



**RI.
SE**

Eksplisjonsrisiko fra litium-ion batterier i bygninger

RISE RAPPORT 2026:61

Christoph Meraner

Davood Zeinali

Lei Jiang

RISE Fire Research

Eksplosjonsrisiko fra litium-ion batterier i bygninger

Christoph Meraner, Davood Zeinali, Lei Jiang

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2026:61

ISBN: 978-91-90109-90-8

Prosjektnummer: 0421-24FOR - 1

Kvalitetssikring: Tian Li, Janne Siren Fjærestad

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

Forsidebilde: ChatGPT generert bilde basert på CFD modellering fra RISE Fire Research Trondheim 2026

Innhold

Innhold	2
Executive Summary	3
Sammendrag	5
Forord	7
1 Introduksjon	8
1.1 Bakgrunn	8
1.2 Målsetting	8
1.3 Omfang og begrensninger	9
2 Litteraturstudie	9
2.1 Hvorfor litium-ion batterier utgjør en eksplosjonsfare	9
2.2 Batterigassegenskaper	13
2.3 Ventilasjonsstrategier for å forhindre eller minimere eksplosjoner	18
2.3.1 Trekk ut strategi	19
2.3.2 Steng inne strategi	20
2.3.3 Oksygenreduksjonssystemer	21
2.4 Gaskyer ved <i>thermal runaway</i>	21
2.5 Modelleringsverktøy	23
3 Casestudie	24
3.1 Numerisk modell	25
3.2 Antagelser og modellbegrensinger	26
3.3 Definisjon av scenarioer	29
3.4 Resultater og diskusjon	30
3.4.1 Avtrekkssystemer etter <i>thermal runaway</i>	30
3.4.2 Avtrekkssystemer mens det pågår <i>thermal runaway</i>	38
3.4.3 Trykkavlastning	40
4 Konklusjoner og anbefalinger	40
5 Referanser	43

Executive Summary

Explosion risk from lithium-ion batteries in buildings

This study has examined the explosion risk associated with lithium-ion batteries in buildings, with a particular focus on battery energy storage systems (BESS). The background is the increasing use of such systems, combined with a growing recognition that explosion hazards related to so-called thermal runaway represent a significant safety challenge. The aim has been to identify the factors influencing the explosion risk and to evaluate how different technical measures, particularly ventilation and containment, can reduce this risk. Furthermore, the study aimed to assess whether and how explosion risk can be analyzed using numerical simulations, and whether such tools can be used to support design and risk assessment in practice.

The study shows that thermal runaway can lead to the rapid release of large amounts of flammable gases. If these gases are not ignited immediately, they may accumulate and form explosive gas clouds. A deflagration can produce harmful overpressures, even with relatively small amounts of gas. This can happen due to delayed ignition or re-ignition after a fire has been extinguished.

Numerical simulations have been used to analyse how such gas clouds form and develop in a battery room and how different measures affect the risk. The study shows that simulations are a useful tool for comparing solutions and understanding the effects of ventilation and room design. At the same time, there are significant limitations, including simplifications in the models and a lack of direct coupling to the actual explosion process. Simulations should therefore be regarded as a supporting tool and must be combined with experimental data and expert judgment.

The results show that there is no single universal solution to eliminate the explosion risk. Two main strategies have been identified:

- Extraction, where the gases are rapidly removed from the room
- Containment, where the oxygen level is reduced, including by the use of inert gas

Both strategies can be effective, but have clear limitations. For ventilation, it is often very challenging to achieve sufficiently high air exchange rates, particularly if multiple battery cells simultaneously undergo thermal runaway. For containment, the challenge is to maintain a low oxygen concentration for a sufficiently long hold time, which is difficult to design for because the duration of thermal runaway can be uncertain.

A key finding is that even with optimal measures, flammable gas mixtures may still occur in many scenarios. This is particularly relevant when ventilating a room already filled with battery gases.

Based on this, it is concluded that the explosion risk cannot be fully eliminated through preventive measures alone. It is therefore essential to supplement these with consequence-mitigating measures, particularly explosion pressure relief, in order to limit damage to buildings and ensure personnel safety. Battery rooms should therefore, as far as possible, be located outside buildings. If this is not feasible, they should be designed to allow straightforward direct venting to the open air while also facilitating effective pressure relief in the event of a deflagration.

For authorities and designers, this implies that regulations and guidelines should:

- Emphasise documentation of battery characteristics through battery abuse testing
- Focus on both preventive and consequence-mitigating measures
- Account for significant variation between different battery types

For fire services, the study highlights the importance of being aware of explosion risk even after a fire has been extinguished, especially during ventilation or opening of rooms.

Overall, the study shows that safe management of battery systems in buildings requires a holistic approach, where the selection of battery systems, the design of ventilation and safety systems, and emergency preparedness must be considered together.

Key words: Lithium-ion batteries, battery rooms, thermal runaway, explosion risk, ventilation, gas dispersion, risk assessment

Sammendrag

Ekspløsjonsrisiko fra litium-ion batterier i bygninger

Denne studien har undersøkt ekspløsjonsrisiko knyttet til litium-ion batterier i bygninger, med særlig fokus på batterienergilagringsystemer (BESS). Bakgrunnen er økende bruk av slike systemer og en samtidig erkjennelse av at ekspløsjonsfare ved såkalt *thermal runaway* representerer en vesentlig sikkerhetsutfordring. Målet har vært å identifisere hvilke faktorer som påvirker ekspløsjonsrisikoen og å evaluere hvordan ulike tekniske tiltak, særlig ventilasjon og inneslutning, kan redusere denne risikoen. Videre var det også et mål å vurdere om og hvordan ekspløsjonsrisiko kan analyseres ved hjelp av numeriske simuleringer, og om slike verktøy kan brukes til å støtte prosjektering og risikovurdering i praksis.

Studien viser at *thermal runaway* kan føre til rask frigjøring av store mengder brennbare gasser. Dersom disse gassene ikke antennes umiddelbart, kan de akkumuleres og danne eksplosive gasskyer. En deflagrasjon kan gi skadelige trykk, selv ved relativt små mengder gass. Dette kan skje ved forsinket antennelse eller reantennelse etter at en brann har blitt sløkket.

Numeriske simuleringer er brukt til å analysere hvordan slike gasskyer dannes og utvikler seg i et batterirom og hvordan ulike tiltak påvirker risikoen. Studien viser at simuleringer er et nyttig verktøy for å sammenligne løsninger og forstå effektene av ventilasjon og romutforming. Samtidig er det betydelige begrensninger, blant annet knyttet til forenklinger i modellene og manglende kobling til selve ekspløsjonsforløpet. Simuleringer bør derfor sees som et støtteverktøy og må kombineres med eksperimentelle data og ekspertvurderinger.

Resultatene viser at det ikke finnes én universell løsning for å eliminere ekspløsjonsrisikoen. To hovedstrategier er identifisert:

- Trekk ut, hvor gassene fjernes raskt fra rommet
- Steng inne, hvor oksygenet reduseres, også ved bruk av inert gass

Begge strategiene kan være effektive, men har klare begrensninger. For ventilasjon er det ofte svært krevende å oppnå tilstrekkelig høye luftutskiftningsrater, særlig dersom flere battericeller gjennomgår *thermal runaway* samtidig. For inneslutning er utfordringen å opprettholde lavt oksygennivå over tilstrekkelig lang tid, noe som er vanskelig å dimensjonere fordi varigheten av *thermal runaway* kan være usikker.

Et sentralt funn er at selv ved optimale tiltak vil det i mange scenarier fortsatt kunne oppstå brennbare gassblandinger. Dette gjelder særlig under ventilerende av et rom som allerede er fylt med batterigass.

På bakgrunn av dette konkluderes det med at ekspløsjonsrisikoen ikke kan elimineres fullstendig gjennom forebyggende tiltak alene. Det er derfor avgjørende å supplere med konsekvensreducerende tiltak, særlig trykkavlastning, for å begrense skade på bygninger og ivareta personsikkerheten. Batterirom bør derfor i størst mulig grad plasseres utenfor bygninger. Dersom dette ikke er mulig, bør de utformes slik at de enkelt kan ventileres direkte til det fri og samtidig legge til rette for effektiv trykkavlastning ved en eventuell deflagrasjon.

For myndigheter og prosjekterende innebærer dette at regelverk og veiledning bør:

- Vektlegge dokumentasjon av batterienes egenskaper gjennom batteristresstester
- Ha fokus på både forebygging og konsekvensreducerende tiltak
- Ta høyde for betydelig variasjon mellom ulike batterier

For brannvesenet understreker studien viktigheten av å være oppmerksom på eksplosjonsfare også etter at en brann er slokket, spesielt ved ventilerings eller åpning av rom.

Samlet viser studien at sikker håndtering av batterisystemer i bygg krever en helhetlig tilnærming, der valg av batterisystemer, design av ventilasjons- og sikkerhetssystemene og beredskap må sees i sammenheng.

Nøkkelord: Litium-ion batterier, batterirom, *thermal runaway*, eksplosjonsrisiko, ventilasjon, gassdispersjon, risikovurdering

Forord

Dette prosjektet er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), og er utført som en del av prosjektporteføljen under forskningsavtalen mellom DSB og RISE Fire Research. Prosjektets bakgrunn og målsetting er beskrevet i kapittel 1.

Christoph Meraner, prosjektleder

Trondheim, juli 2026

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

En såkalt *thermal runaway* (engelsk), også omtalt som termisk rusning eller løpsk termisk reaksjon, i et litium-ion batteri kan føre til rask frigjøring og spredning av både giftige og brennbare gasser. Om gassene antenner umiddelbart eller ikke, avhenger av flere faktorer, blant annet batteriets ladetilstand (SOC). Ved forsinket antennelse kan det dannes en gassky med potensial for eksplosjon. Eksplosjonsfare kan også oppstå dersom flammen sløkkes på grunn av underventilering, samtidig som avgassingene fra *thermal runaway* fortsetter. Dette er særlig relevant for store batterienergilagringssystemer (BESS) installert i bygninger. Risikoen for eksplosjon i slike systemer har blitt fremhevet som en ny trussel i Stortingsmelding Nr. 16 [1], selv om forskningen hittil i større grad har vært rettet mot brannrisikoen i slike systemer.

Det finnes en rekke programmer utviklet for å analysere branner og eksplosjoner. Noen av disse er basert på åpen kildekode, som gir fri tilgang til å se, bruke, endre og distribuere koden, mens andre er kommersielle løsninger. Åpen kildekode fremmer både gjennomsiktighet og samarbeid i utviklingsprosessen. I bygg- og anleggssektoren har brannrådgivere i mange år benyttet Fire Dynamics Simulator (FDS) [2–4] som industristandard for risikovurdering og utvikling av brannkonsepter. Det er derfor ønskelig å etablere en metode for å evaluere eksplosjonsfare knyttet til litium-ion batterier, som enkelt kan integreres i arbeidsflyten ved utvikling av brannkonsepter for BESS i bygninger. Dette vil bidra til å etablere et helhetlig risikobilde for slike installasjoner.

I litteraturen finnes det enkelte vellykkede eksempler på bruk av veletablerte verktøy med åpen kildekode, som FDS og OpenFOAM [5], for å undersøke sikkerhetsrisikoer knyttet til *thermal runaway* i litium-ion batterier. Til tross for disse eksemplene er praktisk anvendelse av slike verktøy fortsatt utfordrende. Dette skyldes blant annet mangelen på offisiell støtte og fraværet av brukervennlige grensesnitt, noe som kan begrense tilgjengeligheten og effektiviteten for ikke-eksperter.

1.2 Målsetting

Hensikten med prosjektet er å undersøke eksplosjonsfaren ved forsinket antenning av gassene og ved reantenning av underventilerte og sløkkede BESS-branner ved hjelp av numeriske simuleringer i programvare med åpen kildekode. CFD-simuleringer vil benyttes for å estimere både total gassmengde og romlig fordeling av gass i ulike scenarioer. En analytisk modell vil bli brukt for å evaluere eksplosjonstrykket ved antenning av en gassky.

Prosjektet skal belyse følgende forskningsspørsmål:

1. Hvilke numeriske verktøy med åpen kildekode er brukt i litteraturen for å evaluere eksplosjonsfare knyttet til litium-ion-batterier, og hvilke forhold knyttet til mulige scenarioer og batterigassenes egenskaper må en slik analyse ta hensyn til?
2. Hvilke tiltak og strategier kan redusere eksplosjonsrisikoen?

1.3 Omfang og begrensninger

Studien omfatter vurdering av eksplosjonsrisiko fra litium-ion batterier i bygninger, med hovedvekt på gassutslipp ved *thermal runaway* og effekten av ulike ventilasjonsstrategier. Arbeidet baserer seg på litteraturgjennomgang, analytiske vurderinger og numeriske CFD-simuleringer som er utført i Fire Dynamics Simulator. Simuleringene dekker scenarioer med *thermal runaway* i et begrenset antall celler og undersøker ulike luftutskiftningsrater, ventilasjonskonfigurasjoner og enkle innsatsstrategier som døråpning og bruk av mobile vifter.

Studien har flere viktige begrensninger. Det er ikke modellert antennelse, brann- eller eksplosjonsforløp, kun gassdispersjon. Utviklingen av selve *thermal runaway*-prosessen i batteriet er ikke modellert. Avgassingsraten er basert på eksperimentelle data. Termiske randbetingelser er sterkt forenklet og varmeoverføring til omgivelsene og stråling er utelatt. Dette påvirker temperaturen og dermed til en viss grad gasspredningen. Ventilasjonssystemene er idealisert ved at detaljer som diffusorer og realistiske strømningsprofiler er utelatt.

Videre er studien begrenset til én representativ gassammensetning med i hovedsak lette, oppdriftsdominerte gasser. Scenarier med tunge eller flerfase gassblandinger er ikke inkludert. Batterikarakteristikkene er basert på et begrenset datagrunnlag, og usikkerhet knyttet til gassproduksjon, temperatur og propagering avhenger derfor av tilgjengelige tester. Antall scenarioer og geometriske konfigurasjoner er også begrenset.

Eksplosjonskonsekvenser vurderes ved forenklete, analytiske metoder som ikke fanger opp dynamiske effekter, trykkavlastning eller komplekse interaksjoner i reelle hendelser. Resultatene gir derfor primært relative sammenligninger mellom tiltak og ikke eksakte prediksjoner av eksplosjonstrykk eller konsekvenser.

Samlet innebærer dette at resultatene må tolkes som indikative og at de bør suppleres med eksperimentelle studier, mer avansert modellering og systemspesifikke analyser ved praktisk prosjektering.

2 Litteraturstudie

Denne delen av rapporten bygger til dels på en nylig publisert studie av Quant et al. [6], som omhandler eksplosjoner i lukkede rom på skip forårsaket av batterier. Sikkerhetskravene til skip er generelt strengere enn for BESS-installasjoner på land, ettersom hendelser til sjøs må håndteres av mannskapet uten mulighet for ekstern assistanse. I tillegg er regelverket for skip mer modent enn det som gjelder for BESS i bygninger, selv om det fortsatt er under utvikling. Dette fremgår blant annet av det nyeste forskriftsforslaget for skip som benytter batterisystem med litium-ion-celler med en samlet kapasitet på 20 kWh eller mer [7]. Det finnes likevel flere paralleller mellom batterirom på skip og tilsvarende installasjoner på land.

2.1 Hvorfor litium-ion batterier utgjør en eksplosjonsfare

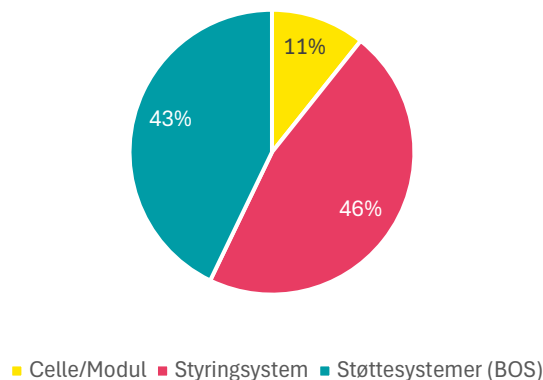
Brann- og eksplosjonsrisikoen knyttet til litium-ion batterier stammer fra deres evne til å gjennomgå en såkalt *thermal runaway*. På norsk brukes også begrepet «termisk rusning». En *thermal runaway* er en ukontrollert selvforsterkende oppvarmingsprosess som kan oppstå i

litium-ion batterier. Prosessen kan utløses av akutt skade, for eksempel ved mekanisk deformasjon, eller av gradvis skade over tid, som ved dannelse av dendritter som kan føre til intern kortslutning. Andre utløsende faktorer inkluderer overoppheting, feil lading eller produksjonsfeil. Når først en *thermal runaway* er initiert, frigjøres store mengder varme og gasser, noe som kan føre til brann eller eksplosjon, særlig i lukkede rom. Figur 1 viser prosessene som oppstår i forskjellige temperaturområder og som leder til *thermal runaway*. Når en celle varmes til 80–120 °C begynner SEI-laget (eng. *Solid Electrolyte Interphase*) å brytes ned, og eksoterme reaksjoner initieres. SEI-laget er et tynt, passiverende sjikt som dannes på anoden i litium-ion batterier under de første ladeprosessene. Ved 120–180 °C oppstår eksoterme reaksjoner mellom anode og elektrolytt, samtidig som betydelige mengder gass dannes. I området 130–170 °C smelter separatorene, noe som kan føre til intern kortslutning. Den eksakte temperaturen er avhengig av separatomaterialet som for eksempel polyetylen (PE) eller polypropylen (PP). Når temperaturen når 180–250 °C, brytes katodematerialet ned og avhengig av batterikjemien kan oksygen frigjøres. Over 250 °C kan cellen gå inn i *thermal runaway* og hydrogen (H₂) vil da dannes som del av de raske og ukontrollerte reaksjonene. Den maksimale temperaturgradienten under en *thermal runaway* korrelerer med energitettheten, slik Feng et al. [8] påpeker. ISO 646-1/Amd 1 [9] beskriver en temperaturgradient på henholdsvis 1 °C/s og 15 °C/s for å detektere *thermal runaway* i celler med en energitetthet under 130 Wh/kg og over 130 Wh/kg.



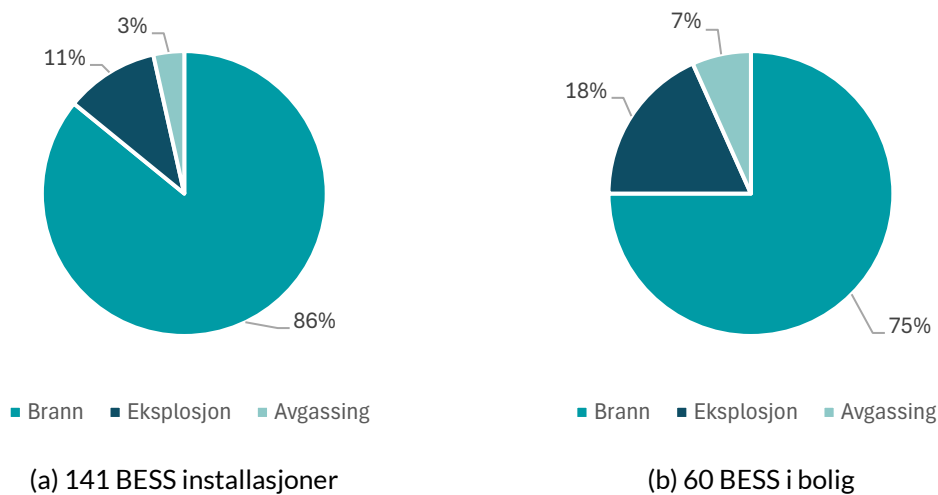
Figur 1 Illustrasjon av prosessene som leder til *thermal runaway* og tilhørende temperaturområder.

Thermal runaway kan være den initiale hendelsen, men brann i et batterirom kan også starte i tilknyttede systemer, som kabler eller elektrisk utstyr, og deretter spre seg til selve batteriene. Son et al. [10] differensierer derfor tre typer feil i batterienergilagringssystemer (BESS) som er feil på celle-nivå, feil på modul-nivå og feil på system-nivå. Det er viktig å skille mellom ulike feiltyper, fordi disse påvirker både hvor mange celler som involveres i en *thermal runaway* og hvor mange som aktiveres samtidig. En feil som fører til *thermal runaway* i en enkelt celle, men som ikke sprer seg videre, vil for eksempel frigjøre relativt lite gass og kan ofte håndteres av ventilasjonssystemet. Samtidig må cellestørrelsen tas i betraktning og de siste årene har utviklingen gått mot stadig større celler, med kapasiteter opp mot og over 1000 Ah. Dermed kan selv en isolert *thermal runaway* i en celle representere en betydelig brann- og eksplosjonsrisiko. Feil i en celle eller en modul utgjør bare rundt 11 % av rotårsakene til feil i BESS (se Figur 2). Resten skyldes feil i styringssystemer (46 %), som for eksempel *battery management system* (BMS) eller *energy management system* (EMS), og feil i støttesystemer (43 %), inkludert kabler, invertere, kjølesystemer, slokkesystemer, ventilasjonssystemer m.m. Sistnevnte kategori omtales som *balance-of-system-feil* (BOS) [11].



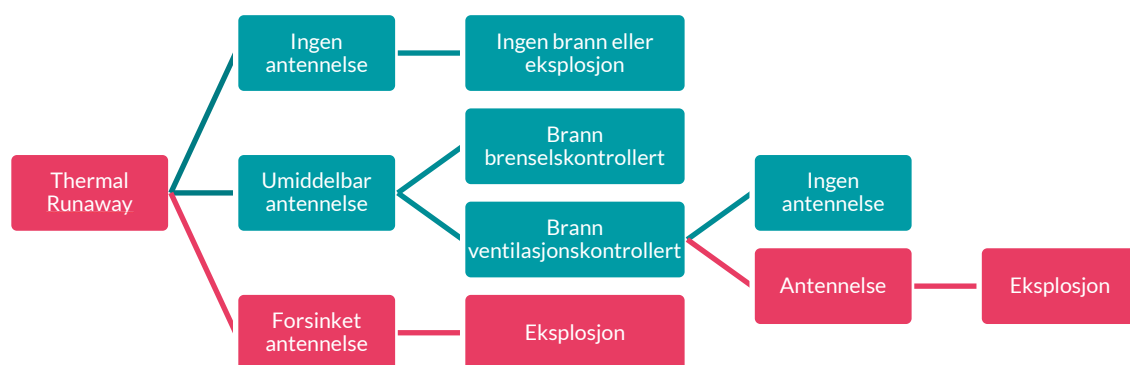
Figur 2 Rotårsak for feil i batterienergilagrinssystemer (BESS). Data fra EPRI's database for BESS feil- og hendelsesdata [11]. Databasen inneholder kun data fra kommersielle og industrielle og nett-tilknyttete BESS. Systemer i bolig er ikke inkludert.

Thermal runaway i et litium-ion batteri fører alltid til avgassing av brennbare gasser, men ikke nødvendigvis til en eksplosjon. Det mest sannsynlige utfallet er brann, ettersom et batteri i *thermal runaway* i seg selv genererer flere potensielle antenneskilder som blant annet gnister, glødende eller svært varme overflater og elektriske lysbuer. Schraiber et al. [12] identifiserte 121 branner (86%) i en database av 141 BESS-hendelser (se Figur 3a). Kun 3% av hendelsene resulterte i avgassing uten antenne, mens de resterende 11% førte til eksplosjon. Databasen omfatter ulike typer BESS, blant annet systemer tilknyttet til sol- og vindkraftanlegg og anlegg for frekvensregulering og stabilisering av strømnettet. Ser man kun på BESS installert i boliger, som utgjør 60 av de 141 hendelsene, øker andelen av avgassing uten antenne og eksplosjoner til henholdsvis 7% og 18% (se Figur 3b).



Figur 3 Sannsynligheten for avgassing uten antenne, brann og eksplosjon basert på 141 hendelser i forskjellige BESS installasjoner (a) og basert på 60 hendelser i BESS som var installert i boliger (b).

Ekspløsjoner på grunn av *thermal runaway* i batterier kan oppstå på grunn av ulike hendelsesforløp som vist i Figur 4. Antenner ikke avgassing fra batteriet umiddelbart, kan en brennbar gass-luft blanding akkumuleres og eksplosjon oppstå ved en forsinket antennelse. Hvis gassen derimot antennes umiddelbart og batteriet brenner, er eksplosjonsfaren på det aktuelle tidspunktet lav, ettersom ny avgassing i stor grad antennes fortløpende og dermed ikke rekker å bygge seg opp i større mengder. Samtidig kan eksplosjonsfaren øke senere i hendelsesforløpet. Synlige flammer kan derfor til en viss grad brukes som en indikator for å vurdere eksplosjonsrisikoen, men gir ikke en fullstendig sikker vurdering. Dersom brannstørrelsen øker eller lufttilførselen reduseres, for eksempel ved at ventilasjonen stenges, kan brannen gå fra å være brennskrollert til å bli ventilasjonskontrollert. Etter hvert kan den kveles dersom det ikke er tilstrekkelige mengder oksygen til stede. Selv om flammene slokner, betyr det likevel ikke at *thermal runaway* avsluttes. Dette ble vist i eksperimentene til Meraner et al. [13], som undersøkte hvordan *thermal runaway* sprer seg fra celle til celle i moduler med 28 poseceller. I to testrunder, der *thermal runaway* ble initiert ved hjelp av varmeelementer, var selve propageringen nesten identisk, til tross for at avgassing i den ene testen antente først etter 40 minutter, mens antennelsen i den andre testen var umiddelbar. Hvordan flammer utenfor batteriet påvirker propagering fra celle til celle, eller modul til modul avhenger i stor grad av batteriutformingen. I de aller fleste tilfellene kan det antas at *thermal runaway* fortsetter også hvis brannen slokkes, for eksempel på grunn av oksygenmangel. I en slik situasjon vil rommet fylles med en gassblanding som ligger over den øvre eksplosjonsgrense. Det vil si at en ny eksplosjonsfare først oppstår når det tilføres oksygen slik at gasskonsentrasjonen synker under den øvre eksplosjonsgrensen, for eksempel ved utlufting av rommet etter at *thermal runaway* i batteriet har sluttet. En lignende situasjon (ikke inkludert i Figur 4) oppstår også ved avgassing uten antennelse hvis rommet lukkes og ventilasjonen stenges. Schraiber et al. [12] gjennomførte tre brannforsøk med et BESS for privat bruk i en garasje. I ett av disse forsøkene førte *thermal runaway* kun til en brann, uten eksplosjon. I to av forsøkene ble avgassingene antent med forsinkelse som forårsaket en delvis volumdeflagrasjon, altså en eksplosjon av en gassky som ikke fylte hele rommet. En annen studie som tydelig viser eksplosjonsrisikoen er eksperimentene til Barowy et al. [14] som demonstrerte deflagrasjon i en BESS-kontainer mock-up. Tre forsøk ble gjennomført, hvorav to resulterte i deflagrasjoner. Den ene var en delvis volumdeflagrasjon forårsaket av forsinket antennelse (30 sekunders forsinkelse). Den andre deflagrasjonen oppstod 42 minutter etter at *thermal runaway* hadde startet, da avgassingene reantente etter tidligere å ha sloknet som følge av manglende oksygentilførsel. Disse forsøkene demonstrerer dermed alle hendelsesforløpene for eksplosjon som vist i Figur 4.

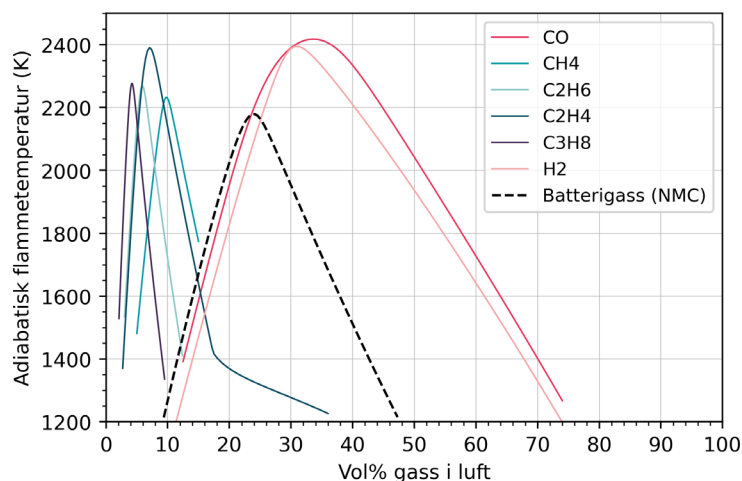


Figur 4 Hendelsestre med mulige brann- og eksplosjonsscenarioer.

2.2 Batterigassegenskaper

En viktig egenskap ved brennbare gassblandinger er eksplosjonsområdet som er definert av den nedre eksplosjonsgrensen (LEL) og den øvre eksplosjonsgrensen (UEL). Eksplosjonsfare er kun til stede når gassblandingen ligger mellom disse grensene. En gass med et stort eksplosjonsområde, altså en lav nedre og en høy øvre eksplosjonsgrense, innebærer derfor en større eksplosjonsrisiko enn en gass med et smalt eksplosjonsområde. For å visualisere eksplosjonsområdet for en gass kan man se på gassens adiabatisk flammtemperatur. Adiabatisk flammtemperatur er temperaturen som oppnås dersom all kjemisk energi som frigjøres i forbrenningen kun går til å varme opp forbrenningsproduktene, uten varmetap til omgivelsene. Temperaturøkningen bestemmes derfor av forholdet mellom hvor mye energi som frigjøres og den totale varmekapasiteten til gassene som varmes opp.

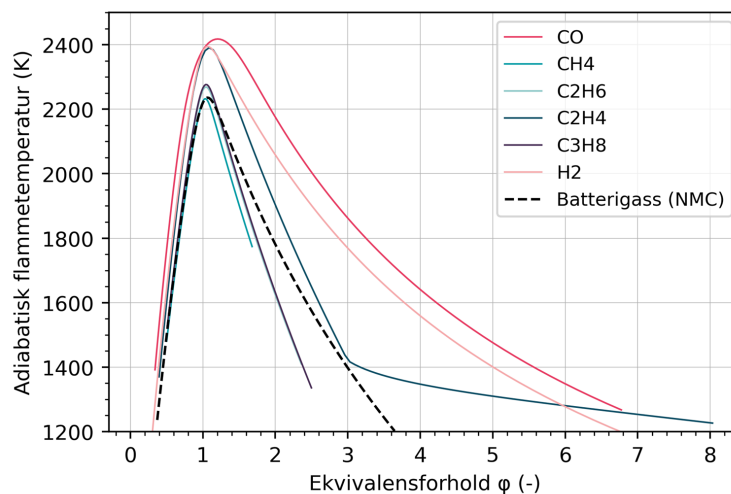
En blanding som inneholder akkurat nok luft for å forbrenne all gass fullstendig betegnes som støkiometrisk. Temperaturen er høyest nær den støkiometriske blandingen fordi alt brenselet kan forbrennes fullstendig, noe som gir maksimal frigjort kjemisk energi, samtidig som mengden gass som må varmes opp er relativt liten. En blanding med for mye luft eller for lite brensel for fullstendig forbrenning betegnes som mager. For magre blandinger senkes temperaturen fordi overskudd av luft, særlig N_2 , fungerer som en termisk ballast som øker varmekapasiteten uten å bidra med energi. En blanding med for lite luft eller for mye brensel for fullstendig forbrenning betegnes som rik. For rike blandinger synker temperaturen igjen fordi det ikke er nok oksygen til fullstendig forbrenning, slik at mindre energi frigjøres, samtidig som uforbrent brensel og delvis oksiderte produkter også må varmes opp. Resultatet er at maksimal adiabatisk flammtemperatur oppnås nær, men ofte litt på rik side av støkiometrisk blanding. Figur 5 viser et eksempel for flere gasser som forekommer typisk i batteriavgassing, samt et eksempel på en batterigass målt fra NMC-celler i *thermal runaway* [19].



Figur 5 Adiabatisk flammtemperatur som funksjon av gasskonsentrasjon i luft for typiske gasser som forekommer i batteriavgassing, samt et eksempel basert på en batterigass målt fra NMC celler i *thermal runaway* [15]. Temperaturene er beregnet i programvaren Cantera [16] ved bruk av GRI Mech 3.0 [17].

Viser man flammtemperaturen som funksjon av ekvivalensforholdet, blir det enklere å sammenligne eksplosjonsområdene for ulike gasser og gassblandinger (se Figur 6). Ekvivalensforholdet beskriver forholdet mellom brensel og luft i en forbrenning, sammenlignet

med det støkiometriske forholdet. Ved ekvivalensforhold mindre enn 1 er blandingen mager. Ved ekvivalensforhold større enn 1 er blandingen rik.



Figur 6 Adiabatisk flammtemperatur som funksjon av ekvivalensforhold for typiske gasser som forekommer i batteriavgassing, samt et eksempel basert på en batterigass målt fra NMC-celler i *thermal runaway* [15]. Temperaturene er beregnet i programvaren Cantera ved bruk av GRI-Mech 3.0.

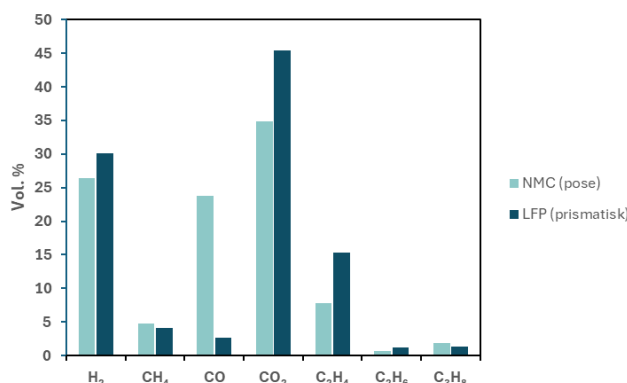
Den nedre brennbarhetsgrensen for blandinger av brennbare gasser beregnes ofte fra Le Chatelier's formel. Formelen bør ikke brukes til å beregne øvre eksplosjonsgrense, og den er heller ikke gyldig for delvis halogenerte hydrokarboner eller oksidasjonsmidler andre enn luft. En metode for å beregne den nedre grense for blandinger av brennbare gasser med andre inertgasser enn N_2 og luft finnes i EN ISO 10156:2017 *Gas cylinders - Gases and gas mixtures - Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets* [18]. Beregningen i denne standarden tar hensyn til karbondioksidinnhold (CO_2) i batteriavgassing ved å bruke en ekvivalenskoeffisient for CO_2 relativt til N_2 . Den øvre eksplosjonsgrensen kan estimeres numerisk ved bruk av programvare som Cantera med en egnet detaljert reaksjonsmekanisme, ved å beregne laminær flammehastighet for en predefinert gassblanding ved gitt temperatur og trykk. Blandingen gjøres gradvis rikere, og for hvert punkt beregnes flammehastigheten. Den høyeste brenselkonsentrasjonen der en stabil flamme fortsatt kan opprettholdes defineres som den øvre eksplosjonsgrensen. Den øvre grensen kan også estimeres som den høyeste brenselkonsentrasjonen der flammemetemperaturen fortsatt overstiger en kritisk temperatur for selvoppretholdende forbrenning (se Figur 5 og Figur 6). Flammemetemperaturen alene tar imidlertid ikke direkte hensyn til flammestabilitet og radikalproduksjon og er derfor normalt mindre nøyaktig.

H_2 , som er en av hovedkomponentene i batteriavgassing (se Figur 7 og Tabell 3), har et stort eksplosjonsområde (se Figur 6). Dette bidrar til at avgasser fra batterier generelt får et bredt eksplosjonsområde. CO_2 har derimot en reduserende effekt ved at det øker den nedre og senker den øvre eksplosjonsgrensen for gassblandingen [19–21].

Tabell 1 Nedre og øvre brennbarhetsgrense og laminær forbrenningshastighet for utvalgte brannbare gasser [6].

Gass	LFL (%)	UFL (%)	Laminær forbrenningshastighet (m/s)
H ₂ , Hydrogen	4	75	3,5
CH ₄ , Metan	5	15	0,45
C ₂ H ₆ , Etan	3	12,5	0,53
C ₃ H ₈ , Propan	2,2	9,5	0,52

Gassammensetningen fra et batteri varierer med batterikjemien, det vil si materialene batteriet er bygget opp av. Ofte omtales kun katodematerialet, men det finnes betydelig variasjon også i de øvrige batterikomponentene. Det finnes mange ulike katodematerialer, hvor de to største gruppene er litiumjernfosfat (LFP) og litium-nikkel-mangan-kobolt-oksidi (NMC). Innen stasjonær energilagring er LFP dominerende. Samtidig bidrar gjenbrukte elbilbatterier til at NMC-batterier i sin andre livsfase også kommer inn på markedet for stasjonær energilagring [6]. Sammenligningen mellom LFP- og NMC-celler i Figur 7 er kun et eksempel, siden det finnes mange varianter innen hver gruppe.



Figur 7 Eksempel på sammensetning av avgassing fra NMC poseceller og prismatiske LFP-celler målt av Sanfeliu Meliá et al. [15]. Verdiene viser snittet fra flere tester. Oppvarmingsraten for å igangsette *thermal runaway* var ulik i testene.

Generelt genererer LFP-celler mer H₂ og andre brennbare gasser, og mindre karbonmonoksid (CO) og CO₂ enn NMC-celler [22–24]. CO₂ målingene i Figur 7 avviker derfor fra det som oftest rapporteres i litteratur.

En ofte fremhevet forklaring på forskjellene i gassammensetning er at NMC-celler har en mer oksiderende katode, som kan frigjøre aktivt oksygen ved høye temperaturer. Dette gir økt intern oksidasjon av elektrolytt og brennbare nedbrytningsprodukter, noe som fører til høyere andeler CO og CO₂ og relativt lavere andel H₂ i avgassen [23]. For LFP-celler, som i langt mindre grad frigjør oksygen fra katodematerialet, forblir en større andel av gassen uoksidert, særlig H₂.

Den lavere H₂- og høyere CO₂-konsentrasjon for NMC-celler sammenlignet med LFP-celler skyldes at en større andel av de brennbare gassene oksideres i selve cellen, på grunn av den mer oksiderende katoden [23].

CO₂ i batterigass fungerer som en termisk ballast og inert komponent, ved at den ikke bidrar til forbrenning, men må varmes opp. Økende CO₂-konsentrasjon reduserer derfor brennbarhetsområdet for gassblandingen og øker den nedre brennbarhetsgrensen [34, 35]. En

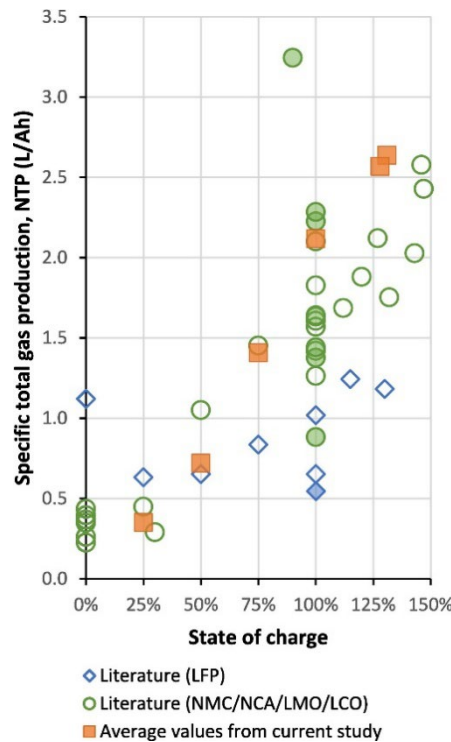
økende H₂-konsentrasjon har motsatt effekt, siden H₂ har et svært bredt brennbarhetsområde og høy laminær flammehastighet.

Som følge av dette har avgass fra LFP-celler, som typisk inneholder mindre CO₂ og mer H₂, generelt et bredere brennbarhetsområde og høyere laminær flammehastighet enn avgass fra NMC-celler, selv om den totale gassmengden ofte er lavere.

I sammenheng med brannrisiko anses LFP-celler ofte som tryggere enn NMC-celler, hovedsakelig på grunn av deres høyere termiske stabilitet. *Thermal runaway* i NMC-celler er mer intens og kjennetegnes av høyere temperaturer og raskere reaksjonshastigheter enn i LFP-celler. NMC-celler viser også tydeligere gnister og flammer, noe som henger sammen med et betydelig større massetap (26–61 %), mens LFP-celler typisk har et langt lavere massetap (ca. 11–23 %) [25,26].

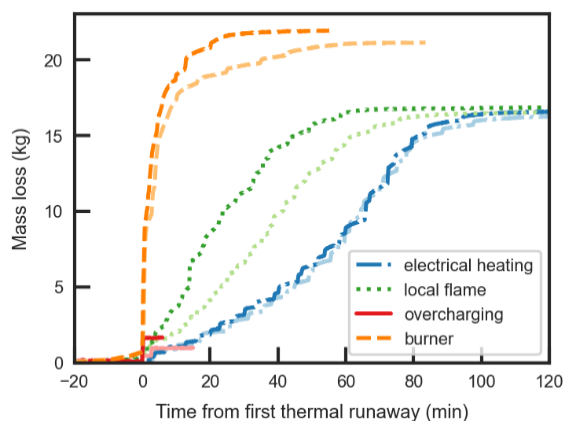
Den høye gasstemperaturen og gnistdannelsen fra NMC-celler øker sannsynligheten for at avgassingene antenner umiddelbart [25]. LFP-celler genererer derimot relativt lave gasstemperaturer, under selvantennelsestemperaturen [23], og slipper primært ut flytende elektrolytt og biproduktgasser [26]. Dermed er sannsynligheten for umiddelbar antennelse av avgassingene lavere for LFP-celler enn for NMC-celler. Dette innebærer imidlertid at *thermal runaway* i LFP-celler potensielt kan føre til større gassakkumulering før antennelse oppstår, noe som igjen kan øke eksplosjonsfaren.

En viktig parameter som påvirker både brann- og eksplosjonsrisiko, er ladetilstanden (engelsk: *state of charge*, SOC). Ladetilstanden påvirker hvor raskt en *thermal runaway* oppstår, intensiteten av den, hvilke temperaturer som oppnås og hvor mye gass som produseres [27,28]. Effekten av SoC er stort sett sammenlignbar på tvers av ulike batterikjemier, med unntak av LFP-celler, som i mindre grad påvirkes av variasjon i ladetilstanden [28]. En viktig parameter for eksplosjonsrisikoen er mengden gass som genereres, som øker med økende SoC (se se Figur 8). Samtidig har eksperimenter vist at sannsynligheten for tidlig antennelse også øker med høyere SoC. Det innebærer at sannsynligheten for at en *thermal runaway* fører til en brann i stedet for en eksplosjon, øker med økende ladetilstand.



Figur 8 Spesifikk total gassproduksjon (totalt gassvolum per nominell cellekapasitet) fra denne studien, sammenlignet med litteratordata. Figuren er gjengitt uendret fra Willstrand et al. [28] publisert under Creative Commons CC-BY-ND 4.0.

Oppsummert kan man si at egenskapene til batteriavgassing ved *thermal runaway* varierer avhengig av faktorer som batterikjemi og ladetilstand. Det er derfor ikke mulig å generalisere hvilke batterityper som innebærer størst eksplosjonsrisiko. Videre finnes det en rekke andre faktorer, som batterienes formfaktor (sylindrisk, pose eller prismatisk) og størrelse, som også påvirker forløpet av en *thermal runaway*, men disse er ikke diskutert her. De fleste batteriene, bortsett av små forbrukerprodukter, er bygget opp av flere celler. Derfor er brann- og eksplosjonsrisikoen ikke bare avhengig av battericellene, men også av måten de er satt sammen til batterimoduler og -pakker, og av hvordan en *thermal runaway* kan spre seg fra celle til celle og modul til modul. Spredningen varierer fra batteri til batteri, men til og med for samme batteri kan spredningen variere avhengig av hvordan *thermal runaway* startet i utgangspunktet. Meraner et al. [29] demonstrerte dette i en studie som undersøkte hvordan ulike triggermetoder, altså måter for å igangsette *thermal runaway* i et batteri, påvirket spredningen av *thermal runaway* i moduler med 28 celler. Figur 9 viser massetap i en batterimodul for forsøk der termisk runsing ble igangsatt ved bruk av fire forskjellige metoder. Gassproduksjonen korrelerer med massetapet [30]. Derfor viser figuren indirekte utviklingen av gassproduksjonen.



Figur 9 Massetap i en batterimodul for to repetisjoner av forsøk der termisk runsing ble igangsett ved bruk av elektrisk oppvarming (stiplet-punktlinje), en liten flamme (prikket linje), overlading (heltrukken linje) og en 50 kWh brenner på utsiden av modulen (stiplet linje). Tiden er satt til null ved første *thermal runaway* (TR). Figuren er gjengitt uendret fra Meraner et al. [29] publisert under Creative Commons CC-BY 4.0

2.3 Ventilasjonsstrategier for å forhindre eller minimere eksplosjoner

For å forhindre en eksplosjon finnes det i teorien to muligheter: å hindre at det akkumuleres en gassblanding med en sammensetning mellom den nedre eksplosjonsgrensen og den øvre eksplosjonsgrensen, eller å forhindre at gassen antennes. Siden *thermal runaway* innebærer at det finnes mange mulige antennelseskilder til stede, er sannsynligheten for antennelse svært høy, noe som også bekreftes av den tidligere omtalte statistikken (se Figur 3). Dermed er det svært viktig å forhindre akkumulering av brennbar gassblanding for å unngå en eksplosjon. Dette kan oppnås ved å bruke aktiv avtrekksventilasjon for å fjerne brennbare gasser fra rommet (trekk ut strategien), eller ved å inneslutte gassene slik at oksygenkonsentrasjonen synker (steng inn strategien). Begge strategiene er i bruk i eksisterende BESS installasjoner i Norge (se Tabell 1).

Tabell 2 Kartlegging av utvalgte eksisterende BESS-installasjoner i Norge. Basert på Garberg et al. [31], oversatt fra engelsk. Lisens: CC BY 4.0.

Bygg type	Batteri Kapasitet (kWh)	Lokasjon	Ventilasjon	Strategi ved brann-deteksjon	Ekspløsjons-avlastning	Deteksjon (Brann/Gass)	Slokke-system
Skole 1	150	Eget bygg	Lukket A/C-system	Steng inn	Ja	Ja / Nei	Nei
Offentlig bygg	109	Kjeller	Felles tilluft og avtrekk	Trekk ut	Nei	Ja / Nei	Nei
Skole 2	450	Kjeller	Felles tilluft, separat avtrekk	Steng inn	Nei	Ja / Nei	Ja, sprinkler
Container	378	Egen container	Lukket A/C-system	Trekk ut	Nei	Ja / Ja (CO, HC)	Nei (kun slange-tilkobling)
Kontorbygg	150	Kjeller	Separat system	Steng inn	Nei	Ja / Nei	Ja, sprinkler
Barnehage	41	Første etasje	Separat system	Trekk ut	Nei	Ja / Nei	Ja, sprinkler

2.3.1 Trekk ut strategi

For å holde konsentrasjonen av brennbare gasser under den nedre eksplosjonsgrensen må gassene som produseres under *thermal runaway* fjernes ved hjelp av en tilstrekkelig høy luftutskiftingsrate i batterirommet. Et eksempel på denne strategien ble undersøkt i SafeBESS-prosjektet, der det ble gjennomført tester med *thermal runaway* i 6,6 kWh moduler i et rom på 54 m³ med balansert mekanisk ventilasjon og en luftutskiftingsrate (*air changes per hour*, ACH) på opptil 62 luftutskiftninger per time [32]. Alternativt kan det benyttes dedikerte ventilasjonskanaler der gassene ledes direkte fra batterikabinettet eller modulene og ut av batterirommet, uten å blandes med romluften. Dette anses som en sikrere løsning enn ventilasjon av selve rommet, og inngår blant annet i forslaget til «forskrift om skip som bruker batterisystem med litium-ion-celler som har en samlet kapasitet på 20 kWh eller mer», publisert i 2025 [7].

Uavhengig av om ventilasjonssystemet er dimensjonert for å fjerne batteriavgassinger direkte fra batteripakker og batteriskap eller fra selve batterirommet, avhenger kravene til ventilasjonsrater av batterienes karakteristiske egenskaper under *thermal runaway*. Dette inkluderer blant annet om og eventuelt hvor raskt *thermal runaway* i én celle kan spre seg til flere celler og moduler. For løsninger som fjerner gassene fra rommet vil romstørrelsen også være en viktig faktor.

Celle- og modulkapasitet, samt propageringsraten, som blant annet er avhengig av koblingen mellom cellene, graden av termisk isolasjon mellom celler og moduler, og utformingen av cellene og batterisystemet, bestemmer gassproduksjonsraten og dermed kravene til ventilasjonsraten. For å karakterisere disse batteriegenskapene bør det gjennomføres passive propageringstester hvor det utløses *thermal runaway* i en eller flere celler for å dokumentere om og hvordan *thermal runaway* sprer seg i batteriet.

En studie fra DNV [33] fra 2019, basert på eksperimentelle forsøk og simuleringer, indikerer at en ventilasjonsrate på seks luftutskiftninger per time kan være tilstrekkelig for å begrense eksplosjonsrisikoen når avgassingene er begrensede, for eksempel ved *thermal runaway* i én enkelt celle med kapasitet på 115 til 175 Ah. Studien omhandler batterirom på skip og forutsetter at batterirommet kan motstå et overtrykk på 50 kPa (0,5 bar). Rom i bygninger forventes generelt å tåle lavere overtrykk (se Tabell 2). Konklusjonen om at kravene til luftutskiftninger blir krevende å ivareta når *thermal runaway* sprer seg til flere celler og moduler er imidlertid også gyldig for batterisystemer i bygninger.

Tabell 3 Skadebeskrivelse avhengig av eksplosjonsovertrykk [34].

Overtrykk (kPa)	Skadebeskrivelse
3,5 – 7	Små og store vinduer knuser vanligvis
7 – 15	Festemidler i tre- og aluminiums-paneler svikter, paneler bukler eller blåses ut
15 – 20	Uarmert betong og lettklinkerblokk vegger knuses
20	Bygninger med stålramme deformeres og trekkes løs fra fundamentene
20 – 28	Selvbærende bygninger av stålpaneler raser sammen
35 – 50	Nesten fullstendig ødeleggelse av boliger

2.3.2 Steng inne strategi

Hvis det brukes en steng inne strategi, det vil si at ventilasjonskanalene lukkes ved bruk av brannspjeld, vil eksplosjonsrisikoen i begynnelsen økes fordi avgassingene fra batteriet akkumuleres i rommet. Hvis avgassingsmengden er stor i forhold til romstørrelsen faller risikoen igjen når konsentrasjonen når den øvre eksplosjonsgrense. Ved bruk av steng inne strategien kan et inertgassystem benyttes for å redusere oksygenkonsentrasjonen under den begrensende oksygenkonsentrasjon (*limiting oxygen concentration*, LOC), slik at gassblandingen ikke lenger er brennbar. Hvis slike gassystemer brukes for å holde oksygenkonsentrasjonen lav, er det avgjørende at systemet er riktig dimensjonert slik at oksygenkonsentrasjonen kan opprettholdes på et tilstrekkelig lavt nivå over tilstrekkelig tid. Det vil si at oksygenkonsentrasjonen ikke bør øke før all *thermal runaway* i batteriet har opphørt. I henhold til den harmoniserte standarden NS-EN15004-1:2019 *Faste brannslukkesystemer – Gass-slukkesystemer – Del 1: Planlegging, installasjon og vedlikehold* [35] skal holdetiden, altså tiden en høy nok slokkemiddelkonsentrasjonen må opprettholdes etter utløsning for å sikre effektiv slokking og hindre gjenantennning, ikke være mindre enn ti minutter. Det antas at inertgassystemer er av spesiell interesse for batterisystemer som ikke er dimensjonert for å forhindre propagering av *thermal runaway* til flere celler eller moduler, siden disse systemene er mer krevende for avtrekksventilasjon. Derfor vil den nødvendige holdetiden være mye lengre enn ti minutter, og må tilpasses hvert enkelt batterisystem spesifikk. Batteriets propageringskarakteristikk definerer holdetiden, mens romtettheten og eventuelle gasstap via trykkavlastning bestemmer hvor mye inert gass som er nødvendig for å oppnå holdetiden. Det sistnevnte krever at det gjennomføres en dørviftetest som beskrevet i EN15004-1:2019 Annex E [35]. Forskning fra Weng et al. [36] indikerer at redusert oksygenkonsentrasjon i atmosfæren, samt uttynning av avgasser med nitrogen (N₂) eller argon (Ar), kan dempe propagering. Dette innebærer at passive propageringstester utført i luft ikke nødvendigvis gir et korrekt estimat på den faktiske tiden det tar før *thermal runaway* i et batteri er fullstendig avsluttet. Det mangler imidlertid forskning på hvor stor denne usikkerheten er for kommersielle batterisystemer.

Ekspløsjoner forhindres både når gasskonsentrasjonen ligger under den nedre eksplosjonsgrensen og når den ligger over den øvre eksplosjonsgrensen. I praksis har det likevel stor betydning hvilket av disse områdene konsentrasjonen befinner seg i. Dersom konsentrasjonen holdes under den nedre eksplosjonsgrensen, anses hendelsen som avsluttet når *thermal runaway* opphører. Ligger konsentrasjonen derimot over den øvre eksplosjonsgrensen, må rommet fortsatt ventileres etter at *thermal runaway* i batteriet har stoppet. Under denne ventileringen kan tilførsel av oksygen føre til at konsentrasjonen igjen passerer det eksplosive området, og dermed oppstår det på nytt eksplosjonsfare. Derfor bør batterigass som ventileres ut fra rommet ikke erstattes med luft, men med inert gass frem til konsentrasjonen av batterigassen ligger under den nedre eksplosjonsgrensen i luft.

2.3.3 Oksygenreduksjonssystemer

De vanligste systemene for å redusere oksygennivået bruker gass som slippes ut fra et reservoar som er beskrevet i forrige avsnitt. Lave oksygenkonsentrasjoner kan også oppnås ved bruk av oksygenreduksjonssystemer i henhold til NS-EN 16750:2017 *Faste brannsløkkesystemer – Inert luft-systemer – Dimensjonering, installasjon, planlegging og vedlikehold* [37]. Disse systemene genererer kontinuerlig N₂ og opprettholder dermed lav oksygenkonsentrasjon også under normal drift. Slike systemer er ikke like utbredt i batterirom som inertgassanlegg [38], men har den fordel at de ikke krever ytterligere gasstilførsel for å sikre lange holdetider. Dokumentasjon og erfaringsgrunnlag for bruk av denne typen systemer i batterirom er imidlertid fortsatt begrenset.

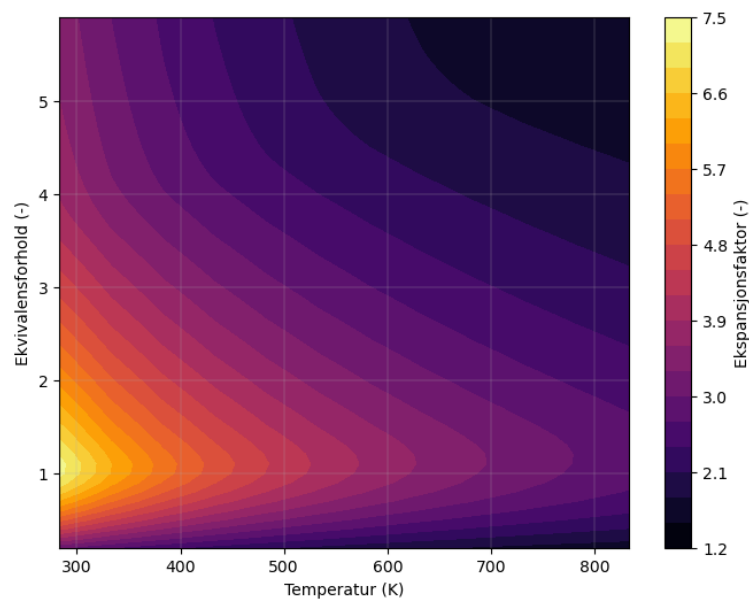
2.4 Gaskyer ved *thermal runaway*

Ekspløsjonsovertrykket som skapes av en deflagrasjon som følge av en *thermal runaway* avhenger av batterigassens egenskaper som diskutert i forrige avsnitt, men også av lokale blandingsforhold. Blandingsforholdene påvirker hvor mye gassen ekspanderer (ekspansjonsfaktoren) ved forbrenningen og hvor raskt forbrenningen skjer, altså den laminære forbrenningshastigheten og dermed konsekvensene av en deflagrasjon. Figur 10 viser for eksempel ekspansjonsfaktoren for en batterigass fra NMC-celler. Ekspansjonsfaktoren er størst nær den støkiometriske blandingen hvor også den laminære forbrenningshastigheten er raskest. I de fleste reelle situasjoner vil gasskonsentrasjonen i et batterirom ikke være uniform. Gassen vil danne sjikt, lokale lommer og konsentrasjonsgradienter, og ulike områder vil dermed bidra forskjellig til trykkoppbyggingen. For å beskrive skadepotensialet for ulike scenarioer med én sammenlignbar verdi brukes det ofte et såkalt ekvivalensgassvolum. Konseptet er at en ikke-homogen gassky representeres av en mindre gassky med en homogen konsentrasjon. Konsentrasjonen i denne ekvivalente gasskyen velges slik at den gir høyest reaktivitet. Konsekvensene av en deflagrasjon i den ekvivalente gasskyen vil dermed tilsvare konsekvensene av en deflagrasjon i den reelle, ikke-homogene gasskyen, selv om volumet er mindre. Det finnes forskjellige tilnærminger for å beregne et ekvivalensvolum [39]. Den mest vanlige metoden er kalt Q9-sky og vektet volumet med både ekspansjonsfaktor og laminær forbrenningshastighet i henhold til Formel 1.

$$Q9 = \sum V \times (SE)/(S \times E)_{max} \quad \text{Formel 1}$$

hvor $Q9$ er ekvivalensvolumet, V er gassvolumet med samme gasskonsentrasjon (typisk et kontrollvolum i en CFD-beregning), S er laminær forbrenningshastighet og E er ekspansjonsfaktoren. I noen situasjoner, for eksempel helt lukkede rom med store gasskyer eller svært raske flammer (som ved overgangen fra en deflagrasjon til en detonasjon), rekker ikke ubrent gass å bli presset foran flammen og derfor blir forbrenningshastigheten mindre relevant og en mer konservativt $Q8$ ekvivalensvolum kan brukes, som beregnes i henhold til Formel 2. [39]

$$Q8 = \sum V \times E/E_{max} \quad \text{Formel 2}$$



Figur 10 Ekspansjonsfaktor som funksjon av ekvivalensforhold og den initiale gasstemperaturen for et eksempel batterigass målt fra NMC-celler i *thermal runaway* [15]. Ekspansjonsfaktoren er beregnet i programvaren Cantera ved bruk av GRI-Mech 3.0. Beregningen er basert på tetthetsforskjellen i en reaktor med konstant trykk.

Et krevende scenario, der alle metodene for ekvivalent sky kan være ikke-konservative, oppstår når en stor del av skyen har rike, ikke-brennbare konsentrasjoner som under eksplosjonen blir fortynnet til svært reaktive blandinger [39]. I denne studien brukes det $Q8$ -volumet for å sammenligne forskjellige ventilasjonsstrategier ved *thermal runaway*. Dermed neglisjeres de dynamiske effekter som oppstår under en deflagrasjon.

2.5 Modelleringsverktøy

Modelleringen av *thermal runaway* omfatter ulike skalaer, fra partikkelskala ($<10^{-3}$ m), celledisken (10⁻³–10⁻¹ m) og modulleskala (10⁻²–10⁰ m) til systemskala ($>10^0$ m), og gassseksplisjoner undersøkes vanligvis i modelleringsstudier på systemskala [40,41]. Et mye brukt modelleringsverktøy er FLACS (Flame Acceleration Simulator), en kommersiell (Computational Fluid Dynamics) CFD-programvare som brukes omfattende til eksplisjonsmodellering og spredningsmodellering i atmosfæren. I simuleringene kan parametere som gasskonsentrasjoner, temperatur og eksplisjonsøvertrykk hentes ut for videre analyser [42,43].

Det finnes også åpen kildekode-programvare som OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) og FDS (Fire Dynamics Simulator). OpenFOAM er en C++-verktøykasse for utvikling av skreddersydd numeriske løsere og pre-/post-prosesseringsverktøy for kontinuerlig mekanikk, særlig CFD. FDS er en åpen kildekode-programvare mye brukt til brannsimuleringer, som løser en lav-Mach-versjon av Navier–Stokes-likningene ved bruk av Large Eddy Simulation (LES) med en Deardorff-modell for subgitterskala. Forbrenningsmodellen baserer seg på en blandingsbegrenset og uendelig rask reaksjon av sammenslåtte komponenter. Selv om FDS er godt egnet til å studere gassspredning og brannspredning, er det ikke forventet at programvaren kan håndtere raske deflagrasjoner.

Henriksen et al. [44] brukte XiFoam-løseren i OpenFOAM til å simulere en forhåndsbladet eksplisjon av gasser ventilert ut under feil i et litium-ion-batteri. En kode kalt mech2Foam ble utviklet for å generere nødvendige forbrennings-, transport- og termodynamiske egenskaper. Simuleringen ble sammenlignet med eksperimenter av forhåndsbladede eksplisjoner i en kanal åpen i den ene enden, med gassammensetning hentet fra et havarert litium-ion batteri. Resultatene viste at simuleringen gjenga maksimal eksplisjonsøvertrykk og flammefrontposisjon godt, samt trykk- og flammefrontshastigheter i de tidlige fasene. Derimot ble oscillasjoner i trykk og flammehastighet når flammen nærmet seg kanalåpningen ikke korrekt gjengitt i modellen.

Henriksen et al. [45] brukte XiFoam videre til å studere forhåndsbladede gassseksplisjoner i en 1 m lang kanal delvis fylt med sylindere tilsvarende 18650-celler. Ved å sammenligne med eksperimenter på tidsavhengig trykkutvikling, maksimalt trykk, positiv impuls og romlig flammehastighet for to kanalgeometrier og to gassammensetninger, ble det funnet at XiFoam ga generelt akseptabel modellprestasjon. Det forble imidlertid usikkert om XiFoam vil prestere tilfredsstillende for større og mer realistiske geometrier, slik som en storskala BESS.

Peng et al. [46] utviklet en forbrenningsmodell for gasser ventilert fra batterier i containerbaserte BESS ved bruk av OpenFOAM, med gassammensetning basert på realistiske litium-ion batteri avgassinger. Koblete randbetingelser ble introdusert for å modellere responsen til eksplisjonsavlastningsdører og toppmonterte deflagrasjonspaneler. Parametere som internt og eksternt øvertrykk, flammetemperatur og vindfelt ble brukt for å vurdere eksplisjonsfaren for ESS-containeren og omgivelsene.

I tillegg til OpenFOAM finnes flere studier som bruker FDS for modellering av batteri-branner, som litium-ion batteri branner i tunneler [47], lagerbygninger [48,49] og energilagringsskabiner [50]. Bruk av FDS for å studere eksplisjoner er derimot mindre vanlig, og fokuset ligger oftest på gasskonsentrasjoner og trykkøkning, heller enn eksplisjonsdynamikk.

Kapahi et al. [51,52] utviklet en CFD-basert metode for å designe et eksplosjonsforebyggende system for litium-ion-baserte energilagringssystemer og gjennomførte deretter en ytelsesbasert vurdering av systemet ved bruk av FDS 6.7.5, inkludert HVAC-modulen. Fokus var på å undersøke om mekanisk ventilasjon kunne holde den totale gasskonsentrasjonen under 25 % av den nedre eksplosjonsgrensen. Eksplosjonssimulering var ikke inkludert. To sannsynlige feilscenarier basert på UL9540A [53] ble simulert, med gassammensetning fra prismatiske celler basert på UL9540A [53] testdata.

I tillegg til OpenFOAM og FDS finnes også egenutviklede verktøy. Li [54] (2015) utviklet en enkel CFD-modell, Pressure Rise Simulator (PRS), for å simulere brannindusert trykkøkning i et enkelt rom med naturlig og mekanisk ventilasjon. Resultatene ble sammenlignet med fullskalatester og FDS-simuleringer. Prediksjoner av trykkøkning og trykkfall i rommet, samt oksygenkonsentrasjon og gasshastighet i kanalen, viste god nøyaktighet. Programvaren kan benyttes for å undersøke effekten av romstørrelser, brannstørrelser, veggmaterialer, åpninger og ventilasjonssystemer på trykkøkning og trykkfall.

Modelleringsverktøy for batteriers *thermal runaway* dekker i dag flere enkeltdeler av prosessen, men få kan simulere hele forløpet fra interne reaksjoner til varmeoverføring, *thermal runaway*-spredning, gassutslipp, dispersjon og deflagrasjon. Integrasjon mellom ulike modelleringsdomener er fortsatt utfordrende, og kommersielle verktøy tilbyr ofte bedre helhetlige løsninger enn åpne alternativer. Modellering må derfor fortsatt kombineres med eksperimentelle studier. Ofte modelleres bare enkelte deler av prosessen, for eksempel ved å simulere gassdispersjon basert på eksperimentelt bestemte avgassingsrater. [6]

3 Casestudie

For å undersøke mulige ventilasjonsdynamikker ved ulike ventilasjonsstrategier ble det gjennomført modellering ved hjelp av den åpne kildekode-løseren Fire Dynamics Simulator (FDS) [55]. Flere konfigurasjoner som representerer forskjellige ventilasjonsstrategier, ble simulert for å vurdere fordeler og ulemper knyttet til hver strategi.

FDS er et beregningsverktøy for fluiddynamikk som kan modellere oppdriftsdrivet strømming ved å benytte Navier–Stokes-ligningene i en lav-Mach-formulering ($Ma < 0,3$). FDS anvender en Very Large Eddy Simulation (VLES)-tilnærming for å representere turbulens og kan simulere en rekke brannrelaterte prosesser, som gassfaseforbrenning, varmestraling og pyrolyse i fast fase. FDS-simuleringene i dette arbeidet ligner på de som er presentert av Sadeghi og Restuccia [56], hvor studien fokuserte på surrogatbrensel for å simulere ventilering av et litium-ion batteri under *thermal runaway*. I den foreliggende modelleringen er sammensetningen av batterigassen basert på faktiske målinger fra eksperimentene som presenteres nedenfor.

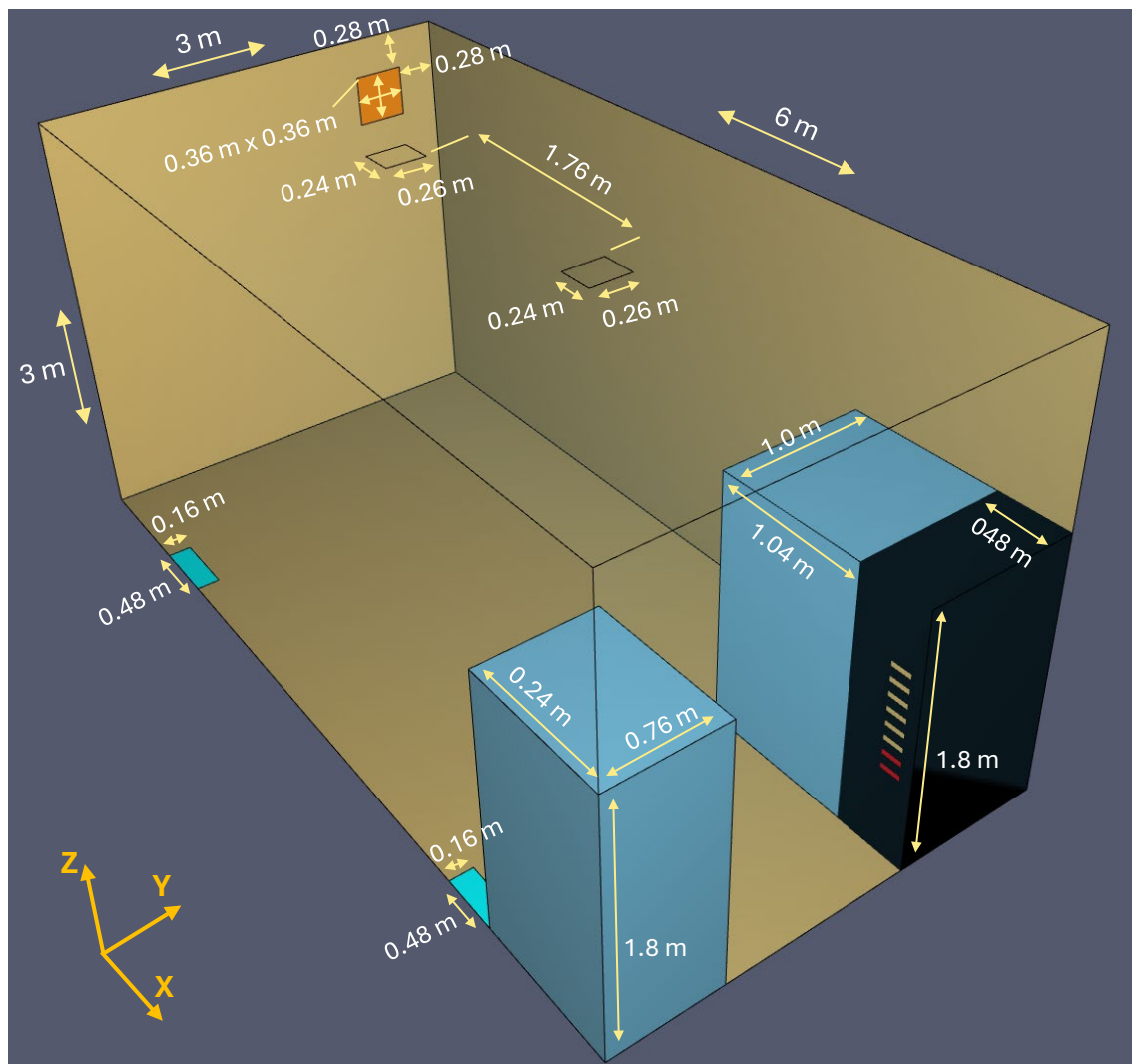
Tabell 4 Sammensetning av batteri avgassingene [15].

Komponent	Volumfraksjon (y_i)	Molekular vekt (M_i , g·mol ⁻¹)
CO ₂	0.348	44.01
CO	0.237	28.01
C ₂ H ₆	0.007	30.07
C ₂ H ₄	0.078	28.05
H ₂	0.265	2.016
CH ₄	0.047	16.04
C ₃ H ₈	0.018	44.10

FDS løser kontinuitetsligningen, transport av komponenter og impuls-, energi- og tilstandsligningen for ideell gass [55]. Beregningene utføres på et kartesisk rutenett ved bruk av en finittedifferansemetode av andre orden. Tidsintegrasjonen utføres med en eksplisitt to-trinns Runge–Kutta-algoritme, begrenset av vanlige stabilitetskrav (CFL- og von Neumann-kriteriene). Mer detaljerte beskrivelser finnes i FDS User Guide [55] og Technical Reference Guide [4].

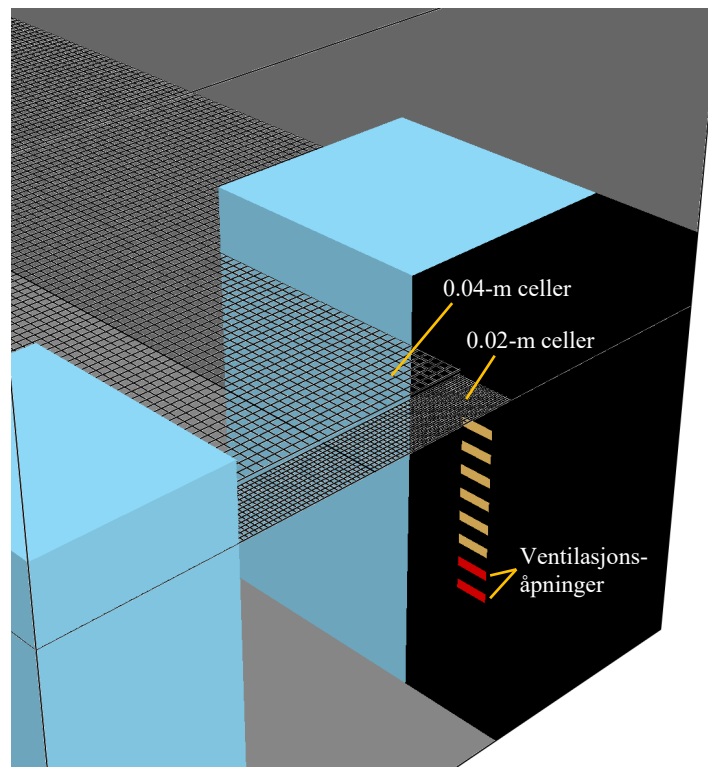
3.1 Numerisk modell

Den numeriske modellen som brukes i denne studien er i hovedsak lik på tvers av de ulike simuleringene. Kun ventilasjonsstrategien og parameterne knyttet til *thermal runaway* varieres for å undersøke deres påvirkning, for eksempel plasseringen av ventilasjonsåpningene. I tråd med oppsettet som ble benyttet i forsøkene, består den numeriske modellen av en romgeometri med lengde 6 m, bredde 3 m og høyde 3 m. Rommet er utstyrt med to tilluftsventiler i himlingen, hver med dimensjonene 0,26 m × 0,24 m, én avtrekkskanal på en av sideveggene med dimensjoner 0,36 m × 0,36 m, samt to dreneringsåpninger langs gulvet, hver på 0,48 m × 0,16 m, som vist i Figur 11.



Figur 11 Geometrien for de numeriske simuleringene. Aksene vist nederst til venstre i angir koordinatreningene.

Hver FDS-simulering utføres i et beregningsdomene som er inndelt i ett eller flere rektangulære beregningsområder for å muliggjøre effektiv parallell beregning. Hvert av dem representerer en tredimensjonal blokk som diskretiseres i rektangulære celler i henhold til valgt romlig oppløsning. I denne studien deles domenet inn i fire beregningsområder. Tre av dem har identiske dimensjoner og består av kubiske celler med en sidelengde på 0,04 m, mens det fjerde område benytter en finere oppløsning med kubiske celler på 0,02 m. De tre grovere nettene dekker områdene $X = 0\text{--}1,92\text{ m}$, $X = 1,92\text{--}3,84\text{ m}$ og $X = 3,84\text{--}5,76\text{ m}$, mens det finere beregningsområdet dekker det gjenværende området fra $X = 5,76\text{--}6,0\text{ m}$, der batterigassen slippes ut, som vist i Figur 12. Hvert beregningsområde inneholder 270 000 celler, og hele beregningsområde representeres dermed av totalt 1 080 000 celler.



Figur 12 Skisse som viser beregningsrutenettet, med finere celler nær batteriventilene der gasser fra termisk runaway slippes ut (markert i rødt).

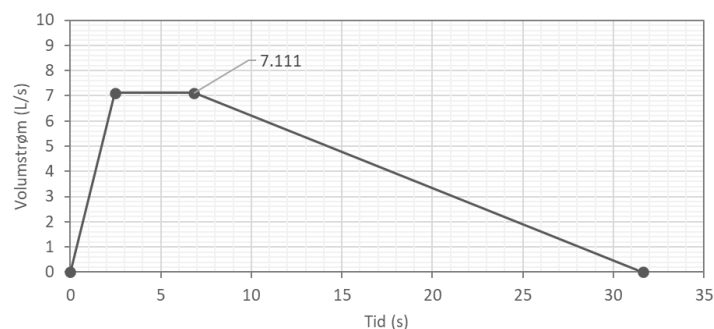
For å muliggjøre sammenligning med eksperimentene er ulike numeriske målepunkter plassert i beregningsdomenet tilsvarende de fysiske sensorene. I tillegg er det definert 3D- og 2D-snitt for størrelser som gasskonsentrasjoner og hastigheter, slik at de overordnede effektene av de ulike ventilasjonsstrategiene og scenariene med *thermal runaway* kan følges.

3.2 Antagelser og modellbegrensinger

Det er i utgangspunktet benyttet standard FDS-modellparametere og forutsetninger som beskrevet i [55], men følgende forenklinger er gjort for å muliggjøre beregninger med maks beregningstid på én uke per case:

- *Ingen antennelse, brann og eksplosjon modelleres.* Kun dispersjon av batteriavgassingene simuleres. Dette muliggjør vurdering av hvordan brennbare blandinger dannes og transporteres gitt ventilasjonsstrategi og scenario for *thermal runaway*; risiko for antennelse, brann og eksplosjon vurderes i etterfølgende arbeid.

- *Termiske randbetingelser.* Alle vegger/solide flater behandles som inerte og adiabatisk ved initial omgivelsestemperatur (20 °C), dvs. at det er ingen netto varmeutveksling mellom gassfasen og faste objekter. Dette øker numerisk stabilitet og hastighet.
- *Stråling er utelatt.* Siden antennelse, brann og eksplosjon ikke inngår, antas strålingspåvirkning på strømningsfeltet å være neglisjerbar. Dette reduserer beregningstid vesentlig. Gassen som dannes i *thermal runaway* er varmere enn veggene. På grunn av neglisjert stråling og adiabatisk randbetingelser vil gassen i simuleringene være varmere enn i virkeligheten, noe som påvirker dispersjonen.
- *Utviklingen av thermal runaway modelleres ikke.* Simuleringene starter ved tidspunktet hvor avgassingene slippes ut, med avgassingsraten lik den eksperimentelt bestemte avgassingsraten, fordelt jevnt over ventilasjonsåpningene.
- *Numerisk oppløsning.* Flere forsiklinger ble gjennomført med forskjellige celledørrelser, altså romlig oppløsning i beregningsområde. Celledørrelse 0,05 m (eller grovere) gjenga ikke strømmingen ved ventilene tilfredsstillende. Antall beregningsområder hadde ingen synlig effekt så lenge grensesnittet mellom to områder ikke krysser kritiske regioner (som for eksempel ventilasjonsventilene). Endelig valg som tidligere beskrevet: 0,04 m celler bort fra ventilene og 0,02 m nær batteriets ventilasjonsåpninger.
- *Initial romtemperatur.* Batterigassen antas i de fleste simuleringene å ha en initial temperatur på 372 °C, basert på data fra Meliá et al. [15]. Enkelte simuleringer representerer imidlertid et scenario der gassen har en temperatur på 20 °C. I disse tilfellene antas det at batterigassen er avkjølt til luftens omgivelsestemperatur, som i alle simuleringene er satt til 20 °C. Begge temperaturene er antatte randbetingelser for simuleringene for å dekke både scenarioer med varm gass og scenarioer med kald gass.
- *Randbetingelser for avløpsåpningene* i gulvet er satt til FDS' standard «OPEN»-randbetingelse, noe som tillater simulering av naturlige lekkasjer uten at en spesifikk strømningsrate må påtvinges.
- *Randbetingelser for ventilasjonsventilene.* Avtrekk og tilluft har fast definerte strømningsrandbetingelse basert på ønsket ventilasjonsrate.
- *Volumstrøm for batterigass.* Volumstrømmen fra én celle som gjennomgår *thermal runaway* er basert på en gjennomsnittlig profil målt i modultester med 28 celler i SafeBESS-prosjektet [57] og skalert for å ivareta den totale gassmengden målt av Sanfeliu Meliá et al. [15]. Den forenklete profilen som ble brukt i simuleringene er vist i Figur 13.



Figur 13 Strømningsprofil for batterigass fra én celle som gjennomgår *thermal runaway*.

Den maksimale volumstrøm, $\dot{V}$, er ved normale betingelser (20 °C og 1 atm) lik 7.111 L/s, hvor batterigassblandingen har samme sammensetning som beskrevet i

Tabell 4. Med den gitte batterigassblandingen er den totale molekylvekten til batterigassblandingen lik

$$\bar{M} = \sum_i y_i M_i = 26.4526 \text{ g/mol} = 0.0264526 \text{ kg/mol.} \quad \text{Formel 3}$$

For en ideell gass er molarvolumet, V_m , definert som volumet ett mol gass opptar ved gitte temperatur- og trykkbetingelser. Fra idealgassloven fås $V_m = RT/P$. Ved 20 °C og 1 atm gir dette $V_m = 24.054 \text{ L/mol}$.

Antatt at batterigassen er en ideell gass, tilsvarer den maksimale volumstrømmen en stoffmengdestrøm ved normale betingelser på

$$\dot{n} = \dot{V}/V_m = 7.111035 \text{ L/s} / 24.054 \text{ L/mol} = 0.2956 \text{ mol/s.} \quad \text{Formel 4}$$

Den tilsvarende massestrømmen for én battericelle er derfor lik

$$\dot{m} = \dot{n} \cdot \bar{M} = 0.2956 \text{ kg/mol} \cdot 0.0264526 \text{ mol/s} = 0.00782 \text{ kg/s.} \quad \text{Formel 5}$$

Batteriavgassingene slippes ut gjennom to ventiler som hver har en størrelse på $0,14 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}$. Dette gir et totalt $A_{total} = 0.0056 \text{ m}^2 \cdot 2 = 0.0112 \text{ m}^2$. Dermed blir den maksimale massefluksen per areal $\dot{m}'' = 0.00782 / 0.0112 = 0.698 \text{ kg/(m}^2\text{.s)}$.

Når to eller flere battericeller antas å gjennomgå *thermal runaway* samtidig, multipliseres massestrømningsraten beregnet ovenfor for én battericelle med antall celler som gjennomgår *thermal runaway* for å komme frem til den totale kombinerte strømmen av batterigass fra cellene.

- *Lav-Mach-begrensning i FDS*. FDS har en antagelse om lavt Mach-tall, dvs. $Ma < 0,3$, der Mach-tallet, Ma , er lik forholdet mellom fluidets hastighet og lydhastigheten i det aktuelle fluidet. Derfor finnes det en grense for den maksimale hastigheten som kan tillates i simuleringene uten å risikere at det fører til numeriske ustabiliteter og ikke-fysiske verdier for enkelte parametre. Dette ble undersøkt ved å simulere ulike antall battericeller som samtidig gjennomgår *thermal runaway*, nemlig 1, 4, 8, 16 og 128, basert på forutsetningen om at jo flere celler, desto høyere samlet gasstrøm fra batteriene. Dette innebærer høyere hastighet, og dermed høyere Ma , ved ventilene der batterigassen slippes ut.

For batterigassen ved 372 °C, modellert som idealgass, tilsvarer $Ma = 0,3$ en maksimal tillatt hastighet på:

$$v_{gas \text{ max}} = Ma \cdot v_{sound} = 0.3 \cdot v_{sound} = 0.3 \cdot \sqrt{\gamma R_u T / \bar{M}} = 0.3 \cdot (1.32 \cdot 8.314 \cdot 645 / 0.0264526)^{1/2} = 155.2 \text{ m/s} \quad \text{Formel 6}$$

der $v_{gas, \text{ max}}$ er den maksimalt tillatte hastigheten for batterigassen som tilsvarer grenseverdien $Ma = 0,3$ for Mach-tallet i FDS-simuleringer, v_{sound} er lydhastigheten i batterigassen betraktet som en ideell gass, γ er forholdet mellom spesifikke varmekapasiteter ved konstant trykk og konstant volum ($\sim 1,32$ når dette vektas basert på γ -verdiene til de polyatomiske gassene i batterigassblandingen som angitt i Tabell 3

ved høye temperaturer i området 600–700 K), R_u er den universelle gasskonstanten (8,314 J/mol/K), T er batterigassens temperatur (372 °C eller 645 K) og M er molmassen til batterigassblandingen. Grensen på 155,2 m/s overskrides kun ved samtidig *thermal runaway* i 128 celler, hvor maksimal hastighet blir ca. 179 m/s. For 1–16 celler forblir hastigheten betydelig lavere. Dette gjelder kun for batterimodulene som er simulert i denne studien. For batterier med mindre ventilasjonsåpninger kan grensen oppnås betydelig tidligere.

- *Oppdriftseffekter.* Batterigassen som ble observert i SafeBESS-forsøkene [32] var tydelig oppdriftsdominert på grunn av høy temperatur og gitt sammensetning. Dette gjenspeiles tilsvarende i simuleringene, ettersom batterigassens initialtemperatur og sammensetning er predefinert i modellen basert på de eksperimentelle målingene. Det finnes imidlertid scenarioer for *thermal runaway* der det kan dannes tyngre og langt mindre oppdriftsterke batterigassblandinger, slik som observert av Zeinali et al. [58], hvor den produserte gassen besto av kalde komponenter som sank mot gulvet i fravær av brann. Et slikt scenario er ikke vurdert i denne studien på grunn av avgrensninger i omfang. En vurdering av effektiviteten til ulike ventilasjonsstrategier under slike forhold vil være et relevant tema for en egen studie.
- *Forenklet modellering av takventilene.* Ventilene i taket modelleres uten diffusorer og er fullt åpne. Denne forenklete geometrien gjør det ikke mulig å representere de komplekse luftstrømningene som normalt oppstår fra diffusorer brukt i reelle installasjoner. I stedet antas en jevn lufthastighet over hele ventilarealet. I praksis er tilluftsventiler ofte optimalisert for å oppnå en mest mulig jevn luftutskifting i hele rommet, for eksempel ved å kombinere aksiale, radiale og roterende hastighets profiler i tilluften. Dette vil dermed også medføre en økt blanding av tilluft og batteriavgasser.

3.3 Definisjon av scenarioer

Simuleringene omfatter ulike scenarioer for *thermal runaway*. Det er først vurdert tilfeller med *thermal runaway* i et varierende antall battericeller, nærmere bestemt 1, 4, 8, 16 og 128 battericeller som gjennomgår *thermal runaway* samtidig, mens ventilasjonen er påslått. Sistnevnte scenario med 128 battericeller overstiger den teoretiske grenseverdien for Mach-tallet, noe som medfører økt usikkerhet i beregningene nær utslippspunktet. Det kumulative gassvolumet anses likevel som representativt, siden det i større grad bestemmes av ventilasjonsforholdene og den totale gassmengden tilført rommet.

Videre er det undersøkt scenarioer etter avsluttet *thermal runaway*, der det antas at rommet er fylt med batterigass uten videre gassproduksjon. For disse tilfellene er gasstemperaturen satt til henholdsvis 372 °C, representativt for kort tid etter hendelsen, og 20 °C, som representerer en situasjon etter lengre tid.

Effekten av ventilasjonsstrategier er studert ved å variere ventilasjonsraten mellom 2, 10 og 30 luftutskiftninger per time, samt ved å endre plasseringen av tilluftsventiler. Dette inkluderer en konfigurasjon med to ventiler plassert i taket og en alternativ løsning med én ventil plassert nær gulvet på bakveggen, med samme totale tverrsnittsareal.

I enkelte scenarioer er også brannvesenets innsats inkludert, representert ved åpning av dør samt bruk av ATEX-godkjente vifter plassert i døråpningen.

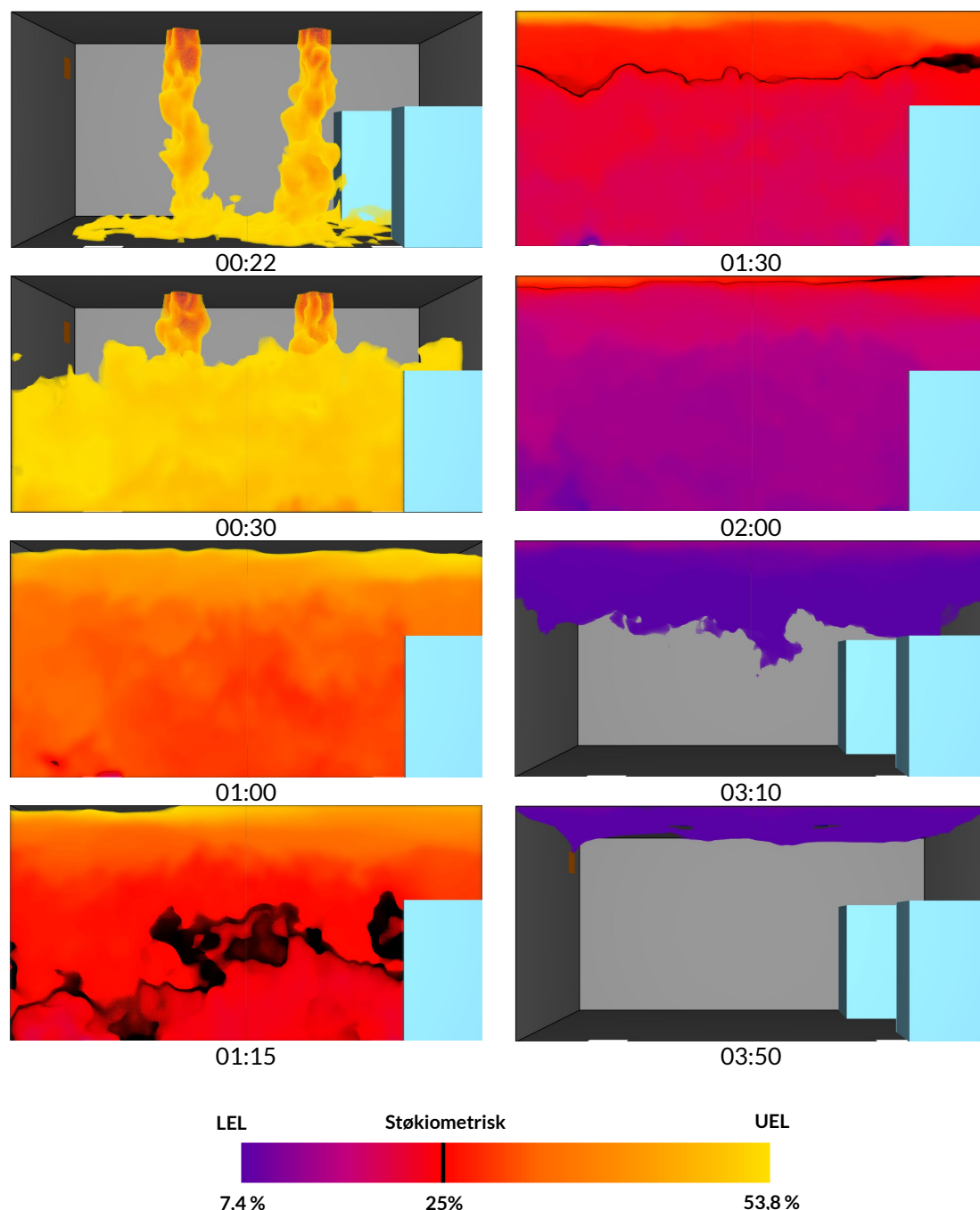
3.4 Resultater og diskusjon

Dette kapitlet presenterer resultatene fra casestudien. Kapitlet er delt inn i to avsnitt, hvor det første avsnittet viser resultatene fra simuleringene som undersøker avtrekksventilasjon etter at *thermal runaway* har funnet sted og gassen ble isolert i rommet, mens det andre avsnittet omhandler resultatene fra avtrekksventilasjon som er dimensjonert for å holde gasskonsentrasjonen i rommet lav mens det pågår *thermal runaway* i batteriet.

3.4.1 Avtrekksventilasjon etter *thermal runaway*

Fast installert ventilasjonssystem

Figur 14 viser en visualisering av den brennbare gasskyen i et rom som ventileres med 30 luftutskiftninger per time, etter at rommet først var fullstendig fylt med batterigass ved 372 °C. Figuren viser utviklingen av gasskyen over tid. I begynnelsen, 22 sekunder etter ventilasjonen har startet, ligger kun områder i nærheten av tilluftstrømmene under den øvre eksplosjonsgrensen, mens gasskonsentrasjonen i resten av rommet fortsatt ligger over den øvre eksplosjonsgrensen. Derfor vises det ingen gass i dette område i figuren. Siden tilluften med 20 °C er kaldere enn batterigassen fylles rommet gradvis fra bunnen oppover med luft. Dermed oppnås en brennbar blanding først i den nedre delen av rommet. Etter rund ett minutt ligger konsentrasjonen i nesten hele rommet under den øvre eksplosjonsgrensen, men fortsatt over den nedre eksplosjonsgrensen og dermed innenfor det brennbare området. Noen sekunder etter er deler av konsentrasjonen støkiometrisk og det etablerer seg et skille hvor den øvre delen av rommet har en rik blanding mens den nedre delen har en mager blanding, men fortsatt, er hele rommet fylt med en brennbar blanding. Etter rund fire minutter er all brennbar gass evakuert fra rommet.



Figur 14 Visualisering av den brennbare gasskyen i et rom som ventileres med 30 luftutskiftninger per time, etter at rommet først var fullstendig fylt med batterigass ved 372 °C. Områder som ikke viser gasskyen ligger enten over den øvre eksplosjonsgrensen (UEL), f.eks. helt fylt med gass eller under den nedre eksplosjonsgrensen (LEL), f.eks. fylt med ren luft.

Den samme tidsutviklingen som i Figur 14 vises i Figur 15, som presenterer volumet av den eksplosive gasskyen over tid for simuleringer med ulike luftutskiftningsrater. Resultatene skilles mellom scenarioer som starter med høy romtemperatur (Figur 15, nedre rad), representativt for hendelser hvor ventileringen igangsettes relativt raskt etter at *thermal runaway* har sluttet, og scenarioer hvor ventileringen igangsettes etter rommet har hatt tid for å kjøle seg ned (Figur 15, øvre rad). Figuren viser både gasskyvolumet av hele gassblandingen som ligger innenfor brennbarhetsområdet og volumet som er vektet basert på den lokale ekspansjonsfaktor og dermed tar hensyn til lokale blandingsforhold.

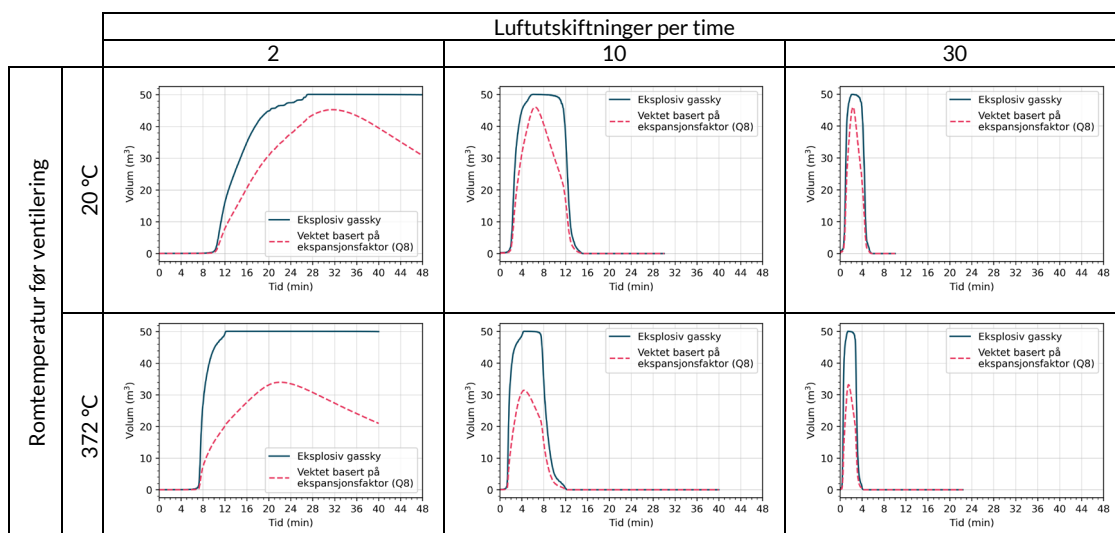
I tråd med forventningene tar det lengst tid å ventilere gassene fra rommet med lave ventilasjonsrater. Simuleringer fremhever, imidlertid, forskjellen mellom nominell og effektiv luftutskiftingsrate. En nominell utskiftningsrate på 30 bør i teorien ventilere all gass etter to minutter, men simuleringene viser at det tar omtrent dobbelt så langt tid, avhengig av temperaturforskjellen mellom tillufta og batterigassen. Plassering og utforming av tillufts- og avtrekksventiler og rommets geometriske utforming og innredning, er ytterligere faktorer som påvirker hvor effektivt ventilasjonssystemet er når det gjelder å skifte ut luften. Simuleringene med to utskiftninger per time ble stoppet før all gass var ventilert ut av rommet for å begrense beregningskostnadene. Ved simuleringstopp av disse simuleringene var fortsatt hele rommet innenfor det brennbare området.

Varigheten av brennbar gass i rommet har stor betydning for sannsynligheten for at gasskyen antennes. For å kunne diskutere sammenhengen mellom oppholdstid i det brennbare området og tennsannsynlighet, må man skille mellom to typer antennelseskilder [59].

- Den første gruppen er **kontinuerlige antennelseskilder**, som varme overflater, åpne flammer eller glødrester. Disse antennelseskildene er permanent til stede, og en brennbar gassky som kommer i kontakt med dem vil kunne antennes umiddelbart.
- Den andre gruppen er **intermitterende antennelseskilder**, som oppstår kortvarig og uregelmessig, for eksempel som følge av gnister, elektrostatisk utladning eller elektriske lysbuer. Slike antennelseskilder er ikke kontinuerlig til stede, men kan utløses spontant som følge av bevegelser, skader eller endrede driftstilstander etter en *thermal runaway*. For denne typen antennelseskilder øker sannsynligheten for antenneelse med tiden gassen oppholder seg i det brennbare området.

Felles for alle de seks simuleringene er at hele rommet på et tidspunkt fylles med en brennbar gassblanding. Den kontinuerlige tennsannsynligheten er dermed i teorien lik for alle scenariene så lenge slike antennelseskilder er til stede. I praksis vil det imidlertid være betydelige forskjeller mellom et scenario der ventileringen startes umiddelbart etter en *thermal runaway*, og et scenario der rommet holdes avstengt til temperaturen har falt. Mange av de kontinuerlige antennelseskildene vil forsvinne over tid etter hendelsen, noe som reduserer den kontinuerlige tennsannsynligheten betydelig. Det kan likevel ta lang tid før både rommet og batteriene har kjølt seg ned tilstrekkelig til at alle varme overflater og hotspots er eliminert. Hvor raskt rommet fylles med en brennbar blanding har også betydning for tennsannsynligheten, men forskjellene som skyldes luftutskiftningsraten vil antageligvis være mindre enn forskjellene mellom de to nevnte strategiene: å starte ventileringen umiddelbart etter en *thermal runaway*, eller å holde rommet avstengt inntil temperaturen har falt.

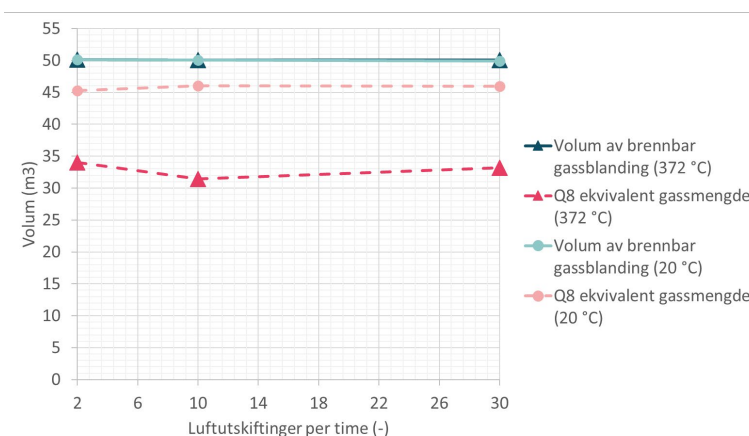
Den intermitterende tennsannsynligheten avhenger derimot i stor grad av eksponeringstiden, og vil derfor være betydelig større ved lave luftutskiftningsrater. Forskjellene mellom simuleringene for begge typer tennsannsynlighet ble imidlertid ikke kvantifisert i denne studien.



Figur 15 Eksplosivt gasskyvolum ved ventilering av brennbare gasser etter avsluttet *thermal runaway*-hendelse, for ulike initiale romtemperaturer og luftutskiftningsrater.

For å evaluere tennsannsynligheten benyttes vanligvis det totale brennbare gassvolumet i rommet. Å bruke dette volumet direkte for å sammenligne forventet alvorlighetsgrad av en deflagrasjon har imidlertid betydelige begrensninger. Figur 16 viser at det eksplosive gassvolumet oppnår en maksverdi på 50 m³ i samtlige simuleringer, som betyr at rommet er fullstendig fylt med brennbar gass. Derfor er det totale brennbare volumet lite egnet som indikator for eksplosjonskonsekvens.

Dersom man i stedet vekter det maksimale brennbare gassvolumet under ventileringen med den lokale ekspansjonsfaktoren, og dermed tar hensyn til den lokale gassammensetningen, altså benytter Q8-volumet, får man et langt mer realistisk bilde av den potensielle deflagrasjonsstyrken. Denne tilnærmingen viser at romtemperaturen kan bidra til å redusere det ekspansjonsvektede gassvolumet og dermed redusere konsekvenspotensialet ved en eventuell deflagrasjon.



Figur 16 Maksimalt brennbart gassvolum under ventilering for ulike ventilasjonsrater og tilluftstemperaturer.

Figur 16 viser at den mest fordelaktige konfigurasjonen i simuleringene forhindrer at hele rommet fylles samtidig med brennbar gass, men en delvis volumdeflagrasjon på over 30 m³ vil likevel kunne gi et uakseptabelt høyt eksplosjonstrykk. En førsteordens eksplosjonsanalyse kan brukes for å sammenligne forventet eksplosjonsovertrykk for de ulike scenariene. I dette arbeidet er det antatt at overtrykket skalerer lineært med fraksjonen av brennbar gass i

rommet, f_{eksp} , og at overtrykket fra en delvis volumdeflagrasjon, ΔP_{eksp} , derfor kan relateres til overtrykket som forventes ved en deflagrasjon i fullt volum:

$$\Delta P_{eksp} = f_{eksp}(\beta_{maks} - 1) p_{atm} \quad \text{Formel 7}$$

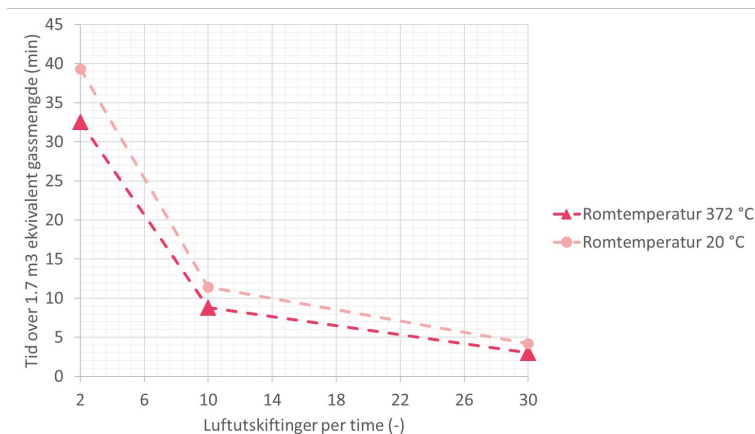
hvor f_{eksp} beregnes basert på Q8-volumet og β_{maks} er den maksimale ekspansjonsfaktoren, altså hvor mye et gassvolum ekspanderer på grunn av forbrenning og p_{atm} er omgivelsestrykket før eksplosjonen.

$$f_{eksp} = \frac{V_{Q8}}{V_{rom}} \quad \text{Formel 8}$$

Ved å bruke trykkforholdet $E_{maks} = P_{maks}/p_{atm}$ istedenfor β_{maks} , blir det beregnede overtrykk rundt 15 % høyere og mer representativt for en eksplosjon i et lukket rom. Siden Formel 7 antar samme trykk i hele rommet og neglisjerer trykkavlastning, lekkasjer og dynamiske effekter, er tilnærmingen likevel kun egnet for grov sammenligning mellom de ulike scenariene. Dette er derfor en forenklet ingeniørmessig tilnærming og ikke egnet for å kvantifisere overtrykket i konkrete enkeltscenarier. Ved å skrive formelen om kan en kritisk brennbar volumfraksjon etableres:

$$f_{krit} = \frac{\Delta P_{krit}}{(\beta_{maks} - 1) p_{atm}} \quad \text{Formel 9}$$

hvor ΔP_{krit} velges basert på et akseptabelt nivå i Tabell 2. Dersom man for eksempel velger $\Delta P_{krit} = 20 \text{ kPa}$, som allerede innebærer et betydelig skadepotensial, blir den kritiske volumfraksjonen 0,03, noe som tilsvarer 1,7 m³ støkiometrisk gassblanding. Figur 17 viser tidsperioden der gassvolumet ligger over denne kritiske mengden. Det er viktig å understreke at tidsverdiene for simuleringene med to luftutskiftninger per time ville vært betydelig lengre, siden disse simuleringene ble avsluttet mens Q8-volumet fortsatt lå over henholdsvis 20 og 30 m³.



Figur 17 Tiden hvor det brennbare gassvolumet i rommet, vektet basert på ekspansjonsfaktoren, overstiger 2.5 m³.

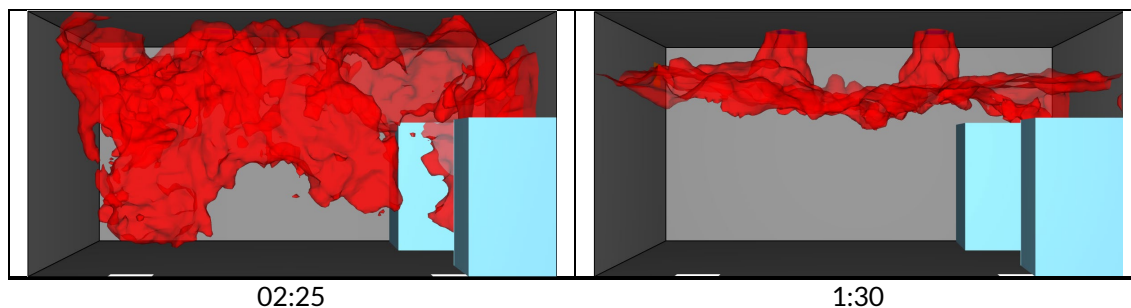
Siden avtrekksventilen i casestudien er plassert høyt i rommet, er det fordelaktig at tilluften er tyngre enn batterigassene. Tetthetsforskjellen blir større når rommet er varmere enn tilluften, siden dette fører til sterkere sjiktning og dermed mindre blanding mellom luft og avgasser. Figur 18 illustrerer dette ved å sammenligne isoflate for den støkiometriske blandingen når denne har nådd omtrent samme høyde i rommet. Tidspunktet er ikke helt identisk i de to tilfellene, siden gasstemperaturen påvirker hvor raskt rommet ventileres.

En viktig begrensning ved denne studien er at kun lette avgasser fra batteriet er undersøkt. I praksis viser eksperimentelle studier at gassene som ventileres ut under en litium-ion batteri *thermal runaway* kan opptre som tyngre enn luft, lettere enn luft, eller som skyer med blandet oppdrift, avhengig av gassammensetning, ladetilstand og fasen av runaway-hendelsen. [60–62].

Oppdriften er avhengig av den dynamiske balansen mellom tunge organiske damper og CO₂ på den ene siden og H₂-rike nedbrytningsgasser på den. Sammensetningen av gassene vil ofte variere gjennom hele *thermal runaway* forløpet. Det er derfor ikke mulig å basere ventilasjonsstrategien på en antakelse om at avgassene alltid er lettere enn luft. I stedet bør det etableres avtrekk både høyt og lavt i rommet for å håndtere de ulike oppdriftsforholdene som kan oppstå.

Ventilasjon av gassene mens de fortsatt er varme tar heller ikke hensyn til tennsannsynligheten knyttet til antennelseskilder som kan være til stede i den tidlige fasen etter en *thermal runaway*, som tidligere diskutert. Tetthetsforskjeller kan derimot utnyttes som en strategi dersom rommet ventileres med andre gasser enn luft, for eksempel flytende N₂. Ved fordamping er N₂ kaldt og dermed tyngre enn omgivelsesluften, noe som kan bidra til å etablere et midlertidig stabilt sjikt nær gulvet og redusere gassblandingen. Effekten er imidlertid avhengig av temperaturforskjellene og vil ofte være begrenset i tid, siden oppvarming og turbulens gradvis vil bryte ned sjiktingen. Det sistnevnte tiltaket krever heller ikke kontroll av antennelseskilder, siden målet er å unngå at det dannes en brennbar blanding i utgangspunktet.

Figur 18 viser det eksplosive gassvolumet ved tretti luftutskiftninger med en initial romtemperatur på 20 °C (venstre) og 372 °C (høyre). Tidspunktene er valgt nær maksimumsverdien for volumet av brennbar gassblanding. Figuren illustrerer tydelig effekten av sjikting, som blir mer uttalt ved større temperaturforskjell mellom batterigass og tilluft.

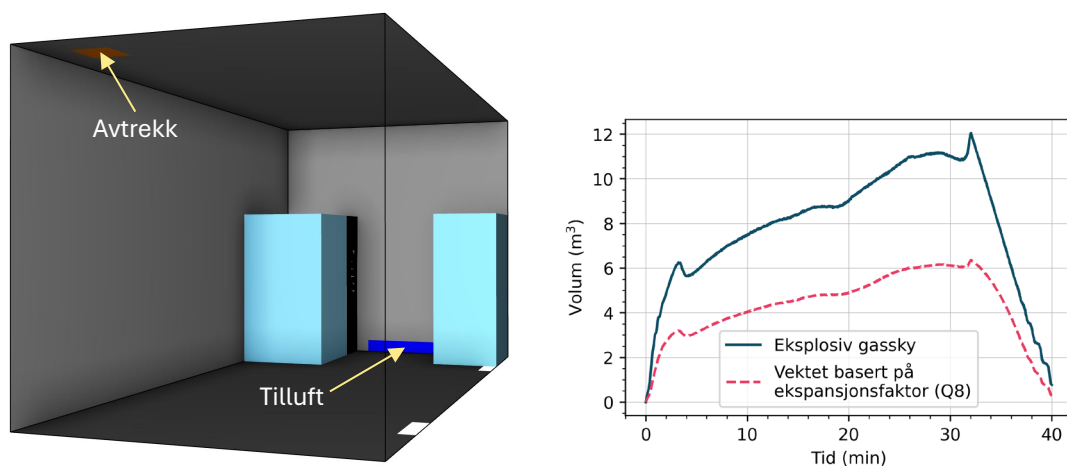


Figur 18 Støkiometrisk isoflate 2 minutter og 25 sekunder etter at ventilasjonen startet ved en romtemperatur på 20 °C (venstre), og 1 minutt og 30 sekunder etter at ventilasjonen startet ved en romtemperatur på 372 °C (høyre). Begge simuleringene benytter en luftutskiftningsrate på 30 utskiftninger per time.

Flere simuleringer ble gjennomført med tilluftsventilen plassert på gulvnivå og avtrekksventilen i taket for å undersøke det beste systemet for å opprettholde sjikting i rommet, se Figur 19 (venstre). Dette forutsetter at tilluften er tyngre enn batterigassen.

Simuleringen viser at plassering av tilluftsventilen på gulvnivå kan redusere det eksplosive gassvolumet betydelig. Ved å flytte både tillufts- og avtrekksventilen ble det maksimale eksplosive gassvolumet begrenset til rundt 12 m³, og Q8-volumet til litt over 6 m³. Til sammenligning var hele rommet fylt med en eksplosiv gassblanding over lang tid da tilluftsventilen var plassert i taket, se Figur 15. Selv om dette representerer en betydelig forbedring, overstiger det eksplosive gassvolumet fortsatt et kritisk nivå i lang tid.

Dette innebærer at selv ved optimal plassering av ventilasjonsventilene, gitt en kjent gasstetthet, er det ikke mulig å begrense ansamlingen av eksplosiv gassblanding tilstrekkelig når rommet ventileres med luft. Simuleringen viser derimot et tydelig potensial for å utnytte sjikting ved ventiler med inert gass. Dersom inert gass som er tyngre enn batterigassen benyttes, vil det være en klar fordel å tilføre gassen ved gulvnivå og ha avtrekket høyt i rommet. Ved å opprettholde sjikting og dermed redusere blandingen mellom batterigass og inert gass vil rommet tømmes betydelig raskere for batterigass.



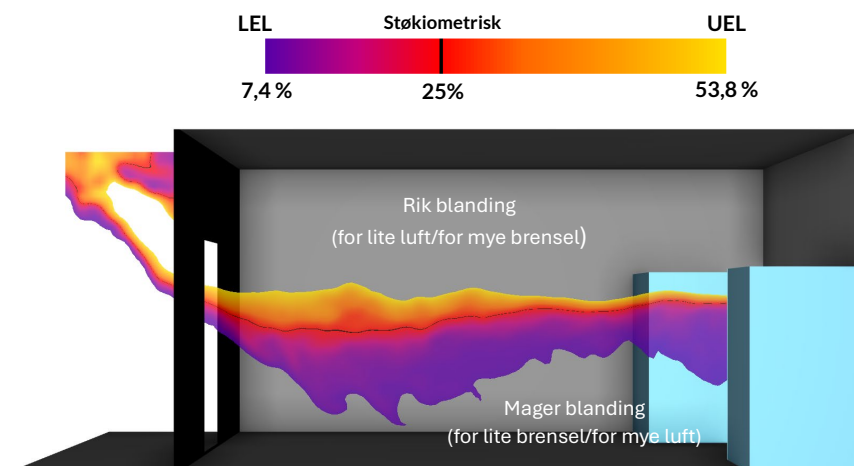
Figur 19 Batteriromgeometri med plassering av tillufts- og avtrekksventil for et system som skal opprettholde sjikting ved lett batterigass (venstre). Eksplosivt gasskyvolum ved ventiler av brennbare gasser etter avsluttet *thermal runaway*, med to luftutskiftninger per time ved en initial romtemperatur av 372 °C (høyre).

Ventilasjon ved bruk av mobile vifter

Brannvesenet vil generelt være forsiktig med å aktivere byggets ventilasjonssystem dersom det ikke finnes spesifikk skilting som angir at røykventileringen skal aktiveres ved brann. Årsaken er at brannvesenet vanligvis ikke har tilstrekkelig kunnskap om byggets konkrete ventilasjonsutførelse. Å aktivere ventilasjonssystemet medfører derfor en risiko for at røyk og brann sprer seg via ventilasjonskanalene til andre rom i bygget.

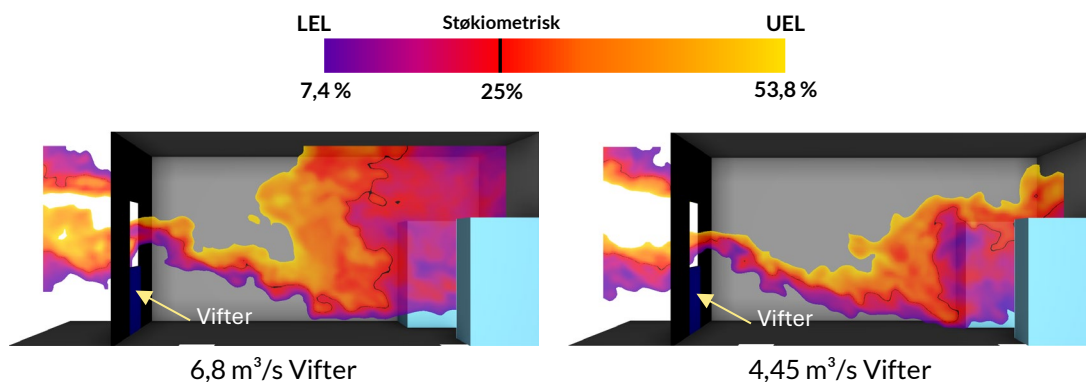
Mobile vifter kan være en mulig løsning for å etablere ventiler av rommet uten å aktivere batterirommets eget ventilasjonssystem, spesielt dersom rommet er plassert slik i bygget at ventiler kan skje direkte ut til det fri, for eksempel via en utvendig dør. Det å åpne en dør inn til batterirommet innebærer imidlertid en eksplosjonsrisiko i seg selv. Et eksempel på dette er deflagrasjonen i et BESS-anlegg i Arizona, som oppstod som følge av at brannvesenet åpnet døren til en BESS-kontainer tre timer etter starten på en *thermal runaway* [63]. Deflagrasjonen inntraff omtrent 2 til 3 minutter etter at døren var åpnet og førte til at flere brannmannskaper ble skadet.

Figur 20 viser en konsentrasjonskontur av den brennbare gasskyen i rommet fra en simulering der døren åpnes til et rom som er fullstendig fylt med varm batterigass. Når døren åpnes strømmer luft inn i nedre delen av rommet, mens batterigassen strømmer ut gjennom øvre delen. I grensesjiktet mellom den innstrømmende luften og den utstrømmende batterigassen dannes det et sjikt med brennbar gass som strekker seg gjennom hele rommet. Dersom dette sjiktet treffer en antenneskilde, kan det oppstå en deflagrasjon.



Figur 20 Tverrsnitt med konsentrasjonskontur av den brennbare gasskyen i rommet 13 sekunder etter at døren ble åpnet. Før døren ble åpnet var rommet fullstendig fylt med batterigass ved 372 °C. Områder som ikke viser gasskyen ligger enten over den øvre eksplosjonsgrensen (UEL), f.eks. helt fylt med gass eller under den nedre eksplosjonsgrensen (LEL), f.eks. fylt med ren luft.

Det ble gjennomført tre simuleringer for å undersøke hvilken effekt overtrykkventilering med en vifte plassert i døråpningen har, altså en vifte som blåser luft inn i rommet. Figur 21 viser konsentrasjonskonturer av den brennbare gasskyen i rommet ved overtrykkventilering med henholdsvis 6,8 m³/s (venstre) og 4,45 m³/s (høyre). Begge simuleringene viser at overtrykkventilering introduserer turbulens i rommet, noe som fører til effektiv blanding av batterigass og luft og dermed større brennbare gassansamlinger i den bakre delen av rommet.



Figur 21 Tverrsnitt med konsentrasjonskontur av den brennbare gasskyen i rommet 5 sekunder etter at viften i døren ble startet. Før viften ble startet var rommet fullstendig fylt med batterigass ved 350 °C. Volumstrømmen fra viften er henholdsvis 6,8 m³/s (venstre) og 4,45 m³/s (høyre). Områder som ikke viser gasskyen ligger enten over den øvre eksplosjonsgrensen (UEL), f.eks. helt fylt med gass eller under den nedre eksplosjonsgrensen (LEL), f.eks. fylt med ren luft.

Økt volumstrøm fra viften reduserer tiden som kreves for å få hele rommet under den nedre eksplosjonsgrensen. Tabell 5 oppgir tiden basert på de tre gjennomførte simuleringene med ulike volumstrømmer. Etter denne tiden vil det fortsatt være brennbar gass i rommet, men konsentrasjonen vil være for lav til at blandingen kan antenne.

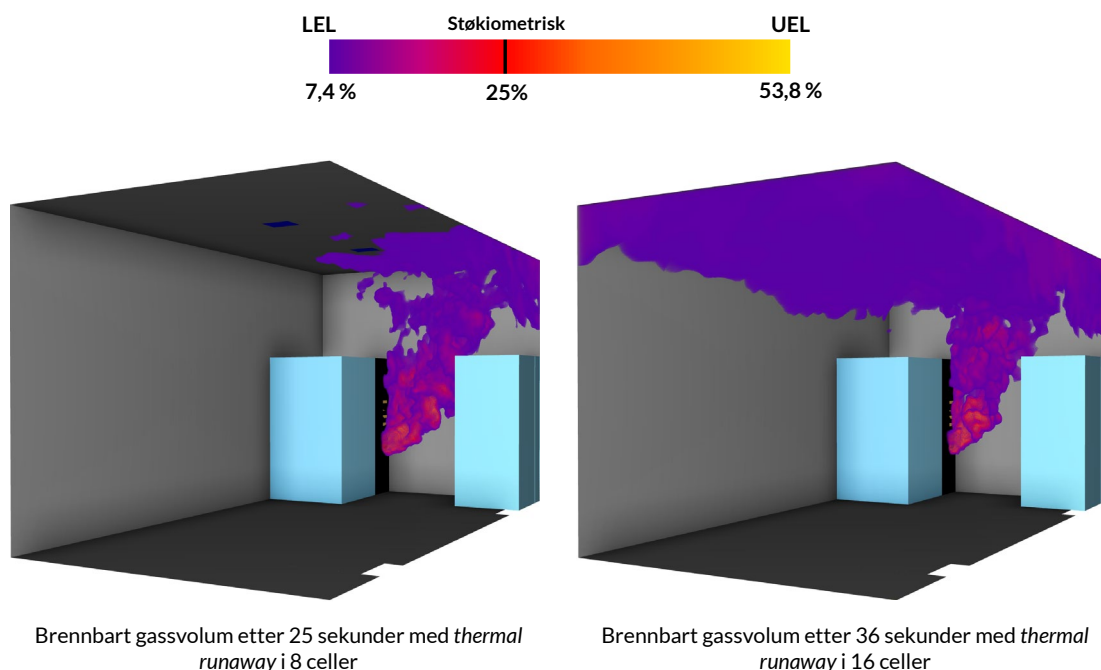
Tabell 5

Tid til hele rommet er under nedre eksplosjonsgrensen (LEL) ved ulike volumstrømmer for overtrykkventilering.

Vifter Volumstrøm (m ³ /s)	Tid til hele rommet er under LEL (s)
6,8	17
4,45	50
2,78	132

3.4.2 Avtrekksventilasjon mens det pågår *thermal runaway*

Spesifikasjonskravene til avtrekksventilasjon for å holde det brennbare gassvolumet under et kritisk nivå avhenger i stor grad av batteriets egenskaper ved en *thermal runaway*, spesielt hvor mye gass som frigjøres og hvor raskt dette skjer. Simuleringene i denne studien er basert på veldokumenterte 64 Ah NMC-celler [15]. Ved å variere antallet celler som gjennomgår *thermal runaway* samtidig, er det mulig å etablere noen generelle betraktninger. Figur 22 viser det brennbare gassvolumet i rommet ved samtidig avgassing fra et ulikt antall celler og aktiv ventilasjon tilsvarende 30 luftutskiftninger per time. Tidspunktene vist i Figur 22 er valgt nært det maksimale gassvolumet.



Figur 22 Brennbart gassvolum ved avgassing fra flere celler samtidig med aktiv ventilasjon tilsvarende 30 luftutskiftninger per time. Områder som ikke viser gasskyen ligger enten over den øvre eksplosjonsgrensen (UEL), f.eks. helt fylt med gass eller under den nedre eksplosjonsgrensen (LEL), f.eks. fylt med ren luft.

Figur 23 viser hvordan ulike luftutskiftningsrater påvirker oppbyggingen av et eksplosivt gassvolum ved ventilering av brennbare gasser under en *thermal runaway*-hendelse, for ulike antall celler som bidrar til gassproduksjon samtidig. Det maksimale eksplosive gassvolumet og Q8-gassvolumet oppnådd i løpet av hendelsen er oppsummert i Tabell 6. Dersom gassproduksjonen er for stor i forhold til romventilasjonen, fylles hele rommet med brennbar gass, og utfordringene blir sammenlignbare med scenarioet der et rom skal ventileres etter en *thermal runaway*. I slike tilfeller reduserer en høyere luftutskiftningsrate hovedsakelig tiden som kreves for å ventilere rommet, men hele eller store deler av rommet vil likevel være fylt med en brennbar gassblanding. Dette er en situasjon som bør unngås. Simuleringen av samtidig

avgassing fra 128 celler, som tilsvarer 26,4 kWh, er et eksempel på et slikt scenario. Denne simuleringen er basert på 30 luftutskiftninger per time.

Når avgassingsraten er begrenset, for eksempel ved bruk av batterier som er dimensjonert for å hindre *thermal runaway*-spredning fra celle til celle, er gassskyens utvikling i større grad avhengig av de lokale blandingsforholdene som oppstår på grunn av turbulent strømning fra avgassing selv, heller enn av rommets ventilasjonssystem. Dette ser man tydelig i resultatene fra simuleringene med åtte eller færre celler, som viser liten variasjon i maksimal gasskystørrelse som funksjon av ventilasjonsraten.

Luftutskiftningsraten er særlig viktig for batterier med høy nok gassproduksjonsrate til at gassvolumet kan overstige et kritisk nivå. I slike tilfeller vil en høyere ventilasjonsrate redusere det maksimale gassvolumet, slik det sees i simuleringen med avgassing fra 16 celler.

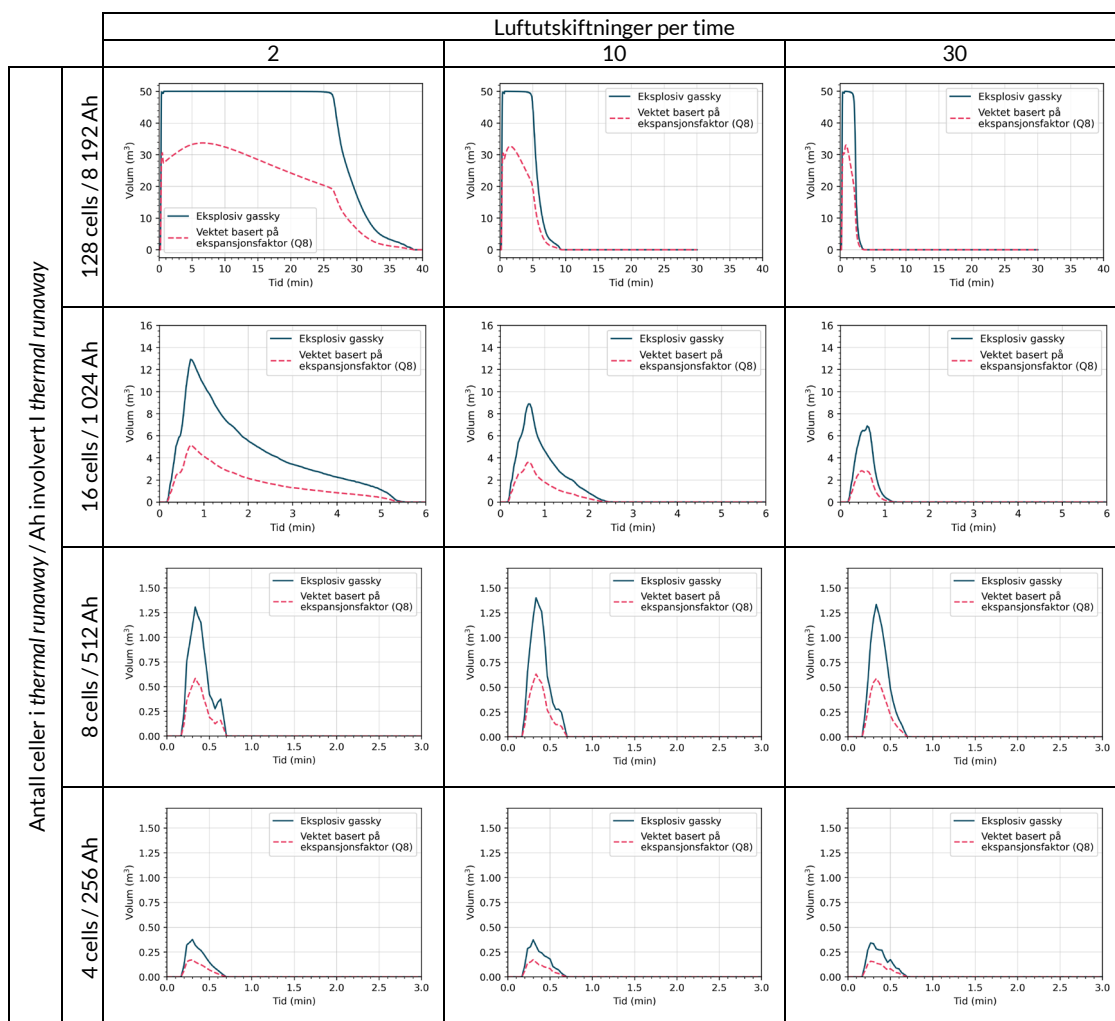
I risikoanalyser brukes ofte 25 prosent av den nedre eksplosjonsgrensen som grenseverdi. I henhold til NFPA 855:2026 [64] er det for eksempel ikke nødvendig å etablere eksplosjonskontroll og forebygging dersom en vurdering av deflagrasjonsfaren viser at konsentrasjonen av brennbare gasser ikke kan akkumuleres og i gjennomsnitt overstige 25 prosent av den nedre eksplosjonsgrensen. For gassen som ble brukt i denne casestudien tilsvarer dette en brenselvolumkonsentrasjon på 1,85 prosent. Det betyr totalt 0,999 m³ batterigass i rommet, som tilsvarer en gassky på 3,996 m³ med støkiometrisk blanding. For avgassing fra 16 celler, som tilsvarer 1 024 Ah, viste simuleringene at det kreves 10 eller flere luftutskiftninger per time for å holde konsentrasjonen under denne grensen.

Å bruke en global konsentrasjon på ≤ 25 prosent av den nedre eksplosjonsgrensen utelukker likevel ikke struktursvikt ved en delvis volumdeflagrasjon [65]. En delvis volumdeflagrasjon av 4 m³ med støkiometrisk blanding gir, i henhold til Formel 7, et overtrykk på 47 kPa. Det finnes flere studier som benytter ≤ 25 prosent av den nedre eksplosjonsgrensen som en etablert grenseverdi for å undersøke effekten av ulike tiltak. Det finnes også studier som analyserer overtrykk fra heterogene gasskyer og delvise volumdeflagrasjoner. Det mangler imidlertid studier som direkte knytter disse fenomenene til 25-prosent-LEL-kriteriet.

Det er viktig å merke seg at Figur 23 fokuserer på det brennbare gassvolumet. At dette volumet er null, betyr imidlertid ikke at rommet er fritt for brennbar gass. Dette er relevant der *thermal runaway* sprer seg sakte fra celle til celle eller fra modul til modul. I slike tilfeller kan gassene akkumuleres over tid slik at det brennbare gassvolumet igjen kan overstige kritiske nivåer, selv om ventilasjonsratene var tilstrekkelige i den tidlige fasen av hendelsen.

Tabell 6 Maksimalt eksplosivt gassvolum og Q8-gassvolum (eksplosivt gassvolum vektet basert på ekspansjonsfaktor) for ulike kombinasjoner av luftutskiftningsrater og antall celler i *thermal runaway*.

	2 ACH		10 ACH		30 ACH	
Antall celler / Kapasitet	Eksplosiv gassky (m ³)	Q8 gassky (m ³)	Eksplosiv gassky (m ³)	Q8 gassky (m ³)	Eksplosiv gassky (m ³)	Q8 gassky (m ³)
128 cells / 8 192 Ah	50,06	33,74	50,02	32,68	49,95	33,01
16 cells / 1 024 Ah	12,92	5,16	8,88	3,63	6,89	2,84
8 cells / 512 Ah	1,31	0,58	1,40	0,63	1,33	0,59
4 cells / 256 Ah	0,38	0,17	0,37	0,17	0,34	0,16
1 celle / 64 Ah	0,06	0,03	0,06	0,03	0,06	0,03



Figur 23 Eksplisivt gasskyvolum ved ventilering av brennbare gasser under en *thermal runaway*-hendelse, for ulike antall celler som bidrar til gassproduksjon samtidig og ved ulike luftutskiftningsrater.

3.4.3 Trykkavlastning

Simuleringene viser at det er krevende å ventilere et rom med batterigass ved hjelp av luft uten at volumet med brennbar gassblanding overstiger kritiske nivåer. Aktiv ventilasjon kan brukes til å begrense oppbyggingen av en brennbar gassblanding, men den nødvendige ventilasjonsraten avhenger av avgassingsraten fra batteriet. I mange tilfeller er det derfor ikke mulig å forhindre en delvis volumdeflagrasjon. På grunn av denne gjenværende eksplosjonsfaren skal batterirom prosjekteres og utføres med trykkavlastningsflater slik at personsikkerheten og bygningens bæreevne opprettholdes på et tilfredsstillende nivå, i tråd med TEK17 § 11-5 [66]. En begrenset kartleggingsstudie av norske BESS-installasjoner i bygg [31] viste likevel at fem av de seks undersøkte installasjonene ikke hadde noen form for trykkavlastning (se Tabell 1).

4 Konklusjoner og anbefalinger

Konklusjonene i denne studien er basert på tilgjengelig litteratur og en omfattende serie med CFD-simuleringer, som er brukt til å evaluere effekten ulike ventilasjonsstrategier har på eksplosjonsrisikoen i forskjellige scenarioer.

For å evaluere eksplosjonsrisikoen er det nødvendig å ta hensyn til gassammensetningen, som hovedsakelig består av H₂, CO, CO₂ og ulike hydrokarboner, som metan (CH₄), etylen (C₂H₄) og propan (C₃H₈). Selv om hovedkomponentene er de samme, varierer konsentrasjonene av de enkelte gassene både med katodematerialet, for eksempel LFP, NMC osv., og med ladetilstanden (SOC). I tillegg finnes det betydelig variasjon også innenfor samme katodefamilie, som for eksempel NMC-batterier med ulikt nikkelinnhold. For å fastslå en nøyaktig gassammensetning er det derfor nødvendig med batteritester på cellenivå, der gassene analyseres direkte.

Alle batterier avgir CO₂ under en *thermal runaway*. Ved beregning av eksplosjonsområdet for en gitt gassammensetning er det derfor viktig å ta hensyn til dette og benytte egnede metoder og verktøy. Dersom man ikke tar hensyn til CO₂, vil eksplosjonsanalysen bli for konservativ. Enkle metoder, slik som beskrevet i EN ISO 10156:2017, kan brukes til screening og klassifisering. Alternativt kan verktøy som Cantera benyttes for å beregne eksplosjonsområdet basert på detaljert kjemisk kinetikk.

Det foreligger ikke konsensus om hvorvidt LFP er sikrere enn andre batterikjemier med hensyn til eksplosjonsrisiko. En viktig årsak til dette er den store usikkerheten knyttet til tennsannsynlighet. Som følge av denne usikkerheten bør beregningen av eksplosjonstrykket i eksplosjonsanalysen ta utgangspunkt i det verste tenkelige realistiske scenarioet for gassakkumulering.

Flere modelleringsverktøy er brukt for å studere eksplosjonsfare av litium-ion batterier, men ofte modelleres bare enkelte deler av prosessen. Kun få verktøy, oftest kommersielle, kan simulere hele forløpet fra interne reaksjoner til varmeoverføring, *thermal runaway*-spredning, gassutslipp, dispersjon og deflagrasjon. Derfor må modellering fortsatt kombineres med eksperimentelle studier som for å etablere tilstrekkelig gode randbetingelser.

Trekk-ut strategien kan brukes for å begrense mengden brennbar gass i et batterirom. Hvilken luftutskiftningsrate som er nødvendig, og om det er praktisk mulig å oppnå tilstrekkelig høy rate, avhenger i stor grad av batteriets *thermal runaway* karakteristikk. Batterier som tillater rask propagering av *thermal runaway* og avgir store gassmengder, er mer krevende. Fordelen med strategien er at eksplosjonsfaren i praksis opphører når *thermal runaway* er avsluttet. Ulempen er at høye ventilasjonsrater også vil tilføre betydelige mengder oksygen til en eventuell batteribrann.

Simuleringene omfattet kun lette gasser. Basert på litteratur og flere batteritester gjennomført hos RISE Fire Research anbefales det likevel å utforme avtrekket slik at både lette og tunge gasser som kan oppstå ved *thermal runaway* kan fjernes fra rommet. Avtrekkssystemer som er direkte tilkoblet enkeltstående batteriskap, slik at gassene trekkes ut uten å slippes ut i rommet, vurderes som den mest hensiktsmessige løsningen.

Selv med effektiv ventilasjon kan det lokalt oppstå oppsamling av brennbar gass som kan føre til en delvis volumdeflagrasjon. Det bør derfor etableres tilstrekkelig trykkavlastning for å begrense trykkoppbygging og redusere konsekvensene ved en eventuell antennelse.

Stenge-inne strategien kan brukes som et alternativ til trekk-ut-løsninger, for eksempel dersom de forventede avgassingene fra batteriet er så store at det er krevende å etablere tilstrekkelig avtrekk. Meraner et al. [32] viste at en slik strategi, i kombinasjon med et inertgassanlegg, kan være svært effektiv for å slukke batteribranner i et rom og samtidig begrense eller fjerne den akutte eksplosjonsrisikoen. En viktig fordel er at strategien håndterer både brann og eksplosjonsfare. Utfordringen er at det kreves tilstrekkelige mengder inert gass for å

oppretholde et lavt oksygennivå over potensielt lang tid, avhengig av batteriets *thermal runaway* karakteristikk. I tillegg kan det være krevende å fastslå hvor lenge *thermal runaway* varer, og å avgjøre når prosessen er avsluttet, noe som gjør dimensjonering og drift av systemet mer usikker.

En ulempe med stenge-inne strategien er at eksplosjonsrisikoen ikke nødvendigvis er over når *thermal runaway* har opphørt. Gassene må fortsatt ventileres ut av rommet. Simuleringene viser at ventilasjonssystemet kan optimaliseres for å begrense mengden brennbar gass, men det er svært krevende å ventilere et rom som allerede er fylt med gass uten at det oppstår perioder med høye konsentrasjoner. En mulig løsning er å tilføre inert gass for å unngå at blandingen blir brennbar. Dersom dette ikke er mulig, bør ventilasjonen først igangsettes når temperaturen i rommet og batteriene har sunket, og de fleste potensielle tennekildene er fjernet.

Batterirom bør i størst mulig grad plasseres utenfor bygninger. Dersom dette ikke er mulig, bør de utformes slik at de enkelt kan ventileres direkte til det fri og samtidig legge til rette for effektiv trykkavlastning ved en eventuell deflagrasjon. Plasseringen av batteriet har også stor betydning for brannvesenets innsats. Brannvesenet må være oppmerksom på eksplosjonsfare også etter at en brann er slokket, spesielt ved ventilering eller åpning av rom.

Dokumentasjon og erfaringsgrunnlag for bruk av lav-oksygen-systemer i batterirom er foreløpig begrenset. Slike systemer kan likevel representere en mulig løsning for å oppnå lange hold-tider. Videre arbeid bør derfor omfatte evaluering av ytelse, dimensjonering og praktisk gjennomførbarhet, basert på eksperimenter og analyser av realistiske scenarioer.

Hovedkonklusjon:

Ulike ventilasjonsstrategier kan benyttes for å redusere eksplosjonsrisikoen i batterirom. Valg av løsning bør baseres på batteriets *thermal runaway* karakteristikk. Dimensjonering av både rom og sikkerhetssystemer er i stor grad avhengig av batteriets innebygde sikkerhetsnivå, noe som understreker viktigheten av å velge batterier med god og relevant dokumentasjon fra batteritester.

Studien viser at ingen av de undersøkte tiltakene alene kan eliminere eksplosjonsrisikoen fullstendig, og det må derfor også etableres risikoreduserende tiltak for å håndtere konsekvensene av en eventuell deflagrasjon. På grunn av dette bør batterirom i størst mulig grad plasseres utenfor bygninger. Dersom dette ikke er mulig, bør de utformes slik at de enkelt kan ventileres direkte til det fri.

Det finnes flere modelleringsverktøy som kan simulere deler av en *thermal-runaway* hendelse, inkludert mulig deflagrasjon. Modellene er imidlertid i stor grad avhengige av korrekte randbetingelser og pålitelige inngangsparametere. Dette innebærer at modelleringen i praksis forutsetter tilgang til relevante og representative eksperimentelle data for å gi meningsfulle og troverdige resultater.

5 Referanser

- [1] Stortingsmelding nr. 16 (2023-2024) - Brann- og redningsvesenet — Nærhet, lokalkunnskap og rask respons i hele landet [Fire and rescue services — Proximity, local knowledge, and rapid response nationwide]. Justis- og beredskapsdepartementet [Ministry of Justice and Public Security].
- [2] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt, 'Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model', National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, NIST Special Publication 1018-1, 2023.
- [3] K. B. McGrattan, M. Randall, Vanella, Marcos, Mueller, Eric, Hostikka, Simo, and Floyd, Jason, 'Fire dynamics simulator technical reference guide volume 3: validation', National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, NIST special publication 1018-3, 2024.
- [4] K. B. McGrattan, 'Fire dynamics simulator (version 4): technical reference guide', NIST Spec. Publ., pp. 1–116, 2018.
- [5] OpenFOAM Foundation, www.openfoam.org, 2024.
- [6] M. Quant, O. Grönlund, J. Anderson, M. Höjgaard, J. Hynynen, and P. Andersson, 'Compartment explosions induced by batteries', RISE Research Institutes of Sweden, Fire and Safety, 2025:64, 2025.
- [7] Sjøfardsdirektoratet, 'Høring - Forslag til forskrift om skip som bruker batterisystem med litium-ion-celler som har en samlet kapasitet på 20 kWh eller mer', 02 Apr. 2025. [Online]. Available: <https://www.sdir.no/regelverk/horingsutlisting/>. [Accessed: 23 Oct. 2025].
- [8] 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.
- [9] 'ISO 6469-1:2019/Amd 1:2022, 2022. Electrically propelled road vehicles Safety specifications — Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS) AMENDMENT 1: Safety management of thermal propagation.' 2022.
- [10] S. Song et al., 'Fault evolution mechanism for lithium-ion battery energy storage system under multi-levels and multi-factors', J. Energy Storage, vol. 80, p. 110226, Mar. 2024.
- [11] 'Insights from EPRI's Battery Energy Storage Systems (BESS) Failure Incident Database: Analysis of Failure Root Cause'.
- [12] A. Schraiber, A. Barowy, B. Gaudet, and V. Kimmerly, 'Considerations for Fire Service Response to Residential Battery Energy Storage System Incidents', Dec. 2023.
- [13] Christoph Meraner, Kemal Sarp Arsavaa, and Tian Li, 'The effect of different trigger methods on the thermal runaway propagation in large-format lithium-ion battery modules', in Proceedings from the Eight International Conference on Fires in Vehicles, 2025, pp. 53–57.
- [14] A. Barowy, A. Klieger, J. Regan, and M. McKinnon, 'UL 9540A Installation Level Tests with Outdoor Lithium-ion Energy Storage System Mockups', UL Firefighter Safety Research Institute, Apr. 2021.
- [15] C. Sanfeliu Meliá, F. Vullum-Bruer, M. Pushp, and C. Meraner, 'Effect of heating rates on thermal runaway and gas composition in large Li-ion battery cell formats – An experimental study', Process Saf. Environ. Prot., vol. 202, p. 107803, Oct. 2025.
- [16] D. G. Goodwin, H. K. Moffat, I. Schoegl, R. L. Speth, and B. W. Weber, 'Cantera: An Object-oriented Software Toolkit for Chemical Kinetics, Thermodynamics, and Transport Processes'. Zenodo, 17 Nov. 2025.
- [17] Smith, Gregory P. et al., 'GRI-Mech 3.0: An optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion and NO formation', Gas Research Institute (GRI), Berkeley, CA, USA, 1999.
- [18] CEN, 'Gas cylinders - Gases and gas mixtures - Determination of fire potential and oxidizing ability for the selection of cylinder valve outlets (ISO 10156:2017)'. 2017.
- [19] X. Yang, W. Yang, C. Liu, and M. Yu, 'Experimental and kinetic study on the explosion characteristics of lithium-ion battery vented gases', J. Energy Storage, vol. 98, p. 113101, Sept. 2024.

- [20] R. Yu, J. Liu, W. Liang, C. K. Law, H. Wang, and M. Ouyang, 'On flammability limits of battery vent gas: Role of diffusion, radiation and chemical kinetics', *Combust. Flame*, vol. 249, p. 112631, Mar. 2023.
- [21] X. Liu, J. Tong, and X. Hu, 'Measurement and theoretical calculation on the flammability limits of lithium-ion battery vent gases', *J. Ind. Eng. Chem.*, p. S1226086X25006823, Oct. 2025.
- [22] H. Wang et al., 'Fire and explosion characteristics of vent gas from lithium-ion batteries after thermal runaway: A comparative study', *eTransportation*, vol. 13, p. 100190, Aug. 2022.
- [23] L. Zhao et al., 'The trade-off characteristic between battery thermal runaway and combustion', *Energy Storage Mater.*, vol. 69, p. 103380, May. 2024.
- [24] A. R. Baird, E. J. Archibald, K. C. Marr, and O. A. Ezekoye, 'Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas', *J. Power Sources*, vol. 446, p. 227257, Jan. 2020.
- [25] A. F. Alsewaleem et al., 'Near-field quantification of hydrogen fluoride emissions during Li-ion battery thermal runaway using laser absorption spectroscopy', *J. Power Sources*, vol. 667, p. 239221, Mar. 2026.
- [26] C. Qi et al., 'Research on the Thermal Runaway Behavior and Flammability Limits of Sodium-Ion and Lithium-Ion Batteries', *Batteries*, vol. 11, no. 1, p. 24, Jan. 2025.
- [27] T. Lian et al., 'Influence of Abuse Methods on Thermal Runaway in Lithium-Ion Cells: Measured Heats from Battery, Jet Flame, and Oxygen Depletion Calorimetry', *J. Electrochem. Soc.*, vol. 172, no. 8, p. 080517, July. 2025.
- [28] O. Willstrand, M. Pushp, P. Andersson, and D. Brandell, 'Impact of different Li-ion cell test conditions on thermal runaway characteristics and gas release measurements', *J. Energy Storage*, vol. 68, p. 107785, Sept. 2023.
- [29] C. Meraner, K. S. Arsava, and T. Li, 'The effects of different trigger methods on thermal runaway propagation in a 6.6 kWh lithium-ion pouch-cell battery module', *Future Batter.*, vol. 9, Feb. 2026.
- [30] Y. Sun et al., 'Internal pressure variation during the thermal runaway of lithium-ion batteries at different state-of-charge', *Appl. Therm. Eng.*, vol. 271, p. 126299, July. 2025.
- [31] B. Garberg, 'Case study of ventilation solutions and strategies for Li-ion battery rooms', *E3S Web Conf.*, in print. 2024.
- [32] C. Meraner, J. S. Fjærestad, F. Vullum-Bruer, M. Stefanska, and T. Li, 'Suppression of battery energy storage system fires', *Fire Saf. J.*, vol. 162, p. 104727, 2026.
- [33] Ben Gully et al., 'Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression', *DNV GL*, 2019–1025, Rev. 4, Nov. 2019.
- [34] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for Vapor Cloud Explosion, Pressure Vessel Burst, BLEVE, and Flash Fire Hazards*, 1st edn. Wiley, 2010.
- [35] 'EN 15004-1:2019 - Fixed fire fighting systems – Gas extinguishing systems – Part 1: Design, installation and maintenance (ISO 14520-1:2015, modified)', 02 Apr. 2019.
- [36] J. Weng et al., 'Alleviation on battery thermal runaway propagation: Effects of oxygen level and dilution gas', *J. Power Sources*, vol. 509, p. 230340, Oct. 2021.
- [37] 'EN 16750:2017 - Fixed firefighting systems — Oxygen reduction systems — Design, installation, planning and maintenance'. CEN, Brussels, 2017.
- [38] L. Barelli et al., 'Oxygen reduction approaches for fire protection to increase grid Li-ion BESS safety', *E3S Web Conf.*, vol. 238, p. 09001, 2021.
- [39] O. R. Hansen, F. Gavelli, S. G. Davis, and P. Middha, 'Equivalent cloud methods used for explosion risk and consequence studies', *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 3, pp. 511–527, May. 2013.
- [40] R. Peng et al., 'Thermal runaway modeling of lithium-ion batteries at different scales: Recent advances and perspectives', *Energy Storage Mater.*, vol. 69, p. 103417, May. 2024.
- [41] G. Wang et al., 'Advances and challenges in thermal runaway modeling of lithium-ion batteries', *The Innovation*, vol. 5, no. 4, p. 100624, July. 2024.
- [42] Y. Jin, Z. Zhao, S. Miao, Q. Wang, L. Sun, and H. Lu, 'Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station', *J. Energy Storage*, vol. 42, p. 102987, Oct. 2021.

- [43] M. Zhang et al., 'Simulation of Dispersion and Explosion Characteristics of LiFePO₄ Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Gases', *ACS Omega*, vol. 9, no. 15, pp. 17036–17044, Apr. 2024.
- [44] M. Henriksen, K. Vaagsaether, J. Lundberg, S. Forseth, and D. Bjerketvedt, 'Simulation of a premixed explosion of gas vented during Li-ion battery failure', *Fire Saf. J.*, vol. 126, p. 103478, Dec. 2021.
- [45] M. Henriksen, K. Vaagsaether, J. Lundberg, S. Forseth, and D. Bjerketvedt, 'Numerical study of premixed gas explosion in a 1-m channel partly filled with 18650 cell-like cylinders with experiments', *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 77, p. 104761, July. 2022.
- [46] R. Peng, P. Ping, G. Wang, X. He, D. Kong, and W. Gao, 'Numerical investigation on explosion hazards of lithium-ion battery vented gases and deflagration venting design in containerized energy storage system', *Fuel*, vol. 351, p. 128782, Nov. 2023.
- [47] Z. P. Bai, Y. Y. Yu, J. Y. Zhang, H. M. Hu, M. Y. Xing, and H. W. Yao, 'Study on fire characteristics of lithium battery of new energy vehicles in a tunnel', *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 186, pp. 728–737, June. 2024.
- [48] J. Xie, J. Li, J. Wang, and J. Jiang, 'Fire protection design of a lithium-ion battery warehouse based on numerical simulation results', *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 80, p. 104885, Dec. 2022.
- [49] S. Madhavan, D. Wu, T. Beji, and B. Merci, 'FDS modelling of fire spread in the bulk storage of lithium-ion batteries', in *4th European Symposium on Fire Safety Science*, 2024.
- [50] Z. Lou, J. Huang, Z. Su, D. Zhang, X. Wei, and H. Yao, 'Effects of ventilation conditions on thermal runaway of lithium-ion batteries packs in an energy-storage cabin', *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 196, p. 106899, Apr. 2025.
- [51] A. Kapahi, A. Alvarez-Rodriguez, S. Kraft, J. Conzen, and S. Lakshmipathy, 'A CFD based methodology to design an explosion prevention system for Li-ion based battery energy storage system', *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 83, p. 105038, July. 2023.
- [52] A. Kapahi et al., 'Performance-based assessment of an explosion prevention system for lithium-ion based energy storage system', *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 82, p. 104998, Apr. 2023.
- [53] Underwriters Laboratories, 'UL 9540A: Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems', Underwriters Laboratories, Northbrook, IL, USA, UL 9540A, 2019.
- [54] Y. Z. Li, 'CFD modelling of pressure rise in a room fire', *SP Rapport* 2015:08, 2015.
- [55] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, and M. Vanella, 'Fire Dynamics Simulator User's Guide', *NIST Spec. Publ.*, p. 434, May. 2022.
- [56] H. Sadeghi and F. Restuccia, 'Modelling 18650-type lithium-ion battery fires using surrogate fuels', *Fire Saf. J.*, vol. 156, p. 104464, Oct. 2025.
- [57] C. Meraner, Janne Siren Fjærestad, Dag Olav Snersrud, Maximilian Ludwig Weisbecker, and Tian Li, 'Battery Abuse Testing and Thermal Runaway Propagation', *Fire Technol.*, (under revision).
- [58] D. Zeinali, R. Stølen, and E. S. Skilbred, 'LASH FIRE D09.2 – Developed ro-ro spaces fire detection solutions and recommendations', *LASH FIRE deliverable report D09.2*, Aug. 2023.
- [59] T. Jespen, 'ATEX—Ignition Sources', in *ATEX—Explosive Atmospheres*, Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 163–169.
- [60] P. J. Bugryniec, E. G. Resendiz, S. M. Nwophoke, S. Khanna, C. James, and S. F. Brown, 'Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds', *J. Energy Storage*, vol. 87, p. 111288, May. 2024.
- [61] Q. Li, Y. Zhang, B. Mao, and Z. Huang, 'Effects of electrolyte vapor condensation on the transport characteristics of gas-aerosol ejecta from lithium iron phosphate batteries thermal runaway', *J. Energy Storage*, vol. 141, p. 119232, Jan. 2026.
- [62] Z. Cheng et al., 'A distributed thermal-pressure coupling model of large-format lithium iron phosphate battery thermal runaway', *Appl. Energy*, vol. 378, p. 124875, Jan. 2025.
- [63] 'Technical Support for Aps Related to McMicken Thermal Runaway and Explosion McMicken Battery Energy - Storage System Event Technical Analysis and Recommendations', *DNV GL - Energy*, Chalfont, PA 18914 USA, 10209302-HOU-R-01, July. 2020.

- [64] ‘Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems’. Quincy, MA, 2026.
- [65] R. A. Ogle, ‘Explosion hazard analysis for an enclosure partially filled with a flammable gas’, *Process Saf. Prog.*, vol. 18, no. 3, pp. 170–177, Sept. 1999.
- [66] Direktoratet for byggkvalitet, Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning. 2017.

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

RISE Fire Research
RISE Rapport: 2026:61
ISBN: 978-91-90109-90-8

