabell 2-2 Øvre grense for gasskonsentrasjon med hensyn på rømning, IDLH grenseverdi gitt i ppm for karbonmonoksid, hydrogenfluorid og hydrogenklorid [17].

	IDLH (ppm)
Karbonmonoksid (CO)	1 200
Hydrogenfluorid (HF)	30
Hydrogenklorid (HCl)	50

Menneskers tålegrenser for ulike gasstyper er avhengig av eksponeringstiden. I tillegg vil tålegrensene variere fra person til person. Eldre og barn vil typisk ha lavere tålegrenser enn den generelle, voksne og friske befolkningen. Retningslinjer for akutt eksponeringsnivå (*access acute*

² «... likely to cause death or immediate or delayed permanent adverse health effects or prevent escape from such an environment.» [17]

exposure guideline levels, AEGL) brukes til beredskapsplanlegging og er ment for å beskytte de fleste individer i befolkningen, inkludert de som kan være spesielt utsatt for de skadelige effektene av gassene. AEGL verdier publiseres av USAs miljøvernmyndighet EPA (*United States Environmental Protection Agency*) og uttrykkes som spesifikke konsentrasjoner av luftbårne kjemikalier der negative helseeffekter kan oppstå. Det skilles mellom 3 AEGL verdier:

AEGL-1: Ubehagelig

AEGL-2: Invalidiserende

AEGL-3: Dødelig

I motsetning til IDLH verdiene er AEGL verdier avhengig av eksponeringstid og tillater dermed en mer nyansert vurdering. For et scenario hvor et litium-ion batteri begynner å avgi gass eller å brenne anses i denne studien AEGL-2 for 10 minutter som mest relevant, med hensikt til mulighet for evakuering. Tabell 2-3 viser AEGL 2 grenseverdien for CO, HF og HCl for forskjellige eksponeringstider.

Tabell 2-3 AEGL2 (*access acute exposure guideline levels*) grenseverdier i ppm for karbonmonoksid, hydrogenfluorid og hydrogenklorid [18].

	10 min	30 min	60 min	4 timer	8 timer
Karbonmonoksid (CO)	420	150	83	33	27
Hydrogenfluorid (HF)	95	34	24	12	12
Hydrogenklorid (HCl)	100	43	22	11	11

Kombinasjonen av AEGL grenseverdi over en gitt eksponeringstid gir en kritisk dose. Imidlertid, tar dette tilnærming ikke hensyn til at konsentrasjonen vil endre seg over tid. For å ta hensyn til den variable gasskonsentrasjon over tid kan standarden ISO 13571:2012 «Life-threatening components of fire» [19] brukes, som inkluderer modeller for beregningen av grenseverdi for kvelende gasser (*fractional effective dose*, FED) og grenseverdi for irriterende gasser (*fractional effective concentration*, FEC). Dermed er det mulig å skille mellom den kvelende og irriterende effekt, i tillegg til en nyansert vurdering for effekten av en gassblanding over tid. I denne studien er en grenseverdi på 0,1 for FED og FEC brukt for å estimere tiden frem til det tidspunktet da det antas at utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område (*tenability*) blir nedsatt. Ved en FED eller FEC verdi på 0,1 vil statistisk sett 1% av den generelle befolkning, inkludert personer som er spesielt utsatte for skadelige effektene, bli påvirket. Det er viktig å påpeke at eksponering til giftige gasser som ikke fører til nedsatt utholdenhet kan fremdeles føre til en rekke effekter som kan forlenge rømming og dermed øke eksponeringsintensiteten og føre til helseproblemer i etterkant [19].

2.4 Deteksjon

Sesseng *et al.* [20] gjennomførte en rekke brannforsøk for å teste forskjellige brannvarslere (optiske røykvarslere og kombinasjonsdetektorer). Studien indikerer at kombinasjonsdetektorer varslet tidligere enn optiske røykvarslere på grunn av CO-sensoren. Ved utløsning av kombinasjonsdetektorene ble CO-konsentrasjon på rundt 34 ppm målt. Denne verdien legges til grunn for å evaluere om og når avgassing potensielt kan detekteres av en kombinasjonsdetektor med CO-sensor. I denne sammenhengen antas det at avgassing detekteres når mesteparten av takarealet har oppnådd denne verdien, det vil si, når mesteparten av taket dekkes av en iso-

overflate på 34 ppm CO (se for eksempel Figur 7-18 og Figur 7-19). Dette er en forenklet tilnærming for å se på deteksjonsmuligheter, likevel gir resultatene en indikasjon på om kombinasjonsdetektorer som måler CO kan være en god løsning for rask deteksjon av avgassing fra litium-ion batterier.

3 Statistikk, relevante batterihendelser

For å få en oversikt over relevante batterirelaterte hendelser i Norge ble det gjennomført et søk i DSBs database for brannstatistikk, BRIS [21]. De viktigste spørsmålene som ble undersøkt ved hjelp av BRIS databasen er:

- Hvilke typer batterier fører til avgassing, røykutvikling eller brann?
- Hvor befinner batteriene seg når hendelsen inntreffer?

Av de 45 hendelser som er registrert i kategori bygning var de fleste, totalt 28, relatert til brann eller røykutvikling i «Andre elektriske maskiner – forbrukerprodukter» (se Tabell 3-1). 15 hendelser var relatert til «balansebrett/ståbrett» eller «elsykkel».

Tabell 3-1: Kategorisering av hendelser relatert til bygninger etter «type elektriske maskiner - forbruksprodukter» som var grunn for hendelsen. Kategori «ikke spesifisert» er markert med grått og er ikke relevant for denne studien.

Type elektriske maskiner - forbrukerprodukter	Antall
Andre elektriske maskiner – forbrukerprodukter	28
Balansebrett/ståbrett	5
Elsykkel	10
Ikke spesifisert	2

Tabell 3-2 gir en oversikt over produktbeskrivelser for brann/røyk-kildene som er registrert i kategori «Andre elektriske maskiner – forbrukerprodukter». I syv (markert med grått) tilfeller er produktet beskrevet som en type lader og er dermed ikke relevant for avgassing fra litium-ion batterier. De fleste batterier i Tabell 3-2 tilhører mindre utstyr som for eksempel håndholdt verktøy (batteridrill, 18 V batteri til verktøy, etc.), forbrukerprodukter (mobiltelefon, hårklipper, etc.) og fjernstyrte biler, båter eller droner. På grunn av størrelsen og dermed mindre potensiale for større konsekvenser, sammenlignet med for eksempel batterier i elsykler eller elsparkesykler anses disse produkter mindre relevant for denne studien.

Søket i BRIS gav ikke treff for branner i energilagringssystemer i Norge. Men dette har forkommet i andre land, som for eksempel 23 branner i energilagringssystemer i Sør-Korea i 2018 [22] og en eksplosjon som følge av en *thermal* runaway i en NMC-posecelle i et container-energilagringssystem i Arizona i 2019 [23].

En svakhet ved BRIS databasen, spesielt for hendelser relatert til batterier, er at batteritype i de fleste tilfellene ikke er kjent. Elektriske rullestoler finnes for eksempel med blybatterier eller litiumbatterier. Dette gjelder for alle registrerte kategorier. Produktbeskrivelse i kategori «balansebrett/ståbrett» og «Elsykkel» var enda mindre omfattende enn beskrivelsene i kategori «Andre elektriske maskiner – forbrukerprodukter». Dette gjør det vanskelig å identifisere nøyaktig hvilke typer batterier som var involvert i disse hendelsene.

Tabell 3-2: Produktbeskrivelse for «Andre elektriske maskiner – forbrukerprodukter» fra hendelser registrert i BRIS. Produkter som er beskrevet som en type lader er markert med grått og er ikke relevante for denne studien.

Andre elektriske maskiner - forbrukerprodukter	Antall
Ikke spesifisert	1
Batteri	1
Batteri til håndholdt verktøy	1
Batteridrill	1
Batterilader	1
Batteri-lader til fjernstyrt bil.	1
batterilader til rc bil	1
Batteripakke til drone til Phantom 2 og 3.	1
Bil lader	1
Dronebatteri	1
Elektrisk radiostyrt bil.	1
Elektrisk rullestol til utlån på senteret	1
Elektrosjokk maskin for massasje ved fysioterapi	1
Elsparkesykkel	1
Fjernstyrt båt, batteriet kortsluttet	1
industri gulv vasker	1
Lader modellfly	1
Lader og batteri til radiostyrt båt.	1
Lader til fjærnstyrt lekebil	1
Lading av Truck	1
Makita 18 v batteri	1
Mobil telefon tilkoblet Huawei mobil lader	1
Mobiltelefon	1
NOOA Hårtrimmer	1
Opp landbart batteri til et fjernstyrt fly.	1
Oppladbar hårklipper.	1
oppladbar lommelykt	1
Startbooster med 12v batteri.	1

Lokasjonen på batteriet er godt dokumentert i BRIS. Tabell 3-3 viser antall registrert hendelser for ulike antatte arnested.

Tabell 3-3: «Antatt arnested» sortert etter «type elektriske maskiner - forbruksprodukter» for relevante hendelser registrert i BRIS.

Antatt arnested	Andre elektriske maskiner - forbrukerprodukter	Balansebrett/ståbrett	Elsykkkel	Total
Annet	1			1
Fellesareal	1			1
Gang	1		4	5
Garasje	1	1	1	3
Kjeller			2	2
Kjøkken	1	1		2
Kontor	3			3
Lager	2		1	3
Soverom	1	1		2
Stue	3	1	2	6
Utvendig		1		1
Våtrom	6			6
Total	20	5	10	35

Det er for få hendelser registrert for å ha en statistisk signifikant konklusjon over hvor de fleste batteribranner starter. Imidlertid kan BRIS data og kunnskap om bruksformålet av de forskjellige produkter brukes for å etablere følgende funn:

- Elsykkkel, elsparkesykkkel og balanse-/ståbrett oppbevares og lades i hovedsak i gangen/inngangspartiet eller i garasje og kjeller. Imidlertid er det urovekendes at det er også registrert hendelser med balanse/ståbrett på soverom og stue.
- For lettere produkter, som er enklere å forlytte, er det større variasjon i lokasjon.
- Romklima på våtrom kan være årsak at det oppstår lettere elektrisk feil. Produktene som ble registrert på våtrom er ikke relevant for denne studien. Dermed ble denne påstanden ikke nærmere undersøkt.

Hendelser som er registrert tilknyttet elbil inneholder mindre informasjon om lokasjonen som er relevant for denne studien. I tillegg er flere av de 114 hendelsene som er registrert på elbil ikke relevant for studien, siden de ikke inkluderte batteripakken, oppsto som konsekvens av en kollisjon, er antatt påsatt, eller lignende. Som tidligere nevnt for hendelser registrert i kategori «bygning» er også informasjon om batteritype i kategori «elbil» veldig begrenset. To av hendelsene, som medførte uantent (uten synlige flammer) avgassing fra et elbil-batteri, hadde en mer omfattende beskrivelse av hendelsesforløpet:

«Det var en kjemisk reaksjon i batteriet på en Tazzai Zero og det ble dannet en svært ubehagelig og kvalmende gass. Temperaturen ble ikke høyere enn 60-70 grader. Om denne gassen var/er giftig vites ikke!»

«Det var varmeutvikling i batteriene på en Buddy elbil. Ingen åpne flammer med mye røykutvikling. [...]».

Videre var det to hendelser registrert i «elbil» kategorien som ligner på hendelser registrert kategori «bygning». Disse to er hendelser er:

«Brann i elektrisk rullestol som stod nære husvegg.»

«Det brant i en stor sparkesykkel da OBRE³ ankom stedet. Vi slukket den ved å senke den i en stor søppelkasse fylt med såpevann. [...]»

Også andre land har registrert økning i denne type hendelser. Myndigheten i Singapore har for eksempel uttrykt bekymring etter at antall branner økte fra 9 branner i elsparkesykler i 2016, til 40 branner i elsparkesykler og 7 i elsykler i 2017, og videre til 50 branner i elsparkesykler og 22 i elsykler i 2018 [24,25]. Myndighetene i Kina har etablert en standard [26] for sikkerhetstekniske spesifikasjoner for elsykler, som krever at alle elsykler skal leveres med en brukermanual. Manualen skal inneholde sikkerhets instruksjoner som:

- Elsykler kan ikke parkeres i foajeen av bygninger, ved rømningsveier/trapper og nødutgangene.
- Elsykler kan ikke parkeres eller lades i boligbygg.
- Elsykler skal laddes bort fra brennbare materialer.
- Det skal ikke laddes for lenge.

Ut fra søket i BRIS-databasen er det funnet at termiske hendelser i elsykkel-, elsparkesykkel- og elbalansebrett-batterier er mest relevante for denne studien, siden det ikke er registrert hendelser knyttet til energilagringssystemer og det er mer sannsynlig at elsykkel- og lignende batterier oppbevares og laddes i oppholdsrom. Det kan antas at frekvensen av hendelser med denne typen batterier vil øke med økende antall av elsykkel og elbalansebrett i Norge.

³ Anm: OBRE er Oslo Brann og Redningsetat.

4 Scenarier

Batterier som brukes i energilagringssystemer inneholder typisk mer energi enn elsykkel-batterier. Dermed er konsekvensen av en termisk hendelse i slike batterier potensielt større enn for elsykkel-batterier. Imidlertid anbefaler NELFO at energilagringssystemer «plasseres i egne brannceller, fortrinnsvis i eksterne bygg som bod eller garasje» [1]. Videre anbefaler NELFO å plassere slike batterier i rom med sporadisk personopphold eller adgangsbegrensninger, hvis eksterne bygg ikke er et alternativ. Dermed antas det at sannsynligheten for at en person er utsatt til avgassingene eller brannrøyk fra et energilagringssystem ved en termisk hendelse er mye mindre enn for avgassingene eller brannrøyk fra elsykkel-, elsparkesykkel- og elbalansebrett-batterier. Batterier i disse kjøretøy er også mer utsatt for termiske belastninger (bruk og lading ved veldig kalde eller veldig varme omgivelsestemperatur) og ikke minst mekaniske belastninger, som igjen vil øke frekvensen for termiske hendelser. Videre vil installasjon og vedlikehold av energilagringssystemer utføres av fagfolk, mens eiere av elsykkel, elsparkesykkel og elbalansebrett ikke nødvendigvis har kunnskap om egenskapene av litium-ion batterier. Basert på disse vurderingene, plassering av batteriene, mekanisk og termisk belastning, i tillegg til kunnskapen om batteriene, konkluderes at frekvens for termiske hendelser og sannsynlighet for eksponering av personer vil være større for elsykkel-, elsparkesykkel- og elbalansebrett-batterier sammenlignet med energilagringssystemer. Derfor fokuserer simuleringene i denne studien på representative hendelser som er relevante for batteriene i disse mindre kjøretøy.

Basert på funn i avsnitt 3 konkluderes det at det mest relevante scenarier er at et batteri i størrelsesorden av elsykkel- eller elbalansebrettbatterier fører til avgassing i inngangspartiet eller gangen av en bolig. En viktig faktor for hendelsesforløpet er om inngangspartiet eller gangen er åpent eller lukket. Det skiller derfor mellom to scenarier:

- Alle dører til gangen er lukket og rommets volum er dermed begrenset.
- Minst en dør til et større rom (for eksempel stue) er åpen.

Et mulig scenario er også at avgassing skjer mens alle dørene er lukket, men at noen underveis i hendelsen åpner døren til gangen for å evakuere boligen eller for å undersøke hendelsen. Dette scenarioet ble tatt hensyn til i en egen simulering. Det antas at disse batteritypene lagres og lades enten på gulvet (for eksempel i nærheten av en stikkontakt) eller i en garderobe eller skap. Disse to lokasjonene ble derfor undersøkt i denne studien. Videre er tilgjengelig energi en viktig faktor. I denne studien ble derfor to scenarier undersøkt:

- Avgassing fra en enkel celle. Den termiske hendelsen sprer seg ikke fra celle til celle og tilgjengelig energi er dermed begrenset.
- Den termiske hendelse propagerer fra celle til celle. Den totale frigjorte energien er dermed større. I tillegg antas det at mer enn en celle vil bidra til avgassing samtidig.

Basert på disse vurderingene ble det etablert totalt ni scenarier som er oppsummert i Tabell 4-1.

Tabell 4-1 Scenariooversikt. Betydning av forkortelser er: battericelle (C), batteripakke (P), plassering på gulv (G), plassering på hylle (H), avgassing i et lite/*small* rom (S) og avgassing i et stort/*large* rom volum (L). Med et stort rom menes i dette tilfelle at dør mellom gang og stue er åpen.

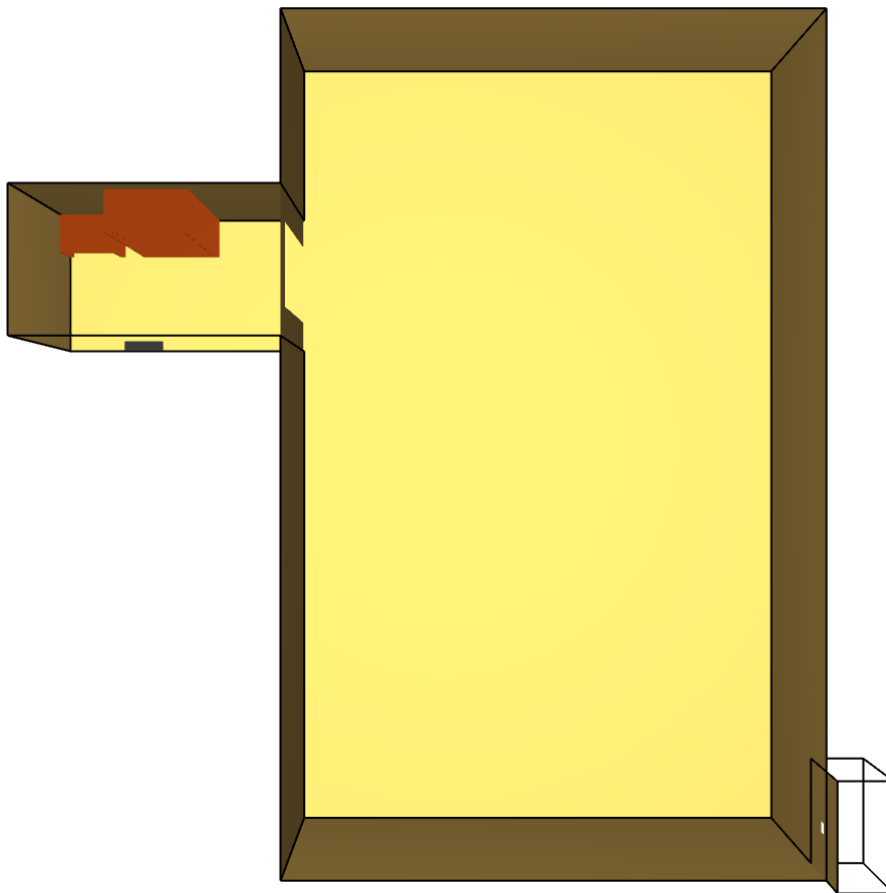
Simulering	Batteri	Batteri posisjon	Romkonfigurasjon
C-GS	Celle	Gulv	Gang
C-GL	Celle	Gulv	Gang og stue
C-HS	Celle	Hylle	Gang
C-HL	Celle	Hylle	Gang og stue
P-GS	Pakke	Gulv	Gang
P-GL	Pakke	Gulv	Gang og stue
P-HS	Pakke	Hylle	Gang
P-HL	Pakke	Hylle	Gang og stue
P-GSL	Pakke	Gulv	Gang (dør til stue åpnes 5 min forsinket)

Mengde avgassing og gasskomposisjon er blant annet avhengig av energiinnhold og batterikjemi. Elsykkel-batterier som er tilgjengelig på markedet har typisk en kapasitet mellom 400 Wh – 700 Wh [27]. Batterier i elbalansebrett er typisk mindre enn det. Derfor ble et Bosch 400 Wh, 36 V batteri valgt som representativt for simuleringene. Batteriet er satt sammen av Samsung INR 18650-29E celler (3,7 V og 2900 mAh), med litium-nikkel-mangan-kobolt-oksid (NMC) batterikjemi.

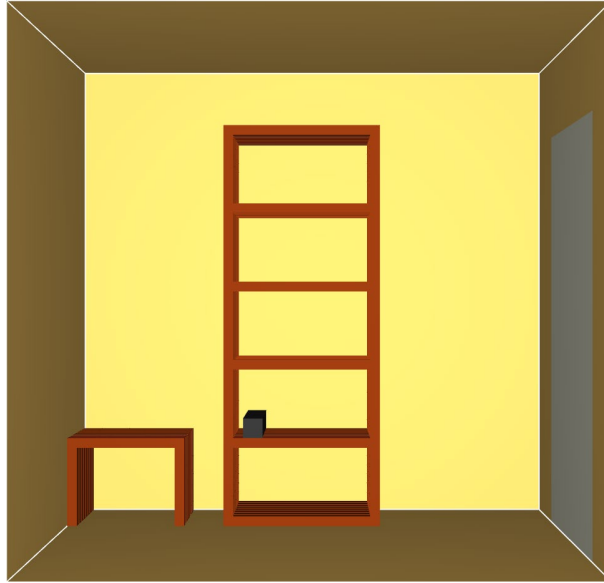
5 Planløsning i simuleringer

En generisk romgeometri ble etablert for å gjennomføre simuleringene. Geometrien består av en gang/entre (2,5 m x 1,4 m) og et tilstøtende, større rom (5 m x 8 m), som representerer for eksempel en stue (se Figur 5-1). Rommene har 2,4 meter takhøyde. Romvolumet er dermed henholdsvis 8,4 m³ (8.400 liter) og 96 m³ (96.000 liter) for gangen og stuen. Døren mellom rommene er 0,8 m x 2 m. Det største rommet inneholder et liten (10 cm x 10 cm) ventilasjonsåpning. I gangen er det blassert en benk og en hylle. Simuleringen ble gjennomført med åpent eller lukket dør.

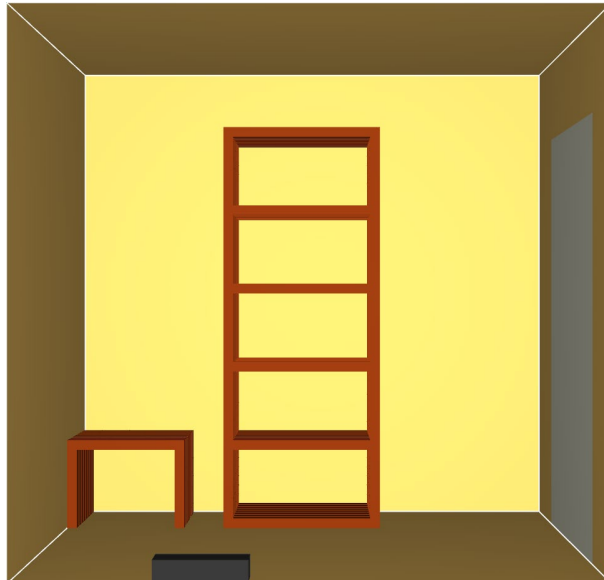
Batteriet ble plassert på to forskjellige posisjoner som er: i hylle, 45 cm over gulvet, (se Figur 5-2) og på gulvet (se Figur 5-3). Batteriet avgasser i alle simuleringene i retning mot døren.



Figur 5-1 Romgeometri for simuleringene bestående av en gang/entre (2,5 m x 1,4 m) og et tilstøtende større rom (5 m x 8 m). Høyde er 2,4 m.



Figur 5-2 Plasseringen av batteriet (svart boks) i hyllen i gang/entre.



Figur 5-3 Plassering av batteriet (svart boks) på gulvet i gang/entre.

6 Oppbygging av den numeriske modellen

6.1 Avgassingsprofil og gass-sammensetting

Simuleringene ble gjennomført i Fire Dynamics Simulator (FDS) versjon 6.7.4-0. FDS bruker godt etablerte modeller for gassdispersjon, turbulens osv. Det viktigste for å få gode resultater fra FDS simuleringer er å etablere realistiske grensebetingelser. For batterihendelser er det spesielt viktig med realistiske utslippsbetingelser (utslippsrate, temperatur og gass-sammensetning). Som nevnt i kapittel 4 anses et 400 Wh NMC batteri som representativt for denne studien. Det ble ikke gjennomført eksperimentelle forsøk i denne studien. Gass-sammensetning og mengde ble derfor etablert basert på tilgjengelig litteratur. Den valgte sammensetningen er i hovedsak basert på en rapport fra Gully *et al.* [28] (tabell 13-5 i rapporten), som blant annet undersøkte avgassing fra NMC-poseceller (3,7 V og 63 Ah) ved ulike ladetilstander (*state of charge*, SOC). Celletype (sylinder, pose eller prismatisk) vil ha en påvirkning av hendelsesforløpet. Likevel anses rapportens data som representativt, siden batterikjemien, NMC i dette tilfelle, kan antas å ha en større betydning for gass-sammensetningen enn celletype. I studien ble det brukt forskjellige initieringsmetoder for å igangsette en termisk hendelse (oppvarming, overlading og ekstern kortslutning). Gass-sammensetningen som ble målt vises i Tabell 6-1. Det er viktig å anmerke at hydrogen (H₂) ikke ble målt i disse eksperimentene, men anslått til å ligge mellom 24% og 28% i rapporten. For simuleringene i denne studien ble en verdi av 26% brukt.

Tabell 6-1 Avgassings-sammensetning i volumfraksjon for oppvarming ved forskjellige ladetilstander (50%, 75% og 100% SOC), overlading og ekstern kortslutning ved 100% SOC.

Gass	Oppvarming ved ulike SOC			Overlading	Ekstern kortslutning ved 100% SOC	Gjennomsnitt
	50%	75%	100%			
CO ₂	19,6	25,7	40,3	38,8	65,9	38,0
CO	29,2	38,1	11,4	34,4	19	26,4
CH ₄	12,6	9,4	19,4	12,5	2,7	11,3
C ₂ H ₆	10,6	10,5	11,7	4,8	7,6	9,0
C ₂ H ₄	10,5	4,4	9,6	4,9	1,6	6,2
HCl	9,7	0,8	1,9	0,2	0,2	2,6
HF	0,7	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3
C ₆ H ₆	4,1	5,2	1,1	4,3	1,9	3,3
C ₇ H ₈	2	4,1	0,3	0,5	0,9	1,6
C ₂ H ₆ O	0,3	0,7	2,9	0,1	0	0,8
CH ₄ O	0,7	0,8	1,1	0,5	0,2	0,7

Det er knyttet store usikkerheter til gass-verdiene fra studien [28], blant annet fordi testkammeret som ble brukt ikke er 100% tett og tillater lekkasje gjennom små hull. Derfor ble den relative andel⁴ av hovedbestanddelene i avgassings-sammensetningen fra oppvarmingsforsøket i Gully *et al.* [28] (H₂: 30,0%, CO₂: 32,5%, CO 22,5%, CH₄: 9,7%, C₂H₄: 5,3%) sammenlignet med

⁴ Relativ andel vil si at hovedkomponenten er vektete, slik at summen av dem blir 100%. Derfor er samsvarer tallene i parentes ikke overens med tallene i Tabell 6-1.

resultatene for en NMC sylinderselle presentert av Golubkov *et al.* [13] (H_2 : 30,8%, CO_2 : 41,2%, CO 13,0%, CH_4 : 6,8%, C_2H_4 : 8,2%). Sammenligningen viser at gasskonsentrasjoner er i samme størrelsesorden. Derfor ble verdiene fra Gully *et al.* [28] brukt i simuleringene, siden denne studien også målte flere gasstyper enn Golubkov *et al.* [13].

Imidlertid er forskjellen mellom HF-målingene fra Gully *et al.* [28] og andre studier relativ stor (en til to størrelsesorden i forskjell). Gully *et al.* [28] rapporterer i snitt 1 mg/Wh HF-frigjøring for NMC posecellen, basert på et antatt totalt gassutslipp av 2 l/Wh. Sturk *et al.* [29] rapporterte for eksempel HF målinger som tilsvarer i snitt 11 mg/Wh per celle for NMC-celler med ulik SOC. Denne snitt verdi ble brukt for simuleringene i denne studien. Nedjalkov *et al.* [30] målte HF-avgassing som tilsvarer 0,7 mg/Wh for NMC poseceller og som er nærmere Gully *et al.* [28] målingene. Men cellen i Nedjalkov *et al.* studien [30] var pakket inn i et tekstil med kompositstruktur og det er uklart i hvilken grad det påvirker avgassingen. Generelt finnes det færre studier som rapporter HF-målingene for NMC celler enn for andre kjemier. Likevel tyder litteraturen på at 11 mg/Wh ikke er en konservativ verdi for litium-ion batterier generelt. Sturk *et al.* [29] rapporterer for eksempel HF målinger som tilsvarer 84 mg/Wh per celle for LFP-celler med ulik SOC. Ribière *et al.* [31] antyder at HF-frigjøringsmengden er 37 mg/Wh – 69 mg/Wh for $LiMn_2O_4$ (LMO) celler. Larsson *et al.* [32] målte HF for syv forskjellige batterier med varierende batterikjemi, inkludert $LiCoO_2$ (LCO), $LiFePO_4$ (LFP), og $LiNiCoAlO_2$ - $LiAlTiPO_4$ (NCA-LATP). HF-avgassing ble funnet å være 20 mg/Wh – 200 mg/Wh. Lecocq *et al.* [33] målte 93 mg/Wh og 63 mg/Wh for branntester av to forskjellige elbiler. For disse målingene må det tas hensyn til at forsøkene ble gjennomført for hele bilder og ikke bare en celle eller pakke/modul.

Basert på gjennomsnittskonsentrasjonen av Gully *et al.* [28] og HF målingene fra Sturk *et al.* [29] ble gass-sammensetning (Tabell 6-2) for simuleringene etablert.

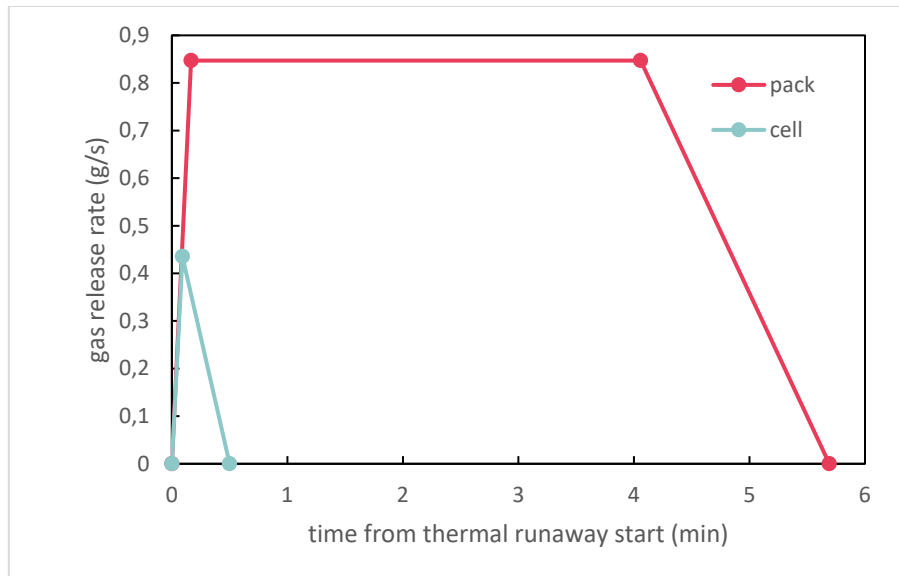
Tabell 6-2 Avgassings-sammensetning som ble brukt i simuleringene.

Spesies	Massefraksjon (%)
CO_2	44,87
CO	19,82
CH_4	4,85
C_2H_6	7,27
C_2H_4	4,65
HCl	2,50
HF	1,81
C_6H_6	6,94
C_7H_8	3,85
C_2H_6O	0,99
CH_4O	0,57
H_2	1,89

Basert på litteraturen angitt ovenfor ble det antatt at et litium-ion batteri som gjennomgår en termisk hendelse avgir 2 l/Ah gass ved 25°C og 3,7 V. Dette tilsvarer rundt 0,54 l (0,6 g) per Wh, som også ble brukt av Gully *et al.* [28]. Denne verdien er også i godt samsvar med de rapporterte 0,7 g/Wh av Golubkov *et al.* [13].

I tillegg til total mengde avgassing er også avgassingsrate en viktig faktor for simuleringene. Avgassingsrate fra en enkel celle kan beskrives som et to-steps forløp som øker raskt (2 s – 10 s) til maksimale raten og deretter avtar lineært eller eksponentielt. For simuleringene i denne studien legges en forenklet profil for avgassingsrate til grunn, som foreslått av Gully *et al.* [28]. Imidlertid, ble profilen modifisert for å reflektere energiinnholdet i Samsung-cellene (se kapittel 4). Profilen

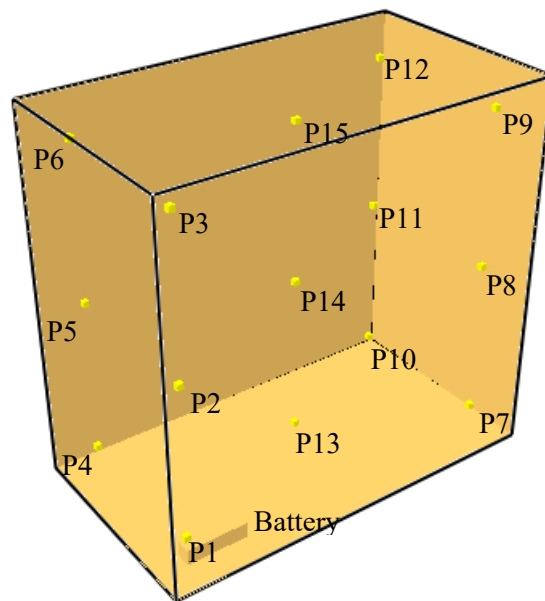
for avgassingsrate for hele batteripakken er etablert basert på profilen fra en enkelt celle og antagelsen at det er maksimalt to celler som avgasser samtidig. Det vil si at maksimal avgassingsrate for batteripakken er dobbelt så stor som for en enkel celle. Hvordan en termisk hendelse propagerer fra celle til celle og igjennom en batteripakke er avhengig av batteridesign. Det betyr at det er også mulig at flere celler enn to avgasser samtidig. Avgassingsprofilene som ble brukt i simuleringene for celle og pakke vises i Figur 6-1. Avgassingstemperatur er 450°C for alle simuleringene, basert på Gully *et al.* [28].



Figur 6-1 Forenklet profil for avgassingsrate som ble brukt for å simulere avgassing fra en battericelle og -pakke.

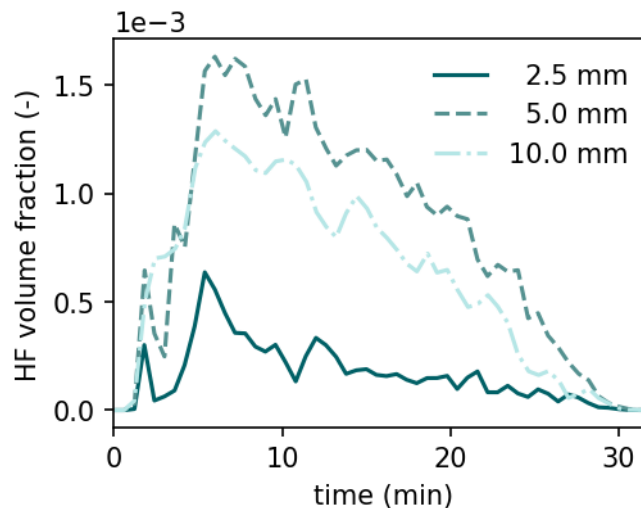
6.2 Grid-sensitivitetsanalyse

Simuleringene er basert på et uniformt grid med 5 mm store gridceller. For å bekrefte at konklusjonene fra simuleringene ikke er avhengig av grid oppløsningen, ble en grid-sensitivitetsanalyse gjennomført med et grovt grid på 10 mm og et finmasket grid med 2,5 mm gridceller. Grid-sensitiviteten ble gjennomført for gang/entre uten ekstra møbler og med batteriet plassert på gulvet. Avgassingsretning er oppover. Gasskonsentrasjonen ble registrert i 12 forskjellige posisjoner, som vises i Figur 6-2.



Figur 6-2 Posisjon av målepunktene i simuleringene.

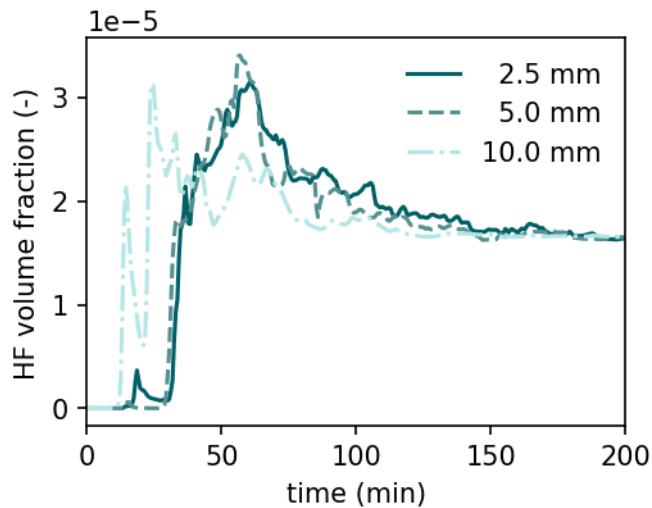
I Figur 6-3 til Figur 6-6 vises HF-konsentrasjonen i forskjellige målepunkter for forskjellige gridoppløsninger. Simuleringen ble gjennomført med en avgassingsrate som er forskjellige fra raten som ble brukt i de påfølgende simuleringene. Derfor er absoluttverdiene i disse figurene ikke korrekt. Imidlertid, vil de fortsatt vise hvordan gridoppløsningen påvirker gassdispersjonen.



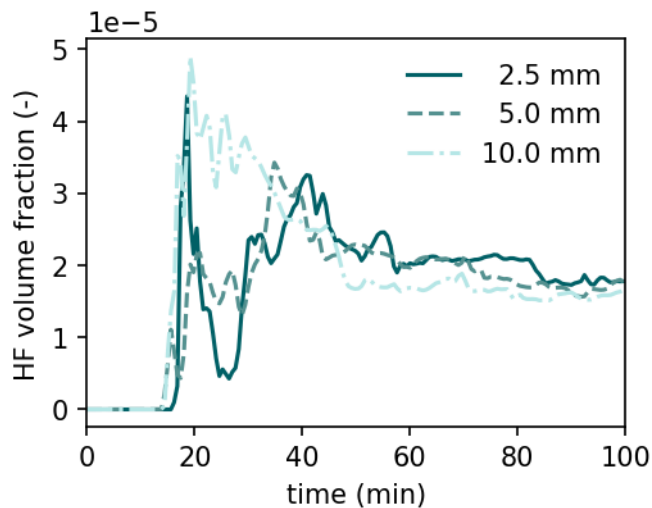
Figur 6-3 HF-volumfraksjon i målepunkt P1 for simuleringene med gridoppløsningene 2.5 mm, 5 mm og 10 mm.

Forskjellen er stor mellom ulike gridoppløsninger for simuleringene i målepunkt P1 (se Figur 6-3). Dette er målepunktet er rett ved gassutslippet. Siden selve utslippet ikke er finoppløst, det vil si at utslippspunktet er modellert med areal på 10 mm x 10 mm, er selv det mest finoppløste grid ikke tilstrekkelig for å beskrive strømningsforholdene i dette området nøyaktig. Dette er en

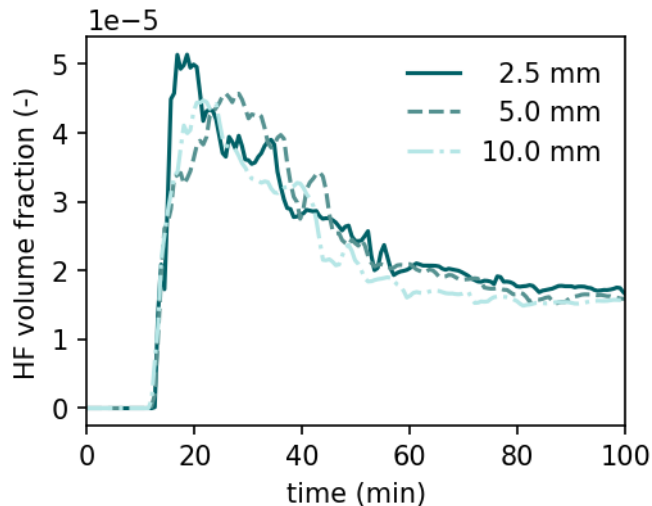
vanlig tilnærming for simuleringene hvor hovedfokus ikke er selve utslippspunktet. Ser man på målepunkter som ligger et stykke vekk fra utslippspunktet (Figur 6-4 og Figur 6-5) ser man at simuleringene med 2,5 mm og 5 mm grid gir relativt like resultat, mens 10 mm grid er noe annerledes. I målepunkt P12, som er lengst vekk, gir alle grid sammenlignbart resultat (se Figur 6-6). Dermed konkluderes det at et grid med 5 mm gridceller er tilstrekkelig finoppløst for denne studien.



Figur 6-4 HF-volumfraksjon i målepunkt P5 for simuleringene med gridoppløsningene 2.5 mm, 5 mm og 10 mm.



Figur 6-5 HF-volumfraksjon i målepunkt P11 for simuleringene med gridoppløsningene 2.5 mm, 5 mm og 10 mm.



Figur 6-6 HF-volumfraksjon i målepunkt P12 for simuleringene med gridoppløsningene 2.5 mm, 5 mm og 10 mm.

6.3 Beregning av brennbart gasskyvolum

Avgassing fra litium-ion batterier inneholder forskjellige brennbare gasser, som fører til at det kan oppstå en eksplosjonsrisiko, hvis gassene fra batteriet blandes med oksygen fra omgivelsen uten å antenne tidlig. Hvor mye av gassen kan antennes er avhengig av blandingsforholdene. Det vil si hvor mye av gassblandingen ligger mellom den nedre (*lower flammable limit, LFL*) og den øvre (*upper flammable limit, UFL*) grensen for brennbar gas. De brennbare gassene som ble inkludert i simuleringene vises i Tabell 6-3, samt tilhørende LFL og UFL verdier.

Tabell 6-3 LFL og UFL for de brennbare gasser som er inkludert i simuleringene. [34]

Gass	LFL (%)	UFL (%)
Karbonmonoksid (CO)	12,5	74,0
Metan (CH ₄)	5,0	15,0
Etan (C ₂ H ₆)	3,0	12,4
Etylen (C ₂ H ₄)	2,7	36,0
Benzen (C ₆ H ₆)	1,3	7,9
Toluen (C ₇ H ₈)	1,2	7,1
Etanol (C ₂ H ₆ O)	3,3	19,0
Metanol (CH ₄ O)	6,7	36,0
Hydrogen (H ₂)	4,0	75,0

For å beregne LFL og UFL for gassblandingen i simuleringene ble Le Chatelier's blandingslov brukt:

$$LFL = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{LFL_i}}$$

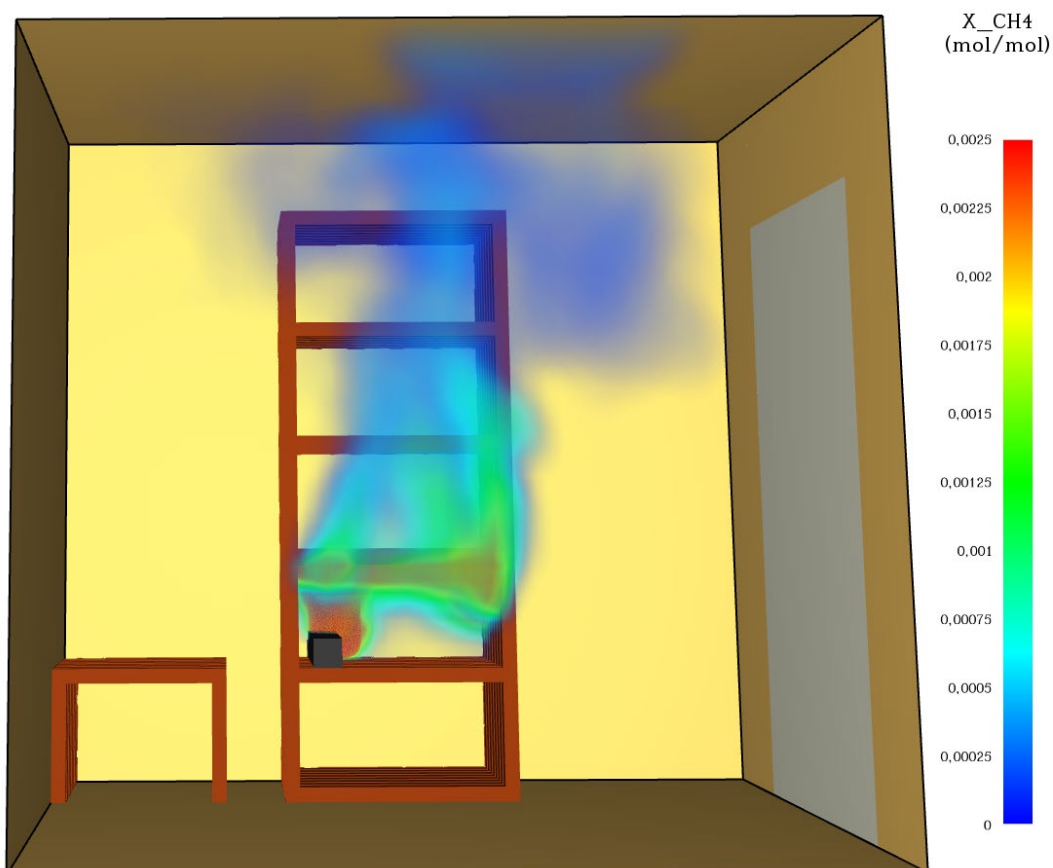
hvor x_i er volumprosent av stoff i . Basert på LFL og UFL verdiene for blandingen i hver enkelt gridcelle ble det bestemt om cellevolumet bidrar til totalt volum av den brennbare gasskyen. Størrelsen av den brennbare gasskyen og hvor lenge den opprettholdes før gassen bli tynnet ut vil påvirke sannsynligheten for at det antennes og hvor stor eksplosjonsovertrykket blir ved antenning. Disse to parameterne ble imidlertid ikke undersøkt i denne studien.

7 Simuleringsresultater og diskusjon

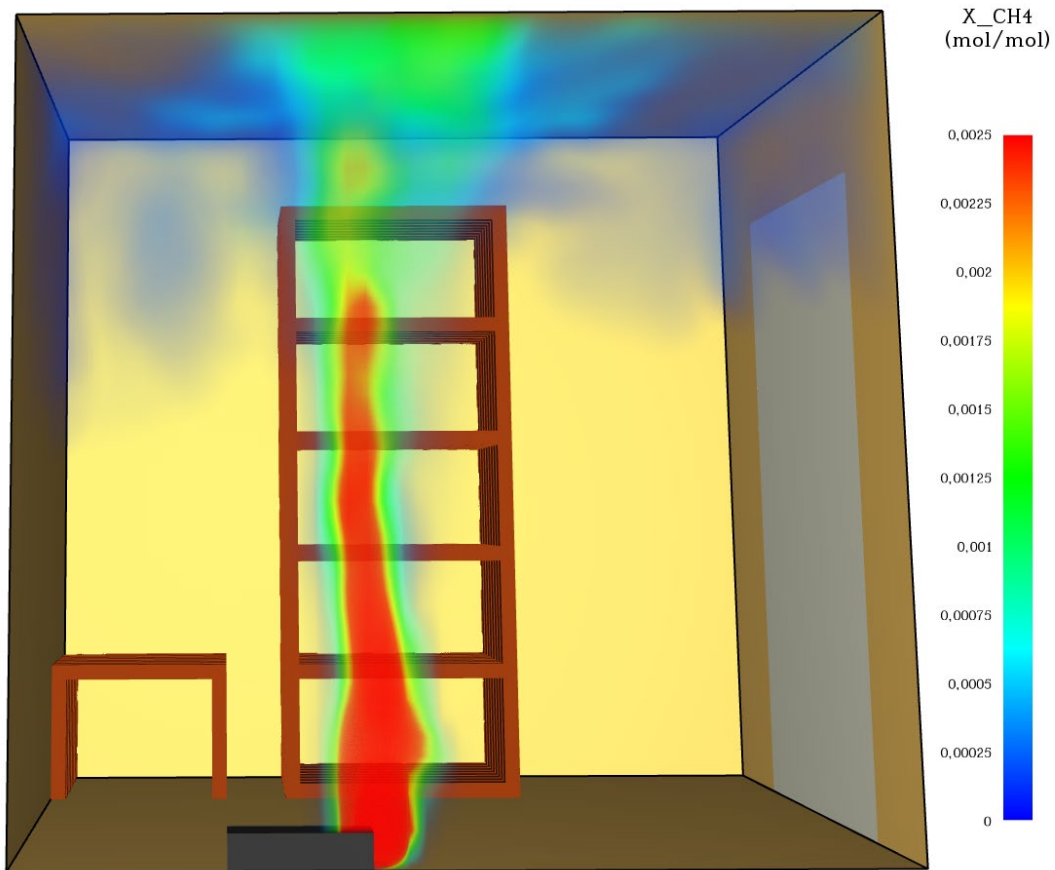
Dette kapittel presenter resultatene fra simuleringene med fokus på brennbar gasskystørrelse og eksponering for kvelende og irriterende gasser.

7.1 Akkumulering av eksplosiv blanding i et rom

Totalt ble det gjennomført ni simuleringer av forskjellige scenarioer. For alle simuleringene ble volumet av den brennbare gasskyen analysert (se vedlegg A). Figur 7-1 og Figur 7-2 viser metankonsentrasjonen tolv sekunder etter at avgassingene fra batteripakken startet. Forskjellen mellom de to viste scenarioene er at batteriet er plassert henholdsvis i hyllen (scenario P-HS) og på gulvet (scenario P-GS). Når batteriet er plassert på gulvet kan de varme, lette gassene stige fritt oppover mot taket, mens de samles delvis i hyllen når batteriet er plassert der. Dermed bygges det opp ett større volum med brennbar gass når batteriet plasseres i hyllen. Dette gjelder, både for simuleringer av battericellen (se Figur 7-3 og Figur 7-4) og simuleringer av batteripakken (se Figur 7-5 og Figur 7-6).

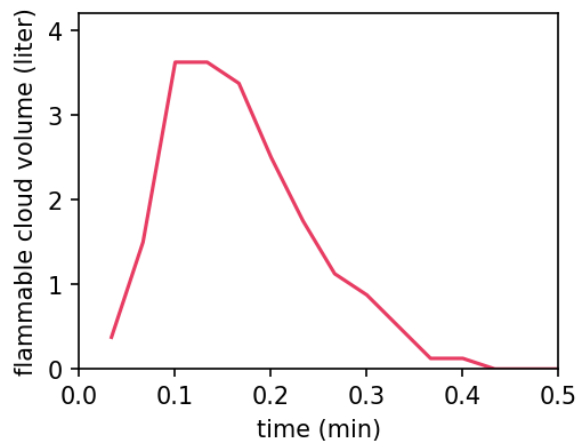


Figur 7-1 CH₄-volumfraksjon etter 12 s for scenario P-HS.

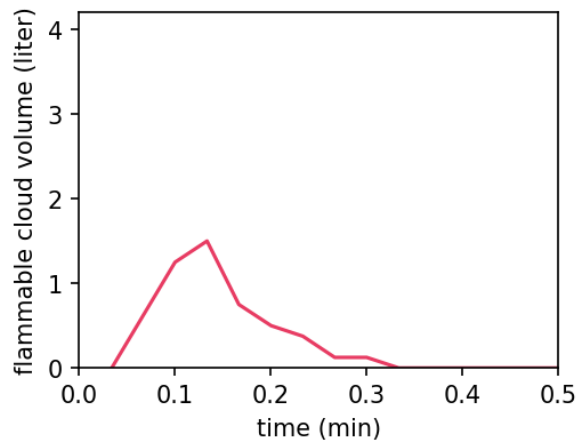


Figur 7-2 CH₄-volumfraksjon etter 12 s for scenario P-GS.

Den største brennbare gassmengde for avgassing fra en enkel battericelle, 3,6 liter, ble oppnådd når batteriet er plassert i hyllen (se Figur 7-3), mens den var mindre av halvparten av det, 1,5 liter, når batteriet er plassert på gulvet (se Figur 7-4). En enkelt celle avgir så lite gass at all gassen ble tynnet ut i luften rundt relativt fort. Derfor utgjør romstørrelse (gang eller kombinasjonen av gang og stue) ingen vesentlig forskjell for oppbygging av den brennbare gasskyen ved avgassing av en enkelt celle. Imidlertid betyr det ikke at romkonfigurasjon og størrelsen ikke kan påvirke eksplosjon-overtrykket ved en eventuell sen antenning av gassen.



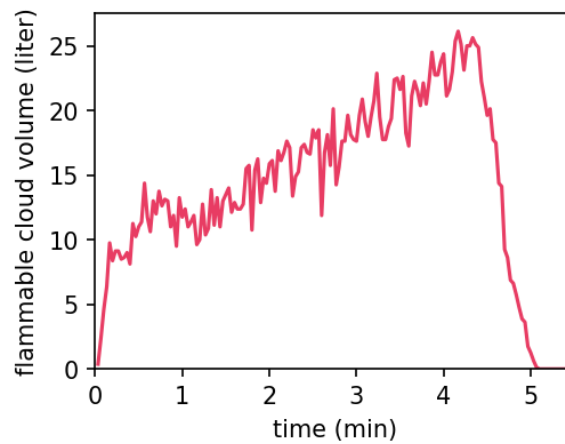
Figur 7-3 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario C-HS.



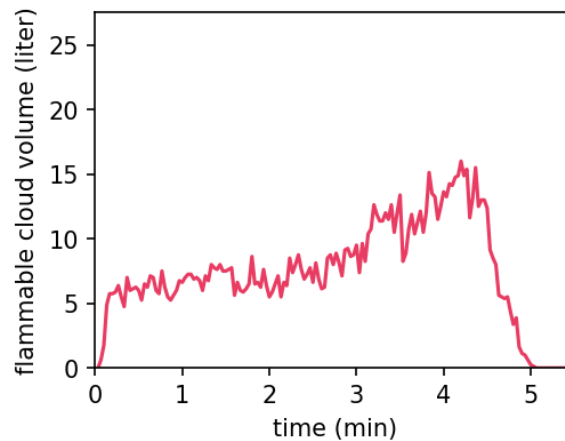
Figur 7-4 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario C-GS.

Det brennbare gassvolumet som bygger seg opp ved en termisk hendelse som sprer seg i hele batteripakken er en størrelsesorden større enn når hendelsen er begrenset til en enkel celle. Det største brennbare gassvolumet ble oppnådd for scenario P-HS (batteripakken er plassert i hyllen og døren er lukket). Figur 7-5 viser oppbyggingen av gasskyen for dette scenarioet. Volumet øker fram til avgassing fra batterier stopper og oppnår 26 liter. Siden kurven ikke flater ut, kan det antas at en større batteripakke vil oppnå et enda større volum under de gitte forholdene. At simuleringene viste at praktisk talt hele gasskyen ligger under UFL støtter antagelsen om at større volum kan oppnås. Som for enkeltceller, ser man også for batteripakkene at plasseringen i hyllen gir større brennbare gasskyer. Når batteripakken er plassert på gulvet oppnås det et brennbar gassvolum på 16 liter (se Figur 7-5). I motsetning til avgassing fra enkle celler påvirker romstørrelsen oppbyggingen av gasskyen for scenarioer med avgassing fra hele batteripakken. Når døren mellom gang og tilstøtende rom er åpen, sprer gassene seg til begge rom. Scenario P-HL (avgassing fra pakke plassert i hyllen med åpen dør) oppnå en brennbar gasskystørrelse på 10 liter, sammenlignet med 26 liter for samme scenario med lukket dør (PH-S). I tillegg viser Figur 7-7 at kurven raskt når en stasjonær tilstand og flater ut, siden det er fortsatt tilstrekkelig

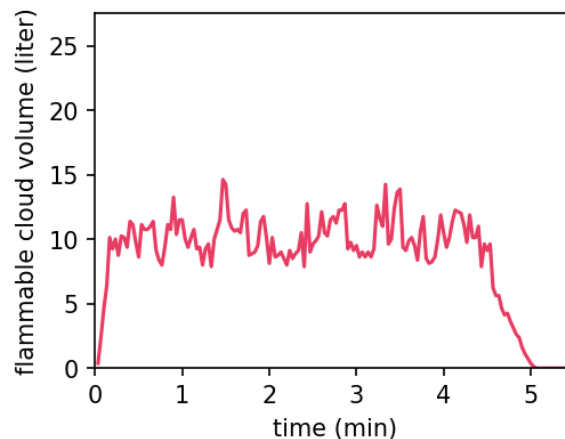
frisk luft til stede for å tynne gassen ut. En lignende effekt kan forventes i godt ventilerte rom med frisklufttilførsel.



Figur 7-5 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-HS.



Figur 7-6 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-GS.

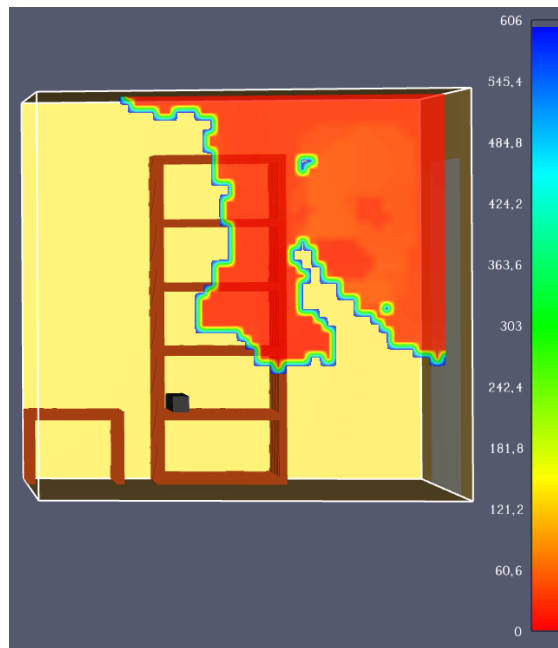


Figur 7-7 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-HL.

7.2 Eksponering for kvelende og irriterende gasser

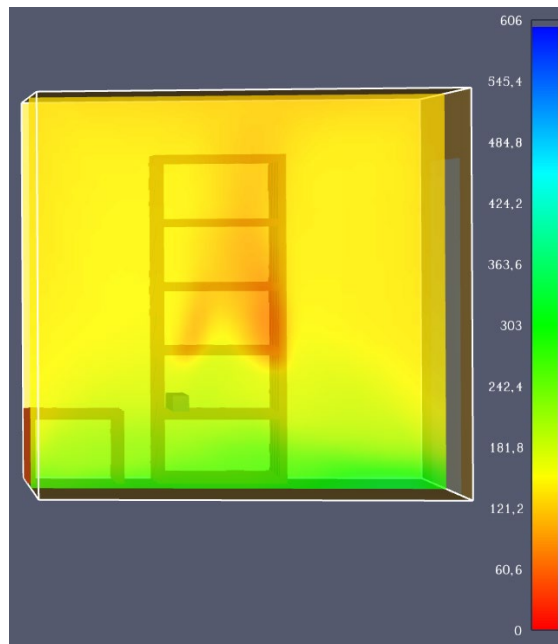
For alle simuleringene ble tiden til 0,1 FED (vurdering av kvelende gasser) og 0,1 FEC (vurdering av irriterende gasser) beregnet (se detaljer i vedlegg B og C). Det anmerkes at det er stor usikkerhet knyttet til tider til FED på under 1 min. I tillegg til FED og FEC tidene ble IDLH grenseverdien (for CO, HCl og HF) etter henholdsvis 30 s og 240 s undersøkt for simuleringene med lukket og åpen dør (se detaljer i vedlegg D, E og F). Hvor 30 s tilsvarer slutten for avgassing fra en celle og 240 s tilsvarer tidspunktet når avgassingsraten begynner å avta for batteripakken. Simuleringene av hele batteripakken er mer relevant når døren er åpent, enn avgassingene fra en celle, derfor ble disse to ulike tidspunkter valgt.

Det ble ikke oppnådd en FED verdi av 0,1 innen simulasjonstiden på 10 min for noen av simuleringene med avgassing fra en enkel celle. Derimot ble FEC verdi av 0,1 oppnådd lokalt i alle simuleringene. Dataene er her presentert som konturplott, hvor tidspunkt for oppnådd 0,1 FEC eller FED i ulike områder i rommet vises er representert med farger (se eksempel i Figur 7-8, flere data er presentert i vedlegg B og C). Som vist i konturplottene, oppnås FEC grenseverdien på 0,1 raskt (1 min – 1,5 min avhengig av scenario). Plasseringen av batteriet (på gulvet eller i hyllen) påvirker resultatene for eksponering mindre enn det ble observert i resultatene fra analysen av det brennbare gasskyvolumet.

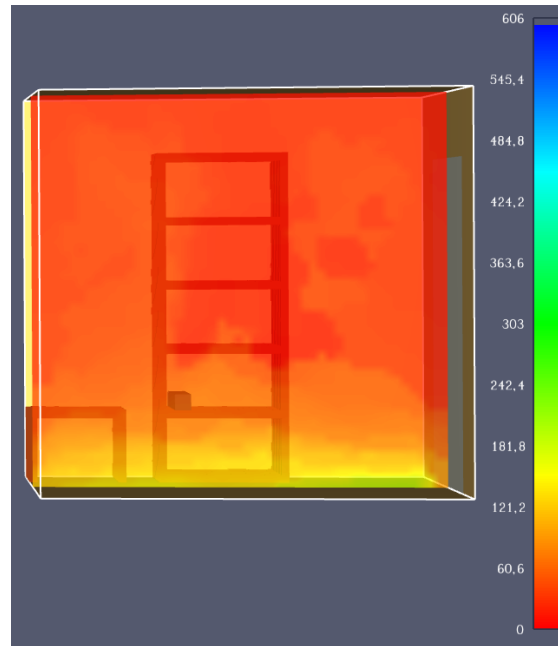


Figur 7-8 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for avgassing fra celle, scenario C-HS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen. Dataene her viser at 0,1 FEC oppnås i områder markert rødt innenfor ca. 1-1,5 min.»

For avgassing fra batteripakken oppnås en FED verdi på 0,1 i nesten hele rommet etter ca. 1,5 min når døren er lukket (se Figur 7-9). Etter ca. 0,5 min overstiger FEC verdien 0,1 i den øvre halvdelen av gangen og etter ca. 1,5 min er FEC verdien i nesten hele rommet over 0,1 (se Figur 7-10)

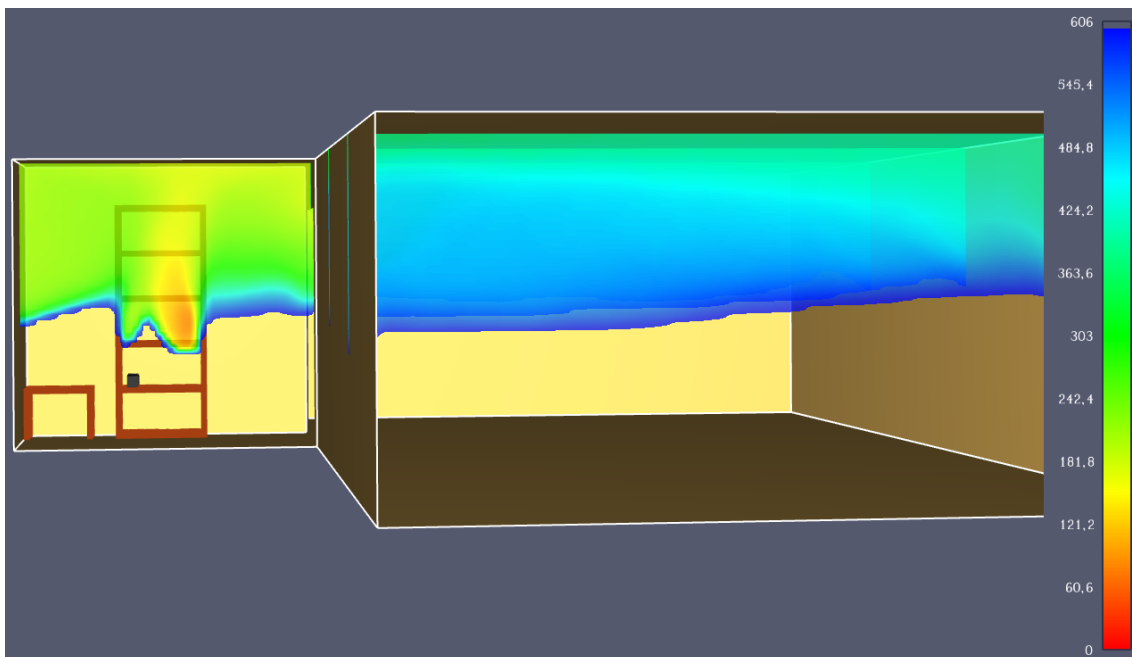


Figur 7-9 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for avgassing fra batteripakke, scenario P-HS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.

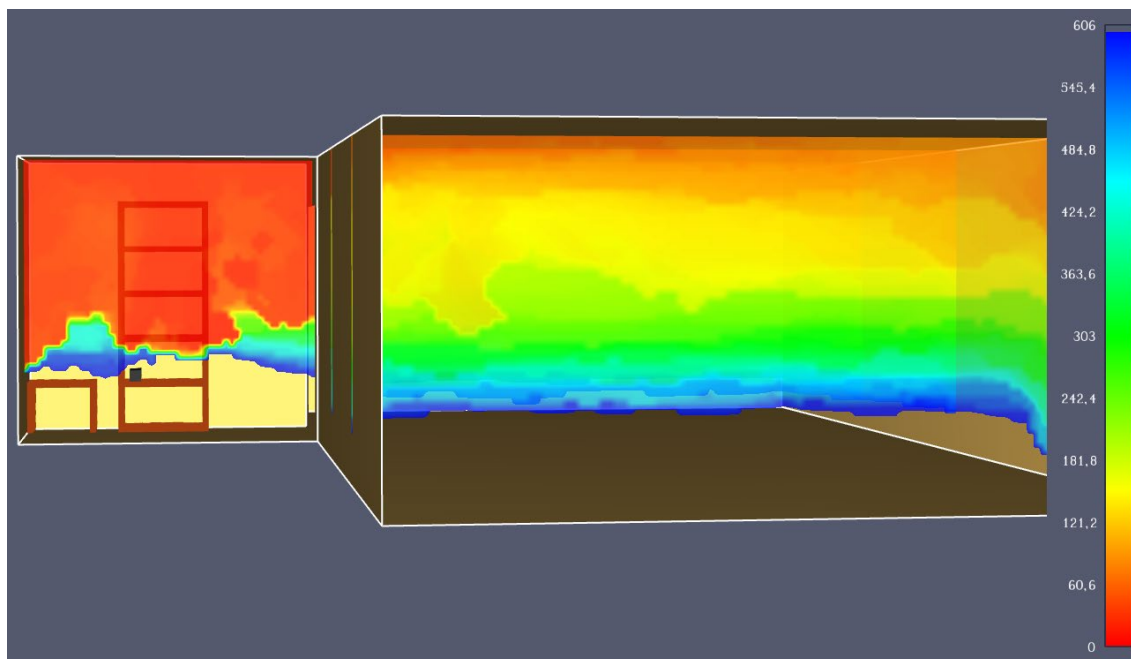


Figur 7-10 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for avgassing fra batteripakke, scenario P-HS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.

Figur 7-11 viser tiden til 0,1 FED for scenario P-HL (batteripakke plassert i hylle, åpen dør). I dette scenarioet oppnås grenseverdien etter ca. 7 min i øvre halvdel av gangen, mens det tar ca. 10 min før den øvre halvdel av stuen oppnår grenseverdien. FEC verdien på 0,1 oppnås også raskere for dette scenarioet (Figur 7-12) enn FED verdien. Etter ca. 45 s overstiger FEC verdien 0,1 i den øvre halvdel av gangen. Etter litt over 4 min overstiges grenseverdien også i stuen. Videre er det en større andel av rommet som overstiger 0,1 FEC (ca. $\frac{3}{4}$ av romvolumet) enn 0,1 FED (ca. $\frac{1}{2}$ av romvolumet).



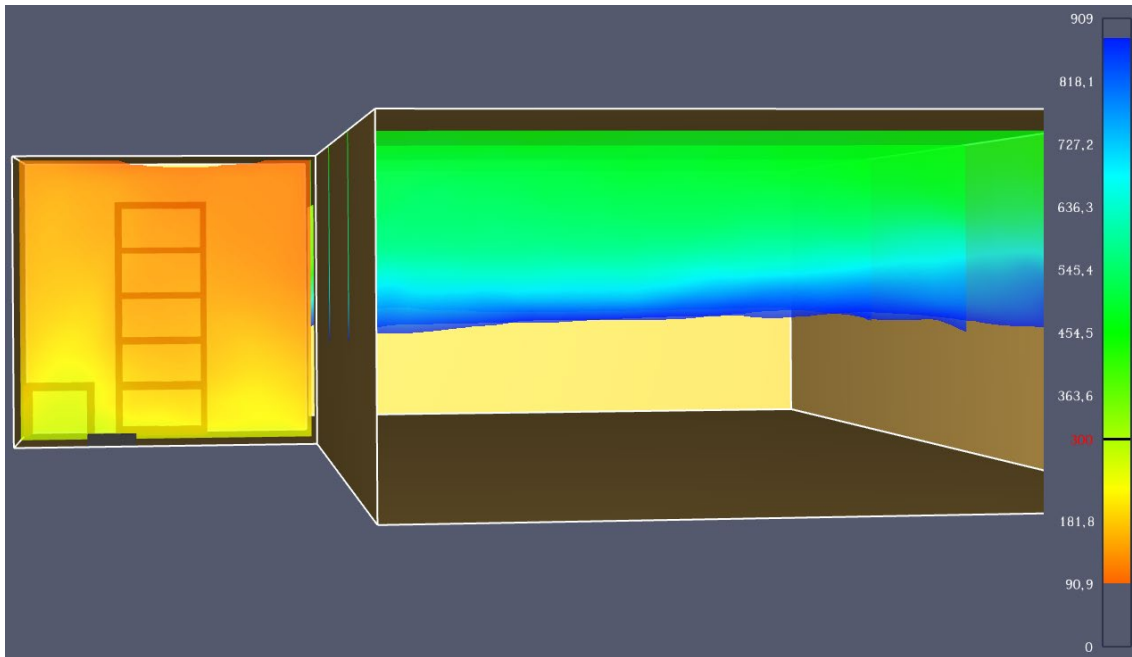
Figur 7-11 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario P-HL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



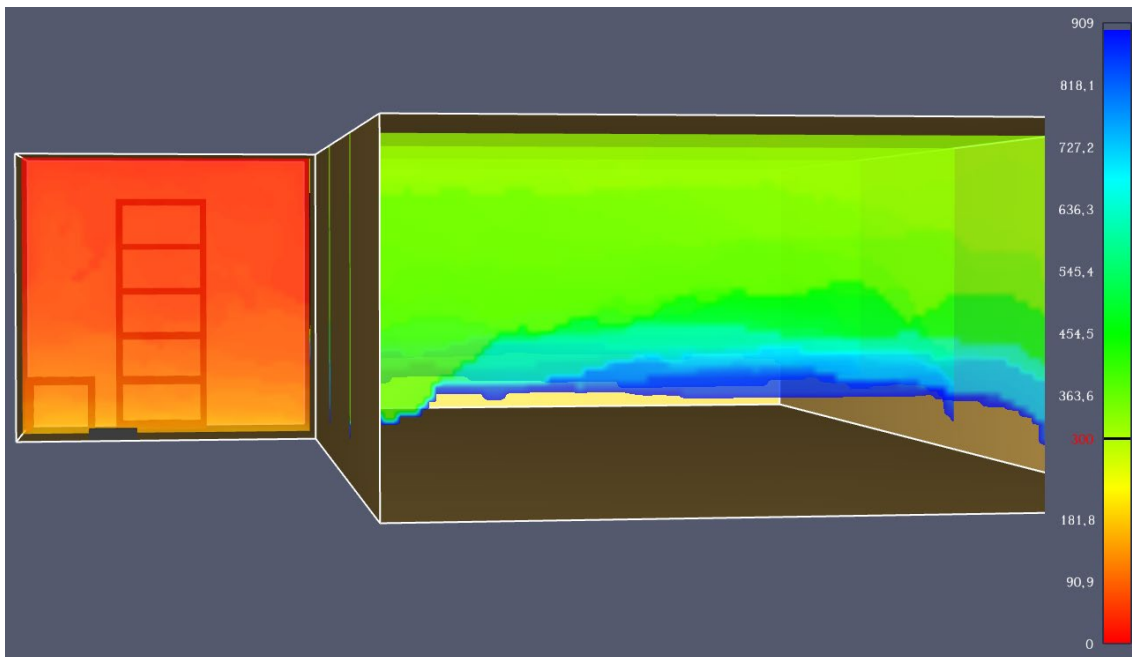
Figur 7-12 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario P-HL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.

Fra resultatene kan det ved første blick virke som at situasjonen er bedre når døren er åpen, siden det forbedrer situasjonen i nedre delen av gangen. Imidlertid er dette kun tilfelle hvis en person som oppholder seg i gangen ikke har muligheten å rømme til et sikkert område innen noen minutter etter avgassingene har startet. I alle andre tilfeller anses lukkede dører som en viktig barriere for å forhindre at gassene spres seg fort til andre deler av bygninger, siden det vil øke risikoen for at flere blir eksponert for gassene og for at rømningsveier vil bli blokkert. Resultatene fra simuleringene burde derfor tolkes slikt at konsekvensene, med tanken på eksponering, fra et litium-ion batteri som avgasser/brenner vil være mindre i et stort godt ventilert rom enn i et lite rom med dårlig ventilasjon. For gasser som samler seg under taket, slik de gjør i simuleringene, vil det være en fordel å ha ventilasjon som trekker luft ut fra øvre delen av rommet og tilfører frisk luft i nedre delen av rommet.

Inngangsdøren og dermed gangen/entre til en bolig er vanligvis primær «rømningsvei». En hendelse som starter i dette området, vil derfor også påvirke rømningsmuligheter. Derfor ble et scenario simulert hvor døren er lukket i de første 5 min, før den deretter blir åpnet (fjernet helt i simuleringen). Dette gjenspeiler et scenario hvor noen prøver å rømme gjennom gangen, eller åpner døren for å undersøke situasjonen i gangen. Figur 7-13 viser tiden til 0,1 FED og Figur 7-14 viser tiden til 0,1 FEC for dette scenarioet (P-GSL). Begge grenseverdier (0,1 FED og 0,1 FEC) overstiges i hele gangen etter henholdsvis ca. 4 min og 2,5 min. Figur 7-13 og Figur 7-14 viser tiden etter avgassing starter. Ca. 13 min etter avgassing startet og 8 min etter døren ble åpnet overstiger den øvre halvdelen av stuen en FED verdi av 0,1. Ca. 3,8 min etter døren ble åpnet overstiger den øvre halvdelen av stuen en FEC verdi av 0,1.



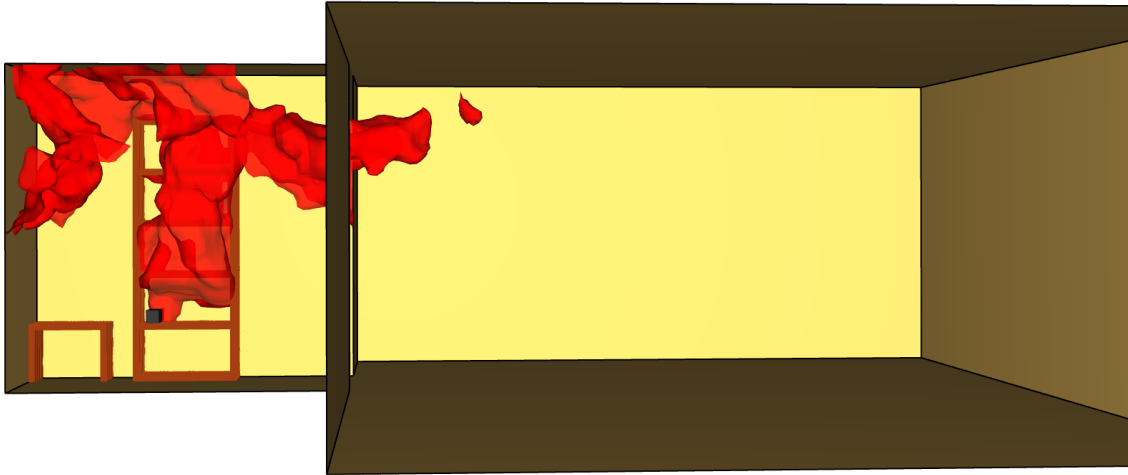
Figur 7-13 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario P-GSL. Tiden er begrenset til 900 sekund som er makstid i simuleringen . Døren mellom rommene ble simulert lukket og ble åpnet etter 300 sekunder.



Figur 7-14 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario P-GSL. Tiden er begrenset til 900 sekund som er makstid i simuleringen. Døren mellom rommene ble simulert lukket og ble åpnet etter 300 sekunder.

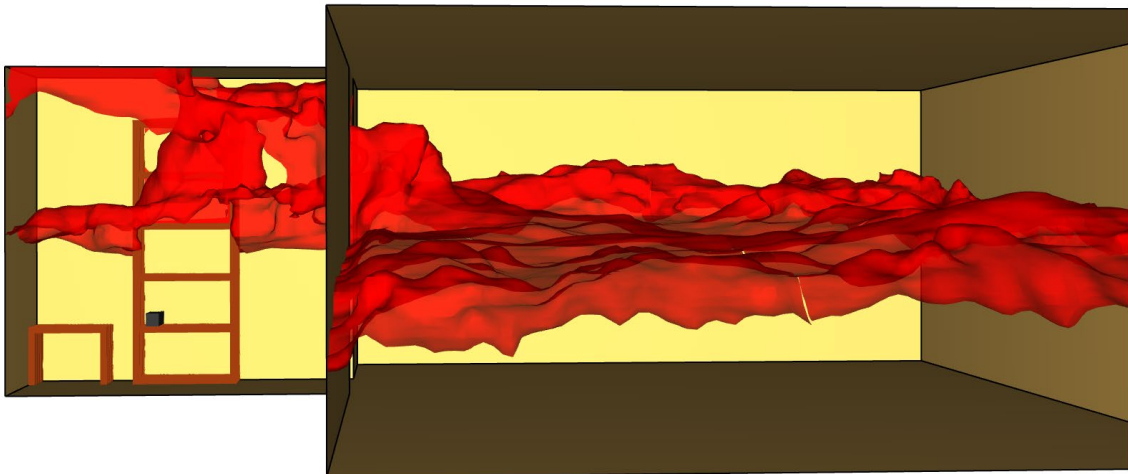
I alle simuleringer ble det observert at FEC ble raskere oppnådd enn FED verdien. Det betyr at den irriterende effekten av avgassingene vil begynne å påvirke personers utholdenhet i rommene før den kvelende effekten. For å skille mellom forskjellige gasser ble grenseverdien for eksponering til kjemikalier, IDLH verdien, for CO, HCl og HF undersøkt (se detaljer i vedlegg D, E og F). Figur 7-15 viser IDLH CO-konsentrasjonen ved avgassing fra en batteripakke etter

4 min (tidspunktet når avgassingsraten begynner å avta). Området hvor IDLH verdien oppnås for CO er hovedsakelig begrenset til gangen og avtar relativt raskt når avgassing fra batteriet stopper.

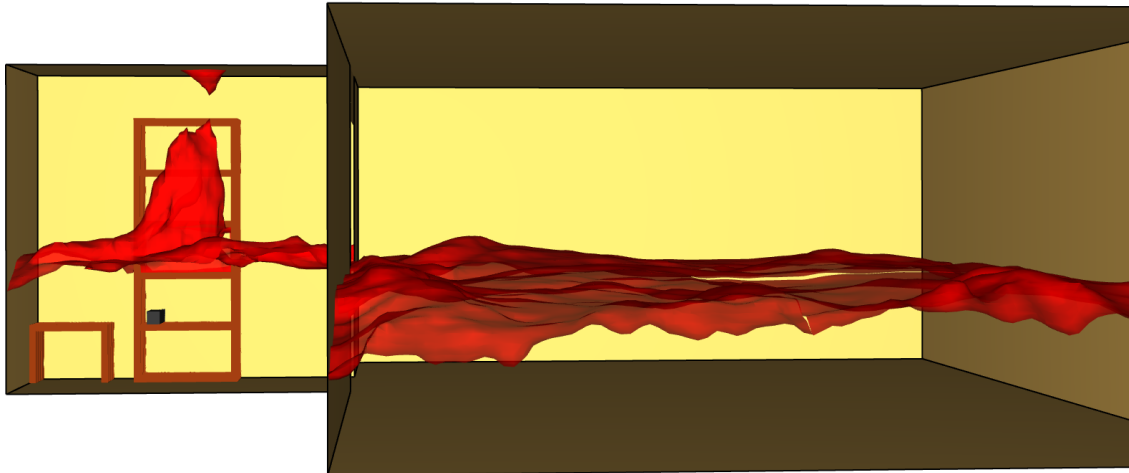


Figur 7-15 IDLH CO-konsentrasjon for scenario P-HL etter 240 s.

HCl- og HF-konsentrasjonen overstiger i motsetning til CO-konsentrasjonen IDLH verdien også i store deler av stuen, som man ser for eksempel i Figur 7-16 og Figur 7-17. Figurene viser henholdsvis IDLH-konsentrasjonen for HCl og HF etter 5,5 min for scenario P-HL (batteripakke plassert i hylle, åpen dør). På dette tidspunktet er CO-konsentrasjonen i begge rommene allerede under IDLH-verdien.



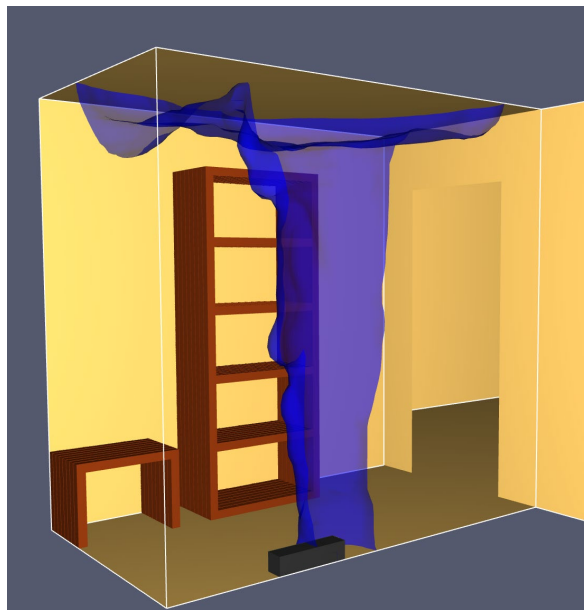
Figur 7-16 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario P-HL etter 330 s.



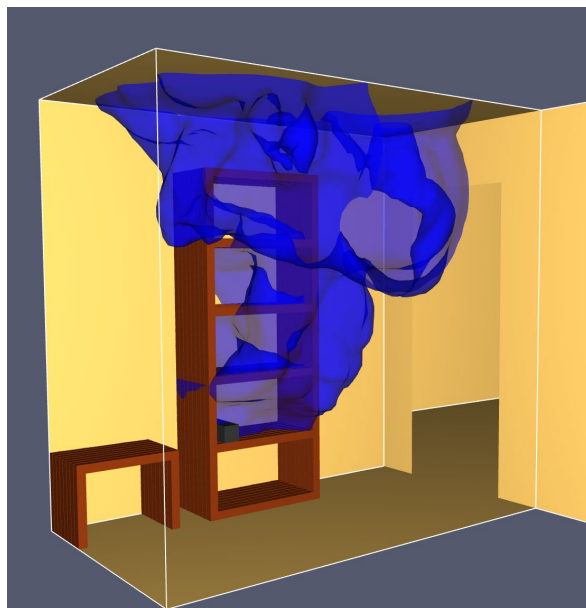
Figur 7-17 IDLH HF-konsentrasjon for scenario P-HL etter 330 s.

7.3 Deteksjon

Figur 7-18 viser at CO-konsentrasjonen under taket overstiger 34 ppm allerede etter 8 sekunder for avgassing fra en battericelle. Det er ikke tatt hensyn til CO-dose, altså konsentrasjonen over tid, for detektoren. Likevel viser simuleringen at en termisk hendelse fra et elsykkel-batteri kan detekteres relativt raskt hvis en kombinasjonsdetektor er montert i nærheten. Når batteriet befinner seg i en hylle eller en annen posisjon hvor gassen samler seg opp før den stiger til taket, vil det ta noe lenger tid før CO detekteres (se Figur 7-19). Siden CO-konsentrasjonen under taket overstiger 34 ppm relativt raskt i simuleringen påvirkes den «antatte» deteksjonstiden ikke av om det er battericelle eller pakke eller rommets størrelse (åpen eller lukket dør).



Figur 7-18 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 8 s for scenario C-GL.



Figur 7-19 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 12 s for scenario C-HL.

8 Konklusjoner og anbefalinger

8.1 Avgassingsmengde og -sammensetting

Avgassing fra litium-ion batterier inneholder i tillegg til karbondioksid både brennbare komponenter som karbonmonoksid, forskjellige hydrokarboner (CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₆H₆, C₇H₈, C₂H₆), metanol og relativt store mengder hydrogen (H₂), samt giftige komponenter som hydrogenfluorid, hydrogenklorid, hydrogencyanid, muligens fosforoksyfluorid og mer.

Gjennomgangen av relevant forskningslitteratur har vist betydelig variasjon i gassammensetningen som ble målt i forskjellige studier. Spesielt HF-konsentrasjonen varierer i stor grad. Variasjonen i resultatene skyldes nok en kombinasjon av stor variasjon i litium-ion batterier på markedet (type, kjemi, kapasitet), forskjellige grensebetingelser under test (SOC, initieringsmetoden for *thermal runaway*, samt om testene var på celle-, modul- eller systemnivå) og instrumentering under test. Hvor sterk disse faktorene kan påvirke avgassingene er forskjellige for ulike gasskomponenter. HF er for eksempel avhengig av SOC, mens HCl ikke er det. Videre dannes SO₂ kun ved høye temperaturer som oppnås ved høye SOC.

Ovennevnte variasjoner gjør det vanskelig å sammenligne forskjellige studier og det hadde derfor vært nyttig å samle resultatene i en database som kan gi en oversikt over manglende kunnskap, usikkerheter og samtidig gi forventningsverdier som kan brukes i risikovurderinger hvor det mangler detaljert datagrunnlag fra eksperimenter.

8.2 Utbredelsen av litium-ion batteribranner

Et søk i BRIS databasen ble gjennomført for å undersøke utbredelsen av litium-ion batteribranner. Søket førte til totalt 159 treff og data fra søket ble gjennomgått med fokus på hendelser knyttet til bygg. Av disse ble 16 hendelser relatert til elsykler (10), elståbrett/elbalansebrett (5) og elsparkesykkel (1) identifisert som mest relevant for denne studien. Det er også registrert branner i andre elektriske maskiner og forbrukerprodukter. Imidlertid er flertallet av disse hendelsene relatert til mindre utstyr, som for eksempel droner eller fjernstyrte biler, og dermed lavere energiinnhold sammenlignet med et elsykkel-batteri. Med økende antall av elsykler, elbalansebrett og elsparkesykler vil sannsynligvis også antall brannhendelser knyttet til disse øke. En slik trend observeres nå i andre land, Kina og Singapore er nevnt som eksempel i denne studien.

Søket i BRIS databasen ga ingen treff relatert til brann i større, stasjonære energilagringssystemer. Det kan antas at hendelser i energilagringssystemer blir mer relevant med økende bruk av slike systemer, også i private boliger, i fremtiden. Energilagringssystemer kan ha et stort energiinnhold og konsekvensen knyttet til en termisk hendelse i energilagringssystemer kan derfor være store. Selv om det per i dag ikke er registrert brannhendelser av energilagringssystemer i Norge anbefales derfor å øke kunnskapen knyttet til brann- og eksplosjonssikkerhet av energilagringssystemer, særlig for systemer installert i boliger.

Det er registrert brannhendelser med elsykkel og balansebrett/ståbrett på ulike steder i boliger: i gangen (4 elsykler), stuen (2 elsykkel og 1 balansebrett/ståbrett) og på soverom

(1 balansebrett/ståbrett). Disse hendelsene er spesielt bekymringsverdige siden stue og soverom er oppholdsrom med høyt personopphold og gangen ofte er primær «rømningsvei».

8.3 Akkumulering av eksplosiv blanding i et rom

Totalt ble ni simuleringer for ulike scenarier gjennomført. Parameterne som ble variert er rom konfigurasjon (lite rom eller lite rom + større rom), batterilokasjon (på gulvet eller i en hylle) og batteristørrelse (celle eller pakke).

Den største mengde med brennbar gassblanding, 26 liter, ble akkumulert for avgassing fra en batteripakke plassert en hylle i gangen med lukket dør. At gasskyen for dette scenarioet ikke oppnådde en stasjonær tilstand (volumet økte til avgassing stoppet) og at tilnærmet ingen del av gassblandingen oppnådde øvre eksplosjonsgrense tyder på at større batteripakker vil potensielt også kunne føre til større brennbare gasskyer. Avgassing fra en enkel battericelle under samme forhold førte derimot til en brennbar gassky på 3,6 liter.

Simuleringene viste videre at lokasjonen av batteriet har en viktig betydning for mengden brennbar gassblanding som kan akkumuleres under en termisk hendelse. Når batterier lagres eller lades i en hylle kan det føre til at mer gass kan samle seg opp i eksisterende hulrom. Det vil trolig også gjelde for garderobeskap, andre møbler eller oppbevaringsløsninger og vil kunne forhindre at gassen tynnes raskt ut.

For avgassing fra en batteripakke kan mengden av brennbar gassblanding begrenses ved å ha et stort og godt ventilert rom. Gassmengden som frigjøres av en enkel celle er derimot så liten at romstørrelse ikke har en signifikant effekt på mengden brennbar gassblanding. Imidlertid betyr det ikke at romstørrelse ikke vil påvirke eksplosjons-overtrykket fra en eventuell sen antenning.

Akkumulering av brennbar gass utgjør naturlig nok både en brannfare og en eksplosjonsfare. Konsekvensen og dermed brannrisiko og eksplosjonsrisiko vil være avhengig av faktorer som ikke ble belyst i studien (som antennelsestidspunkt og tilgjengelig brensel utenom selve batteriet). For å belyse eksplosjonsrisikoen må i tillegg potensielt overtrykk vurderes, som også er utenfor dette prosjektets omfang.

8.4 Eksponering for kvelende og irriterende gasser

Giftige gasser kan ha en kvelende og en irriterende effekt på mennesker. I denne studien ble både den kvelende og den irriterende effekten av giftige gasser undersøkt. I alle ni simuleringene ble grenseverdi for irriterende gasser (0,1 FEC) oppnådd før grenseverdien for kvelende gasser (0,1 FED). Det betyr at den irriterende effekten av avgassingene vil begynne å påvirke personers utholdenhet i rommene før den kvelende effekten.

Når batteriet befinner seg i et lite rom, oppnås 0,1 FEC relativt raskt. I denne studien befant batteriet seg i en gang, og 0,1 FEC ble oppnådd etter ca. 1 min. Utholdenhet eller evnen til å oppholde seg i et område (*tenability*) reduseres i hele rommet etter ca. 1 min, når hele

batteripakken er involvert. Imidlertid overstiges grenseverdien kun «lokalt» når den termiske hendelsen er begrenset til kun én battericelle.

Simuleringene viser at halvparten (øvre halvdel) av gangen fortsatt overstiger grenseverdiene for FED og FEC, når døren til et større rom er åpen. I en slik situasjon vil gassen spre seg også til det tilstøtende rommet og føre til at FEC-grenseverdien i øvre halvpart av begge rom overstiges etter ca. 4 min. Det vil si at i løpet av relativt kort tid kan avgassing fra en elsykkel-batteripakke potensielt eksponere et relativt stort område (i denne studie 43,5 m²) for giftige gasser som overstiger en kritisk konsentrasjon.

Analysen av IDLH-konsentrasjonen for CO, HCl og HF, viser at det er HCl og HF som er mest kritisk med tanke på eksponering av mennesker for giftig røyk og avgassing fra litium-ion batterier. IDLH-konsentrasjonen for CO overstiges også, men dette er begrenset til et mindre areal og for en kortere tid i forhold til HCl og HF. Det er viktig å anmerke at det er stor usikkerhet knyttet til HF målinger rapportert i forskningslitteraturen. Likevel tyder simuleringene på at en termisk hendelse i en elsykkel-batteripakke kan føre til redusert evne til å oppholde seg i et rom på 43,5 m² etter kun noen minutter, også fordi det ikke bare er HF som overstige grenseverdien.

Simuleringene viser også at det er viktig med lukkede dører for å forhindre at røyk og avgassing kan spre seg til flere rom.

8.5 Batteristørrelsens betydning

I denne studien ble batterier med to forskjellige energiinnhold (en enkel celle og en hel batteripakke) undersøkt. Mengden avgassing er avhengig av energiinnholdet/ batteristørrelse og potensialet for alvorlige konsekvenser øker dermed med batteristørrelsen. Dette og andre faktorer som for eksempel ladetilstand påvirker eksplosjons-risikoen (avsnitt 8.3) og risikoen for eksponering til giftige gasser (avsnitt 8.4). Det er viktig å fremheve at batterikapasiteten i elsykler og lignende produkter øker, mens bevisstheten over risikoen knyttet til dette i befolkningen kanskje er mindre sammenlignet med større batterier, som for eksempel elbil-batterier som omtales mye i mediene.

Denne studien viser at personrisikoen knyttet til avgassing fra en enkelt celle (det vil si når *thermal runaway* inntreffer, men ikke propagerer fra celle til celle) er relativt begrenset til området nært cellen. Avgassing fra en batteripakke, her med 400 Wh, kan derimot øke personrisiko i et relativt stort område. Det vil si at for større batterier med mer energiinnhold er konsekvensen større sammenlignet med mindre batterier. Det er ikke her gjort en stor nok parameterstudie for å finne akkurat hvor skillet går, altså hva som er kritisk energiinnhold. Det er også viktig å vurdere batteristørrelsen opp mot andre faktorer, som for eksempel størrelsen og ventilering av rommet.

8.6 Deteksjon

Det ble gjennomført en analyse av CO-konsentrasjonen for å undersøke om kombinasjonsdetektorer som også reagerer på CO kan være en god løsning for å detektere en termisk hendelse i et litium-ion batteri. Undersøkelse av simuleringene tok ikke hensyn til CO-dose ved deteksjon men tyder på at en kombinasjonsdetektor som er montert i nærheten av der

det lagres og oppbevares batterier potensielt kan detektere en termisk hendelse kort tid etter avgassing eller røykutvikling har startet.

Det anbefales derfor å installere kombinasjonsdetektorer som også reagerer på CO i nærheten der man oppbevarer og lader batterier.

8.7 Anbefalinger for videre arbeid

Batterier i størrelse av elsykkel-batterier har mindre energiinnhold enn større, stasjonære batterier brukt til energilagring (energilagringsystemer), det trenges derfor ikke stille samme kravene for plassering. Likevel burde disse batterier helst lades i eksterne bygg eller rom med sporadisk personopphold, hvis det la seg rimelig gjøre. Rommene burde være tørre og godt ventilert. Det er viktig at brukere informeres om risikoen knyttet til litium-ion batterier og om tiltak de kan gjøre for å redusere risikoen. Viktige tiltak inkluderer å unngå lading ved temperaturer under 5°C eller over 30°C, og å unngå mekanisk belastning av batteriet som kan føre til skader. Tiltak kan formidles for eksempel gjennom en veileder, som informerer om trygg bruk, lagring og lading av litium-ion batterier i denne størrelse (elsykkel og lignende), og ved å regulere hvilken informasjon elsykkelprodusenter eller -distributører må gi til kunder (slik det er gjort i Kina). Det også mulig å undersøke om andre tilnærminger er bedre egnet for å øke kunnskapen og bevisstheten om litium-ion batterisikkerhet i befolkningen.

Det anbefales å gjennomføre en vurdering av eksplosjonsrisikoen knyttet til mengden av brennbar gassblanding som ble etablert i denne studien. Videre anbefales det å utvide denne studien til å inkludere flere batteripakker med ulikt energiinnhold i tillegg til simuleringer som omfatter et større romareal.

Den numeriske modellen i denne studien er basert på data tilgjengelig i litteraturen. Det anbefales å gjennomføre brannforsøk med typiske elsykkel-batterier for å validere avgassingsmodellen. Storskala brannforsøk med et slikt batteri i en generisk rom, med tilsvarende planløsning som simuleringene, kan gjennomføres for å validere den numeriske modellen og øke tillitten til modellen. Det er ikke nødvendig å gjennomføre en slik validering for alle simulerte scenarier.

Simuleringene i denne studien fokuserte på avgassing fra batterier med energiinnhold tilsvarende typiske elsykkel-batterier, basert på antagelsen at frekvensen for hendelser knyttet til slike batterier trolig er større enn for energilagringssystemer, med større sannsynlighet for at elsykkel-batterier lades og oppbevares i oppholdsrom eller rømningsveier. Likevel anbefales det å gjennomføre en lignende vurdering for energilagringssystemer, siden energiinnholdet er signifikant større. Tilsvarende kan det være relevant å vurdere risikoen knyttet til lading av mange elsykler eller elsparkesykler samtidig, som er en voksende businessmodell.

9 References

- [1] NELFO, “Veileder: batterisystemer i boliger.” NELFO, 25 Nov. 2020.
- [2] “NEK 400:2018 Elektriske lavspenningsinstallasjoner, Norsk elektroteknisk norm.” Norsk Elektroteknisk Komité, 2018.
- [3] “Kollegiet for brannfaglig terminologi,” 2020. [Online]. Available: <http://www.kbt.no>.
- [4] R. F. Mikalsen *et al.*, “Energieffektive bygg og brannsikkerhet,” RISE Fire Research, Trondheim, Norge, RISE-rapport 2019:02, ISBN: 978-91-88907-16-5, Apr. 2019.
- [5] A. S. Bøe and K. Glansberg, “Brannrisiko ved lagring av ikke-tilkoblede litium-ion og litiumbatterier,” RISE Fire Research, Trondheim, Norge, RISE-rapport 2019:98, 2019.
- [6] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, “Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review,” *Energy Storage Mater.*, vol. 10, pp. 246–267, Jan. 2018.
- [7] J. Sun *et al.*, “Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery,” *Nano Energy*, vol. 27, pp. 313–319, 2016.
- [8] P. Andersson, P. Blomquist, A. Lorén, and F. Larsson, “Investigation of fire emissions from Li-ion batteries,” SP Technical Research Institute of Sweden, Fire Technology SP Report 2013:15, 2013.
- [9] Y. Fernandes, A. Bry, and S. De Persis, “Identification and quantification of gases emitted during abuse tests by overcharge of a commercial Li-ion battery,” *J. Power Sources*, vol. 389, pp. 106–119, 2018.
- [10] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, A. Lorén, and B.-E. Mellander, “Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests,” *J. Power Sources*, vol. 271, pp. 414–420, Dec. 2014.
- [11] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist, and B.-E. Mellander, “Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 2017.
- [12] F. Larsson, P. Andersson, and B.-E. Mellander, “Lithium-Ion Battery Aspects on Fires in Electrified Vehicles on the Basis of Experimental Abuse Tests,” *Batteries*, vol. 2, no. 2, p. 9, Apr. 2016.
- [13] A. W. Golubkov, D. Fuchs, and J. Wagner, “Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes,” *R. Soc. Chem.*, vol. 4, pp. 3633–3642, 2014.
- [14] D. Sturk, L. Rosell, P. Blomqvist, and A. Ahlberg Tidblad, “Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber,” *Batteries*, vol. 5, no. 3, p. 61, Sep. 2019.
- [15] Davion Hill, Nick Warner, and William Kovacs III, “Considerations for ESS Fire Safety,” New York, NY, Final Report OAPUS301WIKO(PP151894), Rev. 3, 2017.
- [16] J. P. Stensaas, “Toxicity, visibility and heat stresses of fire effluents - human tenability limits,” SINTEF NBL as, Trondheim, Norway, SINTEF-rapport STF25 A91022, May. 1991.
- [17] “Immediately Dangerous to Life and Health Limits (IDLHs) | response.restoration.noaa.gov.” [Online]. Available: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical->

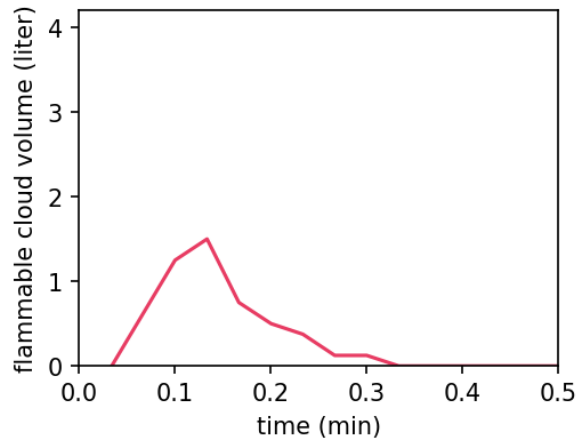
- spills/resources/immediately-dangerous-life-health-limits-idlhs.html. [Accessed: 16 Dec. 2020].
- [18] O. US EPA, “Access Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) Values,” *US EPA*, 30 Apr. 2014. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/aegl/access-acute-exposure-guideline-levels-aegls-values>. [Accessed: 16 Dec. 2020].
- [19] International Organization for Standardization, “ISO 13571 Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires.” International Organization for Standardization, 2012.
- [20] C. Sesseng, N. K. Reitan, and S. Fjær, “Røykvarsler for bruk i bolig - Kartlegging av forskningsfront,” SINTEF NBL as, Trondheim, NBL A12136, Dec. 2012.
- [21] “BRIS,” *Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap*. [Online]. Available: <https://www.dsb.no/lover/brannvern-brannvesen-nodnett/artikler/bris/>. [Accessed: 01 Jun. 2020].
- [22] “Korea’s ESS fires: Batteries not to blame but industry takes hit anyway,” *Energy Storage News*. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/news/koreas-ess-fires-batteries-not-to-blame-but-industry-takes-hit-anyway>. [Accessed: 07 Jan. 2021].
- [23] “Arizona battery fire’s lessons can be learned by industry to prevent further incidents, DNV GL says,” *Energy Storage News*. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/news/arizona-battery-fires-lessons-can-be-learned-by-industry-to-prevent-further>. [Accessed: 07 Jan. 2021].
- [24] Singapore Civil Defence Force, “Fire, Emergency Medical Services and Enforcement Statistics 2018,” 2018.
- [25] H. Weydahl, “Batterihendelser 2018-2019,” presented at the Medlemsmøte i Norsk forum for batterisikkerhet, 28 Mar. 2019.
- [26] “GB 17761-2018: Safety technical specification for electric bicycles.” Standardization Administration of the People’s Republic of China, May. 2018.
- [27] Alex, “How Much Does an Electric Bike Battery Cost?,” *eBikesHQ.com*. .
- [28] Ben Gully *et al.*, “Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression,” DNV GL, 2019–1025, Rev. 4, Nov. 2019.
- [29] D. Sturk, L. Hoffmann, and A. Ahlberg Tidblad, “Fire Tests on E-vehicle Battery Cells and Packs,” *Traffic Inj. Prev.*, vol. 16, no. sup1, pp. S159–S164, Jun. 2015.
- [30] A. Nedjalkov *et al.*, “Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries—Analysis and Safety Enhancement Solution,” p. 10, 2016.
- [31] P. Ribière, S. Grugeon, M. Morcrette, S. Boyanov, S. Laruelle, and G. Marlair, “Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry,” *Energy Env. Sci*, vol. 5, no. 1, pp. 5271–5280, 2012.
- [32] F. Larsson, “Lithium-ion Battery Safety - Assessment by Abuse Testing, Fluoride Gas Emissions and Fire Propagation,” Chalmers, Göteborg, Sweden, 2017.
- [33] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot, and G. Marlair, “Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle,” in *HAL*, 2012.
- [34] “Lower-(LEL)-&-Upper-(UEL)-Explosive-Limits-.pdf.” [Online]. Available: [https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-\(LEL\)-&-Upper-\(UEL\)-Explosive-Limits-.pdf](https://www.mathesongas.com/pdfs/products/Lower-(LEL)-&-Upper-(UEL)-Explosive-Limits-.pdf). [Accessed: 16 Dec. 2020].
- [35] W. Kong, H. Li, X. Huang, and L. Chen, “Gas evolution behaviors for several cathode materials in lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 142, no. 1, pp. 285–291, Mar. 2005.

- [36] Q. Yuan, F. Zhao, W. Wang, Y. Zhao, Z. Liang, and D. Yan, “Overcharge failure investigation of lithium-ion batteries,” *Electrochimica Acta*, vol. 178, pp. 682–688, Oct. 2015.
- [37] M. Lammer, A. Königseder, P. Gluschitz, and V. Hacker, “Influence of aging on the heat and gas emissions from commercial lithium ion cells in case of thermal failure,” *J. Electrochem. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 101–110, 2018.

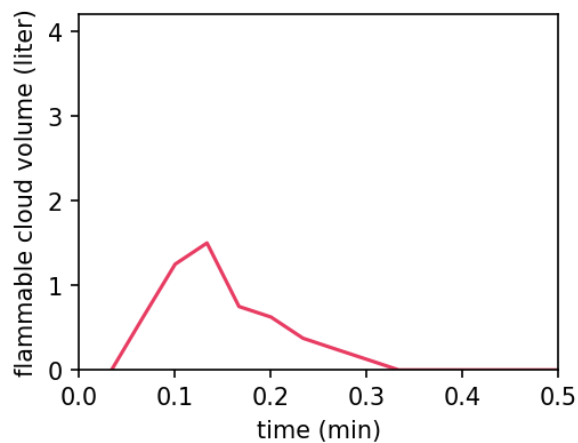
Vedlegg

A. Brennbar gassky-størrelse

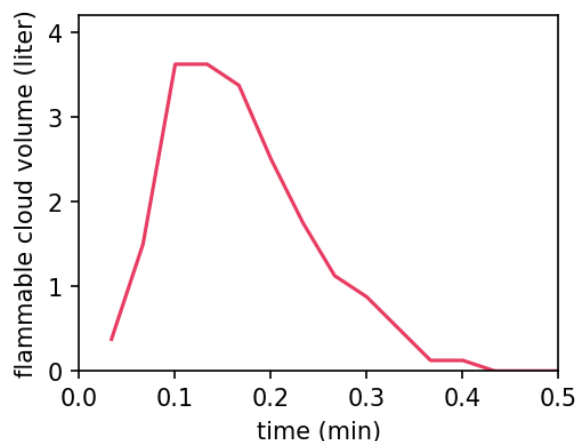
Resultater fra simuleringer som viser volum av den brennbare gasskyen presenteres i dette vedlegget.



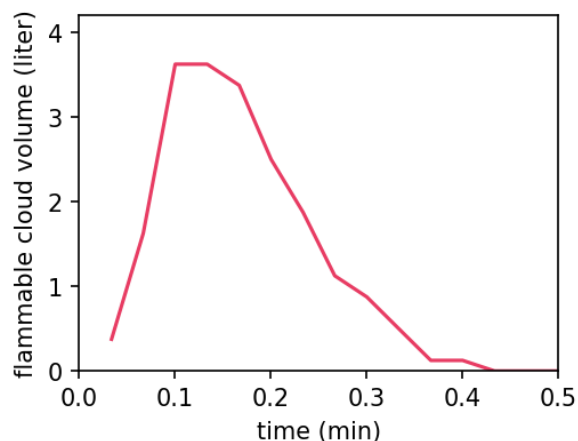
Figur A-1 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario C-GS.



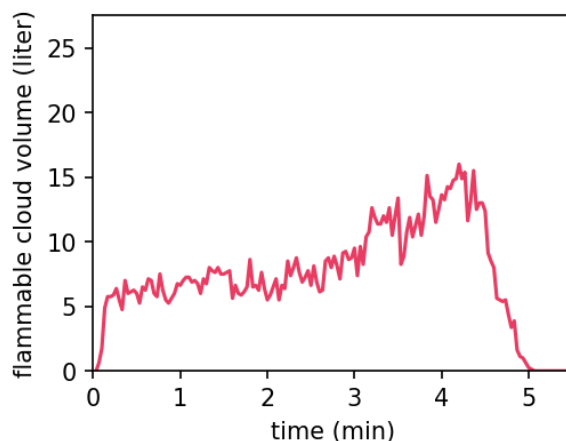
Figur A-2 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario C-GL.



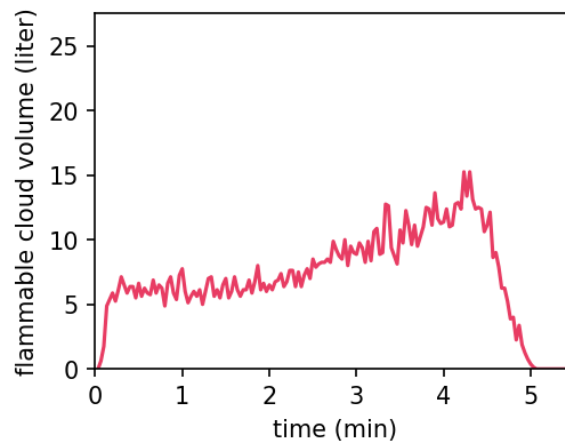
Figur A-3 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario C-HS.



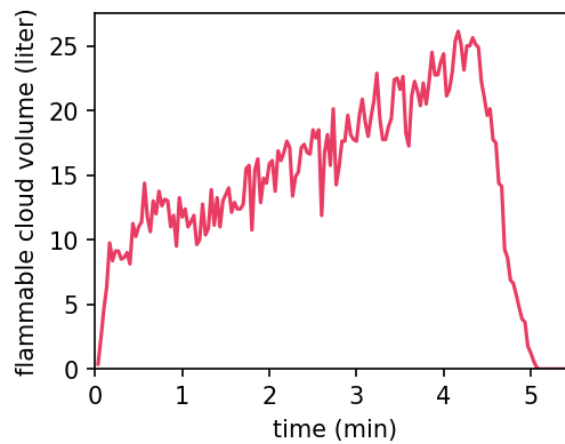
Figur A-4 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario C-HL.



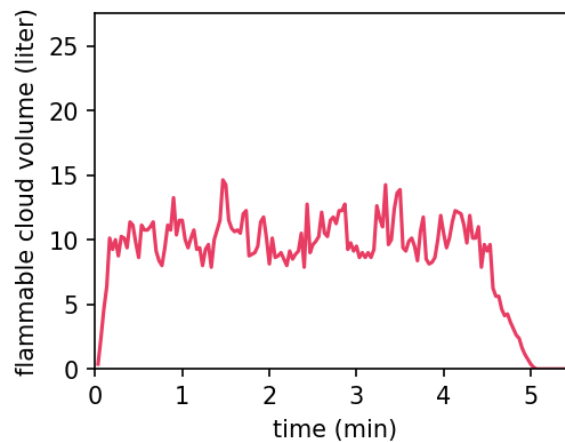
Figur A-5 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-GS.



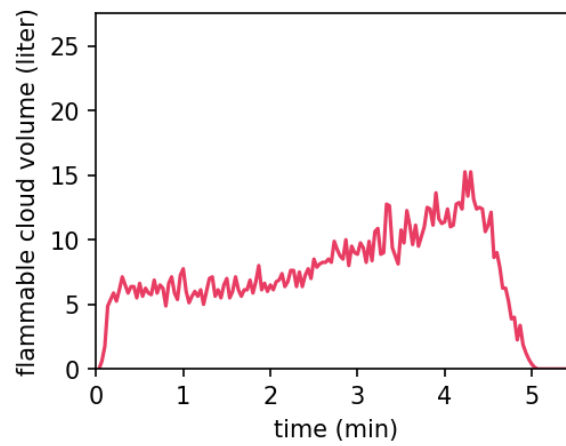
Figur A-6 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-GL.



Figur A-7 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-HS.



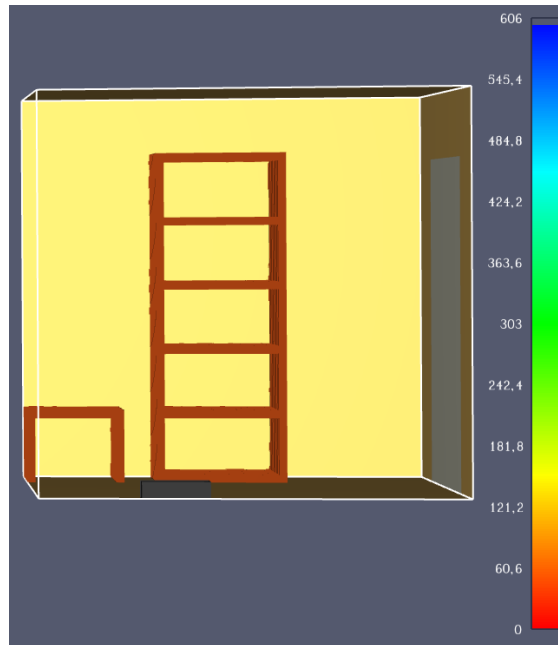
Figur A-8 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-HL.



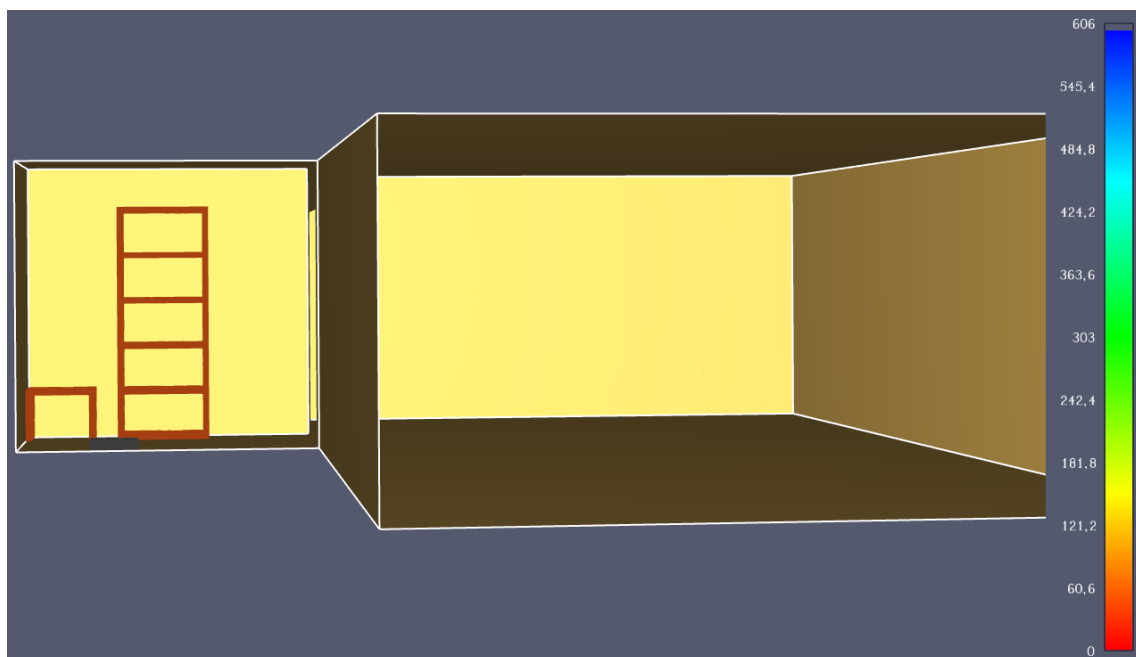
Figur A-9 Volum av den brennbare gasskyen, det vil si den delen av gasskyen som har en konsentrasjon over den nedre brennbare grense (*lower flammable limit*, LFL) og under den øvre brennbare grense (*upper flammable limit*, UFL) for scenario P-GSL.

B. Tid til 0,1 FED

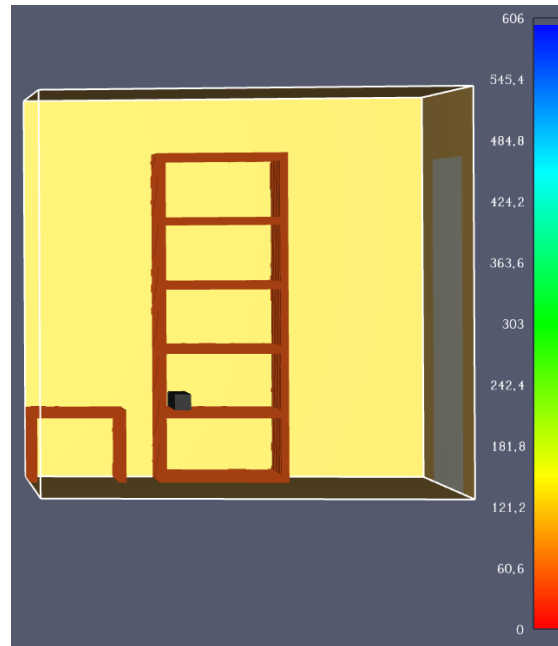
Resultater fra simuleringer som viser tid til 0,1 FED presenteres i dette vedlegget.



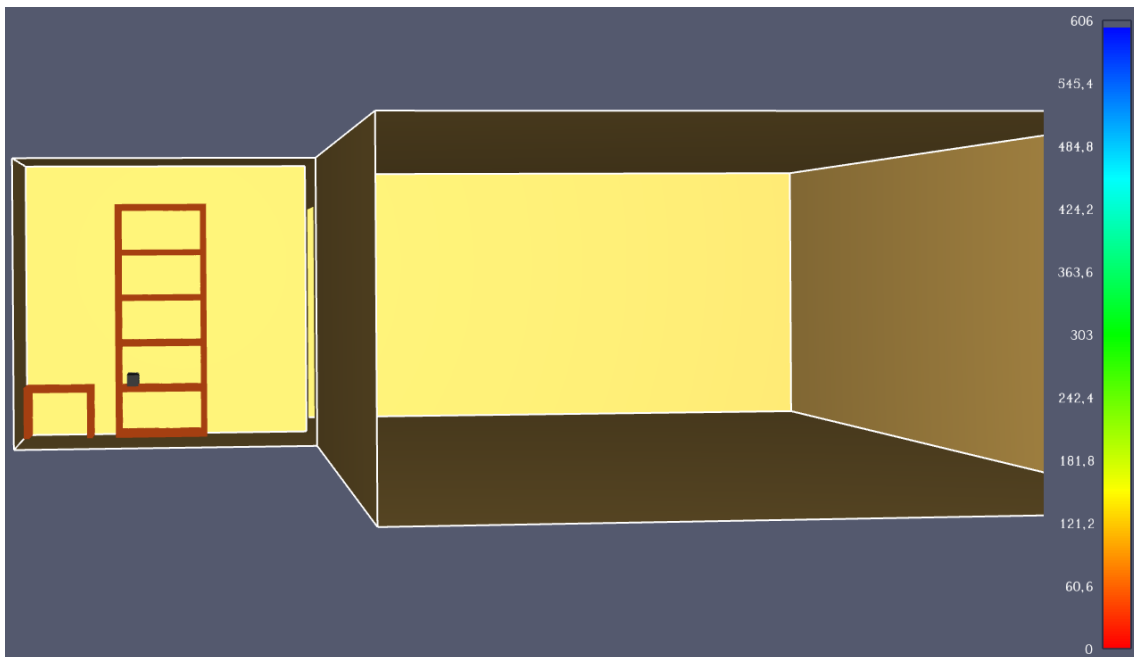
Figur B-1 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario C-GS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen. FED av 0,1 ble ikke oppnådd innen denne tiden.



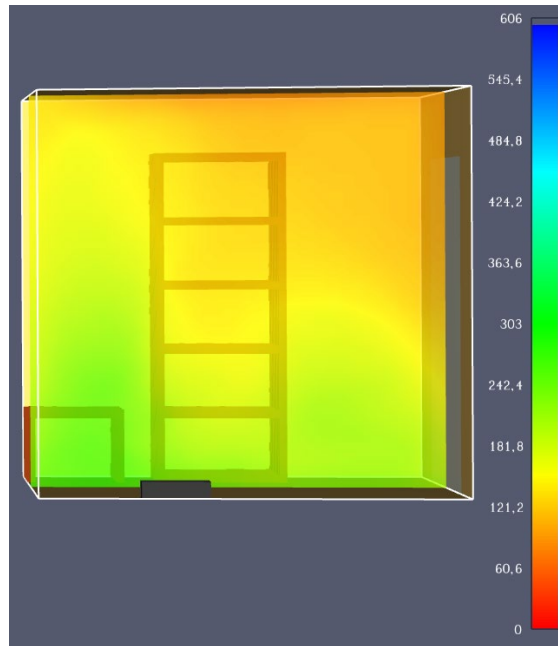
Figur B-2 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario C-GL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen. FED av 0,1 ble ikke oppnådd innen denne tiden.



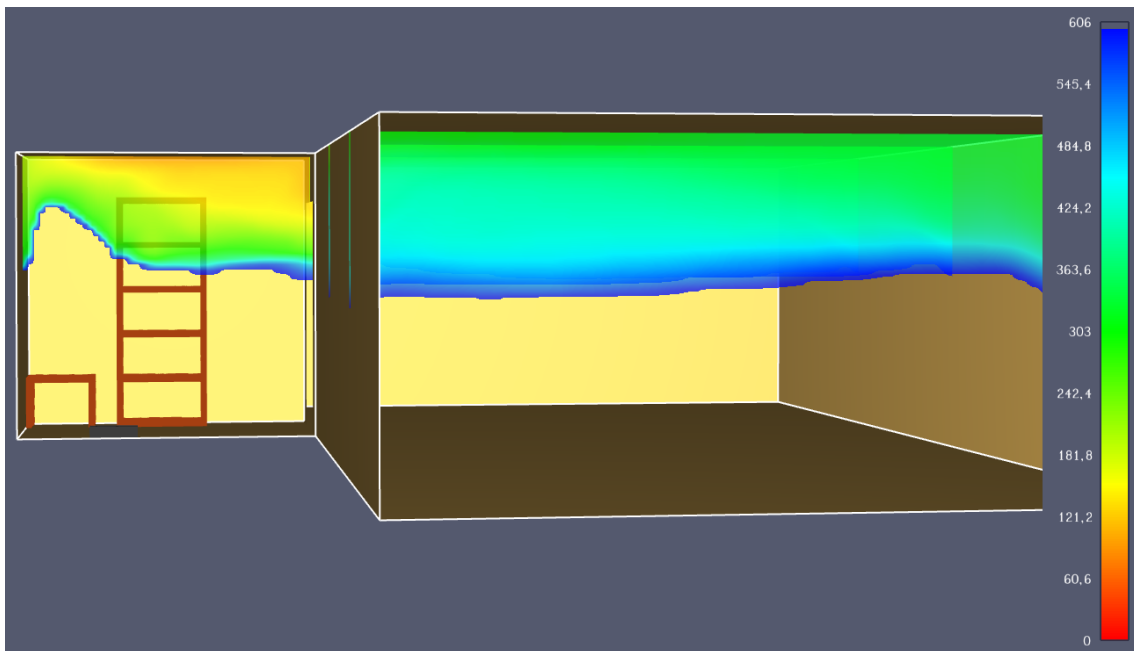
Figur B-3 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario C-HS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen. FED av 0,1 ble ikke oppnådd innen denne tiden.



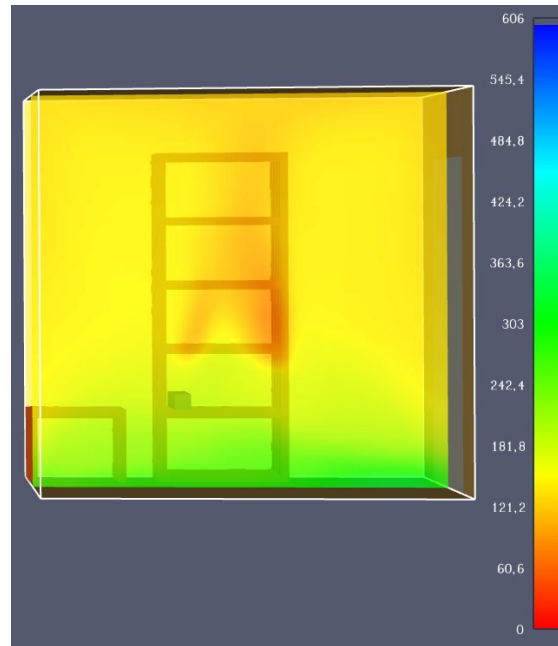
Figur B-4 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario C-HL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen. FED av 0,1 ble ikke oppnådd innen denne tiden.



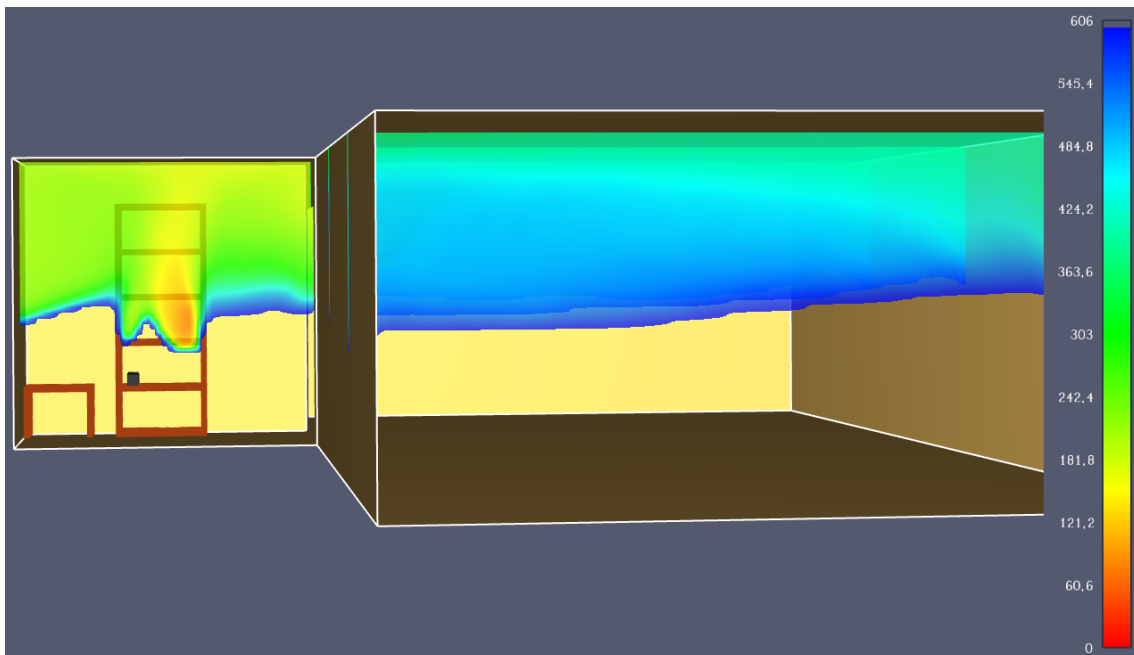
Figur B-5 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario C-GS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



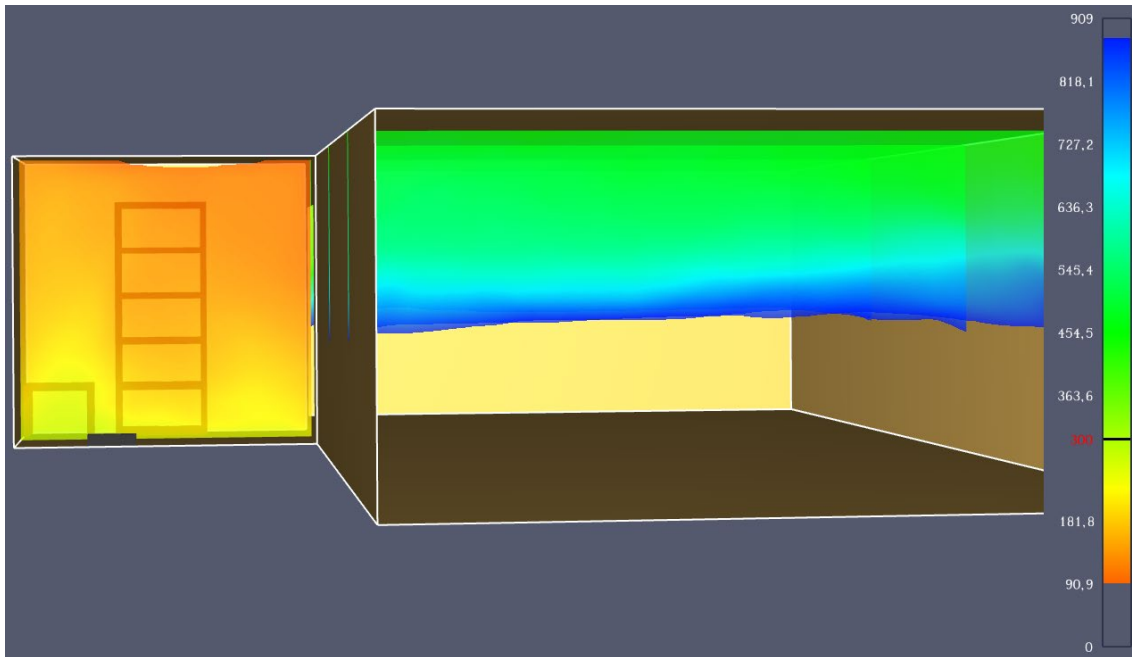
Figur B-6 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario P-GL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



Figur B-7 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario P-HS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



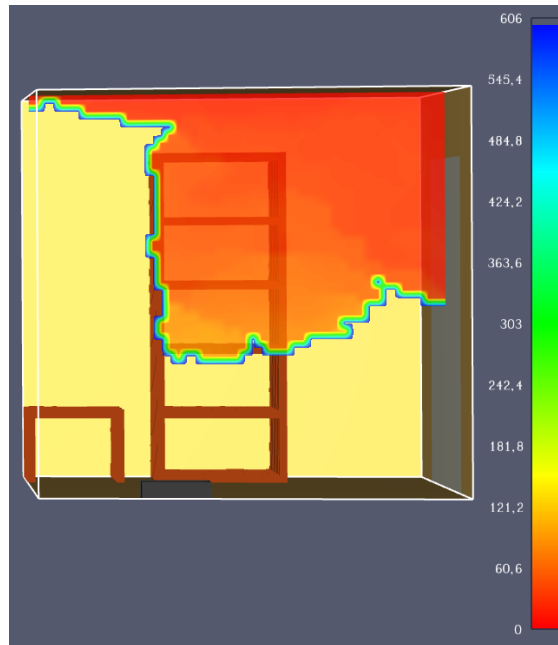
Figur B-8 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario P-HL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



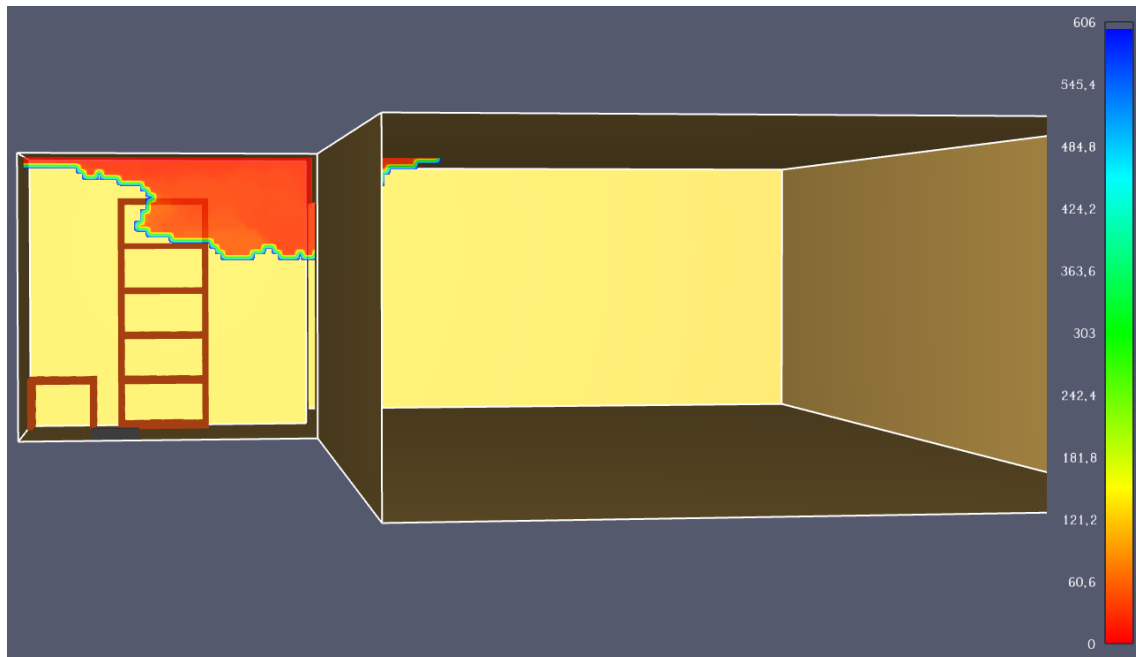
Figur B-9 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FED for scenario P-GSL. Tiden er begrenset til 900 sekund som er makstid i simuleringen. Døren mellom rommene ble simulert lukket og ble åpnet etter 300 sekunder.

C. Tid til 0,1 FEC

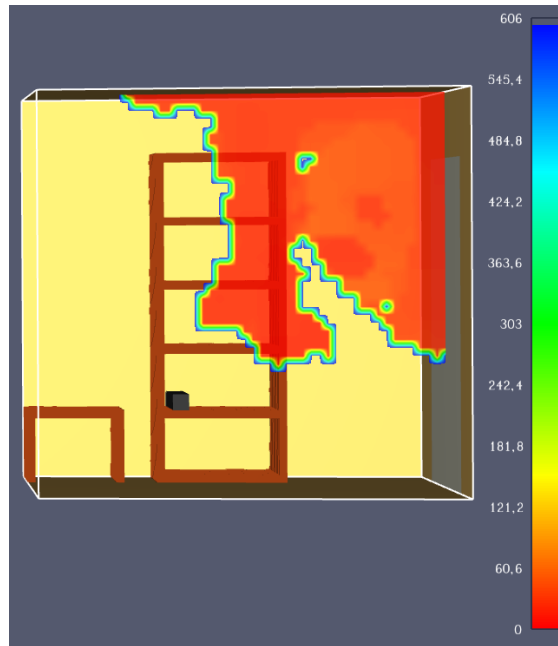
Resultater fra simuleringer som viser tid til 0,1 FEC presenteres i dette vedlegget.



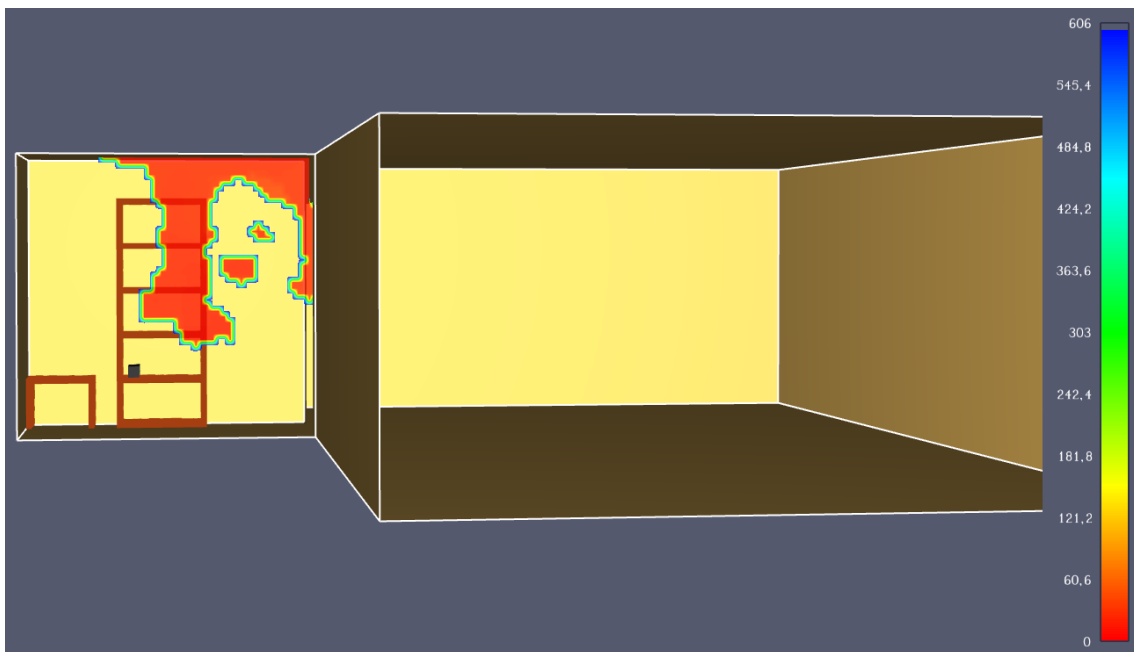
Figur C-1 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario C-GS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



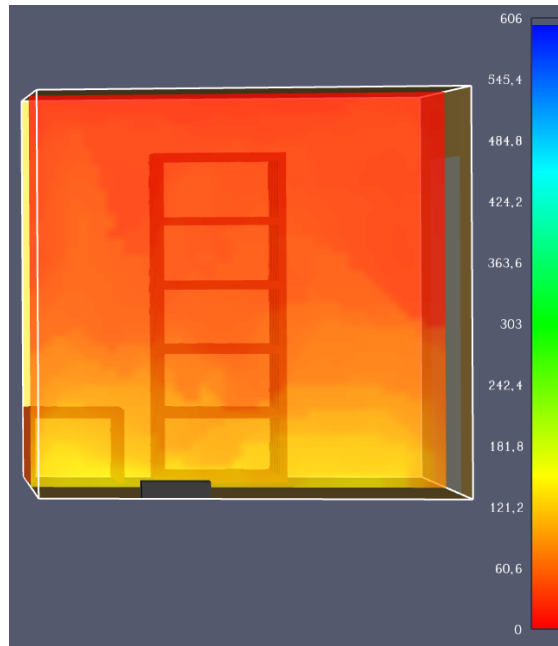
Figur C-2 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario C-GL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



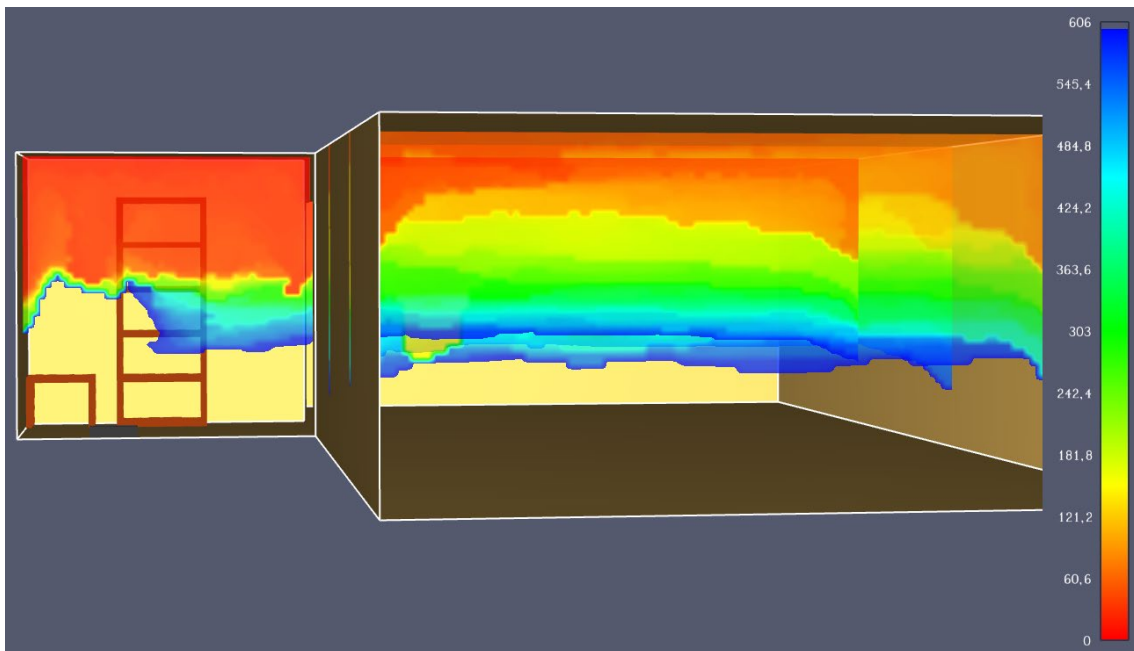
Figur 0-1 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario C-HS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



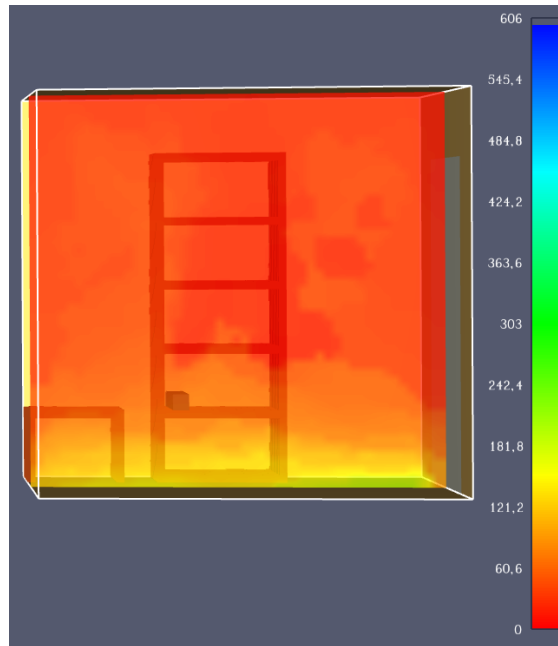
Figur 0-2 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario C-HL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



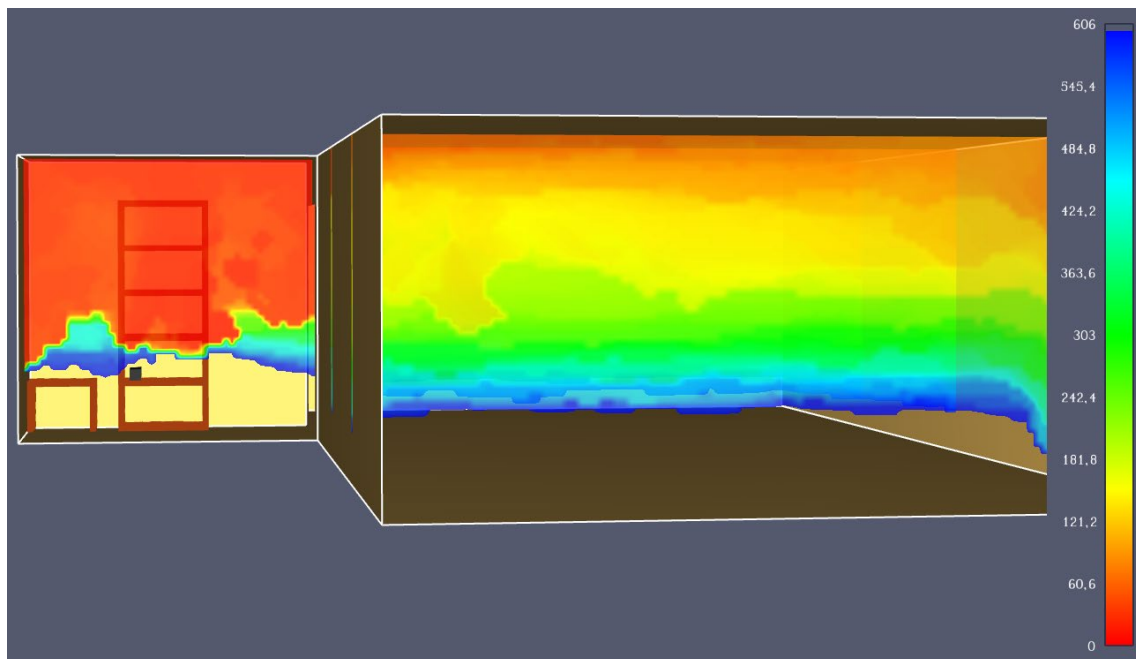
Figur 0-3 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario P-GS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



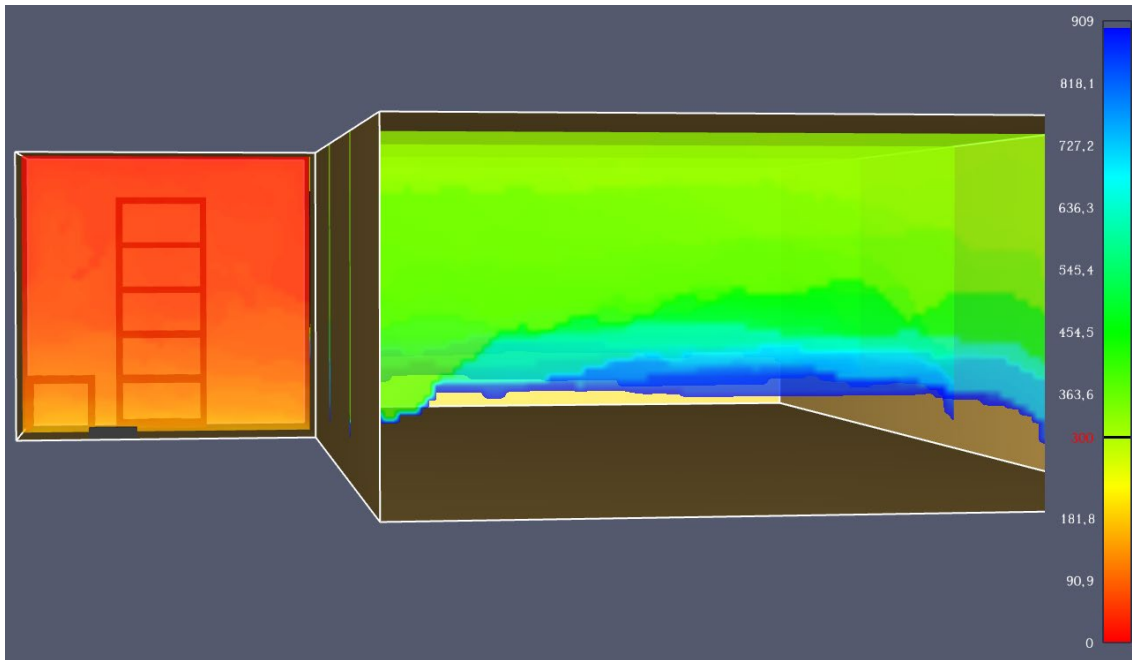
Figur 0-4 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario P-GL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



Figur 0-5 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario P-HS. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



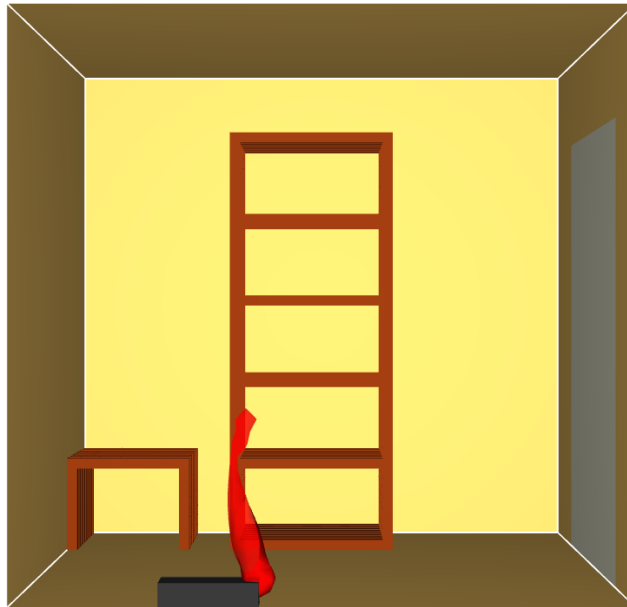
Figur 0-6 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario P-HL. Tiden er begrenset til 600 sekund som er makstid i simuleringen.



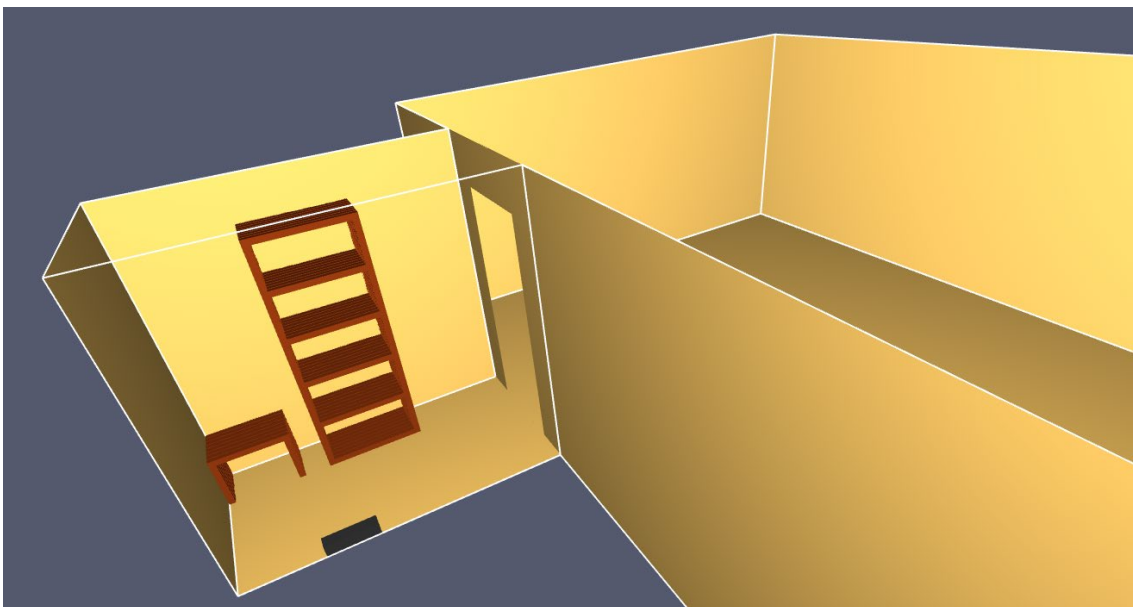
Figur 0-7 Konturplott av tiden, gitt i sekund, til 0,1 FEC for scenario P-GSL. Tiden er begrenset til 900 sekund som er makstid i simuleringen. Døren mellom rommene ble simulert lukket og ble åpnet etter 300 sekunder.

D. IDLH CO-konsentrasjon

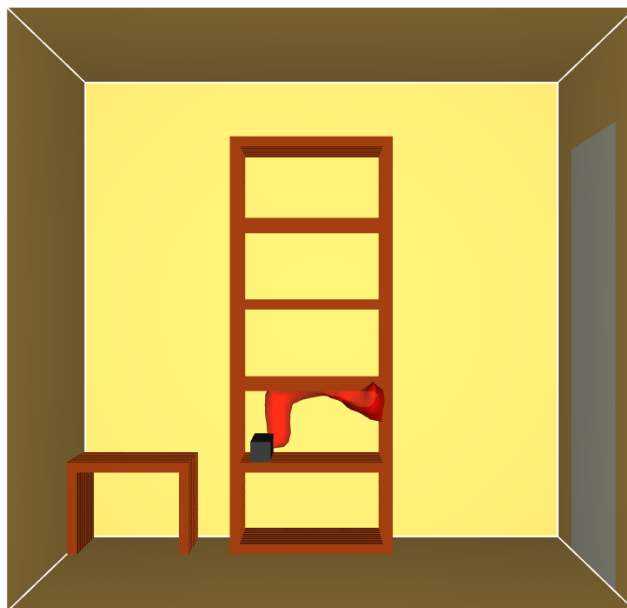
Resultater fra simuleringer som viser IDLH for CO presenteres i dette vedlegget.



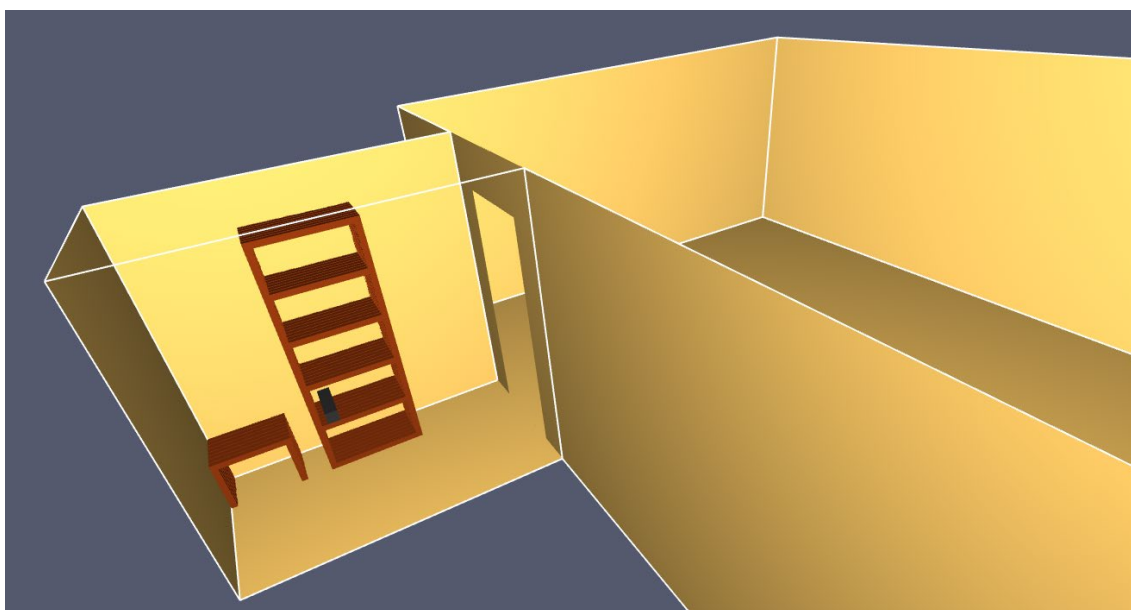
Figur D-1 IDLH CO-konsentrasjon for scenario C-GS etter 30 s.



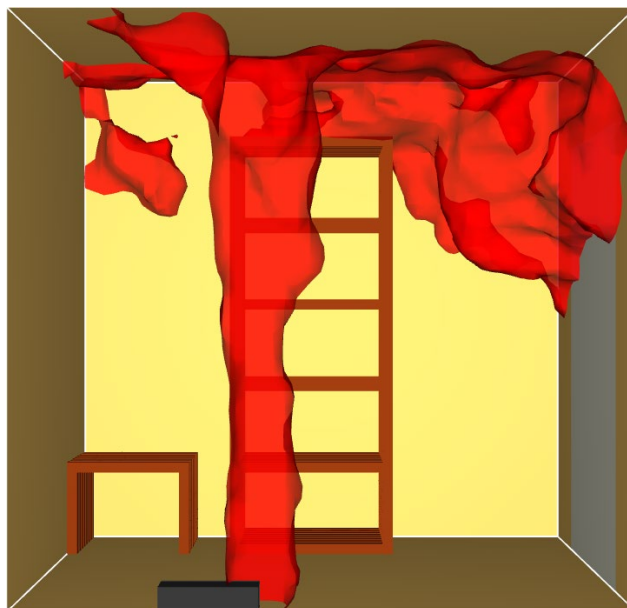
Figur D-2 Figur 0-8 IDLH CO-konsentrasjon for scenario C-GL etter 240 s.



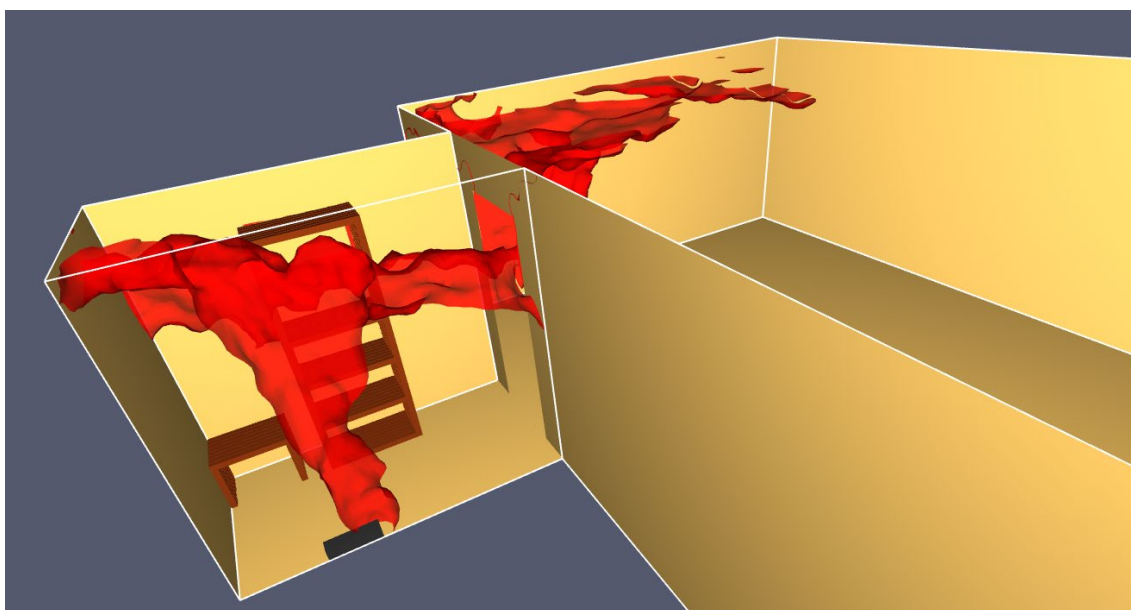
Figur D-3 IDLH CO-konsentrasjon for scenario C-HS etter 30 s.



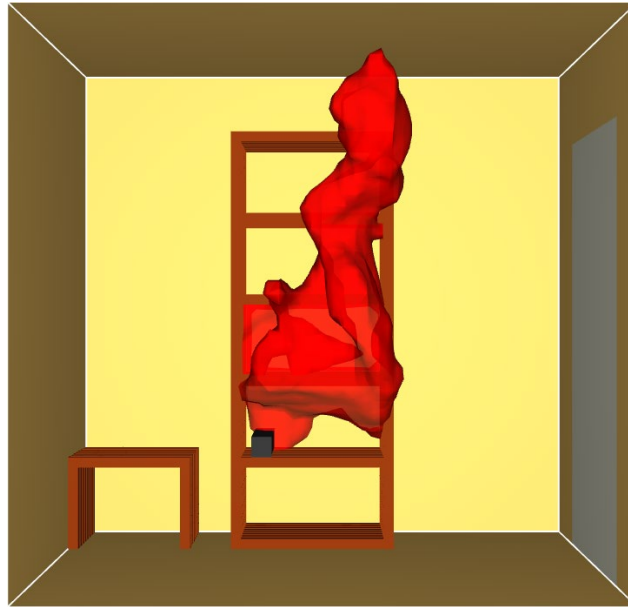
Figur D-4 IDLH CO-konsentrasjon for scenario C-HL etter 240 s.



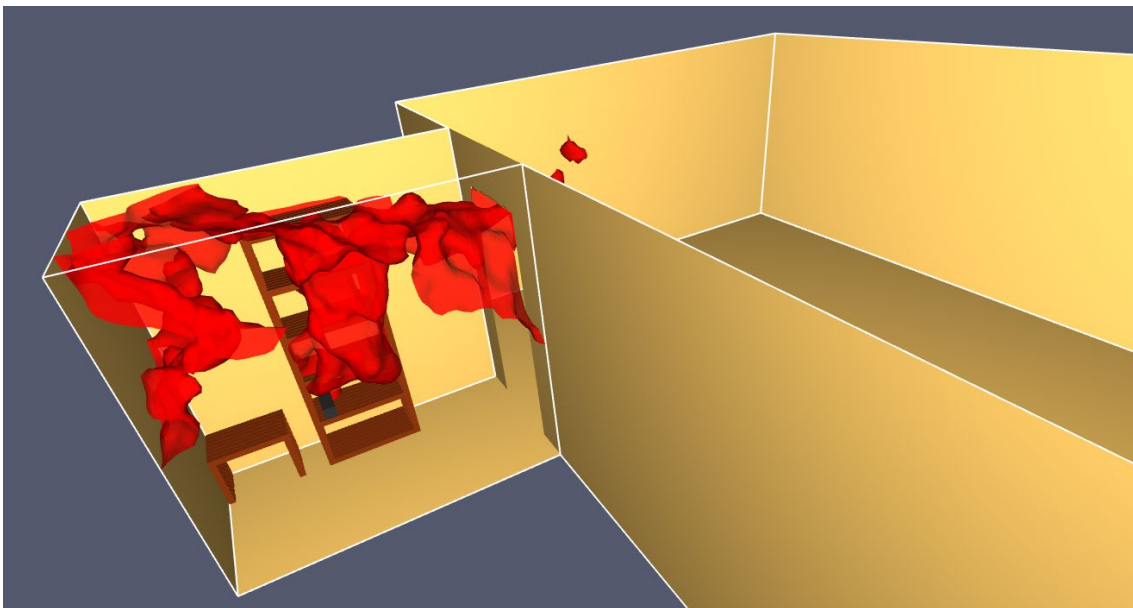
Figur D-5 IDLH CO-konstrasjon for scenario P-GS etter 30 s.



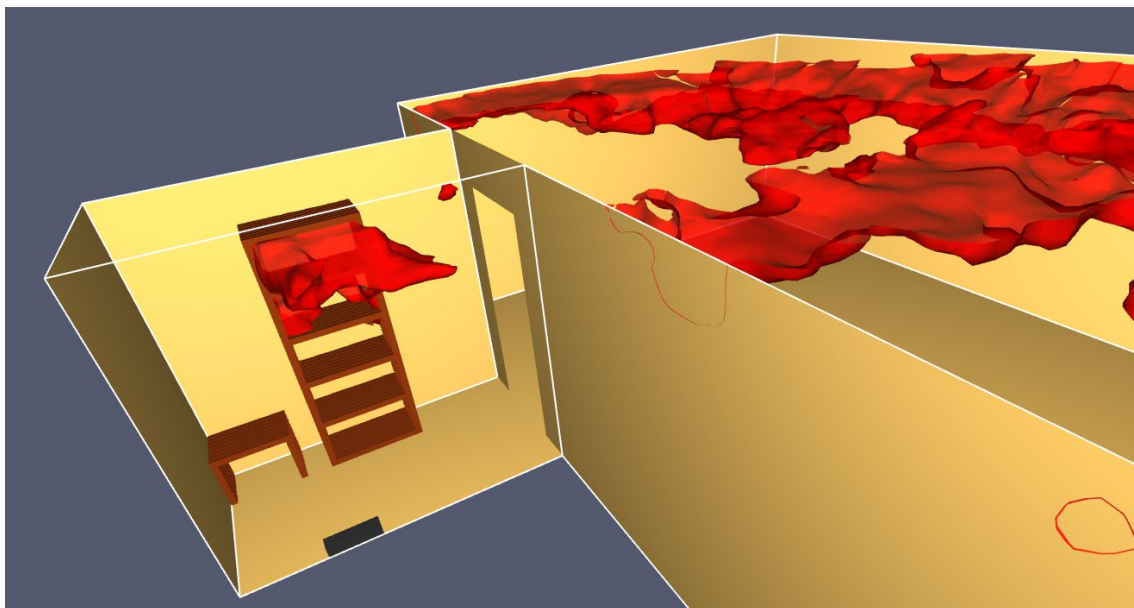
Figur D-6 IDLH CO-konstrasjon for scenario P-GL etter 240 s.



Figur D-7 IDLH CO-konsentrasjon for scenario P-HS etter 30 s.



Figur D-8 IDLH CO-konsentrasjon for scenario P-HL etter 240 s.



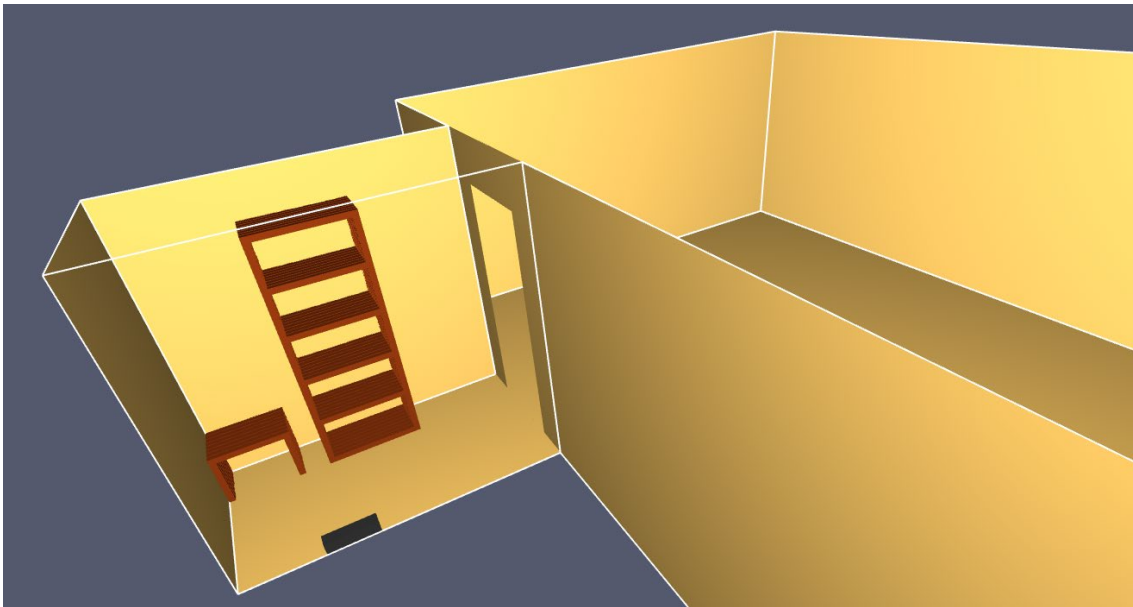
Figur D-9 IDLH CO-konsentrasjon for scenario P-GSL etter 390 s.

E. IDLH HCl-konsentrasjon

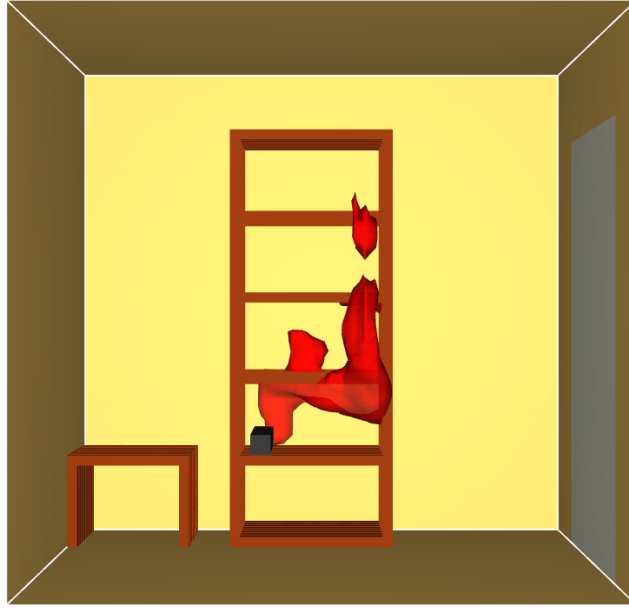
Resultater fra simuleringer som viser IDLH for HCl presenteres i dette vedlegget.



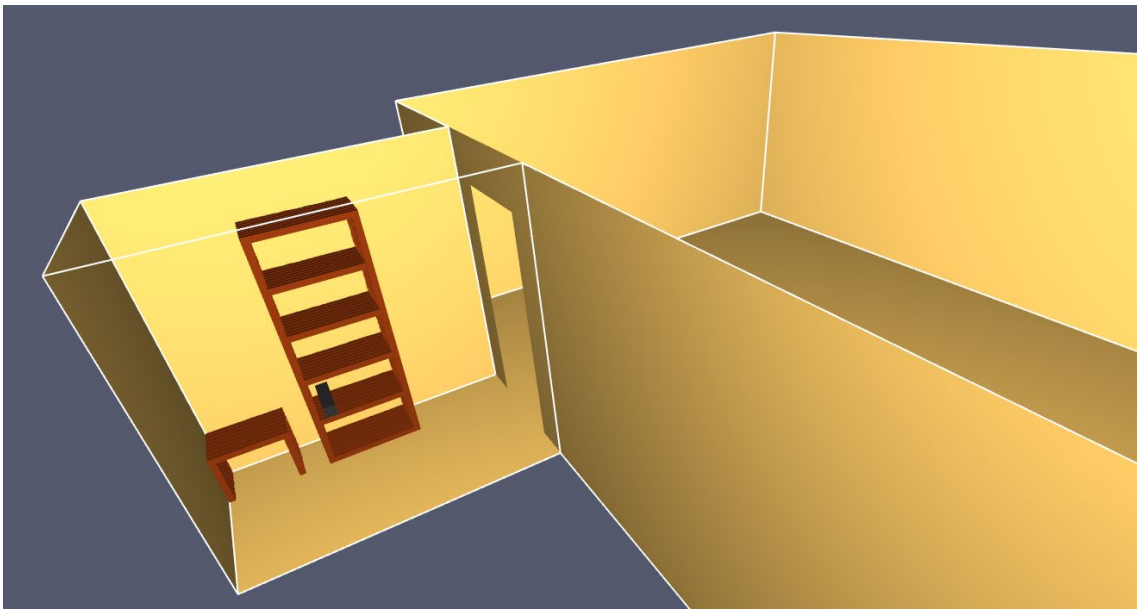
Figur E-1 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario C-GS etter 30 s.



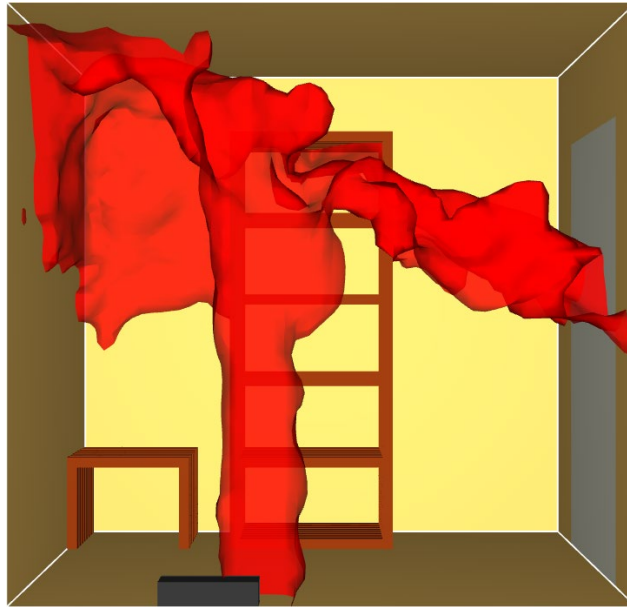
Figur E-2 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario C-GL etter 240 s.



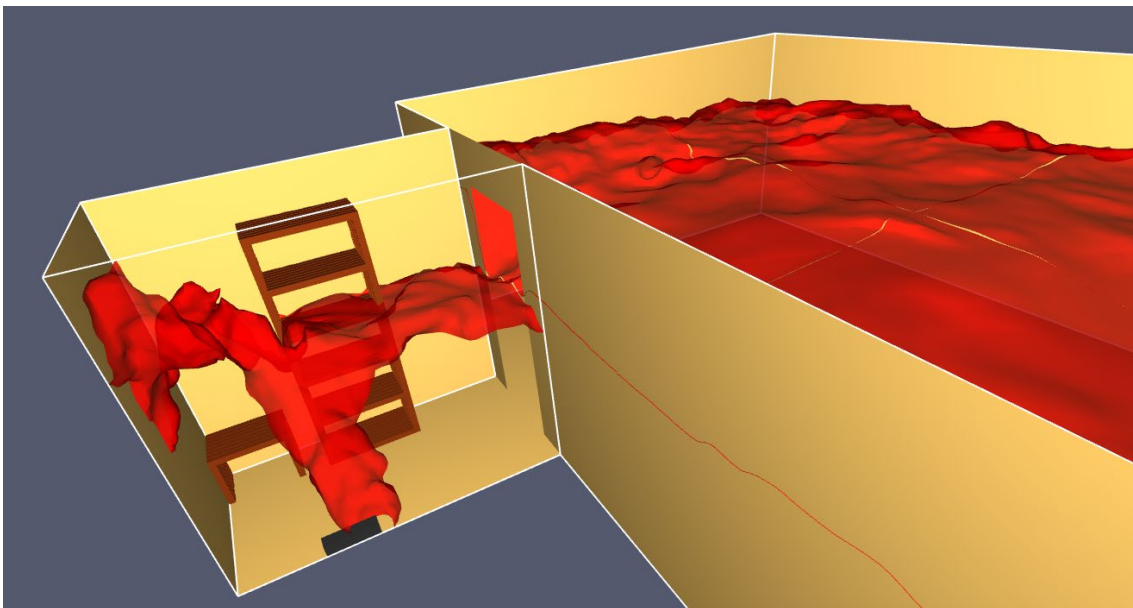
Figur E-3 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario C-HS etter 30 s.



Figur E-4 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario C-HL etter 240 s.



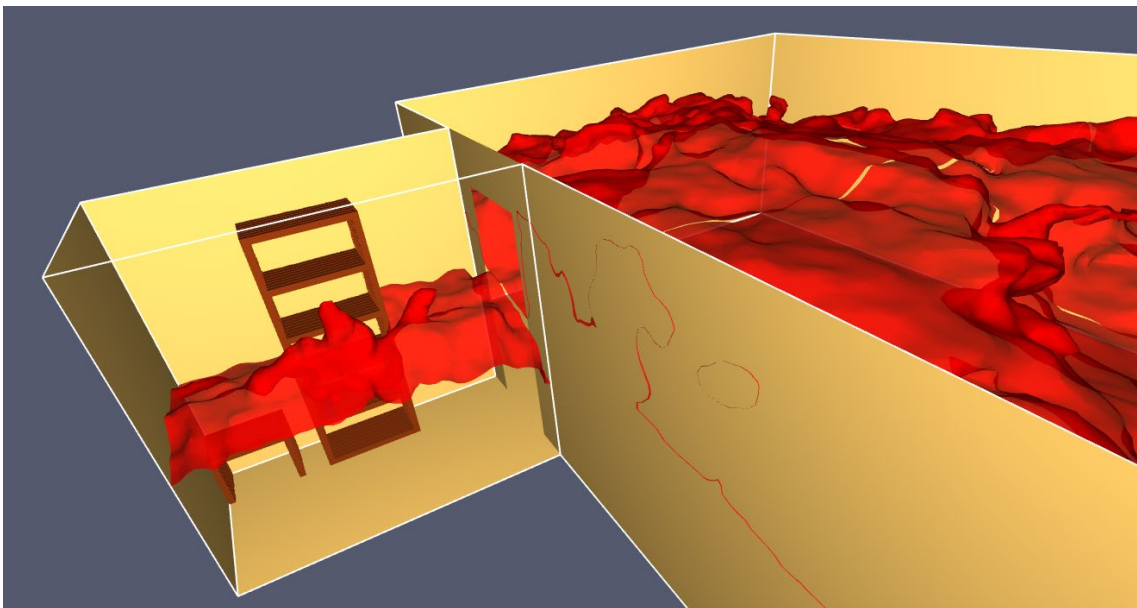
Figur E-5 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario P-GS etter 30 s.



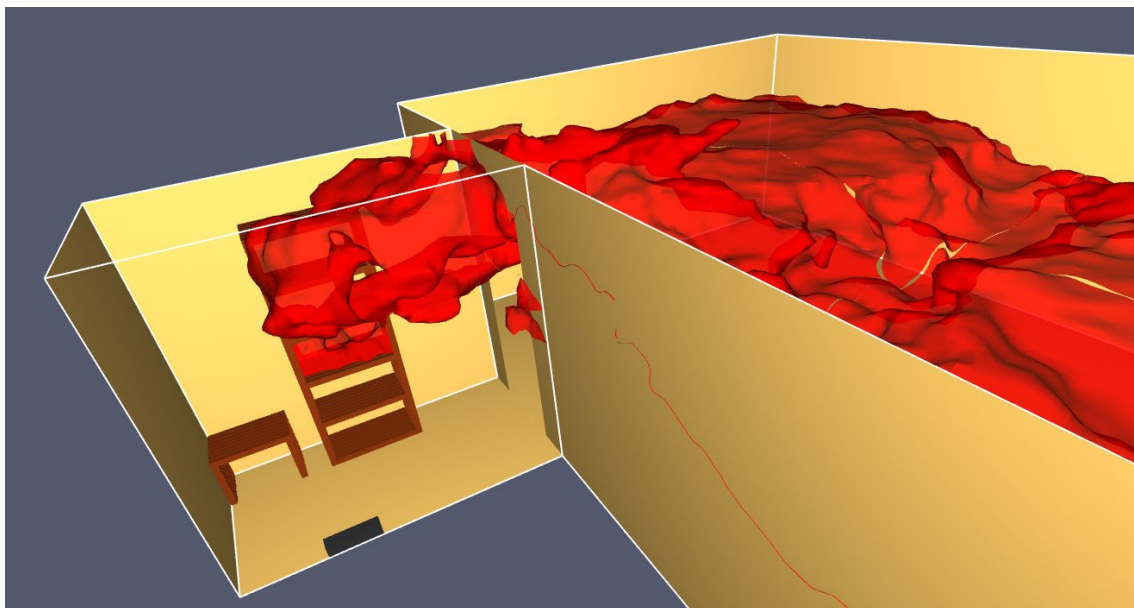
Figur E-6 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario P-GL etter 240 s.



Figur E-7 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario P-HS etter 30 s.



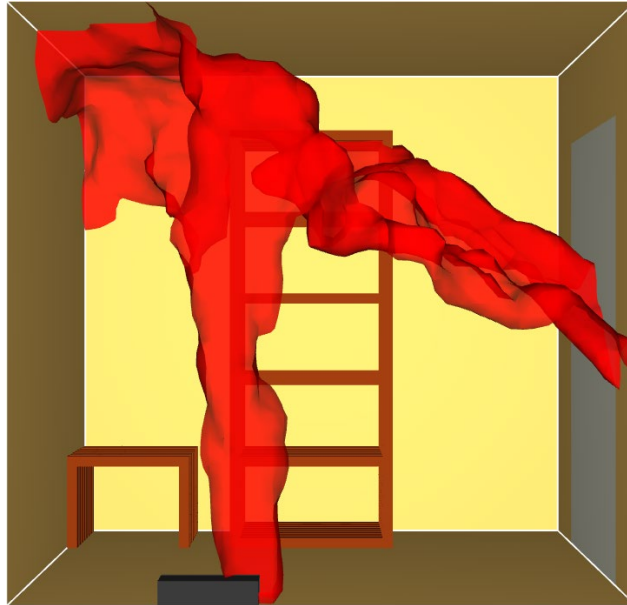
Figur E-8 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario P-HL etter 240 s.



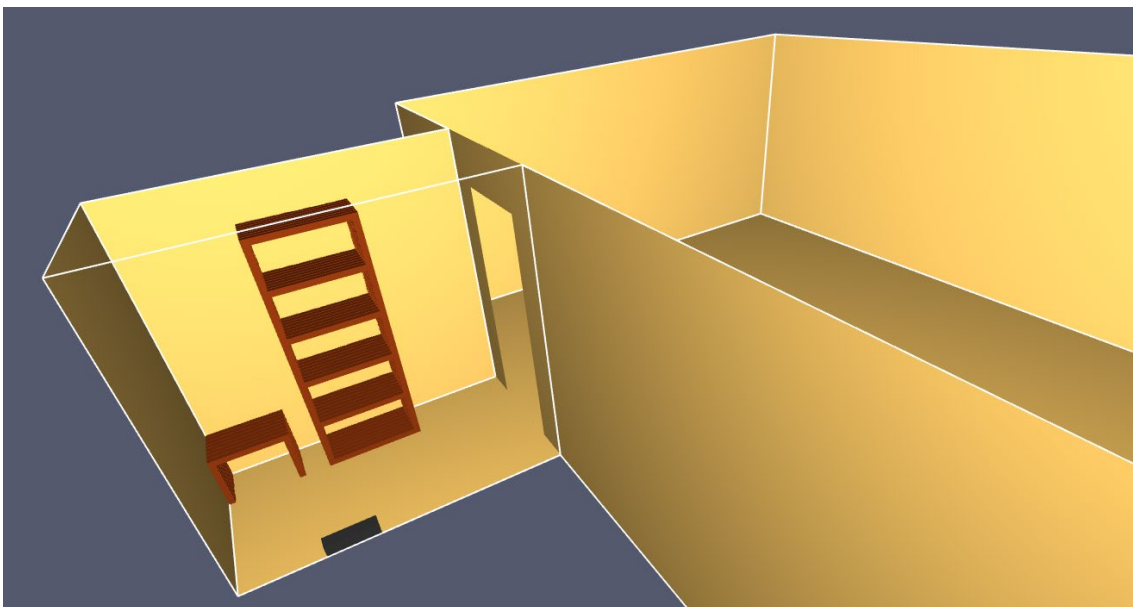
Figur E-9 IDLH HCl-konsentrasjon for scenario P-GSL etter 390 s.

F. IDLH HF-konsentrasjon

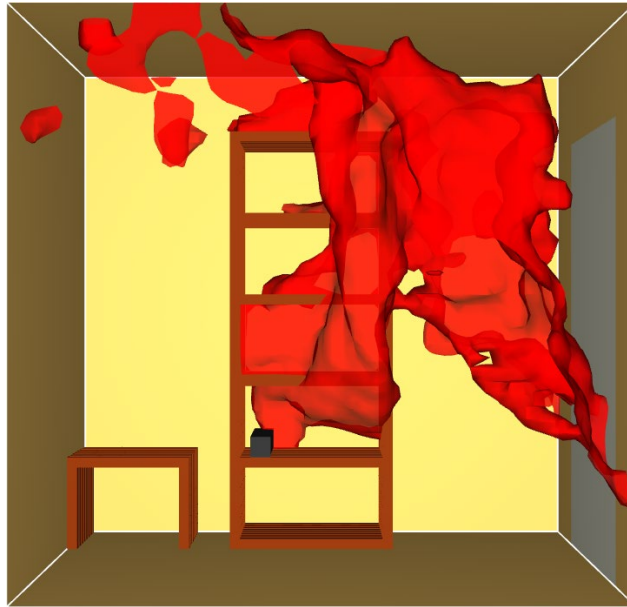
Resultater fra simuleringer som viser IDLH for HF presenteres i dette vedlegget.



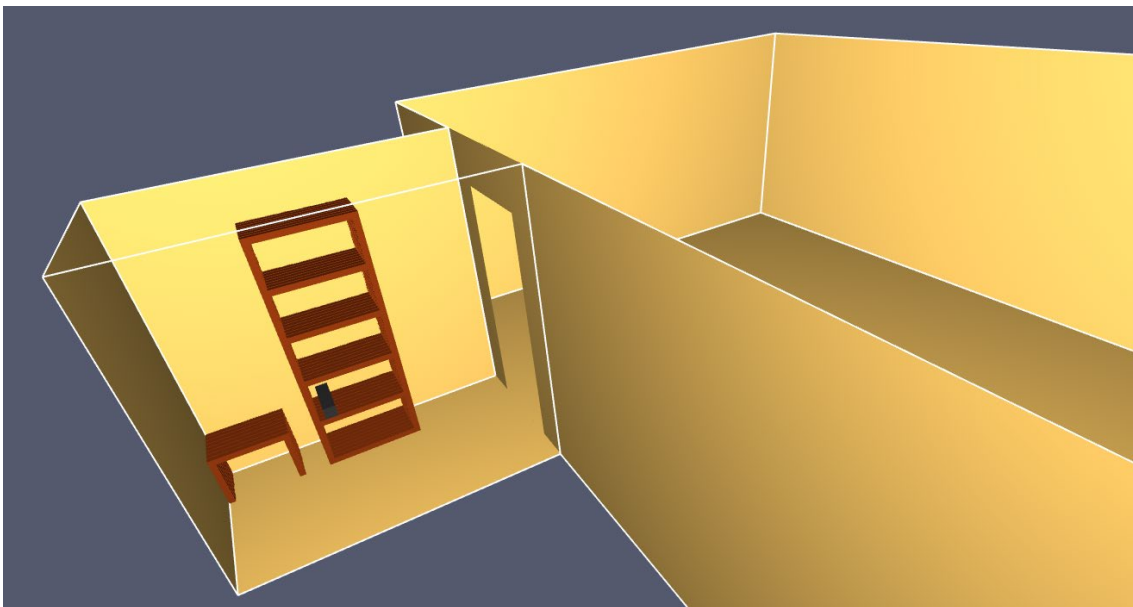
Figur F-1 IDLH HF-konsentrasjon for scenario C-GS etter 30 s.



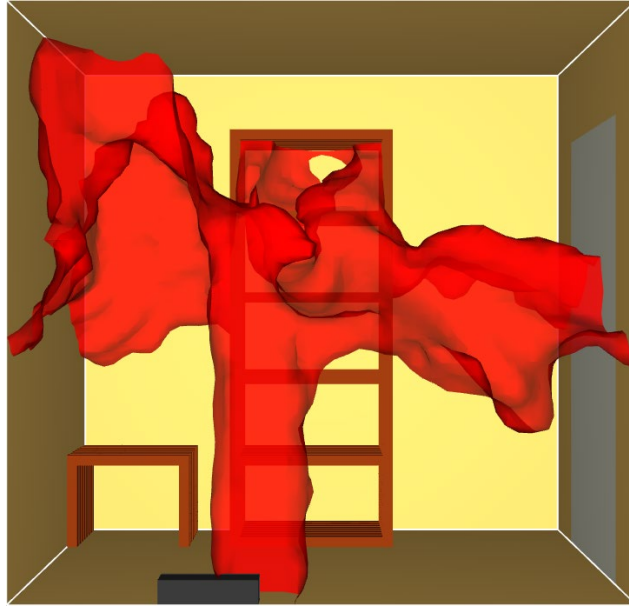
Figur F-2 IDLH HF-konsentrasjon for scenario C-GL etter 240 s.



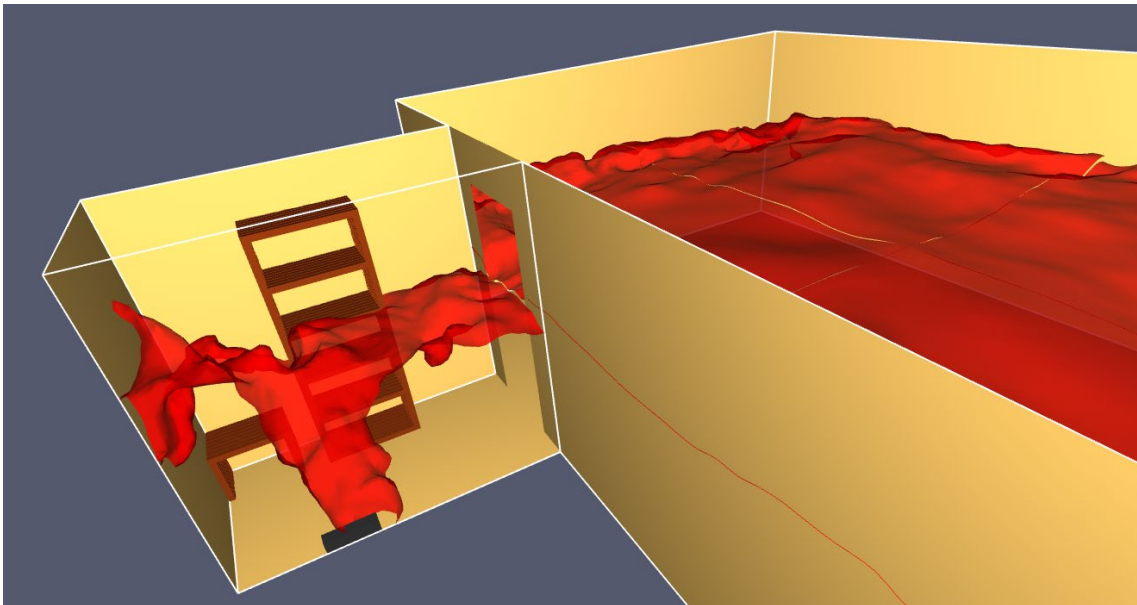
Figur F-3 IDLH HF-konsentrasjon for scenario C-HS etter 30 s.



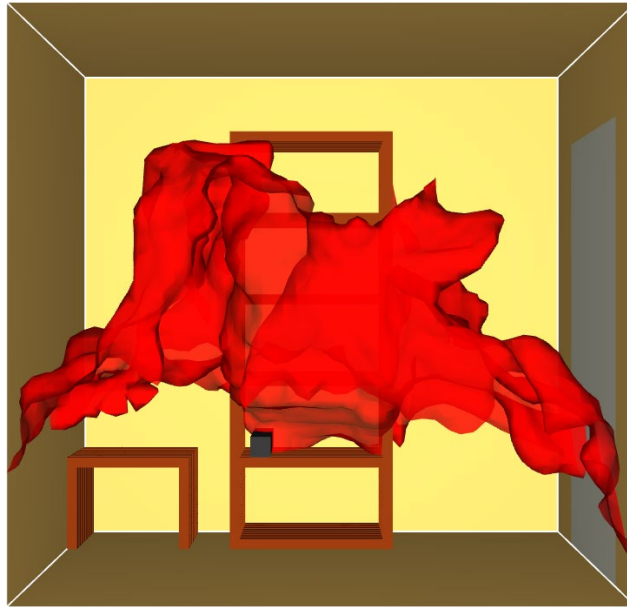
Figur F-4 IDLH HF-konsentrasjon for scenario C-HL etter 240 s.



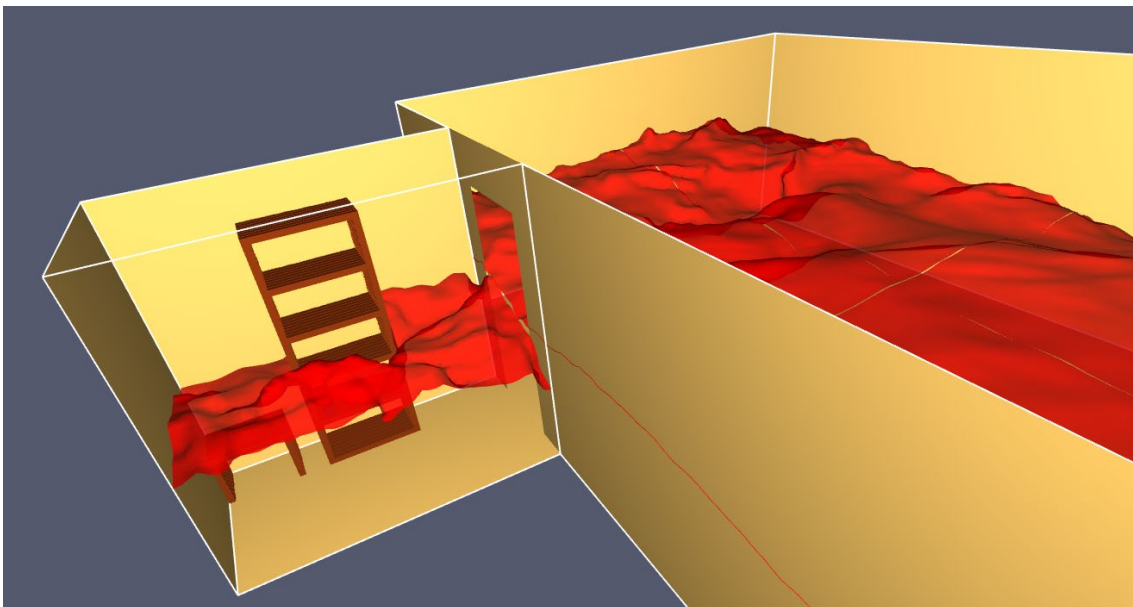
Figur F-5 IDLH HF-konsentrasjon for scenario P-GS etter 30 s.



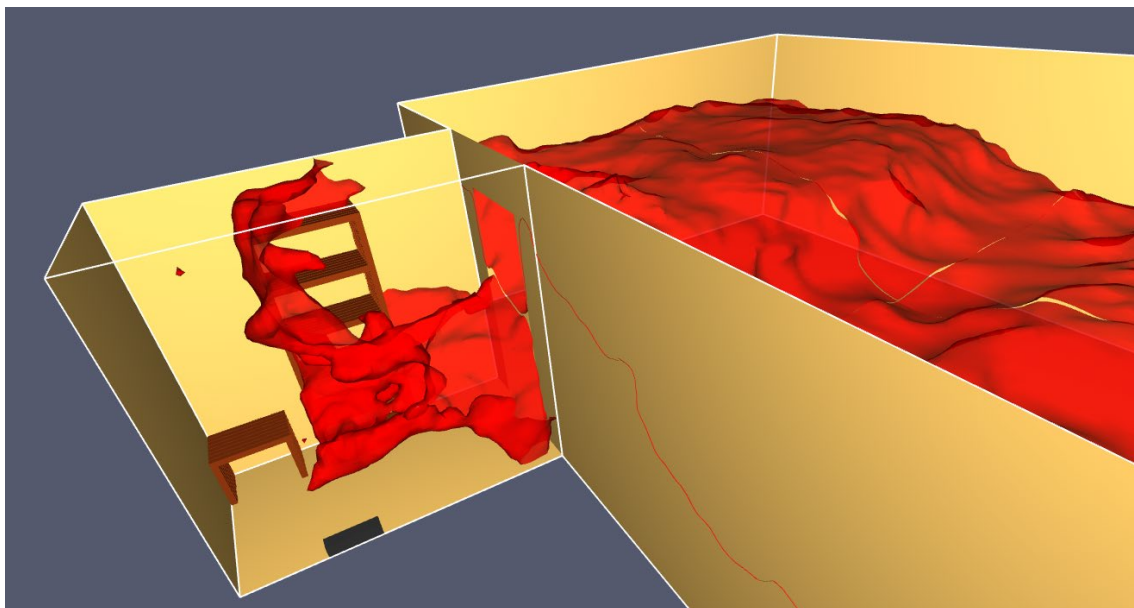
Figur F-6 IDLH HF-konsentrasjon for scenario P-GL etter 240 s.



Figur F-7 IDLH HF-konsentrasjon for scenario P-HS etter 30 s.



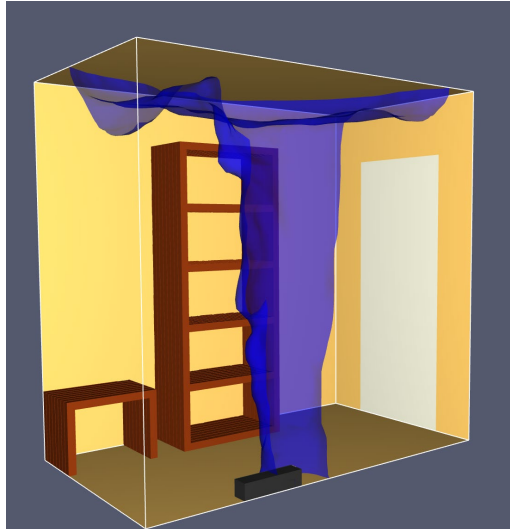
Figur F-8 IDLH HF-konsentrasjon for scenario P-HL etter 240 s.



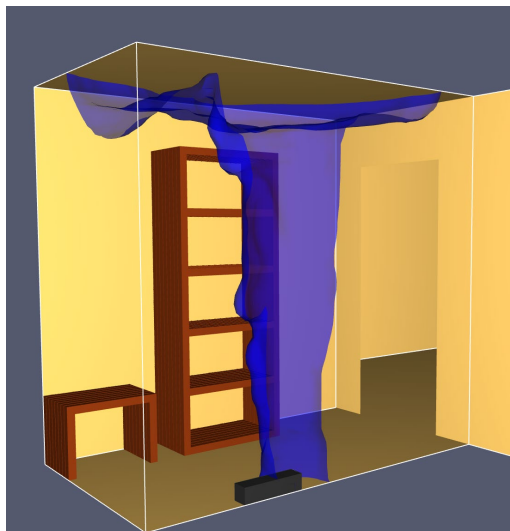
Figur F-9 IDLH HF-konsentrasjon for scenario P-GSL etter 390 s.

G. 34 ppm CO-konsentrasjon

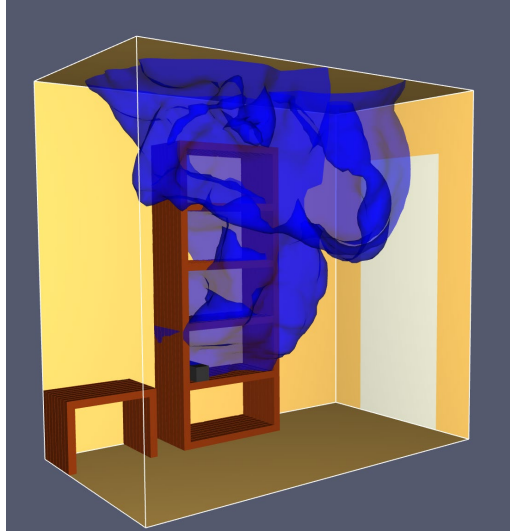
Resultater fra simuleringer som viser iso-overflate for 34 ppm CO presenteres i dette vedlegget.



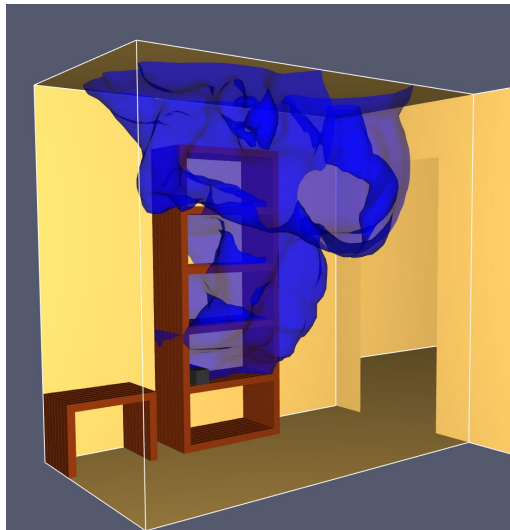
Figur 0-9 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 8 s for scenario C_GS.



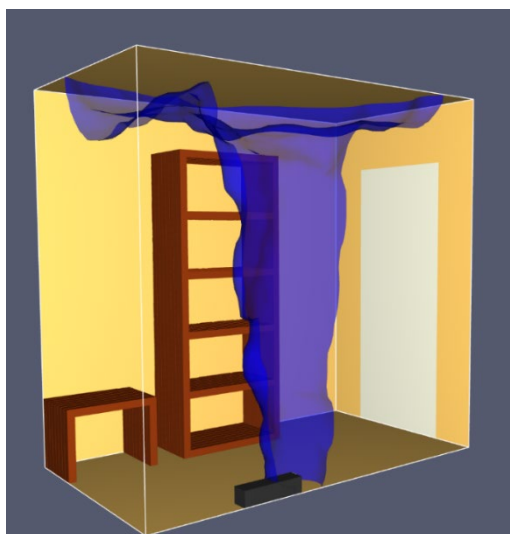
Figur 0-10 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 8 s for scenario C-GL.



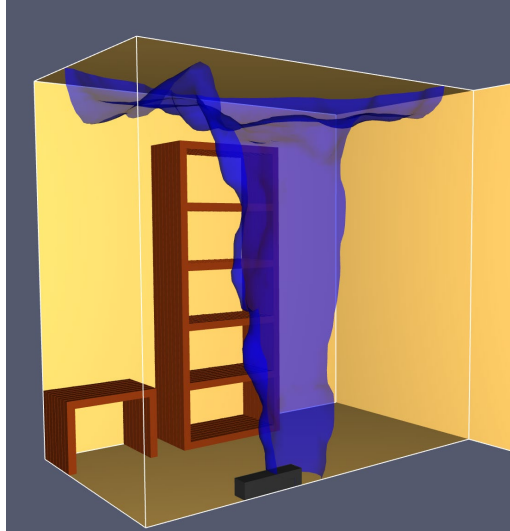
Figur 0-11 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 12 s for scenario C-HS.



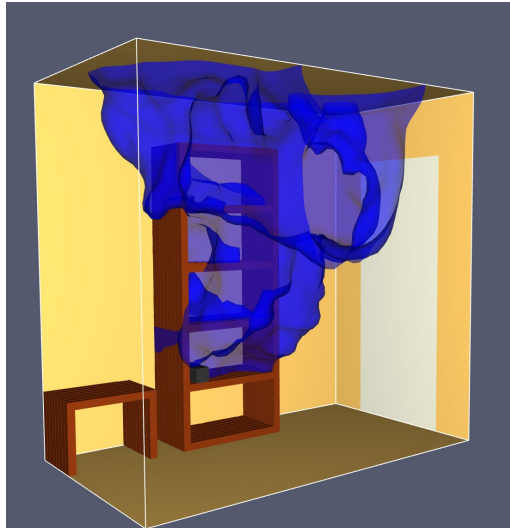
Figur 0-12 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 12 s for scenario C-HL.



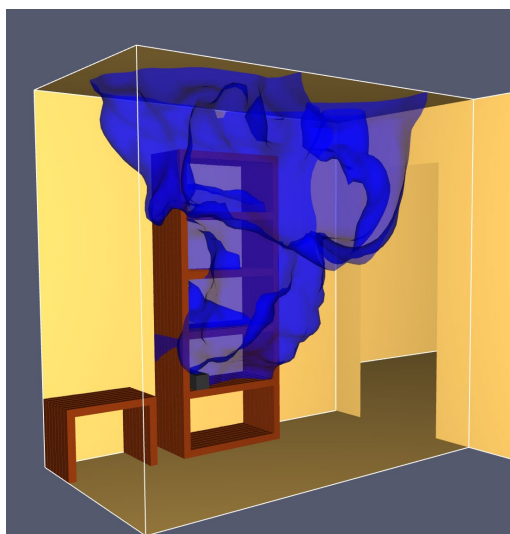
Figur 0-13 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 8 s for scenario P-GS.



Figur 0-14 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 8 s for scenario P-GL.



Figur 0-15 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 12 s for scenario P-HS.



Figur 0-16 Iso-overflate av 34 ppm CO-konsentrasjonen etter 12 s for scenario P-HL.

H. Oversikt over utvalgt litteratur

I dette vedlegget presenteres en oversikt over informasjon og resultater fra utvalgt litteratur.

Tabell H-1 Oversikt over *Battery abuse test* betingelser i utvalgte studier for LFP og NMC batterier. Informasjon i opprinnelig publikasjon er gitt på engelsk, og er presentert her på originalspråket.

Reference	Cell tested	State of charge	Type of cathode	Abuse test conditions	Gas analysis
Kong et al. (2005) [35]	Cell 18650 1Ah, 5V		LFP	Overcharge (0.2C)	CO ₂ -CO- CH ₄ -C ₂ H ₂ - C ₂ H ₄ - C ₂ H ₅ F- C ₂ H ₆ - C ₃ H ₆ -C ₃ H ₈
Golubkov et al. (2014) [13]	Cell 18650 1.1Ah	Charged to 100%	LFP	Thermal (Heater reactor)	CO ₂ -CO- CH ₄ -C ₂ H ₄ - C ₂ H ₆ -H ₂
Larsson (2014 and 2017) [10]	5 cell, pack 18650 7Ah		LFP	Thermal (Fire test chamber)	CO-HF- POF ₃
Yuan (2015) [36]	Cell 18650 2Ah	170, 180 and 190%	LFP	Overcharge (1C)	CO ₂ -CO- CH ₄ -C ₂ H ₄ - C ₂ H ₆
Sun et al. (2016) [7]	Cell 18650	Charged to 0-50-100% and 150%	LFP	Thermal (Fire test chamber)	CO ₂ -H ₂ - CO-SO ₂ -HF- Pox
Lammer (2017) [37]	Pouch cell 10 Ah		NMC	Thermal (Heater reactor)	CO ₂ -CO- CH ₄ - C ₂ H ₂ - C ₂ H ₄ - C ₂ H ₆ -H ₂
Fernandes (2018) [9]	Cell 26650 2.5Ah, 3.6V	Tested from 100%-135%	LFP	Overcharge (2C, 5A and 7.2V)	CO ₂ -CO- CH ₄ -C ₂ H ₄ - C ₂ H ₅ F-H ₂ - HF Also CH ₃ OCH ₃ - CH ₃ OCHO- C ₂ H ₅ OH- CH ₃ F
Gully et al. [28]	Pouch cell, 63 Ah	50, 75, 100% and overcharge	NMC	Thermal (radiant and band heaters) except for the overcharging tests Thermal (radiant and band heaters)	CO ₂ , CO, NO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈ , HCl, HF, C ₆ H ₆ , C ₇ H ₈ , C ₂ H ₆ O, CH ₄ O
	Cylindrical cell 18650, 1.5 Ah	50, 75, and 100%	LFP		
Sturk et al. [14]	Pouch cell, 7 Ah (3.3 V)	100%	LFP	Thermal	HF, CO ₂ , total hydrocarbon
	Pouch cell, 14 Ah (4.1 V)		NMC/LMO		

Nedjalkov et al. [30]	Pouch cell, 40 Ah	Slightly overcharged (4.3V)	NMC	Nail penetration	HF, CO, acrolein, biphenyl, COS, styrene, EMC, DEC, EC, benzene, toluene
Rivière et al. [31]	Pouch cell, 2.9 Ah (11 Wh)	0, 50, 100%	Presumably LMO	Thermal (infrared heaters)	HF, CO, NO, SO ₂ , HCl, CO ₂ , CO, THC, aldehydes, O ₂
Lecocq et al. [33]	Pouch cell, 1.3 Ah (4.2 Wh)	0, 50, 100%	LFP	Thermal (infrared heaters)	CO, CO ₂ , THC, CH ₂ O, HCN, NO _x , SO ₂ , HF, O ₂

Tabell H-2 Oversikt over avgassing i utvalgte studier. Informasjon i opprinnelig publisering er gitt på engelsk, og er presentert her på originalspråket.

Reference	Exhaust gases observed
Kong (2005) [35]	No CO and H ₂ measured. No rupture of the casing.
Golubkov (2014) [13]	After thermal runaway, CO ₂ and H ₂ was detected (Thermal test at a rate of 2°C.min ⁻¹) as well as CO-CH ₄ -C ₂ H ₄ and C ₂ H ₆ in small amounts. First gas was released at 195°C and second one at 404°C. No HF was detected.
Larsson (2014 and 2017) [10]	In 2014, could not measure the release of PO ₂ F ₂ because the concentration levels were below than 6ppm. Andersson confirms that the production of PO ₂ F ₂ could be around 1:20 of HF production.
Yuan (2015) [36]	Observed a rupture of the casing. Measured CO ₂ and CO as a main gases.
Fernandes (2018) [9]	Found 9 stages (A to I) and three vent gases. First slight amount of gases (CH ₄ , CO, CH ₃ OCHO, CH ₃ OCH ₃ and CO ₂ representing 0.7%) escape at 362 sec, 53°C and 120%SOC. Thermal runaway starts in stage F/G at 584 sec when stage T cell surface is 100 °C. Metallic casing cracks and a second gases is released (CH ₃ OCH ₃ , CH ₃ OCHO and C ₂ H ₄). At 140°C is the maximum concentration of the gaseous species and HF is observed. After thermal runaway, when the cell surface temperature increased to 300°C and 350°C, an explosion was leded possibly caused by a strong internal short circuit. From 900 to 2500 sec, the temperature and species decrease. HF is the only species whose concentration increases.
Gully et al. [28]	It was found that when visible combustion was observed, the volume of gas produced in the test was reduced. The oxygen release from the battery was found to be not sufficient to influence the combustibility external to the battery cell. CO was found to be the main component present in the off gas. It was also reported that the off gas produced in the early stages of the thermal runaway was colder than the off gas released in the later stages.
Sturk et al. [14]	The venting duration for NMC/LMO cells is only approximately 2 min compared to 45 min for LFP cells. 50 L of gas was released for NMC/LMO cells, whereas around 1500 L of gas was released for LFO cells. Despite the difference in total gas release, similar amount of HF release was found for the tests using two types of cells.

Tabell H-3 Oversikt over maksimale konsentrasjoner for ulike gasser fra litteraturen.

Gas	Cell tested	Maximum amount of gas (ppm)
CO ₂	/	Fernandes(2018)[9]: 500 ppm (LFP)
	/	Sun (2016)[7]: 3800 ppm (similar for NMC and LFP)
C ₂ H ₄	/	Fernandes(2018)[9]: 230 ppm (LFP)
CO	A cell 26650	Fernandes(2018)[9]: 130 ppm (LFP)
	A cell 18650	Sun (2016)[7]: 616 ppm (NMC), 912 ppm (LFP)
HF	5 cell pack 18650	Larsson (2017)[10]: 150 ppm (LFP)
	/	Lecocq(2016)[33]: ~300 ppm (LFP)
	A cell 26650	Fernandes(2018)[9]:10 ppm (LFP)
	/	Nedjalkov(2016)[30]:1640 ppm (NMC)
	A cell 18650	Sun (2016)[7]: 19 ppm (NMC). 36 ppm (LFP)
PO _x	A cell 18650	Sun (2016)[7]:51 ppm (NMC), 68 ppm (LFP)

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

Gjennom internasjonalt samarbeid med akademi, næringsliv og offentlig sektor bidrar vi til et konkurransekraftig næringsliv og bærekraftig samfunn. RISEs 2 200 medarbeidere driver og støtter alle typer innovasjonsprosesser. Vi tilbyr et hundretalls test- og demonstrasjonsmiljø for framtidssikre produkter, teknikker og tjenester. RISE Research Institutes of Sweden eies av den svenske staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM
Telefon: 464 18 000
E-post: post@risefr.no, Internett: www.risefr.no

RISE Fire Research
RISE-rapport 2021:17
ISBN: