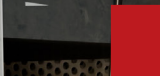


Explosieveiligheid lithium-ion energieopslagsystemen





Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2024

Auteurs T. van Harn, H. Brans en J. Reinders
Contactpersoon T. Hessels

Datum 20 november 2024

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.



Inhoud

Abstract	4
Samenvatting	5
Inleiding	6
1 Explosies bij een thermal runaway	9
1.1 Thermal runaway	9
1.2 Gasmengsel bij thermal runaway	9
1.3 Samenstelling van de vrijkomende gassen	10
1.4 Systeembeschrijving EOS	11
1.5 Faalmechanisme explosie	12
2 Standaardmengsel	14
2.1 Inleiding	14
2.2 LEL en UEL van gasmengsels	14
2.3 Standaardmengsels	15
3 Bestaande (internationale) richtlijnen en regelgeving voor maatregelen	17
3.1 Relevante richtlijnen	17
3.2 NFPA 855	18
3.3 PGS 37-1	20
3.4 RISE Guidelines for the fire protection of battery energy storage systems	21
3.5 Overzicht vereisten in richtlijnen per maatregel	23
4 Evaluatie en effectiviteit van maatregelen	26
4.1 Inleiding	26
4.2 Kansbeperkende maatregelen	26
4.3 Effectbeperkende maatregelen	28
4.4 Niet-effectieve maatregelen	29
5 Conclusie	30
Literatuur	32
Bijlage 1	34

Abstract

In this study, insight was gained into measures that can reduce explosion risk. In addition, a standard gas mixture has been formulated that can be used to model the explosion effects. The research focuses on Battery Energy Storage Systems for large-scale energy storage, which contain racks of lithium-ion batteries and are placed in a free-standing unit.

To model the effects of an explosion in an BESS, an understanding of the amount and composition of the gases released during a thermal runaway is necessary. The literature studied showed that more than 30 different types of flammable gas are released. The exact composition and volume of the gases released vary greatly depending on the type of battery and incident. A large number of components are released in small quantities. Hydrogen, hydrocarbons and carbon monoxide are the flammable components released in the largest quantities. In addition, evaporated solvents from the electrolyte contribute to the explosive mixture. No data were found on the magnitude of the concentrations of evaporated solvents.

Based on the gas components occurring in the highest quantities, standard mixtures for two commonly used Li-ion subtypes, LFP (lithium-iron-phosphate) and NMC (nickel-manganese-cobalt-oxide), have been formulated in cooperation with RIVM, for which the lower and upper explosion limits (often referred to as LEL and UEL) have been determined. For the LFP subtype, the LEL of the standard mixture is 3.9 vol% and the UEL is 32.4 vol%. For the standard mixture of the NMC subtype, the LEL is 4.7 vol% and the UEL 37.7 vol%.

To understand existing measures, guidelines providing information on the safe installation and management of BESS were studied. Two conference presentations by experts on explosion safety devices for BESS were also used. In addition, Elsevier Science and Google Scholar were used to gather scientific literature on the (effectiveness of) safety measures.

Ventilation to keep gas concentrations below the explosion limit and explosion vents to safely vent overpressure have been proven to be effective. For ventilation to function effectively, ventilation speed, sufficient distance from air intakes, ability to tolerate high temperatures and avoidance of ignition sources are important parameters. However, there is currently no standard recommended specification for ventilation of an BESS. In addition, studied literature shows that there is still no consensus on whether ventilation is sufficiently effective in all cases. Regarding explosion vents, it can be stated that they are preferably placed in the roof. If they are placed elsewhere, they should not face routes used for evacuation or emergency services. Furthermore, the necessary facilities must be in place to activate both systems (monitoring, signalling and alarms).

Samenvatting

In dit onderzoek is inzicht verkregen in maatregelen die het explosierisico kunnen beperken. Daarnaast is er een standaardgasmengsel opgesteld waarmee de explosie-effecten kunnen worden gemodelleerd. Het onderzoek richt zich op EOS'en voor grootschalige energieopslag, die opstellingen van lithium-ion batterijen bevatten en zijn geplaatst in een vrijstaande unit.

Om de effecten van een explosie in een EOS te kunnen modelleren, is inzicht in de hoeveelheid en samenstelling van de vrijkomende gassen tijdens een thermal runaway noodzakelijk. Uit de bestudeerde literatuur bleek dat meer dan dertig verschillende soorten brandbaar gas vrijkomen. De exacte samenstelling en het volume van de vrijkomende gassen verschillen sterk per type batterij en incident. Een groot aantal componenten komt in kleine hoeveelheden vrij. Waterstof, koolwaterstoffen en koolmonoxide zijn de brandbare componenten die in de grootste hoeveelheden vrijkomen. Daarnaast leveren verdampte oplosmiddelen uit de elektrolyt een bijdrage aan het explosieve mengsel. Over de grootte van de concentraties van de verdampte oplosmiddelen zijn geen gegevens gevonden.

Op basis van de meest voorkomende gascomponenten zijn, in samenwerking met het RIVM, voor twee veel gebruikte Li-ion subtypen, LFP (lithium-ijzer-fosfaat) en NMC (nikkel-mangaan-kobalt-oxide), standaardmengsels samengesteld, waarvoor de onderste en bovenste explosiegrens (vaak aangeduid als LEL en UEL) zijn bepaald. Voor het subtype LFP bedraagt de LEL van het standaardmengsel 3,9 vol% en de UEL 32,4 vol%. Voor het standaardmengsel van het subtype NMC bedraagt de LEL 4,7 vol% en de UEL 37,7 vol%.

Om inzicht te krijgen in reeds bestaande maatregelen zijn richtlijnen bestudeerd die informatie bieden over het veilig installeren en beheren van EOS'en. Ook is gebruikgemaakt van twee conferentiepresentaties van experts op het gebied van explosie veiligheidsvoorzieningen voor EOS'en. Daarnaast zijn Elsevier Science en Google Scholar gebruikt om wetenschappelijke literatuur te verzamelen over de (effectiviteit van) veiligheidsmaatregelen.

Ventilatie om gasconcentraties beneden de explosiegrens te houden en explosieluiken om druk veilig te kunnen afvoeren zijn hierbij effectief gebleken. Om ventilatie effectief te laten functioneren zijn ventilatiesnelheid, voldoende afstand tot luchtinlaten, het kunnen verdragen van hoge temperaturen en vermindering van ontstekingsbronnen belangrijke parameters. Er is momenteel echter nog geen eenduidige aanbevolen specificatie voor de ventilatie van een EOS. Daarnaast blijkt uit bestudeerde literatuur dat er nog geen consensus is over de vraag of ventilatie in alle gevallen voldoende effectief is. Wat betreft explosieluiken kan worden gesteld dat deze bij voorkeur in het dak worden geplaatst. Als zij elders geplaatst worden, mogen zij niet gericht zijn op routes die worden gebruikt voor evacuatie of door hulpdiensten. Verder geldt dat de noodzakelijke voorzieningen aanwezig moeten zijn om beide systemen kunnen activeren (monitoring, signalering en alarmering).

Inleiding

Vanwege de gestelde klimaatdoelen voor 2030 ontstaat er een toename in het gebruik van duurzame energie, zoals zon- en windenergie. Het aanbod van deze soorten energie fluctueert sterk vanwege weersomstandigheden. Ze worden opgewekt in pieken en dalen, afhankelijk van de hoeveelheid zon en wind. Energieopslagsystemen (verder: EOS'en) kunnen helpen om deze pieken en dalen op te vangen door elektrische energie tijdens overcapaciteit op te slaan, zodat deze op een later moment kan worden gebruikt bij bijvoorbeeld ondercapaciteit. EOS'en kunnen ook gebruikt worden op bijvoorbeeld evenementen- of bouwlocaties waar geen netaansluiting aanwezig is, of als buurtbatterij in woonwijken voor het oplossen van lokale netproblemen (Tennet, n.d.; Stedin, n.d.; van Cappellen et al., 2023).

EOS'en zijn beschikbaar in vele soorten en maten met verschillende capaciteit. Thuisbatterijen hebben doorgaans een capaciteit van 5 tot 20 kWh en worden gezien als kleinschalig. Grootschalige EOS'en kunnen variëren in grootte van bijvoorbeeld een buurtbatterij van 500 kWh tot een groot energieopslagpark van 20 MWh beslaan bestaande uit meerdere units. Dergelijke grote EOS'en bevatten opstellingen van batterijen, geplaatst in een inpandige ruimte of unit van het formaat van bijvoorbeeld een bushokje of zeecontainer.

Hoewel er onderzoek wordt gedaan naar nieuwe batterijtechnologieën die voor EOS'en kunnen worden gebruikt, bevatten EOS'en momenteel nog voornamelijk lithium-ion batterijen. Deze kunnen in een thermal runaway raken, waarbij brandbare en giftige gassen vrijkomen. Wanneer de brandbare gassen niet direct ontsteken, bestaat er een kans op vertraagde ontsteking, met mogelijk een explosie als gevolg indien deze gassen zich hebben kunnen ophopen in een besloten ruimte (NIPV, 2023). Dergelijke incidenten hebben zich al voorgedaan, zoals in Beijing (CTIF, 2021), waar drie dodelijke slachtoffers vielen, en in Arizona, waar vier brandweerlieden ernstig gewond raakten (FSRI, 2020).

Doel en vraagstelling

Het doel van dit onderzoek is om parameters vast te stellen waarmee de effecten van een explosie in een EOS kunnen worden gemodelleerd en om inzicht te krijgen in maatregelen die het explosierisico kunnen beperken. Om dit doel te bereiken zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

- 1 Welke gassen bij een thermal runaway veroorzaken explosiegevaar en in welke concentratie komen deze gassen vrij?
- 2 Wat is een geschikt standaardgasmengsel voor de explosiemodellering en wat zijn de bijbehorende 'Lower Explosion Limit' (LEL) en 'Upper Explosion Limit' (UEL)¹ van dit gasmengsel?

¹ In de literatuur worden ook wel de termen Lower Flammability Limit (LFL) en Upper Flammability Limit (UFL) gebruikt. Deze geven respectievelijk de laagste en hoogste waarde weer van het concentratiegebied waarbinnen een brandbaar gas in lucht kan worden ontstoken. In de context van explosies wordt doorgaans over Explosion Limits gesproken, terwijl Flammability Limits doorgaans worden gehanteerd als het gaat om vlamvorming en verbranding (California Institute of Technology, n.d.).

- 3 Welke veiligheidsmaatregelen staan in relevante richtlijnen beschreven voor het beperken van het explosiegevaar?
- 4 Wat is in de wetenschappelijke literatuur en richtlijnen bekend over de effectiviteit van maatregelen voor het beperken van explosiegevaar?

Afbakening

Dit onderzoek richt zich op EOS'en die opstellingen van lithium-ion batterijen bevatten, zijn geplaatst in een vrijstaande unit en worden toegepast voor grootschalige energieopslag. We kijken alleen naar de brandbare gassen die vrijkomen en de mogelijke explosieve effecten daarvan. Andere effecten van een thermal runaway blijven buiten beschouwing.

Onderzoeksmethode

Uit eerder onderzoek van het NIPV is gebleken dat er een grote variatie bestaat in samenstelling en volume van het gasmengsel dat vrijkomt bij een thermal runaway (NIPV, 2023). Om in de toekomst scenario's uit te kunnen werken, is het van belang om parameters vast te stellen waarmee kan worden gerekend. Hiervoor is een literatuurstudie uitgevoerd en zijn rapporten bestudeerd die experimenten beschrijven over de LEL, UEL en calorische waarde van gasmengsels die vrijkomen bij een thermal runaway. Daarnaast is samengewerkt met het RIVM², dat vanwege zijn taak om rekeninstrumenten te ontwikkelen voor omgevingsveiligheid, ook op zoek is naar parameters voor modellering van gasexplosies als gevolg van thermal-runaway-reacties.

Om inzicht te krijgen in reeds bestaande maatregelen zijn richtlijnen bestudeerd die informatie bieden voor het veilig installeren en beheren van EOS'en: de NFPA 855³, PGS⁴-37-1 en de 'Guidelines for the protection of battery energy storage systems' die zijn opgesteld door het Zweedse onderzoeksinstituut RISE. Ook is gebruikgemaakt van informatie op het gebied van explosieveiligheid van EOS'en verstrekt door experts gedurende de 'EU Energy Storage Systems Safety Conference 2023'⁵, georganiseerd door het NIPV. Verder is gebruikgemaakt van de wetenschappelijke databases Elsevier Science en zoekmachine Google Scholar om wetenschappelijke literatuur te verzamelen over de (effectiviteit van) veiligheidsmaatregelen. Onder meer de volgende zoektermen zijn gebruikt:

- > Energy storage system explosion
- > Battery fire and explosion risk
- > Thermal runaway explosion risk
- > Explosion protection energy storage systems
- > Delayed deflagrations in energy storage systems.

Er is een selectie gemaakt van relevante artikelen die zijn gepubliceerd vanaf 2020.

² Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

³ National Fire Protection Association.

⁴ Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen.

⁵ [Verslag EU Energy Storage Systems Safety Conference 2023](#). Par. 1.6: Matthew Paiss en par. 1.11: Jens Conzen.

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt ingegaan op het verschijnsel thermal runaway, de gasmengsels die daarbij vrijkomen en de explosie die het gevolg kan zijn van een thermal runaway. Hoofdstuk 2 bevat een beschrijving van het standaardgasmengsel en de bijbehorende LEL en UEL. Hoofdstuk 3 behandelt de bestaande (internationale) richtlijnen en regelgeving. In hoofdstuk 4 worden deze richtlijnen en regels geëvalueerd en beoordeeld op hun effectiviteit. Dit rapport sluit af met de conclusie in hoofdstuk 5.

1 Explosies bij een thermal runaway

1.1 Thermal runaway

Uit onderzoek naar het ontstaan van een thermal runaway bij lithium-ion batterijsystemen en de mogelijke effecten daarvan^{6,7} is gebleken dat door elektrische, mechanische of thermische oorzaken het elektrochemisch evenwicht in het inwendige van een batterijcel verstoord kan raken. Voorbeelden hiervan zijn respectievelijk overladen, doorboring en oververhitting. Als gevolg hiervan ontstaan ongewenste processen in de vorm van exotherme reacties waarbij hitte vrijkomt, evenals een grote hoeveelheid toxische en brandbare gassen. Hierdoor raakt het inwendige van de batterij nog verder beschadigd en warmt de batterijcel verder op. De ongewenste processen kunnen al beginnen bij een temperatuur vanaf 60 °C en zodra een temperatuur rond de 200 °C wordt bereikt (afhankelijk van het subtype Li-ion batterij), gaan de exotherme reacties en hitteontwikkeling elkaar versterken. In wezen houdt het ongewenste proces zichzelf vanaf dat moment in stand en nemen de ongewenste reacties (met hittevorming en drukopbouw door de gevormde gassen) gestaag toe. Er is dan sprake van een **thermal runaway** (NIPV, 2023).

De verhitte batterijcel breekt als gevolg hiervan open, waardoor de gevormde brandbare en toxische gassen vrijkomen. Het openbreken van batterijcellen maakt een ploffend geluid en het vrijkomen van de gassen een sissend geluid. Dit is vergelijkbaar met het ontsnappen van gas uit een druktank. Door **thermische propagatie** (aanstraling van naburige batterijcellen) zal het proces zich uitbreiden naar andere batterijcellen en daaropvolgend batterijmodules, waardoor deze ook in thermal runaway raken. Dit proces kan lange tijd (vele uren tot wel dagen) duren, afhankelijk van de mate van uitbreiding van de thermal runaway en de grootte van het systeem. Het gevolg hiervan is, dat een groot aantal batterijcellen brandbare en toxische gassen kunnen produceren, zolang dit proces voortduurt (NIPV, 2023).

1.2 Gasmengsel bij thermal runaway

In Figuur 1.1 is de gevormde gaswolk zichtbaar van een batterijmodule die in een experiment tot thermal runaway is gebracht. Hierin is zichtbaar dat de gevormde gassen deels opstijgen, en zich deels laag over de grond verspreiden. Dit wordt verklaard door het feit dat er gassen vrijkomen die zowel lichter als zwaarder dan lucht zijn, ofwel een kleinere en grotere dichtheid dan lucht hebben. Hierbij dient opgemerkt te worden dat het experiment onder gecontroleerde omstandigheden is uitgevoerd (Christensen, 2022). Uit praktijkervaringen tijdens incidenten blijkt dat deze scheiding in een lichter-dan-lucht-component en zwaarder-dan-lucht-component niet altijd wordt gezien (NIPV, 2023). Daadwerkelijke incidenten zijn immers onvoorspelbaarder en chaotischer van aard dan experimenten onder

⁶ Zie voor een uitgebreide omschrijving de [scenariokaart Li-ion Buurbatterij in kelder](#).

⁷ In onze [explainer video](#) wordt het begrip thermal runaway in detail uitgelegd.

gecontroleerde omstandigheden, waardoor de verschillende gassen meer met elkaar vermengd zijn.



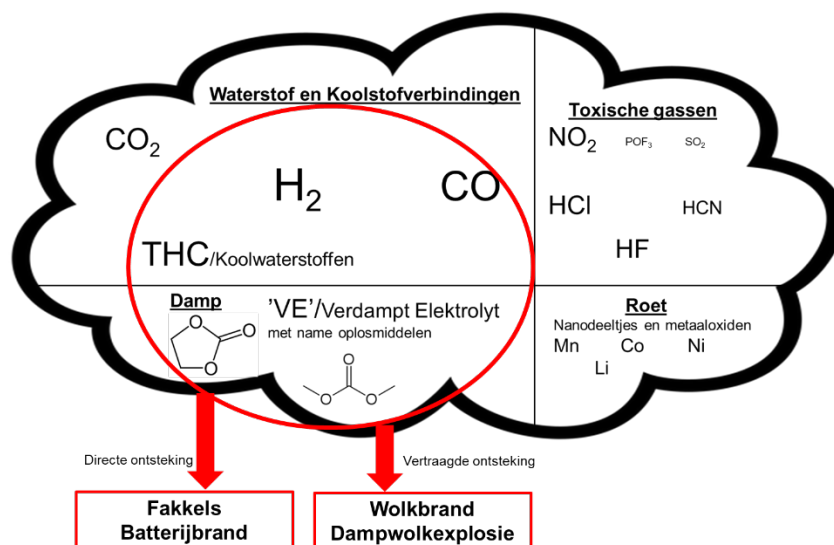
Figuur 1.1 Vrijkomende dampwolk uit 1,7 kWh module (1 minuut en 25 seconden na initiatie van de thermal runaway) (Christensen, 2022)

1.3 Samenstelling van de vrijkomende gassen

De samenstelling en het volume van de vrijkomende gassen verschillen sterk per type batterij en incident. Dit betekent dat er een grote brandbreedte bestaat met betrekking tot zowel gasvolume als gassamenstelling. Het gerapporteerde totaalvolume van de gevormde gaswolk varieert tussen de 500 en 6000 l/kWh (Jin et al., 2021; Christensen, 2023). Dit wil zeggen dat uit een batterijmodule met een energie-inhoud van 1 kWh in totaal tussen de 500 en 6000 liter gassen en dampen kan vrijkomen.

Tijdens een thermal runaway kunnen meer dan dertig verschillende soorten brandbare gassen vrijkomen. Veel gassen komen in kleine hoeveelheden vrij (Wang et al., 2024), en worden in dit rapport niet benoemd. Figuur 1.2 geeft de meest voorkomende gassen weer die vrijkomen tijdens een thermal runaway. De grootte van de letters correspondeert enigszins met de concentratie. Met een rode cirkel zijn de brandbare gassen omcirkeld die in onze studie zullen worden besproken. Deze gassen kunnen namelijk leiden tot fakkels (bij een directe ontsteking) of tot een dampwolkexplosie (bij vertraagde ontsteking). Het betreft:

- > H₂, waterstof
- > THC (Total Hydrocarbon Content), koolwaterstoffen, zoals methaan ethaan en propaan
- > CO, koolmonoxide
- > VE, verdampte elektrolyt.



Figuur 1.2 Schematische weergave dampwolk thermal runaway

Uit de elektrolyt van lithium-ion batterijen kunnen organische oplosmiddelen als ethylacetaat, dimethylacetaat, ethyleencarbonaat of di-ethylcarbonaat verdampen en/of door chemische reacties tot andere componenten reageren (Jin et al., 2021). Uit material safety data sheets (MSDS) blijkt dat de totale batterijcel-inhoud voor 5-25 % uit deze stoffen bestaat (Pubchem, n.d.; Ansmann, 2015; ICSC, 2021). Het is echter onbekend in welke concentraties ze verdampen dan wel verder reageren. De toxische gassen en roetdeeltjes uit de figuur vallen in deze studie buiten beschouwing, want deze dragen niet bij aan een explosie. Van de andere gassen is in Tabel 1.1 de bandbreedte van gerapporteerde concentraties weergegeven.

Tabel 1.1 Concentraties brandbare gassen (bron: Scenarioboek NIPV)

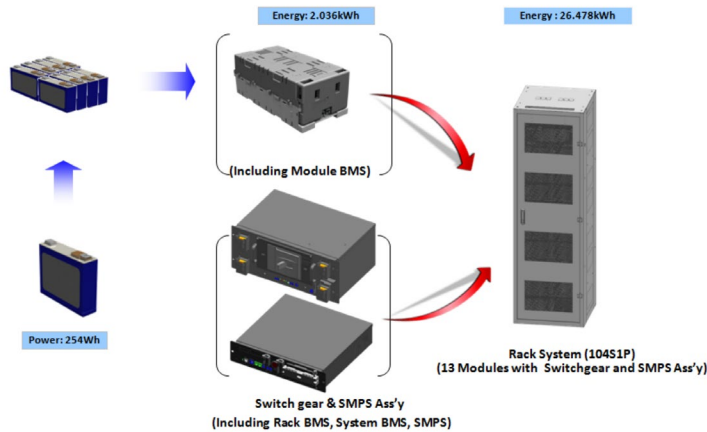
Afkorting	Product	Vol%
H ₂	Waterstof	15-45 vol%
THC	Koolwaterstoffen (methaan, ethaan, propaan enz.)	9-36 vol%
CO	Koolmonoxide	7-38 vol%

1.4 Systeembeschrijving EOS

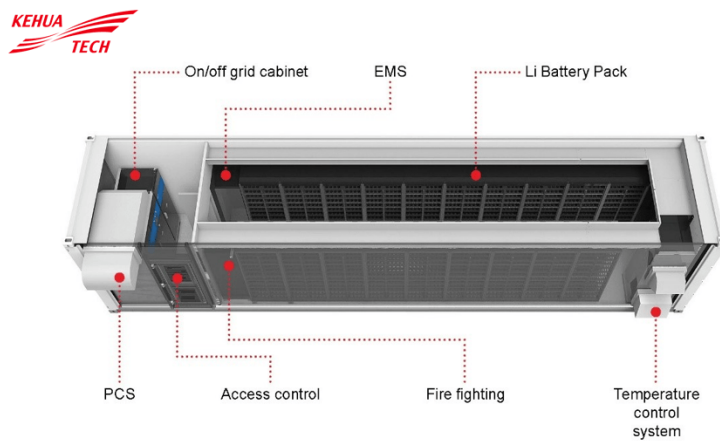
Een groot EOS is in Nederland vaak opgebouwd uit een grote container waarbinnen verschillende racks zijn geplaatst. In de Nederlandse PGS 37-1 wordt dit een zogeheten 'typical 1' genoemd: 'zelfstandig EOS in een (aangepaste) container'⁸ (zie paragraaf 3.3). De racks in het EOS zijn opgebouwd uit modules met individuele batterijcellen. Dit is weergegeven in Figuur 1.3 en Figuur 1.4. Elke module is voorzien van een batterijmanagementsysteem (BMS). Het BMS zorgt ervoor dat de batterij binnen de operationele grenzen werkt, en zorgt daarmee voor de veiligheid. Daarnaast is een EOS voorzien van een Power Conversion System (PCS) dat de aansluiting met het elektriciteitsnet regelt, en een

⁸ Zelfstandig wil zeggen een vrijstaande unit die onafhankelijk kan opereren.

energiemanagement systeem (EMS) dat de batterij aanstuurt en regelt wanneer wordt opgeladen en ontladen.



Figuur 1.3 Opbouw rack en modules in een EOS (bron: Kehua Tech)



Figuur 1.4 Opbouw EOS container met meerdere racks (bron: Kehua Tech)

1.5 Faalmechanisme explosie

Het bij de thermal runaway vrijkomende gasmengsel zal in de meeste gevallen direct ontsteken, waardoor er in principe geen explosiegevaar is. Wanneer dit niet het geval is, kan het gasmengsel zich verspreiden en ophopen in (deels) besloten ruimtes, bijvoorbeeld in de open ruimtes tussen de batterijmodules in een EOS. Vertraagde ontsteking van dit opgehoopte gas kan een explosie tot gevolg hebben (NIPV, 2023). Over het algemeen lijkt het vrijkomen van gas en het niet direct ontsteken daarvan relatief vaak plaats te vinden bij batterijen met een lagere state of charge (Lakshmi et al., 2023). Dit wordt verklaard door het feit dat bij een thermal runaway bij een lagere state of charge minder hitte vrijkomt, waardoor zelfontsteking minder waarschijnlijk is.

Wanneer een gasmengsel vrijkomt uit batterijcellen in thermal runaway, zal het zich verspreiden in de open ruimtes van een EOS. Wanneer meer cellen falen en de concentratie van het explosieve mengsel boven de UEL komt, kan de inmenging van lucht, bijvoorbeeld door het openen van de deur, op een later moment het mengsel binnen de explosiegrenzen brengen (Lakshmipathy et al., 2023).

Potentiële ontstekingsbronnen van het gasmengsel binnen een EOS zijn hete oppervlakken, hoge uitstoottemperaturen van gas en onder spanning staande elektrische apparatuur (Lakshmipathy et al., 2023).

2 Standaardmengsel

2.1 Inleiding

In hoofdstuk 1 is aangegeven dat er een grote spreiding bestaat in de hoeveelheden brandbare gassen die vrijkomen bij een thermal runaway. Mede hierdoor is moeilijk te voorspellen wanneer een explosie gaat plaatsvinden, zelfs als er voldoende data van de gasconcentraties beschikbaar zijn (Klieger et al., 2021). Toch geven dergelijke waarden wel inzicht in het explosiegevaar en kunnen ze richting geven aan de systeemvereisten waaraan een installatie moet voldoen. Daarom is een standaard gasmengsel samengesteld, waarvan de explosiegrenzen (LEL en UEL) zijn bepaald. Dit kan onder meer worden gebruikt om de effecten van explosies te modelleren.

2.2 LEL en UEL van gasmengsels

De Lower Explosion Limit (LEL) en Upper Explosion Limit (UEL) zijn de onder- en bovengrens van het concentratiegebied van een brandbaar gas in lucht waarbinnen dit gas kan ontsteken. De LEL en UEL worden vaak uitgedrukt in volumepercentages⁹ (vol%). Het brandbare gasmengsel is explosief wanneer de concentratie daarvan tussen de LEL en UEL ligt (Projectmaterials, n.d.; Zlochower & Green, 2009). Voor de bepaling van de LEL en UEL van een mengsel van verschillende gassen kan gebruik worden gemaakt van het principe van 'Mole Le Chartelier', weergegeven in onderstaand kader. Deze methode is hier toegepast.

Le Chartelier

Het principe van Le Chartelier is een methode om de LEL en UEL van een gasmengsel te bepalen. Hiervoor zijn de volumepercentages van de gassen uit het mengsel nodig, evenals hun individuele LEL en UEL. Met onderstaande formule kan vervolgens de LEL en UEL van het mengsel worden bepaald (McMurry et al., 2016).

$$LEL_{mengsel} = \left(\sum_i \frac{y_i}{LEL_i} \right)^{-1}$$

$$UEL_{mengsel} = \left(\sum_i \frac{y_i}{UEL_i} \right)^{-1}$$

y_i = Volumefractie component i (vol%)

LEL_i = LEL-waarde van component i (vol%)

UEL_i = UEL-waarde van component i (vol%)

$LEL_{mengsel}$ = LEL-waarde van het explosieve mengsel (vol%)

$UEL_{mengsel}$ = UEL-waarde van het explosieve mengsel (vol%).

⁹ Het percentage van het volume dat het explosieve gasmengsel inneemt ten opzichte van het totale volume van alle gassen.

2.3 Standaardmengsels

Tijdens het uitvoeren van deze studie was het RIVM bezig met een voorbereidende studie voor de ontwikkeling van een standaard rekenmethodiek voor onder meer de modellering van de effecten van explosies in EOS'en. In samenwerking met het RIVM is daarom een explosief standaardmengsel bepaald, waarmee een realistisch worst-case-scenario wordt benaderd. Uitgaan van realistische worst-case scenario's is gebruikelijk binnen de scenario-ontwikkeling voor omgevingsveiligheid en externe veiligheid.

Voor het bepalen van de standaardmengsels zijn met literatuurgegevens (Versluis & Wijten, 2024; Baird et al., 2020; Gully et al., 2019) LEL- en UEL-waarden van gaswolken die vrijkomen bij een thermal runaway en volumepercentages van explosieve gassen binnen deze gaswolken achterhaald. Vervolgens is een selectie gemaakt van gassen waarmee is bepaald welke volumepercentages hiervan binnen een gaswolk aanwezig moeten zijn om LEL- en UEL-waarden te verkrijgen die overeenkomen met waarden uit experimenten beschreven in de literatuur. De (vijf) meest voorkomende gassen in de mengsels zijn meegenomen in de bepaling van de explosiegrenzen. De gassen die niet zijn meegenomen, komen in geringe hoeveelheden vrij en verschillen wat betreft de LEL en UEL weinig van de gassen die wel zijn meegenomen. Daarom menen wij dat de groep van vijf gassen voldoende representatief is om de explosie-effecten te modelleren.

Er bestaat een groot aantal verschillende typen Li-ion batterijen. Veel toegepast zijn LFP¹⁰ en NMC¹¹. Voor deze twee batterijtypes zijn standaardmengsels bepaald van de gassen die vrijkomen bij een thermal runaway. Deze zijn weergegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Samenstelling explosieve standaardmengsels

Brandbaar gas	Gasconcentratie bij type LFP (vol%)	Gasconcentratie bij type NMC (vol%)
Waterstof	45	45
Methaan	0	14
Ethaan	23,1	7
Ethyleen	13,7	7
Koolmonoxide	18,2	27
Totaal	100	100

Daarnaast is ervoor gekozen om verdampte oplosmiddelen uit de elektrolyt niet mee te nemen in het standaardmengsel en dit aandeel te vervangen door een bijdrage van koolwaterstoffen. Redenen hiervoor zijn een te grote onzekerheid in de hoeveelheden elektrolyt die daadwerkelijk verdampen en de mate waarin deze stoffen reageren tot andere componenten. Bovendien zijn de verschillen wat betreft relevante eigenschappen als LEL, UEL en calorische waarde van deze stoffen in verhouding tot de koolwaterstoffen slechts klein.

¹⁰ Lithium-ijzer-fosfaat (Lithium Ferro Phosphate).

¹¹ Nikkel-mangaan-kobaltoxide (Nickel Manganese Cobalt oxide).

Met de formule van Mole Le Chartier zijn voor de samengestelde mengsels uit tabel 2.1 de LEL- en UEL-waarden van het LFP- en NMC-type berekend, gebruikmakend van de LEL- en UEL-waarden van de afzonderlijke componenten zoals te vinden in bijlage 1. Deze zijn weergegeven in de tabellen 2.2. en 2.3 (tweede kolom). Deze waarden zijn vergeleken met in de literatuur aanwezige en experimenteel bepaalde waarden van LEL en UEL (Versluis & Wijten, 2024; Wang et al., 2024). Voor LFP-batterijen zijn acht waarden voor LEL en UEL gevonden. Voor het NMC-batterijtype waren dit er negen. In tabel 2.2 en Tabel 2.3 zijn de hoogste en laagste literatuurwaarden weergegeven in de laatste kolom.

Tabel 2.2 LEL en UEL van het standaardmengsel voor LFP en experimenteel bepaalde waarden uit de literatuur.

Type LFP	Standaardmengsel	Bandbreedte in bestudeerde literatuur
LEL	3,9 vol%	3,9 – 6,2 vol%
UEL	32,4 vol%	27,6 – 43,6 vol%

Tabel 2.3 LEL en UEL van het standaardmengsel voor NMC en experimenteel bepaalde waarden uit de literatuur.

Type NMC	Standaardmengsel	Bandbreedte in bestudeerde literatuur
LEL	4,7 vol%	5,0 – 9,75 vol%
UEL	37,7 vol%	31,4 – 46,8 vol%

Uit de tabellen is op te maken dat de LEL-waarden van het standaardmengsel aan de onderkant van de marges liggen van de waarden die met een experimentele meting zijn verkregen. Omdat bij modellering in het algemeen de effecten niet mogen worden onderschat, betekent dit dat de standaardmengsels geschikt kunnen worden geacht voor modellering van de explosie-effecten als gevolg van een thermal runaway van LFP en NMC-batterijen.

3 Bestaande (internationale) richtlijnen en regelgeving voor maatregelen

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de reeds bestaande richtlijnen en regelgeving met betrekking tot EOS'en, waarbij specifiek wordt gekeken naar de gestelde veiligheidseisen en maatregelen om het explosiegevaar te beperken. Er zijn drie richtlijnen bestudeerd, namelijk NFPA 855, PGS 37-1 en de richtlijnen uit het document van RISE; een kort overzicht is te vinden in paragraaf 3.1. In de paragrafen 3.2 tot en met 3.4 is een overzicht gegeven van de gestelde veiligheidseisen omtrent explosiegevaar uit respectievelijk NFPA 855, PGS37-1 en de richtlijnen uit het document van RISE. Een vergelijking tussen de drie richtlijnen is te vinden in paragraaf 3.5.

3.1 Relevante richtlijnen

3.1.1 Overzicht

NFPA 855 (NFPA, 2023) is een recente Amerikaanse norm die zich volledig richt op de installatie van een EOS. Deze norm wordt in een publicatie van de International Code Council¹² uit 2022 als de meest relevante en recente richtlijn beschouwd (International Code Council, 2022). De redenen hiervoor zijn dat NFPA 855 aandacht heeft voor een breed scala aan technologieën en belangrijke toepassingen, waaronder explosiebeheersing. Daarnaast omvat NFPA 855 andere normen zoals UL9540¹³. Het document beschrijft de minimale vereisten om gevaren omtrent EOS'en te mitigeren. Er wordt in NFPA 855 gekeken naar het ontwerp, de constructie, installatie, inbedrijfstelling en werking van EOS'en, evenals naar onderhoud en de buitengebruikstelling.

PGS-37-1 (PGS, 2023): *Lithiumhoudende energiedragers* is een Nederlandse richtlijn voor de veilige opslag van elektriciteit in EOS'en. Deze richtlijn bevat maatregelen voor het veilig opslaan en gebruiken van grote lithium-ion batterijen. Het doel is om het risico op potentieel gevaarlijke situaties, waaronder explosies, te minimaliseren.

Guidelines for the fire protection of battery energy storage systems (Grönlund et al., 2023). Deze richtlijnen zijn gepubliceerd in 2023 en geschreven door de Zweedse onderzoeksinstelling RISE (Research Institute of Sweden). Het document, dat zowel richtlijnen als onderzoek bevat, is gepubliceerd, omdat er in Zweden nog geen nationale richtlijnen zijn voor het ontwerpen van EOS'en met betrekking tot brandveiligheid. Momenteel moeten

¹² De International Code Council is een wereldwijde bron van modelcodes en -normen die zich richten op bouwveiligheid.

¹³ Norm die wordt gebruikt voor het goedkeuren van EOS'en en die een reeks onderwerpen behandelt, waaronder bouwmaterialen en elektrische bedrading. Goedkeuring volgens UL9540 is een vereiste van NFPA 855 (International Code Council, 2022).

gemeenten en de lokale brandweer hun eigen eisen formuleren, wat kan leiden tot inconsistenties en een verschillende mate van bescherming (Grönlund et al., 2023).

3.1.2 Testmethode voor het ontwerp van maatregelen

In de bestudeerde richtlijnen wordt veelvuldig gerefereerd naar de testmethode uit UL 9540A, waarmee de specificaties van de maatregelen kunnen worden vastgesteld. Dit is een testmethode die is ontwikkeld voor het kwantificeren van brand- en explosiegevaar bij EOS'en. Met deze methode kunnen testgegevens op cel-, module-, en rackniveau worden verkregen, die gebruikt kunnen worden bij het ontwerpen van maatregelen (Barowy et al., 2022). De data die worden gegenereerd uit de verschillende niveaus zijn weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Testdata UL9540A (Lakshmipathy et al., 2023)

Productniveau	Parameters
Cel	<ul style="list-style-type: none">> Start thermal runaway> Gaswolksamenstelling> Volumeconcentratie van de gassen die vrijkomen> Eigenschappen van de verschillende gassen in de gaswolk> Deflagratiedruk in een gesloten vat> LEL van het gasmengsel> Verbrandingssnelheid van het gas
Module	<ul style="list-style-type: none">> Uittreesnelheid¹⁴ van gassen uit de batterijcel> Volume van batterijgas> Propagatiesnelheid van de thermal runaway naar andere cellen
Rack	<ul style="list-style-type: none">> Uittreesnelheid van batterijgas> Volume van het batterijgas> Snelheid van thermische propagatie

Ter aanvulling op de cel-, module- en racktesten, kunnen ook testen worden uitgevoerd op installatieniveau om de ontworpen brand- en explosie veiligheidsmaatregelen te beoordelen (Barowy et al., 2022).

Naast UL9540A bestaat ook IEC 62933, een testnorm die vooral toegepast wordt buiten de Verenigde Staten (International Code Council, 2022). IEC 62933 focust zich naast veiligheid ook op andere aspecten zoals energie-efficiëntie en prestaties.

3.2 NFPA 855

In hoofdstuk 9 van NFPA 855 wordt ingegaan op elektrochemische batterijmodules. Hierbinnen vormen lithium-ion batterijen een van de verschillende hoofdcategorieën batterijtypen. Onder de hoofdcategorie lithium-ion batterijen vallen onder meer de typen NMC en LFP. In NFPA 855 worden de volgende eisen gesteld:

¹⁴ De snelheid waarmee gassen uit de batterijcellen vrijkomen.

- > Brand- en explosietesten moeten worden uitgevoerd door een erkend testlaboratorium met een representatief EOS in overeenstemming met UL9540A of een gelijkwaardige testnorm. Evaluatie van de explosiemaatregelen moet onderdeel zijn van de test. Het testrapport moet aangeleverd worden bij het bevoegd gezag voor controle en goedkeuring.
- > Het EOS moet beschikken over een erkend BMS dat controleert of het systeem normaal functioneert door het monitoren van de voltages, stromen en temperaturen. Wanneer abnormale omstandigheden worden gedetecteerd, moet het BMS de elektriciteit kunnen uitschakelen.
- > Explosiepreventie en explosieluiken zijn niet nodig, indien het bevoegd gezag hiermee instemt en tests volgens de UL9540A of een gelijkwaardige testnorm aantonen dat:
 - een LEL van 25 % niet kan ontstaan.
 - het EOS geen gevaarlijke drukgolven kan genereren of brokstukken kan uitstoten.
- > Explosiepreventieve maatregelen moeten worden ontworpen, geïnstalleerd, getest en toegepast in overeenstemming met NFPA 69. Deze norm stelt eisen aan de installatie van systemen die het voorkomen en beheersen van explosies als doel hebben, en zich binnen omhulsels bevinden die ontvlambare concentraties gas, damp, nevels, stof of hybride mengsels bevatten.
 - Het reductiesysteem voor brandbare gassen moet worden geactiveerd bij een concentratie brandbare gassen van niet meer dan 10 % van de totale LEL van het gasmengsel of van individuele gassen.
 - Het reductiesysteem moet blijven functioneren tot de concentratie brandbaar gas 25 % van de LEL-waarde niet meer overschrijdt.
 - Een stand-by stroomvoorziening moet het gasreductiesysteem gedurende 24 uur van stroom kunnen voorzien.
 - Het gasdetectiesysteem moet een waarschuwing geven aan een meldkamer die door de relevante autoriteiten is goedgekeurd of door de organisatie wordt beheerd, indien het gasdetectiesysteem een storing ondervindt of wanneer de gasconcentratie 10 % van de LEL overschrijdt.
- > Deflagratiemaatregelen moeten worden genomen in overeenstemming met de NFPA 68. Deze norm is van toepassing op het ontwerp, de locatie, de installatie en het onderhoud van apparatuur die bedoeld is om gassen en druk als gevolg van een deflagratie binnen een omhulling te ventileren, zodat structurele en mechanische schade tot een minimum worden beperkt. De explosieluiken moeten zo zijn ontworpen, dat de constructie van het EOS intact blijft bij een explosie die is gebaseerd op een maximale explosieve gasconcentratie in het EOS.
- > Testen in overeenstemming met UL9540A moeten uitwijzen dat er geen brokstukken ontstaan bij een explosie.
- > Uitlaatopeningen van een EOS mogen niet worden gericht op vluchtroutes en voetgangers- of verkeerswegen.

Wanneer een plaatselijk brandalarm is aangebracht en getraind personeel aanwezig is, hoeft er indien goedgekeurd door het bevoegd gezag, geen alarmmelding te worden verzonden naar externe personen of partijen.

3.3 PGS 37-1

In PGS 37-1 wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende vormen van EOS'en, typicals genoemd:

- > Typical 1: Zelfstandig EOS in een (aangepaste) container
- > Typical 2: Energieopslagpark
- > Typical 3: EOS-park met niet-betreedbare behuizingen in de openlucht
- > Typical 4: Mobiel EOS
- > Typical 5: Inpandig EOS met eigen ruimte
- > Typical 6: Inpandig EOS in een open ruimte.

Er zijn verschillende maatregelen beschreven in PGS-37-1 voor inpandige EOS'en en voor EOS'en die buiten staan opgesteld. In dit onderzoek wordt alleen de laatste categorie beschouwd. PGS-37-1 benoemt hiervoor onderstaande maatregelen.

Integriteit EOS

Een EOS slaagt voor een brandpropagatietest die wordt uitgevoerd volgens NEN-EN-IEC 62933-5-2 of UL 9540A, wanneer de structurele integriteit van het EOS na een explosie behouden blijft. Om dit te waarborgen, is in de buitenwand of het dak van de ruimte waarin het EOS is geplaatst een drukontlastingsvoorziening geïnstalleerd. Deze voorziening blijft bij een daadwerkelijke explosie verankerd aan de constructie en wordt niet weggeschoten. De afmetingen van de drukontlastingsvoorziening zijn zodanig dat een eventuele drukgolf als gevolg van een explosie in het EOS naar buiten kan treden zonder schade aan de constructie te veroorzaken.

Noodventilatie

- > Bij detectie van CO of rook in het energiedragercompartiment moet de ventilatie op vol vermogen verse lucht aanvoeren om explosieve mengsels te voorkomen. Als er een brandbeheersingssysteem is, moet de noodventilatie hierop worden afgestemd. De noodventilatie moet uitgeschakeld worden als het brandbeheersingssysteem actief is.
- > Bij de toegang tot het EOS moet een voorziening aanwezig zijn voor de brandweer om de noodventilatie te bedienen.
- > In bestaande situaties kan, wanneer er geen kwetsbare objecten in de buurt zijn of indien het explosierisico vanwege het type EOS beperkt is, hiervan afgeweken worden na overleg met het bevoegd gezag.
- > De afvoer van de ventilatie moet zo hoog mogelijk in het EOS zijn aangebracht.
- > De uitmonding van het mechanisch ventilatiesysteem moet zich op ten minste 5 m van raam- en aanzuigopeningen bevinden van omliggende objecten die geen andere EOS'en zijn.

Monitoring EOS

- > Indien vereist, moet een voorziening aanwezig zijn die het EOS continu monitort op functioneren, ongewenste temperatuurstijgingen, temperatuurniveaus en het vrijkomen van gassen bij brand.
- > Het EOS moet voorzien zijn van een driekleurige statusindicatielamp. Deze brandt rood bij een gevaarlijke situatie, geel bij een abnormale situatie die kritiek kan worden en groen wanneer de situatie normaal is.
- > Het monitoringsysteem is beschikbaar zolang het EOS operationeel is. Als de monitoring wegvalt door het verbreken van de dataverbinding, moet de installatieverantwoordelijke

binnen 5 minuten een alarm krijgen. In dat geval moet er spoedig een controle uitgevoerd worden op het correct functioneren van het EOS.

- > De wijze van monitoren is afhankelijk van de situatie; het monitoren kan door de eigenaar, leverancier of middels een particuliere alarmcentrale uitgevoerd worden.
 - Preventief afschakelen op basis van alarmeringen.

Degene die verantwoordelijk is voor de installatie van het EOS moet op afstand kunnen ingrijpen bij alarmsignalen die kunnen leiden tot falen. Als bevestigd is dat er sprake is van brand of een explosie, moeten de hulpdiensten direct worden gewaarschuwd. Het EOS mag alleen opnieuw worden ingeschakeld, nadat ter plaatse is vastgesteld dat dit veilig is. Als de installatieverantwoordelijke niet reageert, moet het EOS autonoom kunnen worden uitgeschakeld door het BMS en/of EMS. Zowel het BMS als het EMS moeten bij te hoge temperaturen de energiedragers kunnen ontkoppelen om brand te voorkomen. De status van het systeem moet zichtbaar zijn aan de buitenkant van het EOS, en voor bestaande systemen kan een noodstopvoorziening worden gebruikt.
 - Afschakelen op basis van detectie.

Een niet-betreedbaar EOS moet een geschikt branddetectiesysteem hebben met melding naar een 24-uurs particuliere alarmcentrale of bezette bedrijfsmeldkamer, conform NEN 2535. Het onderhoud gebeurt volgens NEN 2654-1+C1. Bij rook-, brand- of explosiedetectie schakelt het EOS autonoom uit, aangestuurd door het BMS en/of het EMS. Beide systemen mogen elkaars ingrepen niet tenietdoen en moeten alle stroomkringen onderbreken. Externe monitoring blijft actief tot de installatieverantwoordelijke ter plaatse is. De installatieverantwoordelijke ontvangt een signaal bij het uitschakelen. De installatieverantwoordelijke mag het BMS en/of EMS niet uitschakelen of de elektronische aansturing anderszins regelen nadat deze hebben ingegrepen. Eventueel gebruik van bluswater mag de werking van de detectie niet verstoren.

Noodplan

Een actueel noodplan moet beschikbaar zijn, waarin beschreven staat hoe moet worden gehandeld bij een incident.

3.4 RISE Guidelines for the fire protection of battery energy storage systems

In Zweden worden minimale bouwvereisten en -normen voor gebouwen en constructies op het gebied van onder andere structuur, ventilatie, brandveiligheid en energie-efficiëntie gereguleerd volgens de 'Boverket's Building Regulations' (verder: BBR). Deze zijn opgesteld door 'Boverket', een overheidsinstantie die verantwoordelijk is voor de ontwikkeling en implementatie van bouwregelgeving. De BBR is van toepassing op zowel nieuwe gebouwen als op bestaande gebouwen die verbouwd of gerenoveerd worden. De BBR bevat verplichte bepalingen en algemene aanbevelingen die gevolgd moeten worden door architecten, ingenieurs, aannemers en anderen die betrokken zijn bij de bouwsector. De voorschriften in de BBR worden regelmatig herzien om nieuwe technologische ontwikkelingen, bouwmethoden en maatschappelijke behoeften erin op te nemen (Grönlund et al., 2023).

Er zijn delen in de BBR die gaan over brandcompartimenten, brandsluizen en oppervlaktelagen die kunnen worden geïnterpreteerd als van toepassing op EOS'en.

EOS'en zelf staan echter (nog) niet expliciet genoemd in de voorschriften. Volgens RISE loopt de techniek van energieopslag voor op de voorschriften. Momenteel worden de voorschriften herzien (Grönlund et al., 2023).

In de 'RISE Guidelines for the protection of battery energy storage systems' worden de volgende punten benoemd die betrekking hebben tot het mitigeren van explosiegevaar (Grönlund et al., 2023):

- > Er moeten explosiepreventiesystemen of explosieluiken worden geïnstalleerd als er genoeg batterijen in een ruimte zijn om een explosieve atmosfeer te vormen.
- > De installatievereisten van de fabrikant moeten worden nageleefd.
- > Explosieluiken moeten omhoog, of naar een andere veilige omgeving gericht zijn vanwege fakkels of drukgolven die kunnen ontstaan bij een explosie.
- > De maximale drukcapaciteit van de behuizing moet dusdanig zijn dat deze bij een explosie intact blijft. Deze parameter wordt aangeduid als de behuizingsterkte.
- > Explosieluiken mogen niet naar nabij gelegen gebouwen, voetpaden, locaties waar brandweerlieden toegang toe hebben of op evacuatieroutes zijn gericht.
- > Sneeuw en ijs moeten van de explosieluiken worden verwijderd.
- > De afzuigventilator moet hoge temperaturen kunnen verdragen (zoals bij brand) en er mogen geen potentiële ontstekingsbronnen zijn in de uitlaatstroom.
- > Luiken en dempers moeten strategisch worden geïnstalleerd om buitenlucht de container binnen te laten en de batterijgassen af te voeren via de uitlaat. Er moet rekening worden gehouden met het feit dat verse lucht zuurstof bevat die een gaswolk binnen de ontstekingsgrenzen kan brengen.
- > De grootte van de behuizing en de beschikbare vrije ruimte zullen bepalen hoeveel afzuigventilatoren en inlaatopeningen nodig zijn. CFD¹⁵-simulaties kunnen worden gebruikt om lokale ophoping van brandbare gassen binnen de EOS-behuizing te bepalen en te helpen bij de plaatsing van ventilatieopeningen, ventilatoren en luchtinlaten.
- > De benodigde ventilatiesnelheid hangt af van het type cel, de gascompositie tijdens een thermal runaway, de state of charge, het aantal cellen dat in thermal runaway is en het volume en de grootte van de behuizing. In richtlijnen met betrekking tot ventilatiesnelheden voor EOS'en op vaartuigen wordt een minimum ventilatievoud van 6 per uur (acph¹⁶) aanbevolen. Voor onshore EOS'en wordt een ventilatievoud aangeraden van 0.34 – 0.54 m³/h per Wh batterij-inhoud (0.09 – 0.15 l/s per Wh batterij-inhoud) (Grönlund et al., 2023).
- > Batterijen die zijn getest op thermische propagatie op moduleniveau vereisen een analyse om te onderzoeken of een ventilatievoud van meer dan 6 acph benodigd is.
- > Er zijn verschillende soorten gasdetectoren beschikbaar. In EOS'en worden H₂, CO en/of CO₂ als de belangrijkste gassen beschouwd om vroegtijdig te detecteren, omdat deze in grote hoeveelheden voorkomen tijdens een thermal runaway.
- > Explosiepreventie voor een EOS kan worden ontworpen volgens NFPA 69 en/of NFPA 68.
- > Een optisch (licht) alarmsysteem kan buiten de ruimte waarin het EOS zich bevindt, worden gebruikt om personen te waarschuwen dat het gebied niet veilig is om te betreden.

¹⁵ Computational Fluid Dynamics.

¹⁶ 'Air Changes Per Hour' is het aantal keren per uur aan dat het volledige volume lucht in een ruimte is vervangen; ofwel een maat voor de ventilatiesnelheid.

- > Een batterijsysteem is normaal uitgerust met schakelaars die de stroom onderbreken in geval van schade of spanningsuitval. Om ervoor te zorgen dat de gelijkstroomkabels (DC) van de batterij geen risico vormen tijdens reddingsoperaties, moeten deze duidelijk gemarkeerd worden, en de omvormer moet in verbinding staan met het EOS, of er moet een veiligheidsschakelaar worden geïnstalleerd voor de uitgaande kabels. Het is belangrijk dat een veiligheidsschakelaar alleen de *uitgaande* stroom onderbreekt om de werking van kritieke interne veiligheidssystemen te behouden.
- > Indien het EOS buiten wordt geplaatst, moet worden voldaan aan een scheidingsafstand van 8 meter tussen gebouwen, volgens BBR 5:61. Alternatieve bescherming omvat het beperken van brandverspreiding tussen gebouwen tot de hoogste brandcompartiment- of brandmuurstandaard in elk gebouw. Deze beperkingen houden echter geen rekening met het explosierisico dat gepaard gaat met EOS-branden. Daarom moet een individuele beoordeling worden uitgevoerd, zodat bijvoorbeeld rekening gehouden kan worden met ramen of andere kwetsbare delen van het gebouw. Daarnaast moet bij de plaatsing van het EOS rekening worden gehouden met een veilige afstand tot luchtinlaatopeningen.
- > De brandweer en reddingsdiensten moeten de mogelijkheid hebben om brandgassen te ventileren vanuit een veilige locatie zonder deuren te openen. Dit kan de veiligheid van brandweer- en reddingspersoneel waarborgen, aangezien er een risico op explosie bestaat wanneer frisse lucht de ruimte binnenkomt.
- > Bij het plaatsen van het EOS moet rekening worden gehouden met een veilige afstand tot luchtinlaatopeningen.
- > Een noodplan dat informatie bevat over de plaatsing, grootte, noodstop-schakelaar en brandveiligheidsinstallaties kan de brandweer en reddingsdiensten helpen tijdens een inzet.

3.5 Overzicht vereisten in richtlijnen per maatregel

In tabel 3.2 worden de maatregelen die wij het relevantst achten voor het beperken van explosiegevaar per richtlijn weergegeven. In de meest linker kolom staat de maatregel en in de drie kolommen rechts daarvan worden per richtlijn de belangrijkste vereisten benoemd. Deze vereisten zullen worden gebruikt om te bepalen hoe de maatregelen het meest effectief kunnen worden toegepast.

Tabel 3.2 Ontwerpmaatregelen richtlijnen

Maatregel	NFPA 855	PGS 37-1	RISE Guidelines
Ventilatie	<ul style="list-style-type: none"> > Moet toegepast worden in overeenstemming met NFPA 69. > Moet worden geactiveerd bij een concentratie brandbare gassen van niet meer dan 10 % van de totale LEL van het gasmengsel en de LEL van individuele explosieve gassen. > Moet aanblijven tot 25 % van de LEL-waarde niet meer wordt overschreden. > Moet van 24 uur stand-by stroom zijn voorzien. 	<ul style="list-style-type: none"> > Bij detectie van CO of rook moet een ventilatiesysteem op vol vermogen verse lucht aanvoeren om explosieve mengsels te voorkomen. > Als er een brandbeheersysteem actief is, moet de noodventilatie uitgeschakeld worden. > Bij de toegang tot het EOS moet een voorziening aanwezig zijn voor de brandweer om de noodventilatie te bedienen. > De afvoer van de ventilatie moet zo hoog mogelijk in het EOS zijn aangebracht. > De uitmonding van het mechanisch ventilatiesysteem moet zich op ten minste 5 m van raam- en aanzuigopeningen bevinden van omliggende objecten niet zijnde andere EOS'en. 	<ul style="list-style-type: none"> > Kan toegepast worden in overeenstemming met NFPA 69. > Installatievereisten van de fabrikant moeten worden nageleefd. > Ventilatiesnelheid, het aantal ventilatoren en de benodigde openingen zullen afhangen van het type cel, de gassamenstelling tijdens een thermal runaway, de state of charge, het aantal cellen dat in thermal runaway is, het (vrije) volume en de grootte van de behuizing. > De afzuigventilator moet hoge temperaturen verdragen en er mogen geen potentiële ontstekingsbronnen zijn in de uitlaatstroom. > Bij plaatsing van het EOS moet rekening worden gehouden met een veilige afstand tot luchtinlaatopeningen. > De brandweer moet de mogelijkheid hebben om brandgassen te ventileren vanuit een veilige locatie zonder deuren te openen. Verse lucht bevat zuurstof die een gaswolk binnen de ontstekingsgrenzen kan brengen.
Explosieluiken (deflagration venting)	<ul style="list-style-type: none"> > Moeten toegepast worden volgens NFPA 68. > Moeten zorgen dat de unit in tact blijft bij een explosie van een maximale explosieve gasconcentratie. > Testen in overeenstemming met UL9540A moeten uitwijzen dat er geen brokstukken ontstaan bij een explosie. > Uitlaatopeningen mogen niet worden gericht op vluchtroutes en voetgangers- of verkeerspaden. 	<ul style="list-style-type: none"> > In de buitenwand of het dak van een EOS-unit moeten explosieluiken worden geïnstalleerd, waarvan de afmetingen zodanig zijn dat een eventuele drukgolf als gevolg van een explosie in het EOS naar buiten kan treden zonder schade aan de constructie te veroorzaken. > Deze voorziening moet verankerd aan de constructie blijven en mag niet wegschieten. 	<ul style="list-style-type: none"> > Kan toegepast worden volgens NFPA 68. > Explosieluiken mogen niet naar nabij gelegen gebouwen, verkeerspaden, locaties waar brandweertoeegang toe hebben of op evacuatieroutes zijn gericht. > Installatievereisten van de fabrikant moeten worden nageleefd. De maximale drukcapaciteit van de behuizing moet dusdanig zijn dat deze bij een explosie in tact blijft. > Sneeuw en ijs moeten van de explosieluiken worden verwijderd. > Er moet een individuele beoordeling worden uitgevoerd waarin bijvoorbeeld rekening gehouden wordt met ramen of andere kwetsbare delen van omliggende gebouwen.

Maatregel	NFPA 855	PGS 37-1	RISE Guidelines
Monitoring, signalering, afschakelen en alarmering	<ul style="list-style-type: none"> > Het EOS moet beschikken over een erkend BMS dat controleert of het systeem normaal functioneert. > Wanneer abnormale omstandigheden worden gedetecteerd, moet het BMS de elektriciteit kunnen uitschakelen. > Bij een storing of een gasconcentratie die 10 % van de LEL overschrijdt, moet een waarschuwing worden gegeven aan een meldkamer die door de relevante autoriteiten is goedgekeurd of door de organisatie wordt beheerd. 	<ul style="list-style-type: none"> > Er moet een voorziening aanwezig zijn die het EOS continu monitort op functioneren, ongewenste temperatuurstijgingen, temperatuurniveaus en het vrijkomen van gassen bij brand. > Het EOS moet voorzien zijn van een driekleurige statusindicatielamp die rood brandt in een gevaarlijke situatie, geel in een abnormale situatie die kritiek kan worden en groen wanneer de situatie normaal is. > De wijze van monitoren, alarmeren en afschakelen is afhankelijk van de specifieke situatie. Monitoren kan door de eigenaar, leverancier of middels een particuliere alarmcentrale gedaan worden. 	<ul style="list-style-type: none"> > Een optisch (licht) alarmsysteem kan buiten de EOS-unit worden gebruikt om personen te waarschuwen dat het gebied niet veilig is om te betreden. > Voor EOS'en worden H₂-, CO- en/of CO₂-sensoren als de belangrijkste beschouwd. > Om ervoor te zorgen dat de gelijkstroomkabels (DC) van de batterij geen risico vormen tijdens reddingsoperaties, moeten deze duidelijk gemarkeerd worden. > De omvormer moet in verbinding staan met het EOS, of er moet een veiligheidsschakelaar worden geïnstalleerd voor de uitgaande kabels. Het is belangrijk dat een veiligheidsschakelaar alleen de uitgaande stroom onderbreekt om de werking van kritieke interne veiligheidssystemen te behouden. > Het ter beschikking hebben van een noodplan dat informatie bevat over de plaatsing, grootte, noodstop-schakelaar en brandveiligheidsinstallaties kan de brandweer en reddingsdiensten helpen tijdens een inzet.

4 Evaluatie en effectiviteit van maatregelen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de bestudeerde wetenschappelijke literatuur over (de effectiviteit van) risicobeperkende maatregelen. Veel maatregelen uit hoofdstuk 3 zullen hierin terugkomen, met name ventilatie en explosieluiken. Er wordt gefocust op maatregelen die effectief zijn na het optreden van een thermal runaway.

Om het explosierisico te beheersen, kan gebruik worden gemaakt van kansbeperkende maatregelen. Deze zijn gericht op het voorkomen van een explosie en worden besproken in paragraaf 4.2. Daarnaast zijn er effectbeperkende maatregelen die de energie die vrijkomt bij een explosie op een gecontroleerde en geplande manier afvoeren. Deze maatregelen komen aan bod in paragraaf 4.3. Beide typen maatregelen kunnen tegelijkertijd worden toegepast op een EOS (International Code Council, 2022). Vervolgens zal in paragraaf 4.4 kort worden ingegaan op enkele maatregelen die in de richtlijnen uit hoofdstuk 3 niet voorkomen (en ook als niet effectief worden beschouwd), maar in de literatuur wel worden genoemd.

Alle maatregelen hebben voor- en nadelen met betrekking tot kosten en effectiviteit. De keuze voor de maatregelen die zullen worden toegepast, hangt daarmee af van het EOS-ontwerp, de locatie en de lokale vereisten (Grönlund et al., 2023). Naar verwachting zullen er in de toekomst meer innovatieve maatregelen op de markt komen, aangezien de industrie hier baat bij heeft en eraan blijft werken (International Code Council, 2022). Het zal echter moeilijk zijn om het risico op een explosie volledig te weg te nemen (Grönlund et al., 2023).

4.2 Kansbeperkende maatregelen

4.2.1 Ventilatie

Ventilatie reduceert de kans op een explosie. Er zijn verschillende methoden om een EOS te ventileren. Om de gasconcentratie tot beneden de LEL-waarde te verlagen, kan buitenlucht worden aangezogen, waardoor de explosieve dampwolk wordt verdund. Daarnaast worden explosieve gassen afgevoerd naar buiten. Uit CFD-experimenten is gebleken dat zo laag mogelijk buitenlucht aanzuigen het meest effectief is. De aangezogen lucht warmt op en zal opstijgen, waarna ze zich vermengt met explosieve dampen en vervolgens aan de bovenkant afgevoerd kan worden (Conzen, 2023).

Voor ventilatie dienen sensoren binnen het EOS geïnstalleerd te zijn, die de concentraties van explosieve gassen monitoren. Wanneer explosieve gassen worden waargenomen, wordt een ventilatiesysteem geactiveerd dat de explosieve gassen tot buiten het EOS

transporteert. Indien de gassen de standaard HVAC¹⁷-systemen niet aantasten, kunnen deze gebruikt worden om de gassen te transporteren. Maar er kan ook voor worden gekozen om een aparte set ventilatoren te gebruiken (International Code Council, 2022). De componenten van een ventilatiesysteem moeten vonkvrij zijn, de afzuigventilator mag geen potentiële ontstekingsbron vormen en dampen die afgevoerd worden, mogen niet langs mechanische en elektrische apparatuur gevoerd worden (Lakshminath et al., 2023).

Er zijn ook EOS-systemen die gebruikmaken van magnetische sloten. Wanneer het gasalarm afgaat, zullen deze sloten ontgrendelen, waarna de deuren van het EOS opengaan en de explosieve dampen kunnen ontsnappen, zodat ophoping ervan wordt voorkomen (Conzen, 2023).

Voor het waarnemen van explosiegevaar en het activeren van het ventilatiesysteem zijn sensoren benodigd. Gangbare sensoren zijn geschikt voor het waarnemen van een thermal runaway. Ze zijn echter kruisgevoelig¹⁸ en raken vervuild door de verschillende dampen die vrijkomen bij een thermal runaway, waardoor ze niet geschikt zijn voor het continu monitoren van concentraties brandbaar gas. Ook andere omstandigheden, zoals vaste stofdeeltjes en een lage zuurstofconcentratie, belemmeren de werking van sensoren (Klieger et al., 2021).

Het vrijkomen en ophopen van gassen door een thermische propagatie van batterijen binnen een EOS kan zeer snel gaan, waardoor de dampwolkconcentratie snel kan stijgen tot een waarde boven de 25 % van de LEL. Een snelle detectie is dus van belang voor de effectiviteit van ventilatie. Tevens zal in de buurt van de plaats waar de explosieve dampen vrijkomen, een 25% LEL-waarde eerder bereikt worden dan elders in het EOS. Daarom is het van belang dat de concentratie op meerdere plaatsen gemeten wordt. Daarnaast moet er voldoende lucht in de omgeving van het EOS zijn om de explosieve dampen te kunnen verdunnen (Grönlund et al., 2023). Bij het ontwerpen van ventilatie moet rekening gehouden worden met het feit dat frisse lucht brandverspreiding kan versnellen en/of de kans op een explosie kan vergroten (Grönlund et al., 2023).

Het aantal acph¹⁹ waarmee geventileerd moet worden, hangt af van het type cel en de gassenstelling tijdens de thermal runaway, de state of charge, het aantal cellen in thermal runaway en het vrije volume binnen de behuizing. Er is momenteel nog geen eenduidige aanbevolen specificatie voor de ventilatiesnelheid van een EOS. Daarnaast is er discussie in de wetenschappelijke literatuur over de vraag of ventilatie in alle gevallen voldoende effectief is (Grönlund et al., 2023).

Op basis van de bestudeerde literatuur en de richtlijnen in hoofdstuk 3 constateren wij dat momenteel ventilatie als maatregel het meest effectief is wanneer onderstaande punten in acht worden genomen:

- > De installatievereisten van de fabrikant moeten worden nageleefd.
- > Voor het waarnemen van explosiegevaar en het activeren van het ventilatiesysteem zijn sensoren nodig. In EOS'en worden H₂-, CO- en/of CO₂-sensoren als de belangrijkste beschouwd om gevaarlijke concentraties vroegtijdig te detecteren.

¹⁷ Heating ventilation and air conditioning.

¹⁸ Dit betekent dat een sensor in een gasmeter niet alleen gevoelig is voor het te meten doelgas, maar ook voor andere stoffen. Kruisgevoeligheid kan te hoge meetwaarden of onterechte alarmen veroorzaken

¹⁹ Air changes per hour (luchtwisselingen per uur)

- > Het ventilatiesysteem moet worden geactiveerd bij een concentratie van niet meer dan 10 % van de LEL van het totale gasmengsel of van individuele gassen.
- > Er moet een 24-uur-stand-by-stroomvoorziening aanwezig zijn voor het ventilatiesysteem.
- > De afzuigventilator moet hoge temperaturen kunnen verdragen en er mogen geen potentiële ontstekingsbronnen zijn in de uitlaatstroom.
- > Er moet rekening gehouden worden met het feit dat verse lucht zuurstof bevat, die een gaswolk binnen de ontvlambaarheidsgrenzen kan brengen, bijvoorbeeld door het openen van een deur of raam.
- > Wanneer een blusinstallatie of ander brandbeheersysteem actief is om brand te bestrijden, moet de noodventilatie uitgeschakeld worden.
- > De afvoer van de ventilator moet zo hoog mogelijk in het EOS worden aangebracht en de aanzuiging zo laag mogelijk.
- > Bij plaatsing van het EOS moet rekening worden gehouden met een veilige afstand tot luchtinlaatopeningen.
- > De brandweer moet de mogelijkheid hebben om vanuit een veilige locatie brandgassen te ventileren, zonder deuren te openen.

4.3 Effectbeperkende maatregelen

Effectbeperkende maatregelen zijn erop gericht de effecten van een explosie te beperken. Zij blijken in de regel goedkoper dan kansbeperkende maatregelen (Paiss, 2023).

4.3.1 Explosieluiken

Een explosieluik is ontworpen om de druk van een explosie in een afgesloten ruimte gecontroleerd af te voeren. Hierdoor worden schade aan de installatie en gevaar voor personen verminderd. Een explosieluik is gemaakt van een stevig lichtgewicht materiaal, zoals aluminium. Het raamwerk dient stevig verankerd te worden aan de structuur die beschermd dient te worden om het explosieluik effectief te laten zijn. Het bevestigingssysteem breekt wanneer een bepaalde druk wordt bereikt, waardoor het luik kan openen en de druk kan ontsnappen. Explosieluiken worden bij voorkeur in het dak geplaatst, of een andere positie indien dit veilig kan. Dit betekent, dat ze dus niet worden geplaatst in de richting van routes die worden gebruikt voor evacuatie of door brandweerpersoneel (Grönlund et al., 2023).

Het vormgeven van explosieluiken is gedocumenteerd in NFPA 68. De parameters die van belang zijn voor het berekenen van de grootte van explosieluiken volgens NFPA 68 kunnen worden verkregen door middel van de testmethode uit UL 9540A. Deze parameters zijn (Barowy et al., 2022):

- > de verbrandingssnelheid van het gasmengsel
- > de maximale druk van het gasmengsel
- > het formaat van het EOS
- > het vrije volume binnen het EOS dat niet wordt ingenomen door apparatuur
- > de drempeldruk van de wanden die nodig is om permanente vervorming of een breuk te veroorzaken.

De NFPA 68-methode van het dimensioneren van explosieluiken is gebaseerd op de aanname dat de druk van de explosie niet meer dan twee derde mag bedragen van de drempeldruk van de wanden die nodig is om permanente vervorming of een breuk te

veroorzaken (Barowy et al., 2022). Het zwakste onderdeel van een EOS-unit is in het algemeen de deur. De weerstand van de deur hangt af van het ontwerp, het slot en de scharnieren die erop gemonteerd zijn (Barowy et al., 2022).

Uit de bestudeerde richtlijnen in hoofdstuk 3 en de literatuur blijkt dat om explosieluiken effectief toe te passen, de onderstaande punten in acht genomen moeten worden:

- > Er moet voor gezorgd worden dat de unit intact blijft en er geen projectielen ontstaan bij een explosie die veroorzaakt wordt door een maximale explosieve gasconcentratie.
- > Testen in overeenstemming met UL9540A moeten uitwijzen dat er geen brokstukken ontstaan bij een explosie.
- > Explosieluiken worden bij voorkeur in het dak geplaatst, maar kunnen ook veilig in de buitenwand van het EOS worden aangebracht. De explosieluiken mogen dan niet zijn gericht naar nabij gelegen gebouwen, voetpaden, locaties waar brandweerlieden toegang toe hebben, of op evacuateroutes.
- > De afmetingen van explosieluiken moeten zodanig zijn dat een eventuele drukgolf als gevolg van een explosie in het EOS naar buiten kan treden zonder schade aan de constructie te veroorzaken.
- > Explosieluiken moeten zo vormgegeven worden, dat de druk van de explosie niet meer bedraagt dan twee derde van de drempeldruk die nodig is om permanente vervorming of een breuk in de wanden te veroorzaken.
- > Tijdens een explosie mogen geen projectielen ontstaan die weg kunnen schieten.
- > Installatievereisten van de fabrikant moeten worden nageleefd.
- > De maximale drukcapaciteit van de behuizing moet dusdanig zijn dat deze bij een explosie intact blijft.
- > Sneeuw en ijs moeten van de explosieluiken worden verwijderd.
- > Er moet een risicobeoordeling worden uitgevoerd, waarin bijvoorbeeld rekening wordt gehouden met ramen of andere kwetsbare delen van omliggende gebouwen.

4.4 Niet-effectieve maatregelen

Er is ook onderzoek gedaan naar andere maatregelen om explosiegevaar te beperken (Klieger et al., 2021; Grönlund et al., 2023; Conzen, 2023). Hieruit blijkt dat inertiseren niet effectief is, aangezien hier luchtdichte systemen voor vereist zijn (Klieger et al., 2021; Conzen, 2023). Ook sprinklers en watermistinstallaties blijken geen effectieve maatregelen te zijn om explosies te voorkomen (Klieger et al., 2021; Barowy et al., 2022).

Vuur zal explosieve stoffen verbruiken, waardoor het explosierisico wordt verminderd (International Code Council, 2022). Gasblussystemen die gebruikmaken van inertiserende gassen hebben geen koelend vermogen, waardoor ze niet bijdragen aan het stoppen van de thermal runaway, en dus ook niet aan het voorkomen van een explosie. Dus ook als een gasblussysteem het vuur heeft gedoofd, kan er door het voortzetten van de thermal runaway nog steeds een ophoping van gassen plaatsvinden, met explosiegevaar als gevolg (Grönlund et al., 2023; Lakshmi et al., 2023).

5 Conclusie

In dit hoofdstuk worden de onderzoeksvragen beantwoord.

1. Welke gassen bij een thermal runaway veroorzaken explosiegevaar en in welke concentratie komen deze vrij?

Tijdens een thermal runaway kunnen meer dan dertig verschillende soorten brandbaar gas vrijkomen. De exacte samenstelling en het volume van de vrijkomende gassen verschillen sterk per type batterij en incident. Dit betekent dat er een grote bandbreedte bestaat met betrekking tot zowel gasvolumes als gassamenstelling. Een groot deel van de gassen komt vrij in een verwaarloosbaar kleine hoeveelheid. Gassen die wel in substantiële concentraties voorkomen, zijn waterstof (15 - 45 vol%), koolwaterstoffen (9 - 36 vol%) en koolmonoxide (7 - 38 vol%). Daarnaast leveren verdampte oplosmiddelen uit de elektrolyt een bijdrage aan het explosieve mengsel. Over de concentraties hiervan zijn echter geen gegevens gevonden.

2. Wat is een geschikt standaardgasmengsel voor de explosiemodellering en wat zijn de bijbehorende 'Lower Explosion Limit' (LEL) en 'Upper Explosion Limit' (UEL) van dit gasmengsel?

Gezien de grote spreiding in de hoeveelheden brandbare gassen die vrijkomen bij een thermal runaway is, in samenwerking met het RIVM, een standaard gasmengsel samengesteld, waarvan de explosiegrenzen (LEL en UEL) zijn bepaald. Dit gasmengsel kan worden gebruikt om de effecten van explosies te modelleren.

Er zijn twee explosieve standaardmengsels vastgesteld, een voor het batterijtype NMC en een voor LFP. Het gasmengsel bestaat uit waterstof, koolwaterstoffen en koolmonoxide. Voor LFP-batterijtype bedraagt de LEL 3,9 vol% en de UEL 32,4 vol%. Voor het NMC-batterijtype bedraagt de LEL 4,7 vol% en de UEL 37,7 vol%. De LEL-waarden van de standaardmengsels blijken aan de onderkant van de marges te liggen van experimenteel bepaalde waardes. Mede omdat bij veiligheidsanalyses de effecten niet mogen worden onderschat, betekent dit dat de standaardmengsels geschikt kunnen worden geacht voor modellering van de explosie-effecten als gevolg van een thermal runaway van LFP- en NMC-batterijen.

3. Welke veiligheidsmaatregelen staan in reeds bestaande richtlijnen beschreven voor het mitigeren van het explosiegevaar?

In de meest relevante richtlijnen NFPA 855, PGS37-1 en in de 'Guidelines for the fire protection of battery energy storage systems' worden explosieluiken als effectbeperkende maatregel genoemd en ventilatie als kansbeperkende maatregel.

4. Wat is in de wetenschappelijke literatuur en richtlijnen bekend over de effectiviteit van veiligheidsmaatregelen voor het beperken van explosiegevaar?

Om de kansbeperkende maatregel 'ventilatie effectief te laten functioneren, wordt in NFPA 855 verwezen naar NFPA 69, waarin installatie en onderhoud worden beschreven. Ventilatiesnelheid, voldoende afstand tot luchtinlaten, het kunnen verdragen van hoge temperaturen en vermijding van ontstekingsbronnen zijn belangrijke parameters. Er is momenteel echter nog geen eenduidige aanbevolen specificatie voor de ventilatiesnelheid van een EOS. Daarnaast is er nog discussie in de wetenschappelijke literatuur of ventilatie in alle gevallen voldoende effectief is.

Om de effectbeperkende maatregel explosieluiken effectief te laten functioneren, wordt in NFPA 855 verwezen naar NFPA 68, die omschrijft hoe de systemen geïnstalleerd en onderhouden moeten worden. In de literatuur wordt verder vermeld dat explosieluiken bij voorkeur in het dak geplaatst worden. Als zij elders geplaatst worden, mogen zij niet gericht zijn op routes die worden gebruikt voor evacuatie of door de brandweer.

Verder geldt (uiteraard) dat de noodzakelijke voorzieningen aanwezig moeten zijn om beide systemen te kunnen activeren (monitoring, signalering, alarmering).

Er zijn in de literatuur ook andere maatregelen besproken die explosiegevaar zouden kunnen reduceren. Inertiseren blijkt niet praktisch te zijn, aangezien hiervoor luchtdichte systemen vereist zijn. Ook sprinklers en watermistinstallaties blijken geen effectieve maatregelen te zijn om explosies te voorkomen in EOS'en waarin zich LFP- of NMC- lithium-ion batterijen bevinden.

Literatuur

- Ansmann. (2015). *Material - Safety - Data Sheet (MSDS) for Ansmann Lithium-ion Batteries*.
- Baird, A. R., Archibald, E. J., Marr, K. C., & Ezekoye, O. A. (2020). Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas. *Journal of Power Sources*, 446, 227257. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227257>
- Barowy, A., Schraiber, A., & Zalosh, R. (2022). Explosion protection for prompt and delayed deflagrations in containerized lithium-ion battery energy storage systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104893. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104893>
- California Institute of Technology. (n.d.). *Explosion Dynamics Laboratory*. Retrieved September 23, 2024, from <https://shepherd.caltech.edu/EDL/PublicResources/flammability.html#:~:text=Flammability%20limits%20also%20depend%20on,fixed%20composition%20mixture%20is%20possible>.
- Christensen, P. (2022). *EU Energy Storage Systems Safety Conference 2022* [Video recording].
- Chrysalis Scientific. (n.d.). *Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors (LEL/UEL)*.
- Conzen, J. (2023). *EU Energy Storage System Safety Conference 2023 - Explosion Control Challenges at Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems (BESS)*.
- CTIF. (2021, May 25). *Accident analysis of the Beijing lithium battery explosion which killed two firefighters*. <https://ctif.org/news/accident-analysis-beijing-lithium-battery-explosion-which-killed-two-firefighters>
- FSRI. (2020). *Four Firefighters Injured In Lithium-Ion Battery Energy Storage System Explosion - Arizona*.
- Grönlund, O., Quant, M., Rasmussen, M., Willstrand, O., & Hynynen, J. (2023). *DIVISION SAFETY AND TRANSPORT FIRE SAFE TRANSPORT Guidelines for the fire protection of battery energy storage systems*.
- ICSC. (2021). *International Chemical Safety Cards*. https://webapps.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0367
- International Code Council. (2022). *Energy storage systems based on the IBC, IFC, IRC and NEC*.
- Jin, Y., Zhao, Z., Miao, S., Wang, Q., Sun, L., & Lu, H. (2021). Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station. *Journal of Energy Storage*, 42, 102987. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102987>
- Klieger, A., Regan, J., & Mckinnon, M. (2021). *UL 9540A Installation Level Tests with Outdoor Lithium-ion Energy Storage System Mockups*.
- Lakshmipathy, S., Conzen, J., Kraft, S., DiDomizio, M., & Kapahi, A. (2023). Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 81, 104932. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104932>
- McMurry, J. E., Fay, R. C., & Robinson, J. K. (2016). *Chemistry*. Pearson
- NFPA. (2023). *NFPA 855 Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems*.

- NIPV. (2023, May). *Scenarioboeken NIPV - Buurtbatterij in kelder*. Li-Ion Buurtbatterij in kelder.
- Paiss, M. (2023). *EU Energy Storage System Safety Conference 2023 - ESS Explosion Control*.
- PGS. (2023). *PGS 37-1 Richtlijn voor de veilige opslag van elektriciteit in energieopslagsystemen*.
- Projectmaterials. (n.d.). *Understand LEL and UEL for Flammable Gases: Values, Hazards, Measurement, and Risk Mitigation*. Retrieved June 6, 2024, from <https://blog.projectmaterials.com/category/epc-projects/project-site-safety/lel-uel-flammable-gas/#comments>
- Pubchem. (n.d.). *PubChem*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>.
- Stedin. (n.d.). *Energieopslagsystemen*. Retrieved August 27, 2024, from <https://www.stedin.net/zakelijk/energietransitie/beschikbare-netcapaciteit/flexoplossingen/energieopslagsystemen>
- Tennet. (n.d.). *Batterijopslag*. Retrieved August 27, 2024, from <https://www.tennet.eu/nl/batterijopslag>
- van Cappellen, L., Groenewegen, H., Bongaerts Michiel, Colenbrander, R., Hügél, C., & Berkhout, C. (2023). *Thuis- en buurtbatterijen - Kansen, knelpunten en beleidsaanbevelingen*. CE-Delft
- Versluis, S., & Wijten, J. H. J. (2024). *Onderzoek relevantie energieopslagsystemen voor omgevingsveiligheid*.
- Wang, S., Wang, Q., Xu, L., Sun, Y., Feng, X., & Wang, H. (2024). A review on mechanisms, characteristics and relating hazards of vent gases from thermally abused Li-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 84, 110892. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110892>
- Zlochower, I. A., & Green, G. M. (2009). The limiting oxygen concentration and flammability limits of gases and gas mixtures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4), 499–505. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.03.006>

Bijlage 1

LEL en UEL-waarden van mogelijke stoffen in een explosieve wolk

Tabel B1.1 Volume percentages, de LEL en UEL van mogelijke stoffen in de explosieve wolk (Pubchem, n.d.; Chrysalis Scientific, n.d.)

Brandbaar gas	LEL (vol%)	UEL (vol%)
Waterstof	4	75
Methaan	5	15
Ethaan	3	12,4
Propaan	2,1	9,5
Benzeen	1,3	7,9
Ethyleen	2,7	36
Tolueen	1,1	7,1
Waterstofcyanide	5,6	40
Methanol	6,7	36
Ethanol	3,3	19
Koolmonoxide (CO)	12,5	74