



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Onderzoek relevantie **energieopslagsystemen** voor omgevingsveiligheid

Onderzoek relevantie energieopslagsystemen voor omgevingsveiligheid

RIVM-briefrapport 2024-0012

Colofon

© RIVM 2024

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2024-0012

S. Versluis (auteur), RIVM
J.H.J. Wijten (auteur), RIVM

Contact:
Sylvia Versluis
Milieu en Veiligheid, Centrum Veiligheid, Omgevingsveiligheid
omgevingsveiligheid@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) in het kader van I/123003/24/LI Advisering veilige energietransitie.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Onderzoek relevantie energieopslagsystemen voor omgevingsveiligheid

Steeds vaker wordt energie opgewekt met duurzame energiebronnen, zoals windturbines en zonnepanelen. Het hangt af van het weer of dat mogelijk is. De tijd waarop de meeste energie wordt opgewekt, is vaak niet de tijd waarop mensen, kantoren en bedrijven de meeste energie gebruiken. Daarom zijn systemen nodig om energie op te kunnen slaan. Die energieopslagsystemen kunnen zo groot zijn als een zeecontainer. Vanwege de overgang naar duurzame energie zullen de komende jaren steeds meer van die systemen geplaatst worden.

Er is nu geen landelijke beleid om energieopslagsystemen veilig te plaatsen. Uit onderzoek van het RIVM blijkt dat het gevaarlijk kan zijn om veel energie op één plek op te slaan. Bij een ongeval met een energieopslagsysteem met lithium-ion batterijen kan een brand, explosie of gifwolk ontstaan. Dat is al een paar keer gebeurd, in het buitenland en een enkele keer in Nederland. Vooral de explosie en gifwolk kunnen groot zijn, waardoor in de buurt van het ongeval slachtoffers kunnen vallen. De kans dat er slachtoffers zijn is klein, maar vraagt wel om voorzorgsmaatregelen.

Het RIVM raadt het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) aan om hiervoor beleid te maken waarbij rekening wordt gehouden met mogelijke ongevallen. Dit kan bijvoorbeeld door energieopslagsystemen niet dichtbij andere gebouwen te plaatsen.

Voor dit onderzoek zijn de effecten van een ongeval berekend om een eerste idee te krijgen tot hoe ver die gevolgen kunnen optreden. Het RIVM gaat een rekenvoorschrift maken om deze afstand precies te kunnen bepalen. Het RIVM heeft dit onderzoek in opdracht van IenW gedaan.

Kernwoorden: duurzame energie, opslag, energieopslagsystemen, ongevallen, slachtoffers

Synopsis

Relevance of energy storage systems for third party risks

Energy production from renewable sources, such as wind turbines or solar panels, is steadily increasing. This production is dependent on the weather. Often, most energy is generated at times that energy consumption by people, offices and companies is low. This means that systems are needed to store energy. Energy storage systems can be as big as a sea container. The number of these systems will increase as we take the step towards renewable energy.

At the moment there is no national legislation concerning the safe placement of energy storage systems. According to research by RIVM, the storage of a lot of energy in one place can be dangerous. An incident with an energy storage system with lithium-ion batteries could result in a fire, explosion or toxic cloud. This has happened several times in the past, with one incident in the Netherlands. The effects of an explosion or toxic cloud in particular can be considerable and could even lead to casualties in the surrounding area. Even though the odds of this happening are small, precautions should be taken.

RIVM has advised the Ministry of Infrastructure and Water Management (I&W) to formulate legislation that takes the possibility of incidents into account. Precautions could include not placing energy storage systems too close to other buildings.

For this research, the effects of an incident were calculated to get a first indication of the extent of the consequences that could occur. RIVM will formulate calculation rules to determine a safe distance.

Keywords: sustainable energy, storage, energy storage systems, incidents, casualties

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding en aanleiding — 11

- 1.1 Afbakening — 11
- 1.2 Begeleidingscommissie — 12
- 1.3 Leeswijzer — 12

2 Aanpak — 13

- 2.1 Wanneer relevant voor omgevingsveiligheid — 13
- 2.2 Onderzoek — 13

3 Typen EOSen en uitvoeringen — 15

- 3.1 Batterijtechnologieën — 15
- 3.2 Type lithium-ion batterijen — 15
- 3.3 Vormen van EOSen — 16

4 Incidenten met EOSen — 19

- 4.1 Incidentscenario's — 19
- 4.2 Incidenten met EOSen — 20
 - 4.2.1 Drogenbos, België — 20
 - 4.2.2 Peking, China — 21
 - 4.2.3 Geelong, Australië — 21
 - 4.2.4 Surprise, Arizona — 22
- 4.3 Voorbeeld incident: EOS deflagratie in Surprise, Arizona — 22

5 Scenario's voor bepalen effecten — 25

- 5.1 Scenario 1: Brand — 26
- 5.2 Scenario 2: Explosie — 28
- 5.3 Scenario 3: Gifwolk — 29

6 Conclusie en aanbevelingen — 31

Literatuurlijst — 33

Bijlage 1 Achtergrondinformatie berekeningen — 37

Bijlage 2 Indicatieve PR contouren — 49

Bijlage 3 Begeleidingscommissie — 52

Bijlage 4 Literatuuronderzoek — 53

Samenvatting

De energietransitie leidt tot het inzetten van duurzame energiebronnen, zoals windturbines en zonnepanelen. Een kenmerk van deze bronnen is dat de energieproductie niet altijd op momenten plaatsvindt waarop de energie gebruikt wordt. Daarom komt er steeds meer vraag naar energieopslagsystemen (EOSen) om deze energie op te kunnen slaan. Op dit moment zijn de meeste bestaande en geplande EOSen op basis van lithium-ion batterijen. Lithium-ion batterijen brengen echter risico's met zich mee. Daarom heeft het RIVM, in opdracht van IenW, onderzocht of energieopslagsystemen relevant zijn voor omgevingsveiligheid, gezien de mogelijke effecten bij een incident.

Er zijn verschillende typen EOSen en batterijen die in de EOSen worden toegepast. Omdat LFP-batterijen (lithium ijzer fosfaat) en NMC-batterijen (lithium nikkel mangaan kobalt oxide) het meest in EOSen worden toegepast, is hier in dit onderzoek op gefocust. Aan de hand van literatuuronderzoek en effectberekeningen is bepaald of EOSen relevant kunnen zijn voor omgevingsveiligheid.

Batterijen kunnen in thermal runaway raken, waarbij een ongecontroleerde toename in temperatuur en druk ontstaat. Door de thermal runaway kan brand, een explosie of een giftige wolk ontstaan, afhankelijk van hoe het incident verloopt. Van alle drie de effecten zijn voorbeelden van incidenten te vinden. Om te kunnen bepalen hoe groot de effecten richting de omgeving kunnen zijn, zijn drie scenario's beschouwd:

- Scenario 1 brand: dit scenario gaat uit van het vrijkomen van stoffen uit batterijen in enerzijds een module en anderzijds een geheel rek met modules met ontsteking;
- Scenario 2 explosie: dit scenario gaat uit van het explosief ontsteken van een wolk batterijgas waarmee de gehele EOS is gevuld;
- Scenario 3 gifwolk: dit scenario gaat uit van het vrijkomen van stoffen uit batterijen in een module zonder ontsteking.

Uit het brandscenario blijkt dat EOSen door de thermal runaway een uniek brandverloop kennen. Door het openbarsten van individuele cellen kunnen er fakkels ontstaan en kan de brand met tussenpozen verlopen. Uit de eerste indicatieve berekeningen blijkt dat voor scenario 1 een brandaandachtsgebied wordt gevonden van maximaal 13 m voor een module. Het brandaandachtsgebied en daarmee de effecten op de omgeving zijn dan ook beperkt en vergelijkbaar met die van branden in opslagen met gevaarlijke stoffen.

Wanneer explosieve stoffen zich kunnen ophopen in een EOS kan, bij vertraagde ontsteking, een wolkbrand of een dampwolkexplosie ontstaan. Hier wordt bij scenario 2 vanuit gegaan. Uit de eerste indicatieve berekeningen blijkt dat een explosieaandachtsgebied van 57 m wordt gevonden. Bij de berekeningen zijn conservatieve aannames gedaan, overeenkomend met de methode in Safeti-NL. Hierdoor vindt waarschijnlijk een overschatting van de effecten plaats. Echter kan op

basis hiervan en door het feit dat er in het verleden zwaar letsel bij brandweerlieden is opgetreden door een explosie van een EOS, geconcludeerd worden dat de explosie-effecten relevant kunnen zijn voor omgevingsveiligheid.

Bij scenario 3 wordt er vanuit gegaan dat er bij een incident met een EOS giftige stoffen vrijkomen die niet ontsteken. Er ontstaat daardoor een giftige wolk. Uit de eerste indicatieve berekeningen blijkt dat voor enkele worst-case situaties de gifwolkaandachtsgebieden maximaal 24 m zijn. De gevonden afstanden zijn sterk afhankelijk van de omvang van de modules. Op basis van deze uitkomsten kan geconcludeerd worden dat de gifwolkeffecten van een incident met een EOS (met een grote module-omvang) relevant kunnen zijn voor omgevingsveiligheid.

Op basis van bovenstaande uitkomsten doet het RIVM verschillende aanbevelingen aan het ministerie.

- Gezien de beperkte brandeffecten wordt aanbevolen energieopslagsystemen op dezelfde wijze te behandelen als PGS15-opslagen, waarbij brand niet wordt meegenomen in de risicobeoordeling;
- Gezien de gevonden omvang van de gifwolk- en explosie-effecten wordt aanbevolen om bij de plaatsing van energieopslagsystemen rekening te houden met deze mogelijke effecten op de omgeving;
- Wanneer het ministerie op basis hiervan besluit afstandenbeleid te gaan voeren, kan het RIVM een rekenvoorschrift opstellen om de benodigde aan te houden afstanden te berekenen.

1 Inleiding en aanleiding

De energietransitie leidt tot het inzetten van duurzame energiebronnen, zoals windturbines en zonnepanelen. Een kenmerk van deze bronnen is dat de energieproductie (elektriciteitsopwekking) hiermee niet altijd op momenten plaatsvindt waarop de energie gebruikt wordt. Daarom wordt gezocht naar manieren om deze energie op te kunnen slaan. Er zijn meerdere manieren om energie op te slaan. Er zijn fysische systemen, waarbij bijvoorbeeld met behulp van dammen of geothermie energie wordt opgeslagen. Daarnaast kan energie worden opgeslagen door chemische omzetting naar bijvoorbeeld waterstof. Ook kan energie chemisch worden opgeslagen in batterijen. Dit laatste gebeurt in energieopslagsystemen (EOSen), zoals buurtbatterijen en mobiele energieopslagsystemen.

Door de energietransitie komt er steeds meer vraag naar energieopslagsystemen. De voorspellingen zijn dat in 2040 wereldwijd 2,5 tot 4 TWh aan EOSen in gebruik zijn (Christensen et al. 2022, ExpertgroepBatterijen 2022). Dit is een groei van 6 tot 10 keer de huidige hoeveelheid (Liu and Huang 2021, ExpertgroepBatterijen 2022).

Op dit moment zijn de meeste bestaande en geplande EOSen op basis van lithium-ion batterijen. Lithium-ion energiedragers brengen risico's met zich mee, omdat er bij een incident een hevige brand kan ontstaan, er giftige stoffen kunnen vrijkomen of een explosie kan plaatsvinden. Er is echter nog onvoldoende bekend over deze mogelijke effecten en de effectafstanden om te kunnen bepalen of energieopslagsystemen relevant zijn voor omgevingsveiligheid. Hierdoor bestaan er in de praktijk, bij onder andere adviesbureaus en vergunningverleners, vragen over hoe met aanvragen voor energieopslagsystemen omgegaan moet worden.

In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) onderzocht of energieopslagsystemen relevant zijn voor omgevingsveiligheid, gezien de mogelijke effecten en effectafstanden bij een incident. De resultaten van dit onderzoek zijn in dit briefrapport beschreven. Op basis hiervan kan het ministerie besluiten energieopslagsystemen wel of niet (expliciet) aan te wijzen als milieubelastende activiteit en of er afstandenbeleid nodig is, waar een rekenvoorschrift voor ontwikkeld moet worden.

1.1 Afbakening

In dit briefrapport is onderzocht of energieopslagsystemen relevant zijn voor omgevingsveiligheid, gezien de mogelijke effecten en effectafstanden bij een incident. Op dit moment zijn de meeste bestaande en geplande EOSen op basis van lithium-ion batterijen, daarom richten we ons hierop. Er is uitsluitend gekeken vanuit het perspectief van omgevingsveiligheid en niet vanuit het perspectief van bijvoorbeeld bestrijding en hulpverlening. Het is bekend dat het bestrijden van lithium-ion branden uitdagingen en afwijkende risico's

voor hulpverleners met zich kan meebrengen ten opzichte van andere branden. Dit valt buiten de scope van dit briefrapport.

Daarnaast zijn uitsluitend energieopslagsystemen beschouwd met een capaciteit vanaf 20 kWh. Dit is gelijk aan de grenstelling in de PGS 37-1¹. Kleinere EOSen vallen in de categorie thuisbatterijen en hebben dus geen industriële toepassing, waar bij omgevingsveiligheid naar wordt gekeken. Daarnaast zijn thuisbatterijen vaak in een gebouw geplaatst, waarbij de effecten van een incident gezien kunnen worden als interne veiligheid. Er zijn echter wel voorbeelden van incidenten met thuisbatterijen, waarbij een brand of explosie heeft plaatsgevonden of waarbij giftige gassen vrijkwamen (Lambert 2019, Henriksen et al. 2023). Ook aan deze systemen zijn dus risico's verbonden.

1.2 Begeleidingscommissie

Bij dit onderzoek is een begeleidingscommissie betrokken. De commissie bestond uit experts van DCMR, DNV, Mlab Testing, NIPV en Omgevingsdienst Flevoland, Gooi en Vechtstreek (zie bijlage 3).

Het doel achter het betrekken van de begeleidingscommissie was om de kennis van stakeholders en experts te kunnen gebruiken bij het onderzoek naar de relevantie van EOSen voor omgevingsveiligheid.

1.3 Leeswijzer

Dit briefrapport is als volgt opgebouwd. Na de inleiding (hoofdstuk 1) waarin de aanleiding en afbakening van het onderzoek zijn beschreven, volgt in hoofdstuk 2 de aanpak van het onderzoek. Hoofdstuk 3 beschrijft typen EOSen en uitvoeringen en in hoofdstuk 4 zijn een aantal incidenten met EOSen besproken. In hoofdstuk 5 zijn vervolgens mogelijke scenario's beschreven en de uitkomsten van de berekeningen naar de effecten en effectafstanden van incidenten met EOSen. In hoofdstuk 6 staan ten slotte de conclusies en aanbevelingen.

¹ De PGS 37-1 is een richtlijn die zich richt op de veiligheid van lithium-houdende energiedragers en de juiste toepassing ervan in EOSen door uniforme maatregelen. De PGS 37-1 is in juli 2023 vastgesteld door de PGS-stuurgroep en in december 2023 definitief vastgesteld in het Bestuurlijk Omgevingsberaad.

2 Aanpak

2.1 Wanneer relevant voor omgevingsveiligheid

Om te kunnen bepalen of energieopslagsystemen relevant zijn voor omgevingsveiligheid, moet allereerst bepaald worden wanneer een activiteit in het algemeen relevant is voor omgevingsveiligheid. In het Protocol aanpassing rekenmethodieken externe veiligheid (Gooijer et al. 2012) is opgenomen wanneer een incidentscenario van een activiteit relevant is om meegenomen te worden in de rekenmethodiek voor omgevingsveiligheidsrisico's. Het gaat hierbij om denkbare scenario's waarvan de mogelijke gevolgen groot zijn.

Er wordt vanuit gegaan dat een scenario denkbaar is wanneer de frequentie van optreden hoger wordt geschat dan het afkapcriterium van 10^{-9} per jaar. Daarbij wordt een scenario als niet relevant voor omgevingsveiligheid beschouwd als hier nog nooit over gerapporteerd is, ondanks veelvuldige toepassing van het proces of de activiteit of als het scenario door Nederlandse omstandigheden kan worden uitgesloten. Daarnaast wordt er vanuit gegaan dat een scenario mogelijk grote gevolgen heeft als er buiten de begrenzing van de activiteit letaal letsel kan ontstaan. We gaan er vanuit dat dit het geval is als het brand-, explosie- of gifwolkaandachtsgebied buiten de terreingrens komt.

Er is bekend dat er incidenten met EOSen kunnen plaatsvinden (zie hoofdstuk 4). Daarnaast zijn er geen specifieke Nederlandse omstandigheden waardoor incidenten met EOSen hier kunnen worden uitgesloten. Daarom is er vanuit gegaan dat incidenten met EOSen ook in Nederland denkbaar zijn. Omdat EOSen een relatief jonge technologie zijn, is er nog niet veel informatie over de kans op een incident. In de literatuur zijn al wel eerste afleidingen te vinden voor faalfrequenties van EOSen. In bijlage 2 zijn indicatieve plaatsgebonden risicocontouren berekend, waarbij we zijn uitgegaan van de faalfrequenties uit de literatuur.

Ook over de mogelijke effecten en tot hoever de effecten bij een incident kunnen reiken is nog niet veel bekend. Om te kunnen bepalen of EOSen relevant zijn voor omgevingsveiligheid is hier meer informatie over nodig. Daarom is in dit onderzoek de nadruk gelegd op de effecten van een incident en de effectafstanden die daarbij kunnen optreden. Hierbij speelt de onzekerheid in de kans van optreden geen rol.

2.2 Onderzoek

Door middel van literatuurstudie (zie bijlage 4) is informatie verzameld die nodig is om te kunnen bepalen of energieopslagsystemen relevant zijn voor omgevingsveiligheid. Tijdens de literatuurstudie is gezocht naar specifieke informatie over energieopslagsystemen, zoals typen en uitvoeringen van energieopslagsystemen. Daarnaast is gezocht naar incidenten met EOSen om een incidentanalyse te kunnen uitvoeren naar de effecten.

Ook is in de literatuur gezocht naar informatie over welke stoffen vrij kunnen komen bij een incident, de totale hoeveelheid stoffen die vrij

kan komen en de snelheid waarmee deze vrijkomen. Daarbij is gelet op de invloed van de samenstelling van de batterij en het ladingsniveau. In de literatuur zijn met name tests te vinden die op de schaal van één lithium-ion batterij, of (kleine) modules, kijken welke effecten mogelijk zijn. Met de gevonden informatie zijn berekeningen uitgevoerd met het rekenprogramma Safeti-NL versie 8.8 dat gebruikt wordt om de omgevingsveiligheidsrisico's te berekenen. Hiertoe is het aantal batterijen geëxtrapoleerd tot hoeveelheden die relevant zijn voor (onderdelen van) EOSen.

Aan de hand van de berekeningen is er bekeken of er omgevingsveiligheidsrisico's zijn. Daarvoor zijn de brand-, explosie- en gifwolkaandachtsgebieden bepaald.

Aandachtsgebieden zijn gedefinieerd als gebieden rond activiteiten met gevaarlijke stoffen die zichtbaar maken waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen onvoldoende beschermd kunnen zijn tegen de gevolgen van ongevallen met gevaarlijke stoffen (RIVM 2023a). Bij de gevolgen van een ongeval met gevaarlijke stoffen gaat het om de effecten brand, explosie en gifwolk. Per aandachtsgebied is naar de volgende begrenzing gekeken:

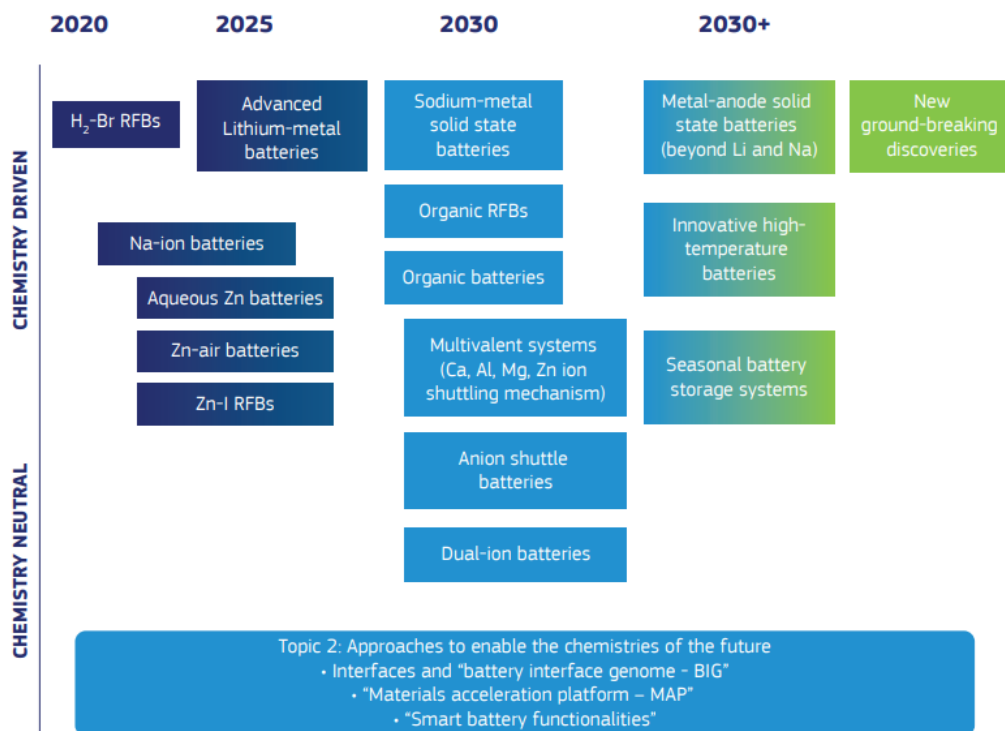
- Brandaandachtsgebied: de locatie begrensd door de afstand, waar als gevolg van een ongeval dat leidt tot een plasbrand of een fakkelbrand, de warmtestraling ten hoogste 10 kW/m^2 is;
- Explosieaandachtsgebied: de locatie begrensd door de afstand, waar als gevolg van een ongeval dat leidt tot:
 - a. een kokende vloeistof-gasexpansie-explosie (BLEVE), de warmtestraling ten hoogste 35 kW/m^2 is, en
 - b. een explosie, anders dan onder a, de overdruk ten hoogste 10 kPa is.
- Gifwolkaandachtsgebied: de locatie begrensd door de afstand, waar als gevolg van een ongeval dat leidt tot een gifwolk, personen in een gebouw overlijden door blootstelling aan de levensbedreigende waarde van een stof voor een periode van dertig minuten².

² Bij het gifwolkaandachtsgebied zullen we kijken naar de $2,54 \times \text{LBW}$ contour volgens het huidige rekenvoorschrift. Per 1 januari 2025 wordt echter beoogd het rekenvoorschrift voor gifwolkaandachtsgebieden aan te passen naar de Indoor dosis. Met het oog hierop kijken we in dit briefrapport ook hiernaar.

3 Typen EOSen en uitvoeringen

3.1 Batterijtechnologieën

Batterijtechnologieën zijn er in meerdere soorten. Het gaat daarbij enerzijds om batterijtechnologieën die al veelvuldig gebruikt worden. Anderzijds zijn er batterijtechnologieën in opkomst. Figuur 1 laat bestaande batterijtechnologieën zien en een verwachting van de ontwikkeling van batterijtechnologieën in de komende jaren. Voorspelde opkomende technologieën zijn onder andere redox flow batterijen (vanadium of waterstof-broom (HBr) zijn de meest voorkomende in Nederland)(ESNL 2023), sodium-ion batterijen (natrium-ion), nikkel metaal hydride batterijen, silicium-anode batterijen, solid state (vast elektrolyt) batterijen, all-solid-state batterijen (anode puur lithium metaal) en lithium-lucht batterijen.



Figuur 1 Roadmap van bestaande batterijtechnologieën en voorspelde opkomende technologieën (ExpertgroepBatterijen 2022)

3.2 Type lithium-ion batterijen

Zover ons bekend zijn de huidige EOSen die in Nederland in bedrijf zijn of in de nabije toekomst gepland worden met name van het type lithium-ion batterijen (ESNL 2023, Brans 2023a). Bij het beantwoorden van de vraag of EOSen relevant zijn voor omgevingsveiligheid, richten we ons daarom op EOSen op basis van lithium-ion batterijen. Voor het inschatten van de omgevingsveiligheidsrisico's van andere batterijen zal goed naar de onderliggende scheikunde gekeken moeten worden en zal onderbouwing nodig zijn welke effecten in welke mate een rol spelen.

Hoewel er vaak over lithium-ion batterijen gesproken wordt, is dit een verzamelnaam van verschillende op lithium-ion gebaseerde batterijen.

Het gaat hierbij onder andere om:

- Lithium kobalt oxide (LCO);
- Lithium nikkel kobalt aluminium oxide (NCA);
- Lithium mangaan oxide (LMO);
- Lithium ijzer fosfaat (LFP);
- Lithium titanaat (LTO);
- Lithium nikkel mangaan kobalt oxide (NMC);
- Lithium stikstof oxide;
- Lithium aluminium oxide;
- Lithium nikkel kobalt aluminium oxide met lithium aluminium titaan fosfaat (NCA-LATP).

NMC is hierbij het meest voorkomende type lithium-ion batterij. Dit type wordt vaak bedoeld als de verzamelnaam 'lithium-ion batterij' wordt genoemd. Dat dit type het meest voorkomend is, is met name vanwege de hoge energiedichtheid van de batterij, die belangrijk is voor bijvoorbeeld elektrische voertuigen. In EOSen daarentegen komt LFP het meest voor (60%), gevolgd door NMC (30%). De overige 10% wordt grotendeels ingenomen door NCA (Mylenbusch et al. 2023). De begeleidingscommissie stelt dat LFP-batterijen veiliger zijn dan NMC-batterijen. Dit komt voornamelijk door het verschil in thermal runaway temperatuur (zie paragraaf 4.1). De thermal runaway temperatuur van NMC-batterijen is lager dan van LFP-batterijen, met een verschil tot 20°C. Hierdoor is de kans op een incident met LFP-batterijen waarschijnlijk kleiner. Daarnaast brandt ijzer (LFP) niet zoals mangaan (NMC), waardoor LFP branden minder gemakkelijk kunnen overslaan van cel op cel (Bly 2023). Vanwege dit verschil in veiligheid worden LFP-batterijen meer in EOSen toegepast. Er zijn bijvoorbeeld omgevingsdiensten waar in de vergunning geëist wordt dat LFP-batterijen worden toegepast, omdat deze op dit moment het veiligst zijn.

3.3 Vormen van EOSen

Naast de verschillende type lithium-ion batterijen zijn er ook verschillende vormen waarin een EOS kan worden uitgevoerd. In de PGS 37-1 richtlijn (PGS 2023) zijn de volgende veel voorkomende typen EOSen gedefinieerd:

- *Zelfstandig EOS in (aangepaste) container:* stationair opgesteld EOS in een (aangepaste) zeecontainer, of andere behuizing met vergelijkbare afmetingen;
- *Energieopslagpark:* meerdere zelfstandige EOSen in aangepaste containers, of andere behuizing, op één locatie die aan elkaar gekoppeld zijn en samen een systeem vormen;
- *EOS-park met niet-betreedbare behuizingen in de open lucht:* stationair opgestelde, gekoppelde EOSen in een speciaal voor de EOS bedoelde behuizing;
- *Mobiel EOS:* mobiel opgesteld EOS in aangepaste container, of andere eigen behuizing, voor tijdelijk gebruik van maximaal 1 jaar op locatie, bijvoorbeeld op evenementen of bouwlocaties;

- *Inpandig EOS met eigen ruimte*: stationair opgesteld EOS in een specifieke ruimte binnen een gebouw, bijvoorbeeld toegepast als noodstroomvoorziening;
- *Inpandig EOS in open ruimte*: stationair opgesteld klein EOS in een ruimte die primair voor een andere functie bedoeld is, bijvoorbeeld toegepast als energievoorziening voor vorkheftrucks.

Voor meer informatie over de typen EOSen wordt verwezen naar PGS 37-1(publicatiereeksgevaarlijkstoffen.nl/publicaties/pgs37-1/). In deze PGS zijn foto's en ontwerp- en constructie-eisen opgenomen voor de verschillende typen EOS, zoals plaatsingseisen en eisen aan brandwerendheid, compartimentering en ventilatie (PGS 2023).

Bij een incident met een inpandige EOS worden de effecten in het gebouw waar de EOS geplaatst is, gezien als interne veiligheid en vallen dus buiten de scope van dit onderzoek. Wel kunnen de effecten groot zijn, bijvoorbeeld wanneer een EOS geplaatst is in de kelder van een appartementencomplex en er bij een incident brandbare en giftige stoffen vrijkomen (Brans 2023b).

In dit briefrapport wordt gesproken over 'cellen', 'modules' en 'rekken' van een EOS (PVSyst 2022). In de literatuur wordt met dezelfde term nog wel eens een andere deel van een EOS bedoeld. Hiertoe definiëren we hier hoe wij deze termen hanteren:

- **Cellen**: Hiermee worden losse batterijcellen bedoeld. Dit kunnen bijvoorbeeld cilindrische, prismatische of pouch cellen zijn. Als de omhulzing van de cel wordt doorbroken, komt de chemische inhoud vrij.
- **Modules**: Hiermee wordt een cluster cellen bedoeld, die fysiek bij elkaar opgeslagen ligt. De grens van de module wordt gekenmerkt door thermische isolatie: zoals luchtisolatie (voldoende onderlinge afstand), actieve koeling of andere hitte-isolatie. Vaak is dit een lade in een rek.
- **Rekken**: Een rek beslaat alle modules met batterijen die boven elkaar liggen, ter breedte en diepte van de breedste en diepste module. Een EOS is vaak opgebouwd uit meerdere rekken.
- **EOS**: Een verzameling van rekken met batterijen die zich vaak in een ruimte, gebouw of omgebouwde zeecontainer bevindt. De behuizing van een EOS-systeem/installatie is de grens van het systeem. Een EOS park bestaat dus uit meerdere EOS-systemen/installaties.

4 Incidenten met EOSen

Het opslaan van veel potentiële energie op één plek gaat gepaard met risico's. Van lithium-ion batterijen is bekend dat ze instabiel kunnen worden bij overladen, diepontladen, hoge en lage temperaturen en slag of stoot (PGS 2023). Bij instabiel geworden lithium-ion batterijen kan de opgeslagen energie hevig vrijkomen in de vorm van brand, een explosie of giftige stoffen.

4.1 Incidentscenario's

In de PGS 37-1 zijn verschillende incidentscenario's voor lithium-houdende energieopslagsystemen vastgelegd. Het gaat hierbij om scenario's voor de oorzaak van een incident en scenario's voor de gevolgen. Voor de effectbepalingen zijn met name de gevolgscenario's van belang. De volgende gevolgscenario's zijn in de PGS 37-1 vastgelegd (PGS 2023):

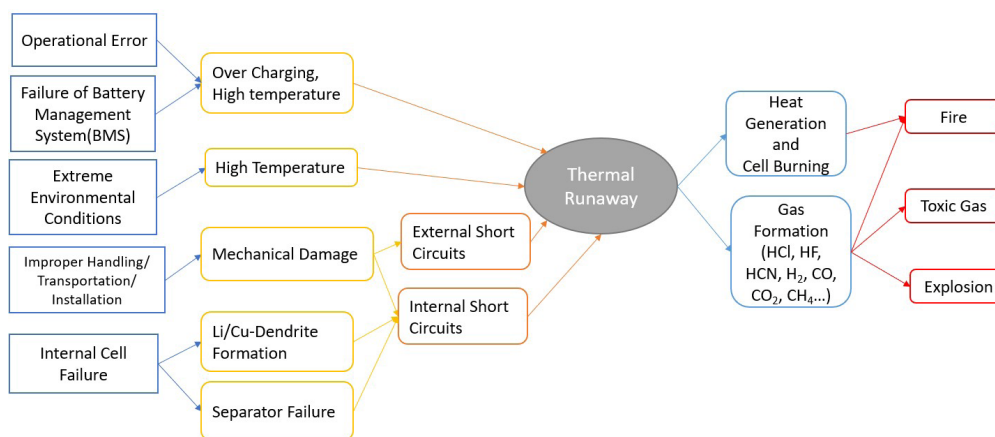
- Brand in de energiedrager: ontstaan van brand in de energiedrager als gevolg van thermal runaway;
- Drukopbouw of explosie binnen energiedrager (energiedragermodule): instantaan falen door drukopbouw of een explosie in de energiedrager-/accupakket als gevolg van thermal runaway;
- Explosie in EOS-installatie: explosie in EOS-installatie – ontsteking van vrijkomende gassen;
- Hoge temperatuuropbouw: opwarming van de energiedrager tot hoge temperaturen;
- Escalatie van brand naar andere energiedragers of energiedragermodules: escalatie naar energiedragers in de EOS door brand in een energiedrager of energiedragermodule;
- Drukopbouw binnen de EOS: falen van de integriteit van de EOS door een drukopbouw als gevolg van vrijkomen (gevaarlijke) dampen;
- Escalatie naar omgeving: escalatie van de gevolgen van het ontstaan van een thermal runaway naar de omgeving van de EOS;
- Vrijkomen van gevaarlijke stoffen: vrijkomen van gevaarlijke stoffen, zoals waterstoffluoride, lithiumoxide en zoutzuur als gevolg van een thermal runaway reactie, brand of lekkage.

Thermal runaway vormt de basis voor bovengenoemde scenario's. In de PGS 37-1 is de volgende omschrijving van een thermal runaway gegeven (PGS 2023):

"Een thermal runaway is een ongecontroleerde toename in temperatuur als gevolg van een grotere warmteproductie dan warmteafvoer. De temperatuuroptoe name is bij een thermal runaway het gevolg van een positief feedbackmechanisme. Een toename in de temperatuur leidt tot een toename van de reactiesnelheid en bijgevolg tot een toename van de warmteproductie. Als deze extra warmte niet of niet snel genoeg afgevoerd kan worden, stijgt de temperatuur van het reactiemengsel, waardoor de reactiesnelheid en de warmteproductie verder toenemen.

Een thermal runaway reactie leidt tot een zeer snelle toename van de druk en de temperatuur en bijgevolg een ontleding, een explosie en/of brand van de energiedrager, waarbij zeer giftige pyrolyseproducten vrijkomen.”

Een thermal runaway houdt zichzelf in stand en door aanstralen van naastgelegen batterijen (thermische propagatie) kunnen ook deze batterijen in thermal runaway raken. De effecten van een batterij in thermal runaway voor de omgeving kunnen worden samengevat als brand, explosie en giftige wolk, zie Figuur 2.



Figuur 2 Incidentscenario's van energieopslagsystemen (Stokes et al. 2022)

4.2 Incidenten met EOSen

Er zijn verschillende voorbeelden van incidenten met EOSen. Een vijftigtal incidenten is terug te vinden in de BESS Failure Event Database (EPRI 2023). Om een beeld te geven van het mogelijke verloop van een incident en de mogelijke effecten worden hieronder een aantal incidenten beschreven. Deze selectie aan incidenten illustreren verschillende scenario's die kunnen optreden.

4.2.1 Drogenbos, België

In Drogenbos, België, is op 11 november 2017 brand geweest in een EOS. Het ging hierbij om een EOS-testopstelling. De testopstelling bestond uit drie EOSen, elk van in totaal 1 megawatt aan verschillende lithium-ion batterijen en elk van een andere producent.

De brand was snel onder controle, maar er bleven giftige stoffen vrijkomen die zich in de vorm van een wolk over de omgeving verspreidde (zie Figuur 3). Het gevolg hiervan was dat er een vijftigtal meldingen uit de omgeving kwamen over irritatie aan de keel en luchtwegen. Metingen wezen uit dat er geen groot gevaar was voor de volksgezondheid, maar preventief werd inwoners van Drogenbos en de omliggende gemeenten gevraagd om ramen en deuren dicht te houden (Vierendeels 2017). Tijdens het blussen was er ook kans op een explosie, maar deze is uitgebleven.

Dit incident is hiermee een voorbeeld van een brand in een EOS waarbij gevaarlijke stoffen vrijkomen en zich verspreiden naar de omgeving.



Figuur 3 Container met batterijen in brand in Drogenbos (Vierendeels 2017)

4.2.2 Peking, China

In Peking, China, is op 15 april 2021 een incident geweest met een 25 megawatt energieopslagsysteem, verdeeld over twee eenheden die elektrisch verbonden waren. Een van de eenheden is in brand gevlogen en later ontplofte de andere (zie Figuur 4). Hierbij zijn twee brandweerlieden om het leven gekomen (CEPT 2021).

De precieze oorzaak van de brand in de eerste eenheid is onbekend. In het onderzoek hiernaar zijn meerdere mogelijke oorzaken gevonden. Er vond op het moment van het incident onderhoud plaats aan de systemen. Mogelijk was een fout tijdens dit onderhoud de oorzaak. Tevens was er op de dag van het incident een waarschuwing voor stoffige winden. Stofopbouw kan hittebeheersing lastiger maken, of zelfs elektronica beschadigen.

De explosie in de tweede eenheid is waarschijnlijk ontstaan doordat de explosieve gassen zich uit de eerste eenheid via de kabelgoot naar de tweede eenheid konden verplaatsen en daar konden opbouwen.

Dit incident is hiermee een voorbeeld van meerdere typen incidenten, namelijk een brand, escalatie naar een naastgelegen energiedrager en een explosie.



Figuur 4 Brand en explosie in elektrisch verbonden EOSen in Peking (CEPT 2021)

4.2.3 Geelong, Australië

In Geelong, Australië, is op 30 juli 2021 een EOS in thermal runaway geraakt. De EOS maakte deel uit van een energieopslagpark met 212 EOSen met een totaal vermogen van 300 megawatt. De betreffende EOS had een vermogen van 3 megawatt (Colthorpe 2021).

De thermal runaway begon in één cel, waarschijnlijk door een lek in het koelmiddel. De daarop volgende brand escaleerde tot het punt dat een tweede naastgelegen EOS ook in brand vloog (Wong 2021) (zie Figuur 5). De thermal runaway werd niet gedetecteerd door de monitoringsystemen, omdat de batterij niet in gebruik was op het moment van het incident. Tijdens de brand is een waarschuwing uitgegaan naar de omgeving in verband met de giftige rook die vrijkwam.

Dit incident is hiermee een voorbeeld van een escalatie van een incident bij één EOS naar een naastgelegen energiedrager.



Figuur 5 Escalatie brand van EOS in Geelong naar naastgelegen EOS (Wong 2021)

4.2.4 *Surprise, Arizona*

In Surprise, Arizona, is op 19 april 2019 een EOS geëxplodeerd. De EOS bestond uit een installatie van 2 megawatt.

Het incident begon met rook die uit de EOS vrij kwam (Randazzo 2020). Bij de brandweerlieden was geen bestrijdingsplan bekend voor incidenten met EOSen. Twee minuten nadat de deur van de EOS geopend werd, explodeerde de EOS. Hierbij raakten enkele brandweerlieden gewond. Dit incident is in detail onderzocht en wordt in Paragraaf 4.3 uitvoeriger besproken.

4.3 **Voorbeeld incident: EOS deflagratie in Surprise, Arizona**

Het incident in Surprise is in detail onderzocht, nadat hier vier brandweerlieden gewond zijn geraakt (McKinnon et al. 2020).

De EOS bevatte 2,16 megawatt uur (2 megawatt)³ aan NMC batterijen in een zeecontainerstructuur. Het gebouw was 15 x 4 x 3,7 m en bevatte 27 rekken aan batterijen. Per rek waren 14 modules aanwezig, met in iedere module 28 NMC pouch cellen (2 parallelle sets van 14 cellen in series (2P14S)). Dit betekent dat er 10.584 batterijen aanwezig waren. Het laadniveau was circa 90%.

³ Megawatt uur (MWh) is een maat van capaciteit. Dit geeft aan hoeveel energie er in totaal is opgeslagen en is een maat die kan worden gebruikt om er achter te komen hoeveel batterijen er aanwezig zijn. Megawatt (MW) is een maat voor hoeveel vermogen een EOS op een moment kan leveren. Deze maat kan gebruikt worden om te bepalen hoe goed een EOS is in bijvoorbeeld het stabiliseren van het net of hoeveel huizen het kan voeden. Deze maat is minder van belang voor het berekenen van effecten voor omgevingsveiligheid.

Bij dit incident raakte één van de batterijcellen in thermal runaway waarna het gasblussysteem (met Novec 1230) in werking trad. Door het blussen werd ontbranding van de installatie voorkomen, maar het systeem werd niet voldoende gekoeld om de thermal runaway te stoppen. Uiteindelijk raakten meerdere cellen in thermal runaway en bleven er gassen vrijkomen, waardoor een explosieve atmosfeer ontstond. Uit onderzoek is gebleken dat deze wijze van bestrijding de kans op een explosie vergroot (McKinnon et al. 2020, Barowy et al. 2021).

Toen de brandweer arriveerde, zagen ze een laaghangende witte damp (zie Figuur 6). Deze damp rook naar azijn. Met het oog op mogelijke giftige stoffen werd het HAZMAT⁴ team ingeschakeld.



Figuur 6 EOS in Surprise, Arizona tijdens het vrijkomen van gassen gedurende de thermal runaway (McKinnon et al. 2020)

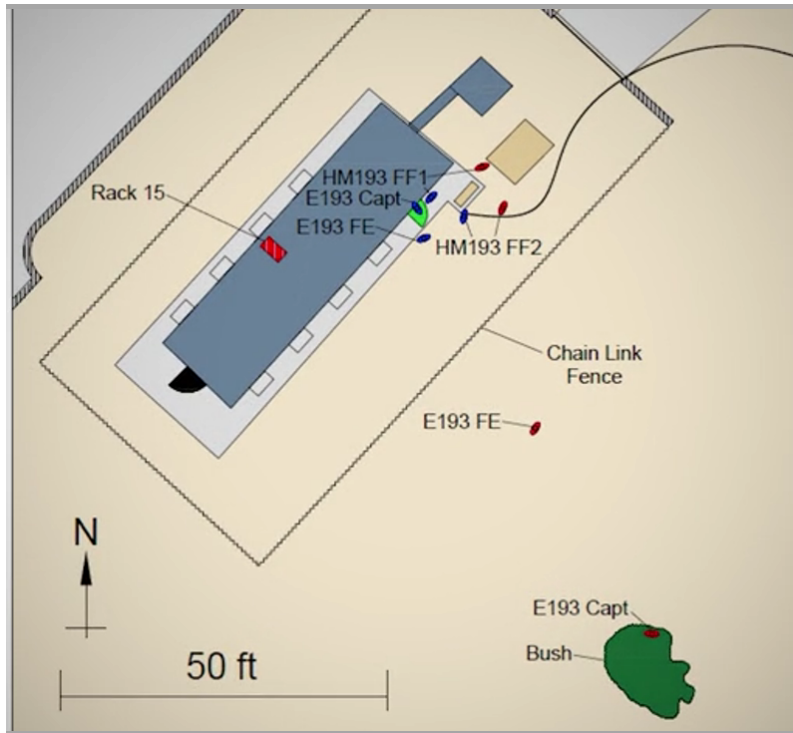
Het HAZMAT team mat dat in de damp koolmonoxide (CO) en waterstofcyanide (HCN) aanwezig was. Het duurde circa drie uur voordat de dampen niet meer uit de EOS kwamen. Tot die tijd was er nog geen actieve bestrijding uitgevoerd door de brandweer. Na die tijd ging het HAZMAT team naar de EOS om de deur te openen met als doel de EOS te ventileren. De dampen in de EOS hingen hoog, van het plafond tot ongeveer 1,5m boven de grond. Er was binnen geen brand en er waren geen elektrisch vonken.

Tijdens de verkenning kon de interne atmosfeer, die bestond uit brandbare stoffen, en de buitenlucht (zuurstof) mengen. Circa twee minuten na het openen van de deur vond er een plotselinge ontsteking (flashover) plaats en explodeerde de brandbare wolk in de EOS (deflagratie). De brandweerlieden werden weggeslingerd en door hulpverleners verderop werd een steekvlam gezien van circa 23 m lang en 6 m hoog.

In Figuur 7 is te zien wat de positie van de brandweerlieden was ten tijden van de explosie en waar ze naar toe geblazen zijn door de drukgolf. De bevelvoerder (volwassen man in brandweeruitrusting, E193

⁴ HAZardous MATerials

Capt in de figuur) werd het verste (23 m) weggeblazen, door de omheining heen. Voor de oriëntatie: in Figuur 6 kijkt men vanuit het noorden.



Figuur 7 Schematische weergave van de EOS en de positie van de brandweerlieden voor (blauw) en na (rood) de explosie. Rek 15 is specifiek aangewezen in deze figuur omdat hier de thermal runaway begon (McKinnon et al. 2020)

In de evaluatie van dit incident werd genoemd dat de omgeving gevaar had kunnen lopen door de explosie en/of de dampen die vrijkwamen bij het incident. Dat er geen grotere gevolgen zijn ontstaan, kwam in dit geval vooral doordat deze EOS vrijstaand was en er dus geen andere bebouwing in de directe omgeving aanwezig was.

5 Scenario's voor bepalen effecten

De effecten van een batterij in thermal runaway voor de omgeving kunnen worden samengevat als brand, explosie en gifwolk. In dit hoofdstuk wordt op elk effect dieper ingegaan. Ook worden de uitkomsten besproken van de berekeningen naar de effecten en effectafstanden van incidenten met EOSen. In bijlage 1 is in detail beschreven hoe de berekeningen zijn uitgevoerd.

Er is voor gekozen om drie scenario's van incidenten met EOSen uit te werken. Deze zijn getoetst bij de begeleidingscommissie. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat EOSen voldoen aan de onlangs gepubliceerde PGS 37-1. Incidenten waarbij een volledig EOS in één keer betrokken raakt en dus in één keer alle gassen vrijkomen, zijn niet realistisch. Alle bij ons bekende incidenten zijn (voor zover gerapporteerd) begonnen in één batterij cel waar vanuit propagatie heeft plaatsgevonden, of zijn ontstaan door aanstralen door een externe brand. In beide gevallen verspreidt een incident zich niet instantaan over het gehele EOS. Voor het bepalen van de relevantie voor omgevingsveiligheid gaan we uit van onderstaande realistische worst-case scenario's.

Scenario 1: brand

Het eerste scenario beschrijft een incident waarbij een cel van een EOS in thermal runaway raakt en het vrijkomende gas ontsteekt. Dit scenario kan ook ontstaan doordat een EOS door een externe brand wordt aangestraald. Het incident kan uiteindelijk escaleren tot een incident waarbij het volledige EOS in brand staat, zoals in Geelong. Echter, zal dit niet instantaan gebeuren en zullen de gassen ook niet tegelijkertijd vanuit de gehele EOS vrijkomen. We doen de aanname dat in het ergste geval maximaal een geheel rek met batterijmodules tegelijk stoffen uitstoot, dit op basis van de brandontwikkeling in onder andere tests (Ditch and Zeng 2020, Barowy et al. 2021). Ook wordt doorgerekend wat de effecten zijn van de uitstoot van stoffen uit een module.

Effectief zal dit scenario 'brand' het vrijkomen zijn van stoffen uit batterijen in enerzijds een module en anderzijds een geheel rek met modules met ontsteking.

Scenario 2: explosie

Het tweede scenario beschrijft de mogelijkheid dat een wolk van batterijgas explosief ontsteekt. Dit werd gezien bij het incident in Surprise Arizona. Hier kwamen giftige gassen vrij uit één module, zonder dat deze ontstaken. Vervolgens vulde de volledige zeecontainer zich met het batterijgas, die catastrofaal faalde en leidde tot deflagratie en explosie effecten.

Effectief zal dit scenario 'explosie' het explosief ontsteken zijn van een wolk batterijgas waarmee de gehele EOS gevuld is.

Scenario 3: gifwolk

Ten slotte beschrijft scenario drie een incident waarbij een cel in thermal runaway raakt en het vrijkomende gas niet ontsteekt. In dit geval kan door de warmte die ontstaat een gehele module in thermal runaway raken, waarbij gassen vrijkomen. Hierbij doen we de conservatieve aanname dat de propagatie dusdanig snel is dat op een bepaald moment iedere cel in de module aan het ontgassen is. Dit kan ook gezien worden als het opbouwen van gas uit de cellen in de module, in de secundaire verpakking rondom de gehele module, dat vervolgens vrijkomt.

Zonder ontsteking zal een dergelijk incident niet verder escaleren dan één module. Tussen de modules is isolatie aanwezig waardoor de kans op thermal runaway van een andere module door hitte-aanstraling klein is. Wel is er de kans op gesmolten materiaal dat op onderliggende modules lekt. Echter nemen wij voor een dergelijk proces aan dat dit dusdanig traag verloopt dat de omvang van het incident niet groter zal worden dan een volledige module die op één moment uitgast. Zie ook de details van het incident in Surprise (McKinnon et al. 2020, Barowy et al. 2021).

Effectief zal dit scenario 'gifwolk' dus het vrijkomen zijn van stoffen uit batterijen in een module zonder ontsteking.

5.1

Scenario 1: Brand

Van de vrijkomende stoffen bij een incident met lithium-ion energiedragers zijn de stoffen waterstof, methaan ethaan, propaan, benzeen, toluen, methanol, ethanol, ethyleen en HCN brandbaar (zie bijlage 1). Ook is van de bestanddelen van elektrolyten zelf bekend dat deze brandbaar zijn. Door de beperkt beschikbare informatie hierover worden deze bestanddelen echter niet meegenomen bij de effectbepalingen. In Figuur 8 is een aantal foto's weergegeven van incidenten met brandende EOSen.



Figuur 8 Voorbeelden van EOS-branden in 1) Linksboven: Ariège, Frankrijk (Marchand 2020) 2) Rechtsboven: Gunwi-Gun, Zuid Korea (Sang-bok 2022) 3) Linksonder: Geelong, Australië (Wong 2021) en 4) Hongseong, Zuid Korea (Herh 2021)

Wanneer incidenten van brandende EOSen worden bestudeerd, is te zien dat deze een uniek brandverloop kennen ten opzichte van gebouwbranden en branden in opslagen met gevaarlijke stoffen. Door de thermal runaway en het openbarsten van individuele cellen kunnen er fakkels ontstaan en kan de brand met tussenpozen verlopen. Ook kan de thermal runaway zichzelf in stand houden, waardoor bestrijding moeizaam is en de brand lang kan duren. Daarbij blijft de kans op herontsteking en explosie bestaan zolang de gasproductie door de thermal runaway nog in gang is of de batterij instabiel is (Brans 2023a).

Daarnaast blijkt uit de beschrijving van het incident in Surprise, Arizona dat ook een steekvlam kan ontstaan. Een steekvlam kan ontstaan wanneer brandbare dampen zich ophopen in de EOS. Dit is naar verwachting te voorkomen met voldoende (nood)ventilatie. Op basis van de PGS 37-1 is voor de meeste typen EOSen noodventilatie verplicht. De begeleidingscommissie stelt echter dat niet in ieder EOS-systeem ventilatie aanwezig is. Daarbij kan de ventilatie falen of niet voldoende zijn, waardoor alsnog een steekvlam kan ontstaan. Voor het bepalen van een brandaandachtsgebied dient een vlam echter ten minste twintig seconden aan te houden. De duur van de steekvlam uit een 'flash fire', zoals bij Surprise, is korter dan twintig seconden en daardoor niet relevant voor omgevingsveiligheid. Daarom wordt in dit scenario alleen gekeken naar de warmtestraling van de brand.

De warmtestraling die het brandaandachtsgebied begrenst is 10 kW/m^2 . Er zijn in de literatuur tests bekend met branden in EOSen waarbij de warmtestraling is gemeten. In Barowy (2021) wordt een test beschreven bestaande uit een EOS-brand beginnend met de thermal runaway van één cel. Tijdens deze test zijn op de achterwand aan de binnenzijde van de EOS aanstralingswaardes van gemiddeld boven de $12,5 \text{ kW/m}^2$ bereikt, met maximale waardes van circa 23 kW/m^2 . In het naastgelegen rek werden significant hogere waardes gemeten (tot 58 kW/m^2). De aanstraling op het tegenover gelegen rek was beduidend minder (tot maximaal 5 kW/m^2). Buiten de EOS werd de waarde voor het brandaandachtsgebied niet gehaald.

Naast de uitslagen van deze test zijn de effecten van scenario 1 ook berekend. Hierbij is gebruik gemaakt van een, wat betreft brandbare stoffen, worst-case mengsel (zie bijlage 1). Uit deze berekeningen blijkt dat er brandaandachtsgebieden gevonden worden (zie *Tabel B 10*). Het scenario is uitgerekend voor een losstaande module en een losstaand rek. Hierbij worden dus geen gebouwinvloeden meegenomen. De gevonden brandaandachtsgebieden zijn maximaal 13 m en 22 m (respectievelijk losstaande module en losstaand rek).

De berekening van het brandaandachtsgebied van een rek gaat er vanuit dat alle vrijkomende stoffen uit het rek met batterijen vanuit één punt vrijkomen en ontsteken. Dit is een onrealistisch scenario door de fysieke barrières die tussen modules worden aangebracht. Een EOS-brand zal dus het meest overeenkomen met de berekening van het brandaandachtsgebied van een module (McKinnon et al. 2020, Barowy et al. 2021). Zolang de brand zich in een EOS bevindt zullen de berekende warmtestralingseffecten buiten de EOS echter niet gehaald worden. Fysieke barrières, zoals de wanden van de EOS, zullen het

overgrote deel van de hittestraling opvangen, zoals beschreven in Barowy (2021).

De effecten van warmtestraling vanuit een batterijbrand op de omgeving zijn daarmee beperkt en vergelijkbaar met die van branden in opslagen met gevaarlijke stoffen⁵. Bij branden in opslagen wordt de beperkte warmtestraling niet meegenomen in het bepalen van de effecten op de omgeving. Er wordt vanuit gegaan dat gebouwbranden zich dusdanig langzaam ontwikkelen dat er voldoende tijd is om te vluchten voor mensen die zich buiten het gebouw bevinden (Kooi and Laheij 2021). Er worden wel afstanden aangehouden tussen de opslagen en omliggende gebouwen om brandoverslag tussen gebouwen te voorkomen (PGS 2023).

5.2 Scenario 2: Explosie

Het kan voorkomen dat de vrijkomende gassen tijdens een thermal runaway van een EOS niet direct ontsteken, waardoor de gassen kunnen ophopen. In dergelijke gevallen kan, bij vertraagde ontsteking, een wolkbrand of een gaswolkexplosie plaatsvinden. Met name verdampte organische componenten van het elektrolyt dragen bij aan het explosiegevaar (Brans 2023b). In hoofdstuk 4 zijn voorbeelden gegeven van incidenten waarbij explosies hebben plaatsgevonden, zoals in Surprise, Arizona en Peking, China.

Voor dergelijke explosies geldt hetzelfde als voor een steekvlam (zie paragraaf 5.1). Dit kan voorkomen als explosieve stoffen zich kunnen ophopen in de EOS. Wanneer de maatregel voor noodventilatie uit de PGS 37-1 wordt geïmplementeerd, is de verwachting dat een dergelijke ophoping aan explosieve gassen, met als gevolg een explosie, niet meer mogelijk is. Zoals eerder aangegeven, is in de PGS niet voor elk type EOS ventilatie verplicht en stelt de begeleidingscommissie dat niet in ieder systeem ventilatie aanwezig is. Daarbij kan de ventilatie ook falen of niet voldoende zijn. Daarom zijn de effecten van een mogelijke explosie in deze paragraaf verder beschouwd.

Er zijn in de literatuur tests gevonden waarbij de ontsteking van een gaswolk, die zich had opgebouwd in een EOS, plaatsvond. In Barowy (2021) wordt genoemd dat in hun test, bestaande uit een EOS-brand beginnend met de thermal runaway van één cel, de ontsteking van de wolk de deuren open drukte, met een geschatte kracht tussen de 10 en 31 kN. De deuren van een dergelijke container hebben een oppervlakte van ongeveer 5,3 m². Hieruit valt uit te rekenen dat het een drukgolf van 2 kPa tot 6 kPa betrof⁶. Dit is minder dan de grens van het explosieaandachtsgebied, die 10 kPa is. Ook in Jin (2021) wordt een explosie gesimuleerd. Binnen de EOS wordt een overdruk van 20 kPa gevonden, de drukgolf is onder de 5 kPa wanneer deze buiten de EOS treedt.

Ook scenario 2 is doorgerekend om de mogelijke effecten van een explosie op de omgeving te kunnen bepalen. Dit is gedaan met een

⁵ Hierbij dient opgemerkt te worden dat de branden enkel vanuit het perspectief van omgevingsveiligheid zijn bestudeerd. Dergelijke branden vertonen wel degelijk afwijkende risico's voor bijvoorbeeld de bestrijding en voor hulpverleners. Dit valt echter buiten de scope van dit document.

⁶ 1 kN/m² komt overeen met 1 kPa.

worst-case mengsel aan stoffen (zie bijlage 1). Hierbij is conservatief de hoogste explosieklasse gekozen (PGS 2005). Deze explosieklasse gaat uit van een explosie met een hoge ontstekingsenergie (zoals een explosie in een gebouw) en een ruimte met veel obstructies. Deze uitgangspunten worden ook gebruikt in Safeti-NL.

Een schatting van het vrije volume waarin het gas zich kan ophopen, kan erg uiteen lopen door het verschil in vormen van EOSen (zie hoofdstuk 3.3). Zo zal het effectieve volume van een niet-betreedbare behuizing relatief klein zijn, terwijl een inpandig EOS in een open ruimte juist een relatief groot effectief volume kan hebben. Daarom is voor het volume aan gas uitgegaan van een lege zeecontainer, zonder daarbij rekening te houden met het volume van de installaties in de container, waardoor er van een groot volume aan explosief gas wordt uitgegaan. De berekening is daarmee zeer conservatief. De berekeningen leveren een explosieaandachtsgebied van 57 m (10 kPa). Dit komt hoger uit dan de gemeten en gesimuleerde explosies uit de literatuur die hierboven beschreven staan (Barowy et al. 2021, Jin et al. 2021).

Door de zeer conservatieve aannames bij de berekeningen van het explosieaandachtsgebied vindt een overschatting van de effecten plaats. Gezien deze eerste (indicatieve) uitkomsten voor de berekende explosie-effecten en het feit dat er in het verleden zwaar en letaal letsel bij brandweerlieden is opgetreden, kan echter gesteld worden dat explosie van een EOS als een relevant mogelijk effect voor omgevingsveiligheid kan worden gezien.

5.3 Scenario 3: Gifwolk

Van de vrijkomende stoffen bij een incident met NMC en LFP batterijen zijn de stoffen CO, CO₂, HCl, HCN, HF, NO₂, benzeen, toluen en methanol giftig (zie bijlage 1).

Er zijn incidenten met EOSen bekend waarbij mensen in de omgeving onwel zijn geworden door de vrijkomende giftige stoffen (Vierendeels 2017). Tevens zijn, bij het incident in Surprise, concentraties aan giftige stoffen gemeten boven het IDHL (immediately dangerous for health and life) niveau.

Om de effecten en risico's van het vrijkomen van giftige stoffen bij een incident met een EOS te kunnen bepalen, is scenario 3 doorgerekend. Bij dit scenario is er vanuit gegaan dat er geen ontbranding van de vrijkomende stoffen plaatsvindt. Deze keuze wordt vanuit het conservatieve oogpunt gemaakt, omdat de vrijkomende wolk giftiger is wanneer deze niet ontsteekt. In bijlage 1 zijn de verdere uitgangspunten voor de berekeningen weergegeven.

Met de berekeningen zijn voor enkele worst case situaties gifwolkaandachtsgebieden gevonden (indoor LBW dosis) (zie *Tabel B 15*). De maximale omvang die in dit onderzoek voor het gifwolkaandachtsgebied is gevonden, is 24 m (voor het 95% percentiel; 20 m voor het 50% percentiel). Deze afstand is gevonden voor een situatie waarbij wordt uitgegaan van een EOS op basis van LFP batterijen met een moduleomvang van 20 kWh. Voor een moduleomvang van 8,8 kWh is het gifwolkaandachtsgebied maximaal 10 m en voor een moduleomvang van 5,7 kWh 0 m.

Uit de berekeningen volgt daarmee dat het formaat van de module van invloed is op het incident. Hoe groter een module, des te meer batterijen bij het incident betrokken kunnen raken en des te meer giftige stoffen er bij een incident kunnen vrijkomen.

LFP is in veel aspecten de veiligere keuze, bijvoorbeeld wat betreft bestrijdbaarheid, kans op incidenten en arbeidsveiligheid (zie paragraaf 3.2). Voor omgevingsveiligheid blijken de effecten van LFP batterijen echter groter te zijn. Dit komt met name door NO₂ die bij deze batterijen vrij kan komen. Voor NMC is deze stof niet gevonden. Faalkans speelt geen rol voor effectafstanden en dus is de waarschijnlijk lagere kans op incidenten bij LFP hierin nog niet gerepresenteerd.

Gezien de uitkomsten voor de berekende gifwolkeffecten wordt de gifwolk bij een incident met een EOS (met een grote module-omvang) als relevant voor omgevingsveiligheid beschouwd.

6 Conclusie en aanbevelingen

Door de energietransitie komt er steeds meer vraag naar energieopslagsystemen. Op dit moment zijn de meeste bestaande en geplande EOSen op basis van lithium-ion batterijen. Lithium-ion batterijen brengen echter risico's met zich mee. Daarom heeft het RIVM, in opdracht van IenW, onderzocht of energieopslagsystemen relevant zijn voor omgevingsveiligheid, gezien de mogelijke effecten bij een incident.

Uit het onderzoek is gebleken dat energieopslagsystemen effect kunnen hebben op omgevingsveiligheid. Batterijen kunnen in thermal runaway raken, waarbij een ongecontroleerde toename in temperatuur en druk ontstaat. Door de thermal runaway kan brand, een explosie of een giftige wolk ontstaan, afhankelijk van hoe het incident verloopt. Van alle drie de effecten zijn voorbeelden van incidenten in de praktijk gevonden. Op basis van de incidenten in de praktijk zijn er drie scenario's uitgewerkt, een scenario voor brand, explosie en een gifwolk.

Uit het brandscenario blijkt dat EOSen door de thermal runaway een uniek brandverloop kennen. Door het openbarsten van individuele cellen kunnen er fakkels ontstaan en kan de brand met tussenpozen verlopen. Uit de eerste indicatieve berekeningen blijkt dat voor scenario 1 een brandaandachtsgebied wordt gevonden van maximaal 13 m voor een module. Het brandaandachtsgebied en daarmee de effecten op de omgeving zijn dan ook beperkt en vergelijkbaar met die van branden in opslagen met gevaarlijke stoffen.

Wanneer explosieve stoffen zich kunnen ophopen in een EOS kan, bij vertraagde ontsteking, een wolkbrand of een dampwolkexplosie ontstaan. Hier wordt bij scenario 2 vanuit gegaan. Uit de eerste indicatieve berekeningen blijkt dat een explosieaandachtsgebied van 57 m wordt gevonden. Bij de berekeningen zijn conservatieve aannames gedaan, overeenkomend met de methode in Safeti-NL. Hierdoor vindt waarschijnlijk een overschatting van de effecten plaats. Echter kan op basis hiervan en door het feit dat er in het verleden zwaar letsel bij brandweerlieden is opgetreden door een explosie van een EOS, geconcludeerd worden dat de explosie-effecten relevant kunnen zijn voor omgevingsveiligheid.

Bij scenario 3 wordt er vanuit gegaan dat er bij een incident met een EOS giftige stoffen vrijkomen die niet ontsteken. Er ontstaat daardoor een giftige wolk. Uit de eerste indicatieve berekeningen blijkt dat voor enkele worst-case situaties de gifwolkaandachtsgebieden maximaal 24 m zijn. De gevonden afstanden zijn sterk afhankelijk van de omvang van de modules. Op basis van deze uitkomsten kan geconcludeerd worden dat de gifwolkeffecten van een incident met een EOS (met een grote module-omvang) relevant kunnen zijn voor omgevingsveiligheid.

Op basis van bovenstaande uitkomsten doet het RIVM verschillende aanbevelingen aan het ministerie.

- Gezien de beperkte brandeffecten op de omgeving bij een incident met een EOS kunnen EOSen voor de brandeffecten op dezelfde manier behandeld worden als PGS15-opslagen, waarbij brand niet wordt meegenomen in de risicobeoordeling.
- De gevonden gifwolkaandachtsgebieden en explosieaandachtsgebieden wijzen op mogelijk relevante effecten van een incident met een EOS op de omgeving. Hieruit worden afstanden gevonden tot 57 m. Aanbevolen wordt om hier bij de plaatsing van energieopslagsystemen rekening mee te houden.
- Als IenW op basis van bovenstaande besluit afstandenbeleid te voeren, kan het RIVM een rekenvoorschrift opstellen om de benodigde aan te houden afstanden te berekenen. Waarbij:
 - o de hoeveelheid giftig gas die vrijkomt, afhankelijk is van de maximale grootte van de gebruikte modules. Hierbij wordt uitgegaan van de beschrijvingen en maatregelen in PGS 37—1 omtrent de afstand tussen onderlinge modules, waardoor voorkomen wordt dat thermal runaway propageert naar omliggende modules wanneer er geen ontsteking plaatsvindt.
 - o de methode voor het bepalen van het explosieaandachtsgebied rekening houdt met het vrije volume in de EOS dat opgevuld kan worden met explosief gas.
 - o iedere losse EOS op een park berekend dient te worden als een eigen systeem, waarbij ervan uit gegaan kan worden dat er geen domino-effecten veroorzaakt worden tussen de EOSen.
- In de berekeningen om te bepalen of EOSen relevant zijn voor omgevingsveiligheid, zoals deze in dit briefrapport zijn opgenomen, zijn zowel de 50% als 95% percentielen weergegeven. Het is een beleidskeuze welk percentiel uiteindelijk bij berekeningen voor EOSen aangehouden moet worden. Bij het opstellen van het uiteindelijke rekenvoorschrift zal hierover met IenW afstemming plaatsvinden.
- Dit onderzoek is gericht op EOSen op basis van LFP of NMC batterijen. Om te kunnen bepalen of EOSen op basis van andere typen lithium-ion batterijen ook relevant zijn voor omgevingsveiligheid zal de initiatiefnemer een soortgelijke methodiek moeten toepassen, zoals in het rekenvoorschrift beschreven zal worden. Indien niet voldoende literatuur beschikbaar is om de effecten van de andere type batterijen te bepalen, bevelen we aan uit te gaan van de stoffen die bij een LFP incident vrijkomen.
- De type effecten bij opslagen van lithium-ion batterijen zullen vergelijkbaar zijn met EOSen. In dit briefrapport is niet naar opslagen van batterijen gekeken. Aanbevolen wordt om bij het opstellen van het rekenvoorschrift voor EOSen ook een rekenvoorschrift op te stellen voor opslagen van batterijen.

Literatuurlijst

Abbot, K. C., et al. (2022). "Comprehensive gas analysis of a 21700 Li(Ni_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂) cell using mass spectrometry." *J. Power Sources* **539**: 231585.

Baird, A. R., et al. (2020). "Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas." *J. Power Sources* **446**: 227257.

Barowy, A., et al. (2021). UL 9540A Installation Level Tests with Outdoor Lithium-ion Energy Storage System Mockups, Underwriters Laboratories.

Bergström, U., et al. (2015). Vented Gases and Aerosol of Automotive Li-ion LFP and NMC Batteries in Humidified Nitrogen under Thermal Load.

Bly, D. (2023). "Lithium-ion batteries differ in terms of risk." Retrieved 18-10-2023, 2023, from <https://www.pv-magazine.com/2023/09/28/lithium-ion-batteries-differ-in-terms-of-risk/>.

Brans, H. (2023a). Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid, NIPV.

Brans, H. (2023b, 05-2023). "Buurtbatterij in kelder." Retrieved 26-10-2023, 2023, from <https://scenarioboeken.nipv.nl/li-ion-buurtbatterij-in-kelder/>.

CEPT (2021). Accident analysis of Beijing Jimei Dahongmen 25 MWh DC solar-storage-charging integrated station project, Institute of energy storage and novel electric technology.

Christensen, P. A., et al. (2022). "Risk Management over the Life Cycle of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles." *Fabig Newsletter*(84): 5-27.

Christensen, P. A., et al. (2021). "Thermal and mechanical abuse of electric vehicle pouch cell modules." *Appl. Therm. Eng.* **189**: 116623.

Colthorpe, A. (2021, 8-12-2021). "Victorian Big Battery: Australia's biggest battery storage system at 450MWh, is online." Retrieved 26-10-2023, 2023, from <https://www.energy-storage.news/victorian-big-battery-australias-biggest-battery-storage-system-at-450mwh-is-online/>.

Ditch, B. and D. Zeng (2020). Development of Sprinkler Protection Guidance for Lithium Ion Based Energy Storage Systems, FM Global.

EPRI (2023). "EPRI BESS Failure Event Database." Retrieved 06/2023, 2023, from [https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database#:~:text=BESS%20Failure%20Event%20Database%20This%20is%20a%](https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Event_Database#:~:text=BESS%20Failure%20Event%20Database%20This%20is%20a%20)

[20public,included%20is%20available%20in%20the%20linked%20public%20documents.](#)

ESNL (2023). Retrieved 16-08-2023, 2023, from www.energystoragenl.nl/projects.

ExpertgroepBatterijen (2022). "Actieagenda Batterijsystemen." Retrieved 28-10-2022, from <https://batterycompetencecenter.nl/nieuws/actieagenda-batterijsystemen-aangeboden-aan-tweede-kamer>.

Golubkov, A. W., et al. (2014). "Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes." *RSC Adv.* **4**: 3633.

Gooijer, L., G. M. H. Laheij and A. G. Wolting (2012). Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid, RIVM.

Gully, B., et al. (2019). Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression.

Henriksen, M., et al. (2023). "Simulation of a Premixed Explosion of Gas Vented during Li-ion Battery Failure." *Fabig Newsletter*(86): 22-34.

Herh, M. (2021, 07-04-2012). "Fire at Solar Plant in Hongseong Involves EV Batteries from LG Energy Solution." Retrieved 26-10-2023, 2023, from <https://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=64241>.

Howard, G., J. Gill and J. E. H. Buston (2021). "Experimental understanding of gas volumes and forces generated due to swelling during lithium-ion pouch cell failure." *Hazards* **31**(168).

Jin, Y., et al. (2021). "Explosion hazards study of grid-scale lithium-ion battery energy storage station." *J. Energy Storage* **42**: 102987.

Keil, P. and A. Jossen (2017). "Calendar Aging of NCA Lithium-Ion Batteries Investigated by Differential Voltage Analysis and Coulomb Tracking." *J. Electrochem. Soc.* **164**: A6066-A6074.

Koch, S., A. Fill and K. P. Birke (2018). "Comprehensive gas analysis on large scale automotive lithium-ion cells in thermal runaway." *J. Power Sources* **398**: 106-112.

Kooi, E. and G. M. H. Laheij (2021). Review of the method for calculating off-site acute health risks of incidents in storage facilities for packaged hazardous substances, RIVM.

Lambert, F. (2019). Hyundai Kona EV exploded in a garage, blowing the door off. *Electrek*.

Larsson, F., et al. (2014). "Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests." *J. Power Sources* **271**: 414-420.

Liu, Y. and X. Huang (2021). "Fire Risk of Transporting and Storing Massive Li ion Batteries." *Fabig Newsletter*(82): 6-16.

Marchand, X. (2020, 01-12-2020). "Des batteries au lithium prennent feu dans un container en Ariège." Retrieved 26-10-2023, 2023, from <https://france3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/ariege/foix/batteries-au-lithium-prennent-feux-container-ariege-1900866.html>.

McKinnon, M. B., S. DeCrane and S. Kerber (2020). Four Firefighters Injured In Lithium-Ion Battery Energy Storage System Explosion - Arizona, Underwriters Laboratories.

Min.IenW (2020, 01-07-2020). "Circulaire risicobeheersing lithium-ion energiedragers." Retrieved 30-10-2023, 2023, from <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2020-34193.html#n11>.

Mylenbusch, I. S., K. Claffey and B. N. Chu (2023). "Hazards of lithium-ion battery energy storage systems (BESS), mitigation strategies, minimum requirements, and best practices." Process Safety Process.

NFPA (2019). Standard on Explosion Prevention Systems.

NFPA (2023). Explosion Protecting by Deflagration Venting.

PGS (2005, 2005). "PGS 2." Retrieved 18-10-2023, 2023, from <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/pgs2/>.

PGS (2023, 02-07-2023). "PGS 37-1." Retrieved 06-10-2023, 2023, from <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/online/pgs-37-1/>.

PVSyst (2022, 2022). "PVSyst 7." Retrieved 26-10-2023, 2023, from https://www.pvsyst.com/help/batterief_lithium_ion_elementscategories.htm.

Randazzo, R. (2020, 2020). "Cause of APS battery explosion that injured 9 first responders detailed in new report." Retrieved 26-10-2023, 2023, from <https://eu.azcentral.com/story/money/business/energy/2020/07/27/aps-battery-explosion-surprise-new-report-findings/5523361002/>.

Ribiere, P., et al. (2012). "Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry." Energy Environ. Sci. **5**: 5271-5280.

RIVM (2020). Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid - Module II – Aanvullende voorschriften voor milieubelastende activiteiten onderdeel A, B en E lid 2 t/m 13, RIVM.

RIVM (2023a, 2023). "Stappenplan bepalen aandachtsgebieden." Retrieved 26-10-2023, 2023a, from <https://www.rivm.nl/omgevingsveiligheid/handboek/stappenplannen/bepalen-afstanden-en-gebieden/aandachtsgebieden>.

RIVM (2023b, 07-12-2023). "Statusoverzicht probitrelaties." Retrieved 13-12-2023, 2023b, from <https://www.rivm.nl/probitrelaties/statusoverzicht-probitrelaties>.

Sang-bok, L. (2022, 26-09-2022). "Another ESS fire after five days... Firefighters entered the dangerous situation (Translated)." Retrieved 26-10-2023, 2023, from https://www-e2news-com.translate.goog/news/articleView.html?idxno=239023& x_tr_sl=auto& x_tr_tl=en& x_tr_hl=en-US& x_tr_pto=wapp.

Spotnitz, R. and J. Franklin (2003). "Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells." J. Power Sources **113**: 81-100.

Stokes, R., et al. (2022). "Mitigating the Hazards and Risks Associated with Lithium-ion Battery Energy Storage Systems." Fabig Newsletter(84): 57-62.

Sturk, D., et al. (2019). "Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber." Batteries **5**: 61.

Vendra, C. M. R., et al. (2022). "Numerical and Experimental Characterization of High Energy Density 21700 Lithium-ion Battery Fires." Fabig Newsletter(84): 28-42.

Vierendeels, T. (2017, 11-11-2017). "Explosiegevaar bij brand in Drogenbos geweken: 50-tal oproepen van mensen die zich onwel voelen door rook." Retrieved 26-10-2023, 2023, from <https://www.hln.be/binnenland/explosiegevaar-bij-brand-in-drogenbos-geweken-50-tal-oproepen-van-mensen-die-zich-onwel-voelen-door-rook~a30380a4/>.

Willstrand, O., et al. (2023). "Impact of different Li-ion cell test conditions on thermal runaway characteristics and gas release measurements." J. Energy Storage **68**: 107785.

Wong, L. (2021, 30-07-2021). "Crews battle Tesla battery fire at Moorabool, near Geelong." Retrieved 26-10-2023, 2023, from <https://www.abc.net.au/news/2021-07-30/tesla-battery-fire-moorabool-geelong/100337488>.

Bijlage 1 Achtergrondinformatie berekeningen

In deze bijlage is in detail beschreven hoe de berekeningen zijn uitgevoerd om te bepalen of er relevante brand-, explosie- en gifwolkeffecten zijn bij incidenten met EOSen. De resultaten van de berekeningen zijn besproken in hoofdstuk 5.

Parameter bepaling berekende scenario's

Om te kunnen bepalen of EOSen relevant zijn voor omgevingsveiligheid is informatie nodig over de bronterm, de vrijkomende stoffen tijdens een incident, de hoeveelheid en de snelheid waarmee de stoffen vrijkomen. Dit hangt af van het type batterij (bijv. lithium ijzer fosfaat, LFP, of lithium nikkel mangaan kobalt oxide, NMC), de state-of-charge en het faalmechanisme.

Veel van de bekende literatuur over tests met lithium-ion batterijen, waarbij brand ontstaat of gevaarlijke stoffen vrijkomen, gaat over één of enkele batterijcellen. EOSen zijn vele malen groter. De gevonden range aan energiedichtheid van EOSen is 0,2 MWh-1.200 MWh. Een typisch formaat is in de orde van 1MW (bijvoorbeeld incident Drogenbos) tot 3 MW (bijvoorbeeld EOS in het Johan Cruijff stadion of een Tesla Megapack). De gevonden effecten in de literatuur dienen dan ook geschaald te worden naar de grotere energiedichtheid van de EOSen. Bij het schalen van de effecten wordt lineaire extrapolatie van de brontermdata toegepast, omdat er niet voldoende informatie beschikbaar is over hoe de bronterm exact schaalt naar grotere systemen. Dit is naar verwachting een conservatieve aanname, omdat hiermee wordt aangenomen dat het gehele systeem in één keer in thermal runaway komt.

Zoals aangegeven is de bronterm in het geval van lithium-ion batterijen ook afhankelijk is van het ladingsniveau (state-of-charge, SoC). Uit de begeleidingscommissie is gebleken dat de SoC afhangt van de toepassing van een EOS. Mobiele opslagsystemen zijn bij plaatsing vol en ontladen tijdens het gebruik. Bij frequentiebalancing, om het energienet te ontlasten, is de SoC rond de 50% en wanneer de EOS gebruikt wordt voor energiehandelen⁷, dan hangt de SoC af van de marktvraag. Hier zit grote variatie in.

De brontermen worden besproken voor de ladingsniveaus van 50% en 100%, hieruit wordt dan de hoogste, meest conservatieve waarde geselecteerd om de effectafstanden te berekenen in de worst-case scenario's.

Bij incidenten met lithium-ion batterijen kunnen veel verschillende giftige en brandbare stoffen vrijkomen, en de verbrandingsproducten hiervan, zie onderstaand (Spotnitz and Franklin 2003, Ribiere et al. 2012, Bergström et al. 2015, Gully et al. 2019, Christensen et al. 2022,

⁷ Energiehandelen is het afnemen van elektriciteit wanneer het aanbod hoog is en het leveren van elektriciteit wanneer de vraag hoog is. Effectief helpt dit met het opslaan van opgewekte energie wanneer deze niet nodig is. Dit is bijvoorbeeld nuttig om hernieuwbare energie op te slaan die op oncontroleerbare momenten wordt opgewekt.

Vendra et al. 2022). Het volume en de verhouding waarin de stoffen vrijkomen verschilt sterkt per subtype lithium-ion batterij en per incident:

- waterstof (H₂);
- koolmonoxide (CO);
- kooldioxide (CO₂);
- waterstoffluoride (HF);
- zoutzuur (HCl);
- cyanide/blauwzuur (HCN);
- organische oplosmiddelen uit het elektrolyt:
 - o Ethyleen carbonaat
 - o Propyleen carbonaat
 - o Dimethyl carbonaat
- Koolwaterstoffen en alcoholen, waaronder:
 - o Methaan
 - o Ethaan
 - o Propaan
 - o Benzeen
 - o Toluëen
 - o Methanol
 - o Ethanol
 - o Ethyleen
- Zwaveldioxide (SO₂);
- Stikstofoxides (NO_x);
- Metalen:
 - o Kobalt
 - o Lithium
 - o Mangaan
 - o Nikkel
 - o Lood
 - o Tin

Ook de elektrolyt speelt een grote rol in incidenten, omdat hier de meeste koolwaterstoffen vandaan komen. Er zijn verschillende elektrolyten in ontwikkeling, maar op dit moment bestaat deze meestal uit lithiumzouten, oplosmiddelen en additieven (Brans 2023a). De stoffen die hieruit vrijkomen bestaan, naast CO en CO₂ met name uit methaan, propyleen, ethyleen en koolwaterstoffen (PGS 37-1, bijlage F). Ook kan de elektrolyt zelf verdampen en een bijdrage leveren aan de explosieve kenmerken van het vrijkomend gas (Christensen et al. 2021, Jin et al. 2021).

In deze bijlage worden verschillende parameters besproken die in de berekeningen van de scenario's gebruikt zijn. Denk hierbij aan de gassamenstelling, het totale volume vrijkomend gas en de snelheid waarmee het gas vrijkomt. De hoeveelheid bruikbare data die is gevonden is enigszins beperkt. Daarom hebben we in de dataset gewerkt met percentielen volgens het protocol aanpassen rekenmethodieken EV (Gooijer et al. 2012). Zowel de 50% (P50) als de 95% (P95) percentielen worden gegeven⁸. Het is uiteindelijk een beleidskeuze welk percentiel aangehouden dient te worden om berekeningen voor EOSen uit te voeren (Gooijer et al. 2012).

⁸ Een percentiel van 95% betekent dat in de dataset 95% van de getallen kleiner is dan deze waarde en 5% is groter.

De gevonden data loopt flink uiteen in zowel de wijze van rapporteren (% , mg, mg/Wh, mg/Ah, mg/s, ppm, etc.) als in de waarden die daadwerkelijk gerapporteerd worden. Om alle waarden om te kunnen rekenen naar waarden die vergelijkbaar zijn met elkaar zijn een paar standaard parameters vastgesteld voor de batterijen. Deze zijn terug te vinden in Tabel B 1. Deze standaardwaarden zijn enkel gebruikt wanneer de bron zelf geen waarden gaf voor het voltage of de capaciteit.

Tabel B 1 Standaardwaarden voor voltage, amp-uur en capaciteit van een aantal verschillende vormen van NMC en LFP batterijen (Keil and Jossen 2017, Gully et al. 2019)

Batterij	Voltage (V)	Ampère-uur (Ah)	Capaciteit (Wh)
NMC cel (18650)^a	3,6	2,4	8,6
NMC cel (pouch)	3,6	63	227
LFP cel (prismatisch)	3,2	105	336
LFP cel (pouch)	3,3	20	66
LFP cel (18650)^a	3,2	1,5	4,8
LFP cel (26650)	3,2	2,5	8,0
NCA cel (18650)^a	3,6	2,8	10,0
NCA cel (21700)	3,6	4,0	14,4

a) Als het type batterij niet te duiden was uit de bron zijn deze waarden benut als algemene waarden.

Enkel NMC, LFP en NCA cellen zijn in deze tabel opgenomen, omdat in de literatuur te vinden is dat dit de voornaamste type batterijen zijn die in EOSen voorkomen (60% LFP, 30% NMC, 10% NCA) (Mylenbusch et al. 2023). Voor NCA batterijen is niet voldoende informatie gevonden om de voor een berekening benodigde parameters van te bepalen, dus deze zijn in het onderzoek verder niet meegenomen en zijn enkel voor de volledigheid in Tabel B 1 opgenomen.

Gassamenstelling

Voor de gassamenstelling is de informatie uit alle relevante bestudeerde bronnen omgerekend naar percentages. Van deze percentages is vervolgens de hoogste waarde genomen als conservatieve benadering (zie *Tabel B 2* en *Tabel B 3*). In deze data is geen percentiel toegepast omdat het een worst-case benadering betreft.

Tabel B 2 Worst-case mengsels van brandbare stoffen voor LFP en NMC batterijen (Howard et al. 2021, Brans 2023b). deze samenstelling is gebruikt voor scenario 1 en 2.

Brandbaar mengsel	LFP (%)	NMC (%)
H₂	45	45
HCN	0,7	0
Methaan	5,9	19,4
Ethaan	23,1	11,7
Propaan	5,8	6,3
Benzeen	13,6	5,2
Tolueen	0,7	4,1
Ethanol	7	2,8
Methanol	5,6	1,1
Ethyleen	13,7	10,5

Tabel B 3 Worst-case mengsels van giftige stoffen voor LFP en NMC batterijen (Gully et al. 2019). Deze samenstelling is gebruikt voor scenario 3.

Giftig mengsel	LFP (%)	NMC (%)
CO	26,1	38,1
NO₂	9,7	0
HCl	2,1	9,7
HF	3,7	0,7
HCN	0,7	0
Air	57,7	51,5

Een aantal van de eerder genoemde stoffen (de metalen, SO₂, stoffen uit het elektrolyt) komen niet in deze tabellen voor. Voor deze stoffen is voor de bekeken batterijtypes onvoldoende numerieke informatie gevonden. Wel is gevonden dat SO₂ bij bijvoorbeeld LMO batterijen vrij kan komen.

Explosielimiet

Voor de onderste explosiegrens (LEL) en bovenste explosiegrens (UEL) van het mengsel dat vrijkomt bij afgassen van batterijen zijn een aantal waardes te vinden in de literatuur (zie *Tabel B 4*).

De P95 van de LEL van het afgassen is 8,8% en 8,6% (respectievelijk LFP, NMC) en de P50 van de LEL is 5,4% en 6,2% (respectievelijk LFP, NMC) (Gully et al. 2019, Baird et al. 2020, Barowy et al. 2021). In de USA dient de noodventilatie de LEL onder de 25% te houden om een gaswolkexplosie te voorkomen (NFPA 2019, McKinnon et al. 2020, NFPA 2023).

Voor de UEL worden P95 waardes gevonden van 68,6% en 65,6% (respectievelijk LFP, NMC). De P50 zijn 33,3% en 36,6% (respectievelijk LFP, NMC).

Tabel B 4 Lijst met gevonden waardes voor de LEL en UEL voor de verschillende batterijsoorten bekeken in dit onderzoek. Niet iedere bron vermeldt een UEL, in deze gevallen is de cel leeg

bron	batterij	LEL	UEL
Gully 2019	NMC	5,8	36,4
Gully 2019	NMC	5,2	36,6
Gully 2019	NMC	6,2	46,8
Gully 2019	NMC	5	35,3
Gully 2019	NMC	8	70,3
Baird 2020	NMC	7,2	
Barowy 2021	NMC	8,9	
Gully 2019	LFP	6,2	43,6
Gully 2019	LFP	5	32,8
Gully 2019	LFP	8,9	79,3
Gully 2019	LFP	3,9	27,6
Gully 2019	LFP	4,8	31,4
Gully 2019	LFP	5,2	33,3
Gully 2019	LFP	5,6	36,3
Baird 2020	LFP	8,5	
Baird 2020	NCA	8	

Uitgassnelheid

Wat betreft de uitgassnelheid is voor NMC gevonden dat op 50% SoC dit ongeveer 5,3 mL/s.Wh is, en op 100% SoC is dat ongeveer 17,7 mL/s.Wh (Willstrand et al. 2023). Voor LFP zijn enkel uitgassnelheden voor specifiek HF gevonden (Larsson et al. 2014), en één waarde voor de totale uitgassnelheid (0,9 mL/s.Wh) (Sturk et al. 2019). De HF uitgassnelheden zijn uit gemiddelde gassamenstellingen tot totale uitgassnelheden omgerekend⁹. Voor LFP100 komt de uitgassnelheid dan, met de waarde uit Sturk 2019 meegenomen, uit op een P95 van 5,9 mL/s.Wh en een P50 van 10,8 mL/s.Wh. Voor LFP50 is maar één waarde gevonden voor HF uitgassnelheden. Ook deze is omgerekend en komt uit op 14,7 mL/s.Wh (Larsson et al. 2014). Deze waarden zijn samengevat in *Tabel B 5*. In drie van de vier gevallen is er geen verschil in P50 en P95, omdat er maar één enkele waarde gevonden is.

Tabel B 5 Percentielen van uitgassnelheden voor de verschillende batterijen. LFP50 bijvoorbeeld staat voor LFP bij 50% SoC.

	Uitgassnelheid (mL/s.Wh)	
	P50	P95
LFP50	14,7	14,7
LFP100	5,9	10,8
NMC50	5,3	5,3
NMC100	17,7	17,7

Totale gasuitstoot

Voor de totale hoeveelheid vrijkomend gas zijn meerdere waarden gevonden, die tot wel een factor twintig uiteenlopen. De P50 en P95 zijn de waarden gebruikt in de berekeningen. De uitkomsten zijn te vinden in *Tabel B 6*, alle benutte waarden staan in *Tabel B 7*.

Tabel B 6 Het gemiddelde, de standaarddeviatie, en de P50 en P95 van het totaal vrijkomend volume uit batterijen bij een thermal runaway voor NMC en LFP bij verschillende SoC (Golubkov et al. 2014, Koch et al. 2018, Gully et al. 2019, Sturk et al. 2019, Abbot et al. 2022, Vendra et al. 2022, Willstrand et al. 2023)

Vrijkomend volume	Gemiddelde (L/Wh)	Standaarddeviatie (L/Wh)	P50 (L/Wh)	P95 (L/Wh)
LFP50	0,84	0,45	1,04	1,23
LFP100	1,21	1,32	0,45	3,25
NMC50	0,81	0,86	0,20	1,84
NMC100	0,89	1,25	0,59	1,86

⁹ Voor LFP50 is dit 1,2 mol% HF (Gully 2019) en voor LFP100 is dit 1,4 mol% HF (Golubkov 2014, Gully 2019).

Tabel B 7 Lijst met alle gevonden getallen voor het totaal volume gas dat vrijkomt uit batterijen van verschillende type en bij verschillende state-of-charge (SoC) waardes.

NMC 50% SoC

Bron	Volume L/Wh
Gully 2019	2,02
Willstrand 2023	0,20
Willstrand 2023	0,20

NMC 100% SoC

Bron	Volume L/Wh
Gully 2019	0,85
Koch 2018	0,54
Sturk 2019	5,88
Vendra 2022	0,55
Willstrand 2023	0,60
Willstrand 2023	0,58
Willstrand 2023	0,20
Willstrand 2023	0,59
Willstrand 2023	0,58
Willstrand 2023	0,61
Willstrand 2023	0,59
Willstrand 2023	0,57
Willstrand 2023	0,58
Willstrand 2023	0,71
Willstrand 2023	0,73
Golubkov 2014	0,63
Abbot 2022	0,35

LFP 50% SoC

Bron	Volume L/Wh
Gully 2019	1,25
Gully 2019	1,04
Willstrand 2023	0,22

LFP 100% SoC

Bron	Volume L/Wh
Gully 2019	3,75
Gully 2019	1,25
Sturk 2019	0,45
Willstrand 2023	0,27
Golubkov 2014	0,33

Gastemperatuur

Voor de temperatuur van het gas na uitstoot is gekozen om 50 °C te hanteren, gelijk aan de modelering voor PGS 15 opslagen (RIVM 2020). Dit zorgt ervoor dat er gerekend wordt zonder pluimstijging, wat een conservatieve keuze is. Het gas komt op hogere temperatuur (75-200 °C) vrij uit de modules, maar zal afkoelen in de EOS voor het vrijkomt naar de omgeving (Gully et al. 2019, Sturk et al. 2019).

Uitstroomrichting

In ieder scenario is conservatief een horizontale uitstroomrichting gebruikt.

Methodiek berekende scenario's

De effecten van een batterij in thermal runaway voor de omgeving kunnen worden samengevat als brand, explosie en giftige wolk. Hieronder is in detail beschreven hoe de berekeningen zijn uitgevoerd om te bepalen of er effectafstanden zijn bij een incident met een EOS. Er zijn drie scenario's van incidenten met EOSen uitgewerkt:

- Scenario 1 brand: dit scenario gaat uit van het vrijkomen van stoffen uit batterijen in enerzijds een module en anderzijds een geheel rek met modules met ontsteking;
- Scenario 2 explosie: dit scenario gaat uit van het explosief ontsteken van een wolk batterijgas waarmee de gehele EOS is gevuld;
- Scenario 3 gifwolk: dit scenario gaat uit van het vrijkomen van stoffen uit batterijen in een module zonder ontsteking.

Berekeningen voor scenario's 1 en 3 zijn uitgevoerd met het rekenprogramma Safeti-NL 8.8. Voor scenario 2 is het Gele Boek, PGS 2, gebruikt (PGS 2005). Voor de resulterende afstanden wordt er vanuit gegaan dat de stof vrijkomt uit een dimensieloos punt in het exacte midden van de EOS.

Voor ieder scenario is een drukvat aangemaakt gevuld met een bepaalde hoeveelheid gas uitgedrukt in m³. Deze is uitgerekend middels:

$$V(\text{m}^3) = V_{\text{tot}} \left(\frac{\text{L}}{\text{Wh}} \right) * P(\text{Wh}) * \frac{1 (\text{m}^3)}{1000 (\text{L})}$$

Waarbij V = volume vat, V_{tot} = totale gasuitstoot, P = het berekende vermogen.

Vervolgens is het scenario 'fixed duration release' gebruikt om de uitstroom te simuleren. Hierbij is de lengte van het incident uitgerekend in seconden middels:

$$t (\text{s}) = \frac{V_{\text{tot}} (\text{m}^3)}{v_{\text{uit}} \left(\frac{\text{mL}}{\text{s} * \text{Wh}} \right) * P (\text{Wh})} * \frac{1000000 (\text{mL})}{1 (\text{m}^3)}$$

Waarbij v_{uit} = uitgassnelheid. Hierbij is uitgegaan van de hoogste waarde per batterijtype (LFP of NMC), omdat in de scenario's geen onderscheid is gemaakt tussen de state-of-charge van batterijen.

Indien onderscheid wordt gemaakt in het percentiel is voor alle waardes, waar mogelijk, ofwel de P50 ofwel de P95 gebruikt.

Scenario 1: Brand

In dit scenario zijn twee situaties doorgerekend, namelijk een brand gesimuleerd vanuit één module (5,7 kWh, 8,8 kWh of 20 kWh) en een brand gesimuleerd vanuit een heel rek (80 kWh). Gassen kunnen zich opbouwen in de behuizing van een module voordat deze vrijkomen. In dit scenario ontsteekt het gas direct en kan het zich dus niet ophopen voordat het verbrandt. Bij de simulatie van een heel rek gaat de berekening uit van één groot lek, waardoor alle vrijgekomen gassen uit alle modules in dat rek uitstromen en ontbranden als één jetfire. Beide sub-scenario's zijn gesimuleerd als een drukvat op 10 kPa¹⁰.

Omdat we er in dit scenario van uitgaan dat de vrijkomende stoffen ontsteken, is een ontstekingskans van 1 gehanteerd. Het worst-case brandbaar mengsel is benut (*Tabel B 2*) en in *Tabel B 8* en *Tabel B 9* zijn de overige invoergegevens weergegeven voor respectievelijk P50 en P95. De uitkomsten van deze berekeningen zijn te vinden in *Tabel B 10*.

Tabel B 8 Invoergegevens voor scenario 1 met een P50 van de parameters: V_{tot} en v_{uit} .

	Inhoud (m ³)	T (°C)	Druk (bar)	Lengte 'fixed duration release' (s)	Gebouw-invloeden
LFP - 5,7 kWh	5,94	50	0,10	71	Geen
LFP - 8,8 kWh	9,17	50	0,10	71	Geen
LFP - 20 kWh	20,83	50	0,10	71	Geen
LFP - 80 kWh	83,33	50	0,10	71	Geen
NMC - 5,7 kWh	3,34	50	0,10	33	Geen
NMC - 8,8 kWh	5,16	50	0,10	33	Geen
NMC - 20 kWh	11,72	50	0,10	33	Geen
NMC - 80 kWh	46,88	50	0,10	33	Geen

¹⁰ Dit is een kwalitatieve aanname. Weliswaar komen gassen met een hogere druk uit individuele batterijcellen, wanneer de gassen uit een module lekken is de drijvende kracht significant afgenomen tot een lichte overdruk.

Tabel B 9 Invoergegevens voor scenario 1 met een P95 van de parameters:
 V_{tot} en V_{uit} .

	Inhoud (m ³)	T (°C)	Druk (bar)	Lengte 'fixed duration release' (s)	Gebouw-invloeden
LFP - 5,7 kWh	7,01	50	0,10	84	Geen
LFP - 8,8 kWh	10,82	50	0,10	84	Geen
LFP - 20 kWh	24,58	50	0,10	84	Geen
LFP - 80 kWh	98,33	50	0,10	84	Geen
NMC - 5,7 kWh	10,58	50	0,10	105	Geen
NMC - 8,8 kWh	16,33	50	0,10	105	Geen
NMC - 20 kWh	37,12	50	0,10	105	Geen
NMC - 80 kWh	148,48	50	0,10	105	Geen

Tabel B 10 De gevonden brandaandachtsgebieden voor het 50^e en 95^e percentiel. De berekeningen zijn uitgevoerd voor één module (5,7 kWh) en één volledig rek (80 kWh).

Sub-scenario	brandaandachtsgebied (m)	
	P50	P95
LFP - 5,7 kWh	8	8
LFP - 8,8 kWh	9	9
LFP - 20 kWh	13	13
LFP - 80 kWh	22	22
NMC - 5,7 kWh	7	7
NMC - 8,8 kWh	9	9
NMC - 20 kWh	12	12
NMC - 80 kWh	21	21

Scenario 2: Explosie

In dit scenario gaan we er vanuit dat een EOS volledig gevuld wordt met batterijgas. Hiermee wordt het incident in Surprise, Arizona gesimuleerd.

Er is gerekend met een typische zeecontainer van 5,9 x 2,4 x 2,4 m. Dit betekent dat een inhoud van 34.000 L wordt gebruikt. Deze kan vullen met gas. De maximale formaat wolk die in de ruimte kan ontsteken heeft een concentratie van het UEL. Er wordt dan gerekend met n mol gas (mengsels uit Tabel B 2) getoond in Tabel B 11. Met behulp van de methode in PGS-2 (het gele boek) is een eerste inschatting gemaakt van de mogelijke explosie die kan optreden. Hierbij is conservatief de hoogste explosieklasse 10 aangenomen (PGS 2005). Bij deze explosieklasse wordt uitgegaan van een explosie met een hoge ontstekingsenergie (zoals een explosie in een gebouw) en een ruimte met veel obstructies. Voor de energie-inhoud zijn waarden gebruikt uit Safeti-NL 8.8.

De totale energie inhoud van het gasmengsel is berekend middels (*Tabel B 11*):

$$E_{\text{meng}}(\text{J}) = \sum^{\text{Stoffen}} E_{\text{inhoud,stof}} \left(\frac{\text{J}}{\text{mol}} \right) * n (\text{mol}) * f_{\text{stof}}$$

Waarbij E_{meng} = totale energie inhoud mengsel; $E_{\text{inhoud,stof}}$ = de energie-inhoud van de chemische stof, n = aantal mol gas, f = mol fractie van de stof in het mengsel.

Voor een piek overdruk (p_s) van 10 kPa, wat het explosieaandachtsgebied is, is de geschaalde piek overdruk (p_s') 0,1:

$$p_s(\text{Pa}) = p_s' * p_a (\text{Pa})$$

Waarbij p_a = omgevingsdruk (101kPa).

Uit PGS 2 kan worden afgelezen uit figuur 5.8A dat bij een geschaalde afstand (r') van 2,6 een piek overdruk van 10 kPa te verwachten is voor explosie klasse 10. De afstand waarop dit geldt is te berekenen met:

$$r (\text{m}) = r' * \left(\frac{E_{\text{meng}}(\text{J})}{p_a(\text{Pa})} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Waarbij r = observatie afstand.

Tabel B 11 Invoer parameters voor scenario 2. Wat betreft betrouwbaarheid is bij de percentiel scenario's het percentiel van de UEL gebruikt.

Sub-scenario	UEL (%)	n (mol)	E_{meng} (J)
LFP P50	33,3	471	$5,3 * 10^8$
LFP P95	68,6	971	$1,1 * 10^9$
NMC P50	36,6	518	$5,2 * 10^8$
NMC P95	65,6	928	$9,3 * 10^8$

Tabel B 12 Gevonden explosieaandachtsgebieden voor de verschillende sub-scenario's.

Batterijtype	Explosieaandachtsgebied (m)	
	P50	P95
LFP	45	57
NMC	45	54

Uit de uitkomsten (*Tabel B 12*) blijkt de maximale waarde voor explosie aandachtsgebied 57 m is. Ter indicatie, als een maximaal beschikbaar volume van 10% wordt genomen, dus 3400 L, dan zou het explosie aandachtsgebied 27 m zijn.

Scenario 3: Gifwolk

Voor scenario 3 zijn berekeningen uitgevoerd voor een module die door thermal runaway begint uit te gassen. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat er geen ontsteking plaatsvindt. Dit scenario beschouwt de situatie waarin geen ontsteking optreedt. Een module is aangenomen als zijnde 5,7 kWh, gebaseerd op het formaat van de modules in Surprise, Arizona (McKinnon et al. 2020). Ook zijn voor de worst-case scenario's

berekeningen uitgevoerd met grotere modules van 8,8 kWh, die in de literatuur te vinden zijn (Jin et al. 2021). In de circulaire batterijen wordt een maximale capaciteit van modules van 20 kWh genoemd (Min.IenW 2020). Uit de berekeningen blijkt dat grotere modules leiden tot grotere effectafstanden.

Zonder ontsteking is het resulterende mengsel aan vrijkomende stoffen giftiger (*Tabel B 3*), dan wanneer wel ontsteking optreedt. Een module is gesimuleerd als een drukvat op 10 kPa en er is gebruik gemaakt van een gebouw van 5,9 x 2,4 x 2,4 m, dat overeenkomt met een standaard zeecontainer. De overige invoergegevens zijn weergegeven in *Tabel B 13* en *Tabel B 14* voor respectievelijk P50 en P95. Er is zonder pluimstijging gerekend door zowel de temperatuur op 50°C te houden alsook de opmenging in de leiwervel mee te nemen in de berekeningen. Gezien de complexiteit van de mengsels is gekozen voor:

- De Mole Le Chatelier methode, relevant voor de 2,54xLBW berekeningen. Deze methode berekent de LBW van het mengsel op basis van de molaire samenstelling:

$$\frac{1}{LBW_{\text{mix}}} = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{LBW_i}$$

Waarbij LBW_{mix} = LBW waarde van het mengsel in ppm. N = het aantal giftige componenten in het mengsel. y_i = de genormaliseerde molaire samenstelling van de component 'i' in het mengsel. LBW_i = de LBW waarde van de component 'i'.

- Een additieve interactie voor het bepalen van de dosis is gebruikt. Hiermee wordt aangenomen dat de verschillende stoffen in het mengsel een vergelijkbare werking hebben.

Tabel B 13 Invoergegevens voor de bepaling van giftige effecten voor P50 waarden door het uitgassen zonder ontsteken

	Inhoud vat (kg)	T (°C)	Druk (bar)	Lengte 'fixed duration release' (s)
LFP-5,7kWh	5,94	50	0,10	71
LFP-8,8kWh	9,17	50	0,10	71
LFP-20kWh	20,83	50	0,10	71
NMC-5,7kWh	3,34	50	0,10	33
NMC-8,8kWh	5,16	50	0,10	33
NMC-20kWh	11,72	50	0,10	33

Tabel B 14 Invoergegevens voor de bepaling van giftige effecten voor P95 waarden door het uitgassen zonder ontsteken

	Inhoud vat (kg)	T (°C)	Druk (bar)	Lengte 'fixed duration release' (s)
LFP-5,7kWh	7,01	50	0,10	84
LFP-8,8kWh	10,82	50	0,10	84
LFP-20kWh	24,58	50	0,10	84
NMC-5,7kWh	10,58	50	0,10	105
NMC-8,8kWh	16,33	50	0,10	105
NMC-20kWh	37,12	50	0,10	105

Met de berekeningen zijn voor enkele worst case situaties gifwolkaandachtsgebieden gevonden (*Tabel B 15*). Voor het gifwolkaandachtsgebied op basis van de concentratie methodiek (2,54xLBW) worden geen aandachtsgebieden gevonden. Voor het gifwolkaandachtsgebied op basis van de dosis (indoor LBW dosis) zijn wel afstanden gevonden.

Tabel B 15 De gevonden gifwolkaandachtsgebieden voor het 50^e en 95^e percentiel. De berekeningen zijn uitgevoerd voor één module van variërend formaat. Resultaten zowel op basis van concentratie (2,54xLBW) als dosis (indoor LBW dosis) zijn gepresenteerd.

Sub-scenario's	Gifwolk aandachtsgebied (m)			
	2,54xLBW		Indoor LBW dosis	
	P50	P95	P50	P95
LFP-5,7kWh	0	0	0	0
LFP-8,8kWh	0	0	8	10
LFP-20kWh	0	0	20	24
NMC-5,7kWh	0	0	0	0
NMC-8,8kWh	0	0	0	8
NMC-20kWh	0	0	0	20

Bijlage 2 Indicatieve PR contouren

Met de scenario's en gegevens beschreven in bijlage 1 zijn tevens indicatieve berekeningen gedaan om een idee te geven van de plaatsgebonden risico (PR) contouren¹¹ (10^{-6} en 10^{-8}) die kunnen volgen uit incidenten met EOSen. Deze zijn slechts indicatief omdat de gebruikte faalfrequentie nog niet gevalideerd is.

Faalfrequenties

Energieopslagsystemen zijn een relatief jonge technologie. Daardoor is het totaal aantal installaties en het aantal incidenten met EOSen nog beperkt. Daar komt bovenop dat de eisen aan de installaties nog volop in ontwikkeling zijn om de kans op incidenten te beperken. Hierdoor is het vooralsnog lastig om een goed onderbouwde faalfrequentie af te leiden. In de literatuur zijn al wel eerste afleidingen te vinden voor faalfrequenties van EOSen.

Er is een database (EPRI 2023) die EOS-incidenten bijhoudt. Gezien de bij ons bekende incidenten, lijkt deze database redelijk volledig. Mylenbusch 2023 heeft op basis van het aantal incidenten in deze database en een geschatte hoeveelheid geïnstalleerde EOSen een faalfrequentie afgeleid. De faalfrequentie komt uit op $7,14 \times 10^{-4}$ per jaar.

Gully 2019 presenteert ook faalfrequenties: $3,8 \times 10^{-4}$ per jaar (brand op cel niveau), $1,4 \times 10^{-4}$ per jaar (brand op module niveau) en $1,2 \times 10^{-7}$ per jaar (globale brand). Gully benoemt zelf in dit onderzoek de onzekerheden van de afgeleide faalfrequenties, omdat deze frequenties zijn samengesteld op basis van een generiek systeem. Zij gaan wel in op verschillende faalmechanismen en meerdere barrières. Deze zijn beredeneerd uit generieke faalfrequenties voor onder andere elektrisch falen en mechanisch falen.

Na overleg met de begeleidingscommissie kiezen wij ervoor hun advies over te nemen en in de scenario's te rekenen met de faalfrequentie van $1,4 \times 10^{-4}$ per jaar (module niveau) uit Gully 2019, omdat deze herleidbaar is naar de faalmechanismen. De faalfrequenties en de wijze van afleiding zijn echter niet in detail bekeken en beoordeeld. Wanneer een rekenvoorschrift opgesteld wordt, zal deze beoordeling nog plaats moeten vinden.

Methodiek berekende scenario's

De methodiek zoals beschreven in Bijlage 1 is ook gehanteerd voor het indicatief berekenen van de PR-contouren. Voor ieder scenario is een dag en nacht runrow gemaakt met een fractie van 0,44 en 0,56 respectievelijk. De standaard weersomstandigheden van Nederland zijn gebruikt. Voor ieder scenario is een faalfrequentie van $1,4 \times 10^{-4}$ per jaar

¹¹ Het plaatsgebonden risico is daarbij de kans per jaar dat één persoon overlijdt door een ongeval met gevaarlijke stoffen. Deze persoon bevindt zich onafgebroken en onbeschermd op één bepaalde plaats.

gebruikt. Dit betekent dat ieder scenario gezien wordt als het enige faalmechanisme. Bij het opstellen van de rekenmethodiek zal een onderlinge verhouding bepaald moeten worden waarin de verschillende scenario's zich voor kunnen doen. Deze verdeling zal op basis van de ontstekingskans zijn. Belangrijk is dat op dit moment de vervolgcans tot een scenario's nog niet bekend is.

Scenario 1: Brand

In *Tabel B 16* zijn de PR contouren te vinden voor Scenario 1. Zoals te zien zijn deze afstanden vergelijkbaar met het brandaandachtsgebied. De PR 10^{-8} contour reikt iets verder dan de 10^{-6} contour. De 10 kW/m^2 grens van een jetfire komt ongeveer overeen met 1% letaliteit, en alles onder 1% letaliteit nemen we niet mee. Alleen de afstanden tot het PR 10^{-6} zijn gegeven in *Tabel B 16*.

Tabel B 16 Indicatieve PR contouren voor brand op basis van de faalfrequentie uit *Gully (2019)*.

Sub-scenario	PR 10^{-6} (m)	
	P50	P95
LFP - 5,7 kWh	7	7
LFP - 8,8 kWh	9	9
LFP - 20 kWh	12	12
LFP - 80 kWh	20	20
NMC - 5,7 kWh	7	7
NMC - 8,8 kWh	8	8
NMC - 20 kWh	12	12
NMC - 80 kWh	19	19

Scenario 2: Explosie

Voor Scenario 2 is de PR 10^{-6} contouren bepaald (*Tabel B 17*) met behulp van het gele boek (PGS 2005). De PR 10^{-6} contour is de grens van 30 kPa.

Tabel B 17 Indicatieve PR contouren voor explosie op basis van de faalfrequentie uit *Gully (2019)*.

Batterij type	PR 10^{-6} (m)	
	P50	P95
LFP	23	29
NMC	22	27

Scenario 3: Gifwolk

In *Tabel B 18* zijn de PR contouren te vinden voor Scenario 3. Deze zijn bepaald met de probitrelaties die op het moment van schrijven zijn voorgeschreven. Echter bevelen wij aan te werken met de inhoudelijk vastgestelde probitrelaties (RIVM 2023b). Deze zijn in Safeti-NL aangemerkt met (TG). De gerelateerde PR contouren zijn te vinden in *Tabel B 19*.

Tabel B 18 Indicatieve PR contouren voor de gifwolk op basis van de faalfrequentie uit Gully (2019) op basis van de voorgeschreven probitrelaties.

Sub-scenario	PR 10 ⁻⁶ (m)		PR 10 ⁻⁸ (m)	
	P50	P95	P50	P95
LFP-5,7kWh	15	16	34	38
LFP-8,8kWh	23	24	52	57
LFP-20kWh	43	45	95	102
NMC-5,7kWh	0	0	0	0
NMC-8,8kWh	0	0	0	0
NMC-20kWh	0	0	0	8

Tabel B 19 Indicatieve PR contouren voor de gifwolk op basis van de faalfrequenties uit Gully (2019) op basis van de inhoudelijk vastgestelde probitrelaties.

Sub-scenario	PR 10 ⁻⁶ (m)		PR 10 ⁻⁸ (m)	
	P50	P95	P50	P95
LFP-5,7kWh	17	17	53	56
LFP-8,8kWh	24	25	74	79
LFP-20kWh	44	46	123	134
NMC-5,7kWh	0	0	0	0
NMC-8,8kWh	0	0	0	0
NMC-20kWh	0	0	6	14

Bijlage 3 Begeleidingscommissie

Bij dit onderzoek is een begeleidingscommissie betrokken. De commissie bestond uit onderstaande leden

Henk Brans	NIPV
Maarten Mooij	Mlab Testing
Henry Hiltjesdam	Omgevingsdienst Flevoland, Gooi en Vechtstreek
Julien le Roy	DCMR Milieudienst Rijnmond
Rianne 't Hoen (DNV)	Battery Safety Lab en Battery Safety Campus

Het doel achter het betrekken van de begeleidingscommissie was om de kennis van stakeholders en experts te kunnen gebruiken bij het onderzoek naar de relevantie van EOSen voor omgevingsveiligheid en onderdelen van het onderzoek te kunnen laten reviewen. Onderstaand is het overlegdocument dat besproken is met de begeleidingscommissie weergegeven.

Bijlage 4 Literatuuronderzoek

Er is veel literatuur te vinden rondom lithium-ion batterijen. Er is gezocht naar bronnen rondom incidenten met zoektermen en combinaties zoals beschreven in *Tabel B 20*. Bij elk van deze termen is ook gezocht op de Nederlandse vertaling ervan, maar zoals te verwachten met wetenschappelijke literatuur zijn de meest gevonden bronnen Engelstalig.

Tabel B 20 Engelse zoektermen gebruikt in de literatuurstudie. Er is gezocht met ófwel enkel Term 1, ófwel een combinatie van een Term 1 en een Term 2.

Term 1	Term 2
BESS/battery energy storage system	Explosion
Battery/batteries	Fire
Lithium ion/li ion/lithium/lithium-ion	Incident
	Toxic
	Risk/hazard
	Risk assessment
	Gas production/gasses
	Venting
	Thermal runaway
	State-of-charge/soc/state of charge
	Types/form
	Stability
	Failure frequency

Na het vinden van specifieke incidenten, en met name de EPRI database (EPRI 2023), zijn bronverwijzingen naar deze incidenten ook bekeken. Het is dus mogelijk dat hieruit bronnen zijn gevonden die niet met de bovenstaande termen waren gevonden.

Ditzelfde geldt voor referenties in gevonden bronnen die aangehaald werden wanneer het over SoC, vrijkomende gassen of hitte productie ging. Deze bronnen zijn gevonden via de referenties in de wetenschappelijke artikelen.

Ten slotte is ook gebruik gemaakt van bronnen die ons toegestuurd zijn via verschillende routes zoals de begeleidingscommissie en IenW. Ten minste 80% van dergelijke bronnen was al bij ons bekend via de bovenstaande methodes.

Er is meer literatuur te vinden dan realistisch in een dergelijk onderzoek beschouwd kan worden. Het gebruik van percentielen helpt om de spreiding van data uit de literatuur te vangen en poogt zo om de invloed van ontbrekende literatuur te beperken.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

www.rivm.nl

februari 2024

De zorg voor morgen
begint vandaag