

RAPPORT

Afleiden van faalfrequenties Lithium-ion energieopslagsystemen (EOS) en opslagen van Lithium-ion energiedragers

Klant: RIVM

Referentie: BJ2452-RHD-XX-XX-RP-X-02

Status: Definitief/01

Datum: 13 december 2024

Projectgerelateerd

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.

Laan 1914 no.35
3818 EX Amersfoort
Netherlands
Industry & Buildings
Trade register number: 56515154

Telefoon: +31 88 348 20 00
Fax: +31 33 463 36 52
Email: info@rhdhv.com
Website: royalthaskoningdhv.com

Titel document: Afleiden van faalfrequenties Lithium-ion energieopslagsystemen (EOS) en opslagen van Lithium-ion energiedragers

Ondertitel:
Referentie: BJ2452-RHD-XX-XX-RP-X-02
Uw kenmerk
Status: Definitief/01
Datum: 13 december 2024
Projectnaam: RIVM Faalfrequenties EOS
Projectnummer: BJ2452
Auteur(s): Mohammad Seyfi, Joost van Dijk, Karen van Tol

Opgesteld door: MS, JvD

Gecontroleerd door: KvT

Datum:

Goedgekeurd door:

Datum:

Classificatie: Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden veeleenvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

NB: Conform afspraken met de opdrachtgever (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) is de opdrachtgever gemachtigd om dit rapport te gebruiken ten behoeve van de ontwikkeling van de rekenmodellen ten behoeve van de EOS'en.

Inhoud

1	Samenvatting	1
2	Inleiding	2
2.1	Doelstelling	2
2.2	Afbakening	2
2.3	Terminologie en Afkortingen	3
2.4	Leeswijzer	5
3	Werkwijze - Aanpak	6
3.1	Onderzoek stappen	6
3.2	Methode afleiding scenario's	7
3.3	Methode afleiding faalfrequenties	7
4	Typen EOS'en en opslagen van energiedragers	8
4.1	Batterijtechnologieën	8
4.2	Typen EOS'en	8
4.3	Typen opslagen met energiedragers	9
5	Methodiek voor het afleiden van faalfrequenties	10
5.1	Thermal Runaway en gevolgscenario's	10
5.2	Gevolgscenario's	11
5.3	Oorzaakscenario's	12
5.3.1	Technische oorzaken	13
5.3.2	Operationele oorzaken	14
5.3.3	Externe oorzaken	14
5.4	Preventieve veiligheidsmaatregelen	14
5.4.1	Cel fouttolerantie	15
5.4.2	Batterij Management Systemen/Energie Management Systemen monitoren en isolatie	15
5.4.3	Weerbaarheid van modules	16
5.4.4	Weerbaarheid van racks/containers/opslag vakken	16
6	Stappenplan, frequenties en scenario's: Energieopslagsystemen (EOS)	17
6.1	Stappenplan voor afleiden overall faalfrequenties	17
6.2	Initiële faalkansen en -frequenties per oorzaakscenario	17
6.2.1	Technisch falen van energiedragers	18
6.2.2	Technisch falen van BOS-onderdelen	19
6.2.3	Operationele fouten tijdens het laadproces	20
6.2.4	Faalfrequentie als gevolg van externe brand	20
6.2.5	Faalfrequentie als gevolg van mechanische impact van buitenaf	21
6.3	Faalkansen van maatregelen per oorzaakscenario	21

6.3.1	Basismaatregelen	21
6.3.2	Afwijking van standaard maatregelen	23
6.3.3	Aanpassing van faalkansen op basis van het type energiedrager	23
6.4	Vervolgkansen voor gevolgscenario's	25
7	Stappenplan, frequenties en scenario's: Opslagen van energiedragers	1
7.1	Stappenplan voor afleiden overall faalfrequenties	1
7.2	Initiële faalfrequenties per oorzakscenario	1
7.2.1	Technisch falen van energiedragers	2
7.2.2	Faalfrequentie als gevolg van externe brand	3
7.2.3	Faalfrequentie als gevolg van mechanische impact van buitenaf	3
7.2.4	Operationele fouten tijdens het laadproces	3
7.3	Faalkansen van maatregelen per oorzakscenario	3
7.3.1	Basismaatregelen	4
7.3.2	Afwijking van standaard maatregelen	5
7.3.3	Aanpassing van faalkansen op basis van het type energiedrager	5
7.4	Vervolgkansen voor gevolgscenario's	7
8	Conclusies en aanbevelingen	9
9	Bibliografie	11

Tabellen

Tabel 2-1 - Lijst met afkortingen en hun betekenis	3
Tabel 3-1: Methode voor het bepalen van de scenario's	7
Tabel 3-2: Methode voor het bepalen van de faalfrequenties	7
Tabel 5-1: Samenvatting van oorzaakcategorieën voor TR in EOS'en en opslagen van energiedragers	13
Tabel 5-2: Samenvatting van preventieve maatregelen voor TR in EOS'en en opslagen van energiedragers ('+' is wel effectief meegenomen en '-' is niet effectief meegenomen).	14
Tabel 6-1: Initiële frequenties per jaar van oorzakscenario's op basis van het type EOS	18
Tabel 6-2: Faalkansen (PFD) van de van toepassing zijnde veiligheidsmaatregelen per oorzakscenario	22
Tabel 6-3: Voorbeelden van totale faalkans per oorzakscenario voor verschillende modules en kathode technologieën	24
Tabel 6-4: Vervolgkans op TR, brand en explosie op basis van het type mitigerende maatregelen	25
Tabel 7-1: Initiële frequenties per jaar van oorzakscenario's voor opslagen van Lithium-ion energiedragers	2

Tabel 7-2: Faalkansen (PFD) van de van toepassing zijnde veiligheidsmaatregelen per oorzakscenario	4
Tabel 7-3: Voorbeelden van totale faalkans per oorzakscenario voor verschillende modules en kathode technologieën	6
Tabel 7-4: Vervolgkansen van brand in opslagvoorziening van Lithium-ion energiedragers	7

Figuren

Figuur 5-1: Schema voor ontwikkeling van incident vanaf een oorzakscenario tot gevolgscenario's	11
Figuur 5-2: Samenvatting van de van toepassing zijnde gevolgscenario's na het ontstaan van TR	12
Figuur 6-1: Stappenplan voor faalfrequenties van EOS'en	17
Figuur 6-2: Voorbeelden van frequentie van het optreden van thermal runaway op rackniveau (5000 cellen)	25
Figuur 7-1: Stappenplan voor faalfrequenties van EOS'en	1
Figuur 7-2: Voorbeelden van frequentie van het optreden van thermal runaway op opslagvak niveau (500 cellen)	6

Bijlagen

A1	Informatie interviews
A2	Verslaglegging interviews
A3	Uitgebreide beschrijving van faalmechanismen
A4	Uitgebreide beschrijving van maatregelen

1 Samenvatting

Het doel van dit onderzoek is om faalfrequenties af te leiden voor EOS'en en Lithium-ion batterij opslagen. De reikwijdte van dit onderzoek beperkt zich tot Lithium-ion batterijen, specifiek LFP (lithium ijzer fosfaat) en NMC (lithium nikkel mangaan kobalt oxide) batterijen, en beschouwd de scenario's met brand, explosie, en emissie van afgas of de formatie van een gifwolk als gevolg van een Thermal Runaway (TR) en brand buiten de batterij(systemen). Een TR hoeft op zichzelf geen bedreiging te vormen voor de omgeving, maar is wel de hoofdoorzaak voor het ontstaan van een brand, explosie of het vrijkomen van afgas.

Dit rapport beschrijft de methodiek die ten grondslag ligt aan het afleiden van de faalfrequenties.

De faalfrequenties worden afgeleid op basis van:

- Wetenschappelijke statistische methoden
- Analogon met vergelijkbare sectoren/branches
- Expert judgement van stakeholders in de betreffende sector/branche

De ontwikkeling van gevaarscenario's naar een TR en vervolgens naar de drie gevolgscenari'o's kan inzicht geven in de mechanismen waarbij dergelijke gevolgscenari'o's kunnen ontstaan. Een BowTie methodiek sluit goed aan bij de veiligheidsanalyse van de energiedragers met een TR als top-event.

De gevolgscenari'o's na een TR zijn brand, explosie en emissie van afgas. Het afgas bestaat over het algemeen uit brandbare stoffen (waterstof en koolwaterstoffen) en toxische stoffen. In het geval van een brand worden de brandbare stoffen (gedeeltelijk) omgezet in verbrandingsproducten.

De oorzaaksce'nari'o's zijn onderverdeeld in technische oorzaken, operationele oorzaken en externe oorzaken. Technische oorzaken omvatten fouten of beschadigingen in de energiedragers tijdens de fabricage of montage, evenals door de veroudering van de energiedragers. Operationele oorzaken verwijzen naar fouten en faalincidenten tijdens het laadproces. Externe oorzaken zijn externe brand in de omgeving en fysieke impact van buitenaf.

De preventieve veiligheidsmaatregelen zijn onderverdeeld in cel fouttolerantie, BMS/EMS monitoren en isolatie, weerbaarheid van modules en weerbaarheid van racks/containers/opslag vakken. Deze maatregelen moeten een TR geheel onafhankelijk en op zichzelf kunnen voorkomen.

De afgeleide faalfrequenties zijn afhankelijk van het type EOS en het type opgeslagen energiedragers. Een voorbeeld voor frequenties van een TR op EOS rackniveau wordt gegeven als conclusie van dit onderzoek voor mobiele en stationaire EOS. Ook wordt een voorstel gegeven voor de frequenties van een TR op opslag vak niveau gegeven voor nieuwe/remanufactured, gebruikte/refurbished, en afgedankte energiedragers in de conclusie van dit onderzoek.

2 Inleiding

De energietransitie maakt de inzet van duurzame energiebronnen noodzakelijk. Dit zijn bijvoorbeeld windturbines en zonnepanelen. Deze kenmerken zich door wisselende energieproductie. Daarmee vindt de energieproductie niet altijd plaats op momenten dat de energie gebruikt wordt. Om deze discrepantie in geproduceerde en gebruikte energie op te vangen, stijgt de vraag naar energieopslagsystemen (hierna: EOS'en) om de geproduceerde energie op te slaan voor later gebruik.

Op het moment van dit onderzoek zijn de meeste EOS'en (gerealiseerd of gepland) op basis van Lithium-ion batterijen. Dat betekent dat met de stijgende vraag naar EOS'en ook de vraag naar en het gebruik van Lithium-ion batterijen steeds verder toeneemt. Als gevolg van deze stijging, neemt ook het opslaan van Lithium-ion batterijen in warenhuizen toe.

2.1 Doelstelling

Recent onderzoek van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (hierna: RIVM) en Royal HaskoningDHV (hierna: RHDHV) toont aan dat EOS'en en opslagen van grote hoeveelheden Lithium-ion batterijen relevante risico's voor de omgevingsveiligheid kunnen opleveren. Om het risico voor de omgevingsveiligheid door het toenemende gebruik van EOS'en te duiden stelt het RIVM, in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, rekenvoorschriften op om de risico's van EOS'en en de opslag van Lithium-ion batterijopslagen voor de omgeving te kunnen berekenen. Een onderdeel van het rekenvoorschrift zijn de faalfrequenties.

Doelstelling van het onderzoek:

Het afleiden van de faalfrequenties voor:

1. EOS'en, *en*
2. Lithium-ion batterijopslagen.

Bij de afleiding dient gebruik te worden gemaakt van recente wetenschappelijke inzichten.

2.2 Afbakening

Type EOS'en

Er zijn verschillende types EOS'en en batterijen die in EOS'en worden toegepast. Dit onderzoek gaat uit van Lithium-ion batterijen. Daarbij focust het onderzoek op LFP (lithium ijzer fosfaat) - en NMC (lithium nikkel mangaan kobalt oxide) -batterijen. Deze batterij typen worden momenteel het meeste in EOS'en toegepast.

Type effecten

Binnen dit onderzoek wordt enkel gekeken naar brand, explosie, en emissie van afgas of de formatie van een gifwolk, bij het uitblijven van een ontsteking, als gevolg van een Thermal Runaway (hierna: TR) en brand. Het beschouwen van deze type effecten is zo gekozen dat de effecten in lijn zijn met het onderzoek van het RIVM.

Restricties werkwijze

De afleiding van faalfrequenties kan in volgorde van voorkeur plaatsvinden op basis van:

- Wetenschappelijke statistische methoden;
- Analogon met vergelijkbare sectoren/branches;
- Expert judgement van stakeholders in de betreffende sector/branche.

Voor EOS'en is het lastig om de faalfrequenties statistisch te onderbouwen. Vanwege de relatief nieuwe toepassing is nog weinig concrete informatie beschikbaar. Uitgangspunt voor dit onderzoek is voornamelijk analogon en expert judgement.

2.3 Terminologie en Afkortingen

In dit rapport over het onderzoek naar het afleiden van faalfrequenties voor EOS'en en opslag van energiedragers worden meerdere afkortingen gebruikt. Deze afkortingen en hun betekenis zijn daarom weergegeven in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden..**

Tabel 2-1 - Lijst met afkortingen en hun betekenis

Afkorting	Betekenis
BESS	Battery Energy Storage Systems
BEVI	Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen
BMS	Battery Management System
BOS	Balance of Systems
CID	Current Interruption Devices
EMS	Energy Management System
EOS	Energieopslagsysteem
ESS	Energy Storage System
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
LFP	Lithium-IJzer-Fosfaat
NMC	Nikkel-Mangaan-Kobalt
PCS	Power Converter System
PFD	Probability of Failure on Demand
PGS	Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SCAI	Safety Control, Alarms, and Interlocks
SOC	State of Charge
TR	Thermal Runaway
VBB	Vast opgestelde Brand beheersings- en Blusinstallaties

Naast afkortingen wordt er in dit rapport ook gesproken in bepaalde termen of worden er bepaalde zaken beschreven die expliciete duiding of definitie behoeven. Deze terminologie en belangrijke definities zijn toegevoegd in de onderstaande opsomming. De definities zijn voor zover mogelijk overgenomen van het RIVM en de PGS 37-1 en PGS 37-2.

- **Balance of Systems (BOS):** Een algemene term voor alle componenten van een EOS-installatie, behalve de energiedragers, met als rol het ondersteunen van de functie van het EOS;
- **Batterij:** Elke bron van door rechtstreekse omzetting van chemische energie verkregen elektrische energie, bestaande uit een of meer niet-oplaadbare of oplaadbare batterijcellen of groepen daarvan;
- **(Batterij)cel:** De functionele basiseenheid in een batterij die wordt gevormd door elektroden, elektrolyt, een behuizing, aansluitingen en, indien van toepassing, separatoren, en die de actieve materialen bevat waarvan de reactie elektrische energie opwekt;

- **(Brand)compartiment:** Brandcompartiment als bedoeld in het Besluit bouwwerken leefomgeving: gedeelte van één of meer gebouwen bestemd als maximaal uitbreidingsgebied van brand;
- **Batterijmodule:** Een serie- en/of parallelschakeling van cellen verpakt in een behuizing voorzien van temperatuursensoren en meetdraden waarop een lokaal BMS gekoppeld is of kan worden;
- **Batterijrack:** Een batterijrack wordt gezien als een samenstelling van batterijmodules in een fysieke behuizing daarbij is de wijze van stapeling (horizontaal of verticaal) niet van belang voor de in dit onderzoek beschreven ontwikkeling van scenario's;
- **Batterijsysteem voor stationaire energieopslag:** Een industriële batterij met interne opslag die speciaal is ontworpen om elektrische energie van het elektriciteitsnet op te slaan en aan het elektriciteitsnet te leveren, of om elektrische energie op te slaan en aan de eindgebruiker te leveren, ongeacht waar deze batterij wordt gebruikt of door wie zij wordt gebruikt;
- **Energiedrager:** Met de energiedrager wordt de daadwerkelijke batterij cel bedoeld, daar waar de energie wordt opgeslagen. Bij een parallelschakeling van cellen geldt deze parallelschakeling ook als energiedrager, omdat deze schakeling zicht gedraagt als één cel;
- **EOS (energieopslagsysteem):** Een EOS is de samenstelling van de lithium houdende energiedragers, omvormers, eventueel transformatoren, datacommunicatie, (substelsysteem) EMS (systeemcontroller), elektrische infrastructuur;
- **EOS-park:** Een compleet systeem bestaande uit meerdere EOS'en (subsystemen), datacommunicatie, energiehandelsoftware, EMS, elektrische infrastructuur en verbinding met het elektriciteitsnet;
- **Grootschalige TR:** Een Thermal Runaway (TR) reactie die dusdanig groot is dat een volledig batterijrack in een EOS of een volledig opslagvak behelst;
- **IP-rating (Ingress-Protection rating):** Een standaard die een maatstaf geeft voor de mate waarin de batterij vaste stoffen en vloeistoffen buiten kan houden. Met andere woorden, hoe goed de batterij bestand is tegen de intrede van vaste stoffen en vloeistoffen;
- **Laadniveau:** De beschikbare capaciteit van een energiedrager, uitgedrukt als percentage van de nominale capaciteit;
- **Misbruik:** het gebruik van EOS'en en energiedragers buiten de aanvaardbare grenzen op het gebied van temperatuur, elektriciteit, en mechanische integriteit;
- **Opslagvak:** Een groep van de opgeslagen energiedragers in een fysieke behuizing met en bepaalde weerstand tegen fysieke impact. **Definitie PGS 37-2:** Afgebakend deel van de opslagvoorziening, over het algemeen middels belijning of afwijkende kleuren;
- **Opslagvoorziening:** Vaste ruimte bestemd voor de opslag van lithium-houdende energiedragers uitgevoerd als een brandcompartiment conform Bouwbesluit (2012);
- **Probability of Failure on Demand (PFD):** De kans dat een bepaalde veiligheidsmaatregel faalt wanneer er beroep gedaan wordt op die specifieke maatregel; In dit rapport verwijzen de termen PFD en faalkans naar eenzelfde concept;
- **Refurbished:** Er is sprake van refurbishing wanneer een defecte (eventueel afgedankte) lithium-houdende energiedrager opnieuw wordt samengesteld volgens de specificaties van de marktpartij die de reparatie uitvoert al dan niet met gebruikmaking van onderdelen van de originele fabrikant;
- **Remanufactured:** Er is sprake van remanufacturing wanneer een defecte (eventueel afgedankte) lithium-houdende energiedrager opnieuw wordt samengesteld volgens de specificaties van, en met gebruikmaking van de onderdelen van de originele fabrikant;
- **Six-sigma aanname:** De aanname dat één in de miljoen producten in een productieproces met een defect geproduceerd wordt (DNV, 2019);
- **Thermal Runaway (TR):** Ongecontroleerde toename in temperatuur, als een gevolg van een grotere warmteproductie dan warmteafvoer.

2.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 3 gaat in op de gehanteerde werkwijze. Een toelichting op de verschillende typen EOS'en en opslagen van Lithium-ion batterijen wordt uitgewerkt in Hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 beschrijft de oorzaak- en gevolgscenario's die ten grondslag liggen aan de methodiek voor het afleiden van faalfrequenties voor EOS'en en opslag van Lithium-ion batterijen. Tevens gaat dit hoofdstuk in op de effectiviteit van maatregelen en in hoeverre deze in de afleiding van de faalfrequenties mogen worden verdisconteerd.

Hoofdstuk 6 combineert de initiële kansen voor het optreden van een TR en/of externe brand met de kans dat veiligheidsmaatregelen falen in het voorkomen of mitigeren van de oorzaak- en gevolgscenario's voor EOS'en. De combinatie van deze kansen geeft een uiteindelijke faalfrequentie voor het betreffende scenario. Hoofdstuk 7 werkt dit op een vergelijkbare manier uit voor de opslagen van Lithium-ion batterijen.

3 Werkwijze - Aanpak

Dit onderzoek doet een voorstel voor het afleiden van faalfrequenties ten behoeve van het ontwikkelen van een rekenmethodiek voor risicoberekeningen om de veiligheidsrisico's van EOS'en en de Lithium-ion batterijopslagen te bepalen. De afleiding van faalfrequenties dient, op basis van het protocol "Aanpassing rekenmethodieken externe veiligheid" (RIVM, 2012), in volgorde van voorkeur plaatsvinden op basis van:

- Wetenschappelijke statistische methoden;
- Analogon met vergelijkbare sectoren/branches;
- Expert judgement van stakeholders in de betreffende sector/branche.

3.1 Onderzoek stappen

De aanpak van dit onderzoek sluit hierbij aan. Zoveel als mogelijk is gestreefd naar wetenschappelijke onderbouwing, daarna is analogon en expert judgement toegepast. De gevolgde aanpak bestaat uit de volgende stappen:

- i. Literatuuronderzoek
De voorkeur gaat uit naar het afleiden van faalfrequenties onderbouwd door wetenschappelijke literatuur en statistiek. Het doel van het literatuuronderzoek is de afleiding van de faalfrequenties van oorzaak- en gevolgscenario's te onderbouwen, of tenminste de methodiek daarvoor op basis van wetenschappelijke literatuur te onderbouwen. Tevens dient het literatuuronderzoek ter identificatie van de relevante oorzaak- en gevolgscenario's.
- ii. Identificatie van bruikbaar analogon en expert judgement
Het protocol voor aanpassing van rekenmethodieken geeft de mogelijkheid om, bij gebrek aan beschikbare literatuur, faalfrequenties af te leiden uit analogon (vergelijkbare technieken waarvoor de faalfrequenties wel beschikbaar zijn in wetenschappelijke literatuur en statistiek) of uit "expert judgement".
- iii. Vaststellen van relevante oorzaak en gevolg-scenario's en mitigerende maatregelen
Het literatuuronderzoek in combinatie met expert judgement van de onderzoekers en RIVM leidt tot de bepalende scenario's Thermal Runaway (TR) en een externe brand (buiten de EOS of in de opslagloods voor energiedragers). Er kunnen hiervoor meerdere oorzaken zijn en ook kunnen meerdere mitigerende maatregelen relevant zijn. Ook deze zijn op basis van literatuuronderzoek en expert judgement van de onderzoekers en het RIVM vastgesteld.
- iv. Onderbouwing van de initiële faalkansen en de kans op het falen van veiligheidsmaatregelen
De initiële faalkansen en de kans op het falen van veiligheidsmaatregelen zijn onderbouwd vanuit verschillende bronnen. Voor veel veiligheidsmaatregelen, of in het algemeen technologieën die gebruikt worden in EOS'en, zijn geen of weinig wetenschappelijke bronnen of statistiek beschikbaar. Dit onderzoek valt daarom terug op een analogon (een vergelijking met een technologie waarvoor wel wetenschappelijke bronnen en statistiek beschikbaar is), of op "expert judgement".
- v. Bepaling van de faalfrequentie per scenario
De combinatie van de initiële kansen voor het optreden van een TR en/of externe brand gecombineerd met de kans dat veiligheidsmaatregelen falen in het voorkomen of mitigeren van de oorzaak- en gevolgscenario's geeft een uiteindelijke faalfrequentie voor het betreffende scenario.
- vi. Toetsing en aanvulling op basis van interviews
De "expert judgement" van experts in de branche van EOS'en en de opslag van energiedragers is ingebracht in de vorm van interviews. De interviews zijn verifiërend van aard en dienen ter bevestiging van de gekozen uitgangspunten en de grootteorde van de afgeleide faalfrequenties.

Gekozen is voor een inhoudelijke weergave van de resultaten. Hoofdstuk 4 (Typen EOS'en en opslagen van energiedragers) bevat weergaven van resultaten van onderzoekstappen i. en vi. Hoofdstuk **Fout!**

Verwijzingsbron niet gevonden. (Methodiek voor het afleiden van scenario's) bevat resultaten van onderzoekstappen i, ii., iii. en vi. Hoofdstuk 6 (Stappenplan, frequenties en scenario's: EOS) en 7 (Idem: opslag) van onderzoekstappen i, ii, iv, v en vi. In bijlagen A1 en A2 zijn de organisaties van de geïnterviewden gegeven en de op voorhand opgestelde vragen voor de interviews gegeven.

3.2 Methode afleiding scenario's

Tabel 3-1 geeft een samenvatting weer van de methode voor het vaststellen van de scenario's die ten grondslag liggen aan de methode voor het afleiden van de faalfrequenties. Deze methode geldt voor zowel de EOS'en als voor de opslag van Lithium-ion batterijen.

Tabel 3-1: Methode voor het bepalen van de scenario's

Nr.	Stap
1	Definiëren van oorzaakscenario's die tot een grootschalige Thermal Runaway kunnen leiden
2	Definiëren van de veiligheidsmaatregelen en hun impact op het verloop van scenario's
3	Definiëren van gevolgscenario's na een grootschalige Thermal Runaway

3.3 Methode afleiding faalfrequenties

Tabel 3-2 geeft een samenvatting weer van de methode voor het vaststellen van de faalfrequenties voor de relevante (gevolg)scenario's. Deze methode geldt zowel voor de EOS'en als voor de opslag van Lithium-ion batterijen.

Tabel 3-2: Methode voor het bepalen van de faalfrequenties

Nr.	Stap
1	Vaststellen van initiële faalfrequenties van oorzaakscenario's op basis van het type EOS of Opslag van energiedragers
2	Vaststellen van faalkansen van de van toepassing zijnde preventieve maatregelen voor een TR per initieel oorzaakscenario
3	Berekening van de totale frequentie van een TR: combinatie van initiële faalfrequenties en (waar van toepassing) faalkansen van maatregelen voor brandbeheersing
4	Berekening van vervolgekansen voor gevolgscenario's

4 Typen EOS'en en opslagen van energiedragers

In Nederland wordt momenteel gebruik gemaakt van diverse typen EOS'en met verschillende typen energiedragers. Deze verschillen zijn te beschrijven aan de hand van verschillende niveaus: het type batterijtechnologie in een EOS, het type EOS zelf en het type opslag waarin de Lithium-ion batterijen worden opgeslagen. Er bestaat daarnaast een wezenlijk verschil tussen de opslag van batterijen en het gebruik van deze batterijen in een EOS. Dit hoofdstuk bespreekt deze verschillen en bevat de resultaten van de onderzoekstappen i. en vi.

4.1 Batterijtechnologieën

Het type batterijtechnologie in een EOS of in de batterijen in een batterij-opslag kan verschillen. Het verschil betreft de elektrochemische basis waarop de batterij energie opslaat. Momenteel is de meest voorkomende batterijtechnologie de Lithium-ion batterij. Andere voorkomende batterijen zijn redox-flow batterijen, natrium-ion batterijen, nikkelmetaalhydride batterijen, silicium-anode batterijen, solid-state batterijen, all-solid-state batterijen, en lithium-lucht batterijen.

Vanwege het overgrote aandeel van Lithium-ion batterijen in de Nederlandse markt van EOS gaat dit onderzoek uit van Lithium-ion batterijen, zowel als basis van een EOS als voornaamste opgeslagen batterijsoort. Bij Lithium-ion batterijen kan onderscheid gemaakt worden tussen verschillende typen: de lithium ijzer fosfaat (LFP) en de lithium nikkel mangaan kobalt oxide (NMC) batterijen vormen respectievelijk 60% en 30% van de gebruikte batterij typen in EOS'en.

4.2 Typen EOS'en

Naast verschillen in het type batterijtechnologie dat gebruikt wordt in EOS'en, zijn er onder EOS'en ook verschillende typen. Verschillende vormen van EOS'en worden genoemd in de PGS 37-1:

Stationaire EOS'en:

- Zelfstandig EOS in (aangepaste) container: een stationair opgesteld EOS in een (aangepaste) zeecontainer, of andere behuizing met vergelijkbare afmetingen;
- Energieopslagpark: meerdere zelfstandige EOS'en in aangepaste containers, of andere behuizing, op één locatie die aan elkaar zijn gekoppeld en samen één systeem vormen;
- EOS-park met niet-betreedbare behuizingen in de open lucht: stationair opgestelde, gekoppelde EOS'en in een speciaal voor de EOS bedoelde behuizing;

Mobiele EOS'en:

- 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;

Inpandige EOS'en:

- *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.*

Inpandige EOS'en vallen buiten de reikwijdte van dit onderzoek. Deze EOS'en hebben vanuit het incidentscenario nauwelijks invloed op de externe veiligheid.

Er bestaat variatie in de grootte van EOS'en en energiedragers. Een EOS kan uit een groot aantal batterijcellen bestaan dat verschilt per EOS en hetzelfde geldt voor energiedragers. Het uitgangspunt voor het afleiden van faalfrequenties in dit onderzoek is dat een EOS uit 5000 batterijcellen bestaat en een

energiedrager uit 500 batterijcellen. Echter zijn alle gebruikte formules op een manier gerapporteerd waarop ze te gebruiken zijn voor elk willekeurig aantal batterijcellen dat in een specifiek EOS of in een specifieke energiedrager voorkomt (genormaliseerd).

4.3 Typen opslagen met energiedragers

De opslag van lithium houdende energiedragers kan ook verdeeld worden op basis van verschillen in het soort opslag. De PGS 37-2 maakt onderscheid in de staat van de energiedragers die worden opgeslagen en het soort opslagvoorziening. De combinatie van deze twee aspecten is een zogenoemde “typical”.

De basis is de staat van de energiedrager:

- Nieuwe en “remanufactured” (technisch nieuwe) energiedragers;
- Gebruikte, in gebruik zijnde en refurbished energiedragers;
- Afgedankte energiedragers (zowel t.b.v. recycling, als t.b.v. eindverwerking);

Daarnaast kent de PGS 37-2 een verdeling van soorten opslagvoorziening in kleine, middelgrote, en grote opslagvoorzieningen.

Op basis van beschikbare literatuur en interviews met deskundigen uit de branche leidt dit onderzoek faalfrequenties af voor:

- Nieuwe en remanufactured energiedragers;
- Gebruikte energiedragers en refurbished energiedragers;
- Afgedankte energiedragers.

De argumentatie voor deze verdeling komt voort uit het feit dat remanufactured energiedragers aan dezelfde vereisten moeten voldoen als nieuwe energiedragers.

Tussen gebruikte en refurbished energiedragers is geen onderscheid gemaakt. Gebruikte energiedragers zijn batterijen die niet langer optimaal presteren maar nog wel hergebruikt kunnen worden voor minder veeleisende toepassingen of refurbished kunnen worden. Refurbished energiedragers hoeven niet aan dezelfde eisen te voldoen als nieuwe of remanufactured energiedragers. Afgedankte energiedragers en batterijen zijn niet langer geschikt voor de opslag van energie en hebben een significant hogere faalkans ten opzichte van nieuwe/remanufactured en gebruikte/refurbished energiedragers.

5 Methodiek voor het afleiden van faalfrequenties

Hoofdstuk 5 bevat de resultaten van onderzoek stappen i, ii., iii. en vi.

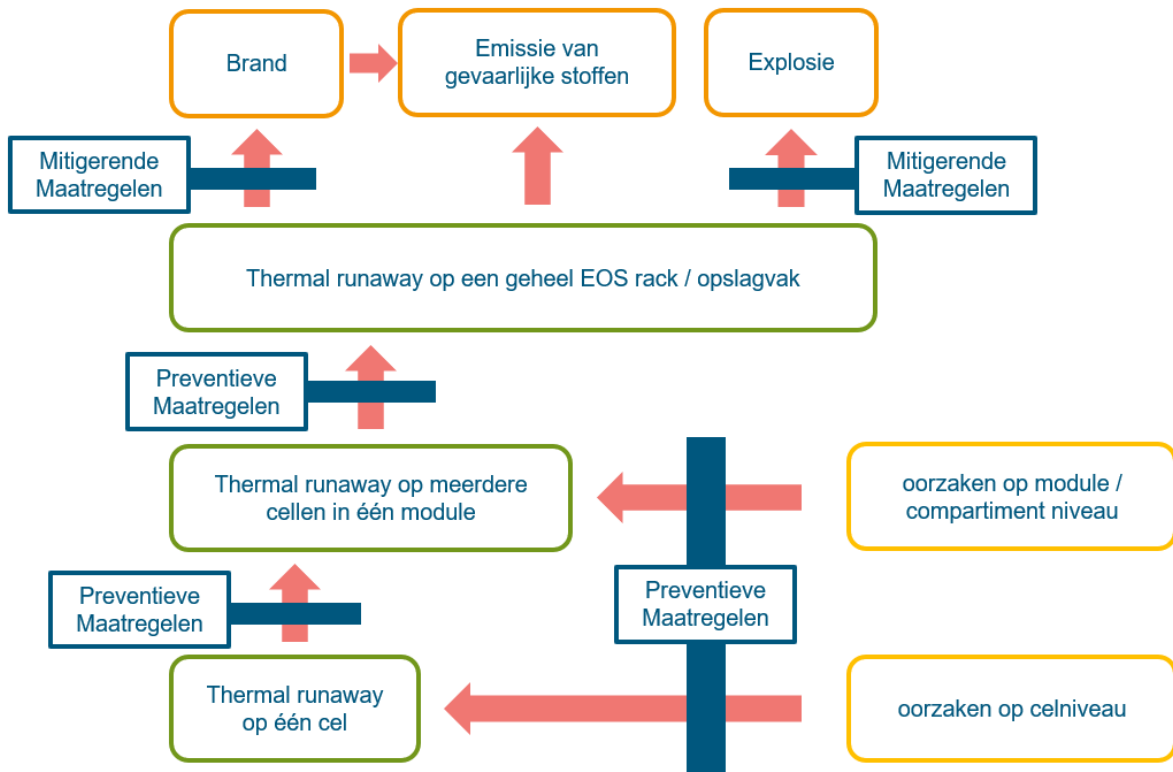
5.1 Thermal Runaway en gevolgsenario's

Het primaire gevaar verbonden met het gebruik van Lithium-ion energiedragers zowel in EOS'en als bij de opslag van energiedragers is het optreden van een TR. Bij een grotere warmteproductie dan het – zowel passieve als actieve – vermogen van warmteafvoer van de energiedragers zal de temperatuur van batterijen toenemen waardoor de warmteproductie nog verder zal toenemen (een positief feedbackmechanisme).

Een TR hoeft op zichzelf geen bedreiging te vormen voor de omgeving maar is wel de hoofdoorzaak voor het ontstaan van een brand, explosie of het vrijkomen (emissie) van afgas. De ontwikkeling van gevaarsscenario's naar een TR en vervolgens naar de drie gevolgsenario's kan inzicht geven in de mechanismen waarbij dergelijke gevolgsenario's kunnen ontstaan. Een BowTie methodiek sluit dus goed aan bij de veiligheidsanalyse van de energiedragers met een TR als top-event. Er moet echter worden opgemerkt dat de voorgestelde analyse zich niet per se houdt aan alle eisen van een BowTie risicoanalyse. Het mechanisme waarbij een TR mogelijk (op verschillende niveaus) kan ontstaan en de ontwikkeling van het scenario tot brand, explosie en emissie van gevaarlijke stoffen (afgas) worden in Figuur 5-1 weergegeven.

TR kan mogelijk op verschillende niveaus plaatsvinden, van één cel tot een geheel EOS of opslag vak van energiedragers. Gebaseerd op ervaring met incidenten die hebben plaatsgevonden wordt aangenomen dat de gevolgsenario's van brand, explosie en het vrijkomen van afgas alleen plaatsvinden wanneer een TR een voldoende niveau bereikt. Voorbeelden hiervan zijn een TR van een volledige batterijmodule of een opslag vak van energiedragers (RIVM, 2024). Het niveau van temperatuurstijging waarbij een TR geïnitieerd wordt hangt af van de faalmodus waaruit de TR voortkomt (de manier waarop de TR veroorzaakt wordt). Dergelijke evenementen zijn uitgebreider besproken in de onderstaande paragrafen maar in het kort wordt aangenomen dat verschillende gevaren een TR in gang kunnen zetten op celniveau of module niveau of op het niveau van een groep cellen. Op een vergelijkbare manier wordt aangenomen dat alleen een TR op het niveau van een batterijmodule (of groter) relevant is voor de omgevingsveiligheid.

Rekening houdend met een TR op een EOS-rack of opslag vak niveau als het primaire incident, kunnen de beschikbare veiligheidsmaatregelen worden verdeeld onder preventief en mitigerend. Binnen de reikwijdte van deze studie zijn de preventieve maatregelen van belang voor het afleiden van de faalfrequentie voor het primaire incident (TR op een rack of opslag vak), in combinatie met de initiële frequenties voor de van toepassing zijnde oorzaakscenario's. Vervolgens kunnen de mitigerende maatregelen worden gebruikt om de frequenties af te leiden voor de drie primaire gevolgsenario's.



Figuur 5-1: Schema voor ontwikkeling van incident vanaf een oorzakscenario tot gevolgscenario's

5.2 Gevolgscenario's

Hoewel het uitwerken van de gevolgscenario's buiten de reikwijdte van deze studie valt, is het voor het afleiden van faalkansen belangrijk welke scenario's voor welk type systemen van toepassing zijn, met name ten behoeve van het toekennen van frequenties voor de gevolgscenario's die van toepassing zijn. Een overzicht van deze scenario's is in Figuur 5-2 weergegeven.

Afgas (offgas) is een belangrijke indicatie van TR. De samenstelling van het afgas is echter afhankelijk van meerdere (technische, operationele en omgevings-) factoren, onder andere het type energiedrager en het laadniveau (State of Charge [SOC]). Over het algemeen bestaat het afgas uit brandbare stoffen (waterstof en koolwaterstoffen) en mogelijk toxische stoffen. In het geval van een brand worden de brandbare stoffen (gedeeltelijk) omgezet in verbrandingsproducten. Hoewel de samenstelling van het afgas en verbrandingsproducten niet gelijk zijn, wordt in deze studie uitgegaan van de emissie van gevaarlijke stoffen in beide gevolgscenario's ongeacht de aanwezigheid van een ontstekingsbron, met andere woorden een TR, met of zonder brand, op een EOS rack of een opslag vak. Dit is een conservatieve benadering voor het afleiden van de faalfrequenties.

In het geval van vertraagde ontsteking van een ontvlambare gaswolk binnen de explosie limieten kan een explosie of brand ontstaan. Binnen de reikwijdte van externe veiligheid is een explosie een belangrijker gevolg. Echter, dit scenario is niet van toepassing op alle typen EOS en opslagen van batterijen. Specifiek wordt aangenomen dat de effecten van een explosie relevant zullen zijn voor de externe veiligheid van mobiele of stationaire EOS'en in containers waarbij de mogelijkheid bestaat dat er significante hoeveelheden brandbare producten zich ophopen. Anderzijds wordt het aangenomen dat dergelijke hoeveelheden brandbaar gas niet gevormd kunnen worden in de relatief kleine ruimte van zelfstandige EOS'en in de buitenlucht en zelfs in het geval van dergelijke hoeveelheden brandbaar gas wordt aangenomen dat de gevolgen niet grootschalig genoeg kunnen zijn voor de externe veiligheid. Als laatste

wordt aangenomen dat explosies in een opslag vak binnen een opslag van energiedragers niet zal leiden tot significante gevolgen voor de externe veiligheid.



Figuur 5-2: Samenvatting van de van toepassing zijnde gevolgscenario's na het ontstaan van TR

5.3 Oorzaakscenario's

Tabel 5-1 geeft een samenvatting weer van verschillende categorieën van oorzaakscenario's. Een uitgebreide beschrijving van de wijze waarop de categorisering is gemaakt is opgenomen in de volgende paragrafen. De oorzaakscenario's zijn over het algemeen van toepassing op zowel EOS'en als opslagen van energiedragers, maar de manier waarop een TR kan ontstaan kan mogelijk verschillen tussen EOS'en en opslagen van energiedragers. Tabel 5-1 geeft geen uitputtende lijst van alle oorzaken maar is bedoeld om alle primaire mechanismen in kaart te brengen waardoor een TR mogelijk kan optreden. Het niveau waarop een TR ontstaat is afhankelijk van het mechanisme waarmee elk oorzaakscenario leidt tot een TR. Een vergelijking tussen de voorgestelde oorzaakscenario's en die vanuit PGS 37-1 en PGS 37-2 is in Bijlage A3 weergegeven.

De voorgestelde scenario's sluiten aan bij de drie hoofdcategorieën van gevaren in een BowTie, te weten: technische oorzaken waardoor de apparatuur niet binnen de operationele grenzen kan blijven functioneren, operationele oorzaken waardoor de apparatuur – hoewel niet foutief – buiten de operationele grenzen wordt bediend, en omgevingsoorzaken waarbij de apparatuur door fysieke impact of warmtestraling wordt beschadigd. Elk oorzaakscenario – indien niet effectief beheerst – zal onafhankelijk kunnen leiden tot een TR.

Tabel 5-1: Samenvatting van oorzaakcategorieën voor TR in EOS'en en opslagen van energiedragers

nr.	Categorie oorzaakscenario's	Omschrijving van voorbeeldmechanismen	Niveau van TR
1	Technisch falen van energiedragers	Fouten of beschadigingen in de energiedragers, tijdens de fabricage of montage, evenals door de veroudering van de energiedragers	Cel
2	Technisch falen van BOS-onderdelen (interne brand)	Opwarming van de energiedragers vanwege een brand in EOS rack vanwege het falen van BOS-onderdelen [fabricage- of montagefouten, veroudering]	Module
3	Operationele fouten tijdens het laadproces	Het laden of ontladen buiten de operationele en toegestane grenzen [bijvoorbeeld door het falen omvormers, trafo's, enz.]	Cel
4	Externe brand	Opwarming van de energiedragers vanwege externe warmtestraling door een brand in de omgeving	Module
5	Mechanische impact	Het beschadigen van de energiedragers door een fysieke impact van buitenaf	Module

5.3.1 Technische oorzaken

Hoewel het falen van energiedrager- en/of BOS-onderdelen niet per se tot het ontstaan van TR zal leiden, wordt in deze studie uitgegaan van een TR als gevolg van dergelijke fouten. Dit is een conservatieve benadering om rekening te houden met het ontbreken van concrete frequenties voor verschillende faalscenario's.

De belangrijkste oorzaken voor het technisch falen van een energiedrager zijn fouten tijdens de fabricage van de energiedragers of tijdens de montage van energiedragers in modules. De frequentie van dergelijke fouten kan worden benaderd met een six-sigma aanname. Tevens is de veroudering van energiedragers een belangrijke oorzaak voor het technisch falen van componenten. Elk van de drie oorzaken zijn relevant voor EOS'en en opslagen van energiedragers. Specifiek voor veroudering, wordt uitgegaan van een grotere waarschijnlijkheid voor refurbished en gebruikte energiedragers ten opzichte van nieuwe energiedragers. Afgedankte energiedragers lopen uiteraard het hoogste risico op falen.

Er dient een onderscheid gemaakt te worden tussen het falen van energiedragers en het falen van andere componenten binnen een EOS rack of opslag vak, wat kan leiden tot het falen van batterijen en tot een TR. De tweede oorzaakcategorie en de categorie voor externe branden buiten de batterijmodule zijn zeer vergelijkbaar voor de toepassing op de opslag van energiedragers. Daarmee worden deze twee oorzaak categorieën beschouwd als één categorie in dit onderzoek, namelijk de categorie voor externe brand.

Het technisch falen van EOS-onderdelen refereert naar het falen van omvormers, ventilatiesystemen, logische controlesystemen, compressoren, verwarming, pompen, etc. Omwille van eenvoud wordt het falen van een EOS-onderdeel zonder een daaropvolgende brand niet als relevant gezien voor dit onderzoek. Een relevant oorzaakscenario is eerder een combinatie van het falen van een EOS-onderdeel inclusief de inefficiëntie van beschikbare veiligheidssystemen zoals brandbeheersing of HVAC-systemen voor het verwijderen van vrijgekomen warmte. Omdat dergelijke scenario's impact zullen hebben op de gehele module wordt het aangenomen dat een TR zal beginnen op module niveau.

Een speciale vorm van het technisch falen van energiedragers en/of EOS-onderdelen is het technisch falen door invloeden vanuit de omgeving. Conditie in de omgeving zoals een hoge vochtigheid en/of zout water spelen een belangrijke rol in het vormen van "hotspots". Ondanks dat kortsluiting een oorzaak kan zijn van een TR, is de aanname dat een kortsluiting altijd tot een TR leidt te conservatief vanwege het lage voltage waarop batterijen opereren. Invloeden vanuit de omgeving zullen eerder voor "hotspots" zorgen op EOS-onderdelen, vooral omdat de energiedragers zelf een IP-rating hebben en niet de racks, de containers of

de opslag vakken. Echter kan de effectiviteit van deze IP-rating niet goed geborgd worden voor gebruikte en afgedankte batterijen in vergelijking met nieuwe energiedragers.

5.3.2 Operationele oorzaken

De categorie van operationele oorzaken verwijst naar fouten en faalincidenten tijdens het laadproces, onder andere een onaanvaardbare spanning of stroom tijdens het laadproces. Onaanvaardbare spanning of stroom zou bijvoorbeeld kunnen komen door het falen van elektrische installaties buiten het EOS. Het falen van BMS/EMS en gelijkwaardige controlesystemen worden in deze studie niet onder een oorzakscenario genoemd, maar juist onder het falen van een veiligheidsmaatregel. Het falen van een BMS/EMS sensor leidt bijvoorbeeld niet direct tot een TR maar het overladen van energiedragers terwijl het BMS/EMS de cellen niet isoleert kan wél leiden tot een TR.

Voor de opslag van energiedragers kunnen de fouten tijdens het laadproces wel of niet worden inbegrepen in de totale frequentie van TR. Dit is afhankelijk van de wijze waarop het laadproces plaatsvindt. Het oorzakscenario wordt niet geloofwaardig geacht voor situaties waarin het laden van energiedragers niet in hetzelfde brandcompartiment plaatsvindt als waar de energiedragers worden opgeslagen, of waar het laden en testen in een brandwerende kast/kluis gedaan wordt die voldoet aan de van toepassing zijnde eisen.

5.3.3 Externe oorzaken

De belangrijkste externe oorzaken voor het ontstaan van een TR zijn externe brand in de omgeving en fysieke impact van buitenaf. Door een brand buiten het EOS of het opslag vak van energiedragers kunnen de energiedragers worden aangestraald en mogelijk in TR raken. Vanwege een uniforme temperatuurstijging binnen het EOS wordt hier uitgegaan van TR in het gehele EOS (alle modules). Dit geldt ook voor mechanische impact, zoals het aanrijden of vallen van de energiedragers, waardoor het gehele EOS wordt beschadigd en een TR ondergaat. Hieruit wordt aangenomen dat de faalfrequenties voor externe risico's voor mobiele EOS'en hoger zijn voor stationaire EOS'en omdat mobiele EOS'en vaak getransporteerd worden en op verschillende plaatsen worden geplaatst. Daar komt bij dat mobiele EOS'en worden vervoerd via locaties waar minder systeem-specifieke barrières aanwezig zijn, zoals de openbare weg.

5.4 Preventieve veiligheidsmaatregelen

Tabel 5-2 is een samenvatting van de verschillende categorieën van preventieve maatregelen. Gezien de vele opties en diverse vormen van toepassingen is er gekozen om alleen basismaatregelen te beschouwen: Cel fouttolerantie, BMS/EMS monitoring, Weerbaarheid (resilience) van modules en Weerbaarheid van rack/container/opslag vak. Deze paragraaf licht de effectiviteit van deze maatregelen toe.

NB. Aanvullende maatregelen moeten afzonderlijk worden beoordeeld op hun effectiviteit en gelijkwaardige faalkansen kunnen waar nodig worden meegenomen voor deze maatregelen en relevante oorzakscenario's.

Tabel 5-2: Samenvatting van preventieve maatregelen voor TR in EOS'en en opslagen van energiedragers ('+' is wel effectief meegenomen en '-' is niet effectief meegenomen).

Maatregel	Technisch falen van energiedragers	Technisch falen van BOS-onderdelen (interne brand)	Operationele fouten tijdens het laadproces	Externe brand (buiten EOS/opslag vak)	Mechanische impact van buitenaf
Cel fouttolerantie	-	+	+	+	+
BMS/ EMS monitoren en isolatie	+	-	+	-	-
Weerbaarheid van modules	+	+	+	+	+

Maatregel	Technisch falen van energiedragers	Technisch falen van BOS-onderdelen (interne brand)	Operationele fouten tijdens het laadproces	Externe brand (buiten EOS/opslag vak)	Mechanische impact van buitenaf
Weerbaarheid van rack/container/ opslag vak	-	-	-	+	+

Elke preventieve veiligheidsmaatregel moet een TR geheel onafhankelijk en op zichzelf kunnen voorkomen. De effectiviteit en relevantie van de verschillende preventieve veiligheidsmaatregelen hangen dus af van het type oorzakscenario. Met andere woorden, hoewel generieke categorieën voor preventieve veiligheidsmaatregelen gebruikt worden voor alle gevaren, kan de effectiviteit van vergelijkbare maatregelen verschillen in het geval van verschillende oorzakscenario's.

In de praktijk beoordeelt het bevoegd gezag de effectiviteit van de toegepaste preventieve veiligheidsmaatregelen per geval. Het is belangrijk om alleen de maatregelen mee te nemen die daadwerkelijk in het EOS of de opslag van energiedragers worden gebruikt. Waar een specifieke maatregel niet aanwezig is, of de effectiviteit van een maatregel niet kan worden gegarandeerd (gebaseerd op de vereisten zoals gedefinieerd in de bijbehorende secties van dit rapport), dient de bijdrage van deze maatregelen niet meegenomen te worden. De faalkans van de betreffende maatregel wordt dan gezien als 1 (100%).

5.4.1 Cel fouttolerantie

Deze categorie bevat alle inherente preventieve veiligheidsmaatregelen die voorkomen dat de cellen in een TR terecht komen vanwege een gevaarlijke conditie die niet wordt geïnitieerd door de energiedragers zelf. Met andere woorden: het gaat om de tolerantie van batterijcellen tegen elektrisch, thermisch, of mechanisch misbruik (dat wil zeggen het gebruik buiten de aanvaardbare grenzen).

Dit zijn doorgaans geen sterke preventieve veiligheidsmaatregelen. Er mag niet vertrouwd worden op deze maatregelen tegen grote externe invloeden. Verschillende batterijtechnologieën zouden verschillende niveaus van tolerantie tegen misbruik (gevaarlijke condities) kunnen hebben.

Uit literatuuronderzoek blijkt dat LFP-energiedragers over het algemeen een hogere drempelwaarde hebben voor de temperatuur waarbij ze in TR terecht komen ((Boxia Lei, 2017); (Said, 2020)). Dit is meegenomen door een aanpassingsfactor te hanteren op de faalkans van deze veiligheidsmaatregel bij LFP. Voor de NMC-batterijtechnologie wordt geen aanpassingsfactor gehanteerd.

5.4.2 Batterij Management Systemen/Energie Management Systemen monitoren en isolatie

De categorie “BMS/EMS monitoren en isolatie” betreft alle preventieve veiligheidsmaatregelen die een defecte component kunnen detecteren – als het gaat om cellen, modules of andere componenten – en de component vervolgens kunnen isoleren van het EOS. Deze maatregelen kunnen actief of passief van aard zijn. Voorbeelden van actieve veiligheidsmaatregelen zijn het monitoren van het cel voltage, SOC (State Of Charge), temperatuur etc., in combinatie met de mogelijkheid van de veiligheidsmaatregel om de defecte component los te koppelen en te isoleren. Voorbeelden van passieve maatregelen zijn stroomonderbrekers (CIDs) en zekeringen, die geen manieren vereisen voor detecteren, besluiten, en handelen (“detect, decide, and act”).

BMS/EMS monitoren en isolatie is niet van toepassing op de opslag van energiedragers, met uitzondering van het van toepassing zijn op het laden en testen van de energiedragers. Het falen van een omvormer PCS zou bijvoorbeeld ook het falen van fysieke en elektrische isolatie van elektronica door mechanische

schakelaars, relais, geleiders, en andere hardwarecomponenten kunnen betekenen. Daarnaast valt het handmatig uitschakelen/loskoppelen van componenten binnen deze categorie.

5.4.3 Weerbaarheid van modules

De term weerbaarheid van modules refereert naar alle veiligheidsmaatregelen met het doel om de onderlinge invloed van cellen op elkaar binnen een module (een groep energiedragers) te minimaliseren. Hieronder vallen ook alle veiligheidsmaatregelen met als doel om de onderlinge invloed tussen componenten buiten de module te minimaliseren. Deze veiligheidsmaatregelen kunnen, aan de ene kant, de propagatie van een TR van cellen in een module naar cellen in andere modules voorkomen/mitigeren, en aan de andere kant de initiatie van een TR in de cellen door externe invloeden, zoals hoge temperatuur (door brand) en mechanische impact, voorkomen/mitigeren.

De weerbaarheid van modules is meegenomen in de vorm van passieve veiligheidsmaatregelen. Voorbeelden hiervan zijn de brandbestendigheid van een module (die de propagatie van hitte van en naar een module kan mitigeren), de structurele sterkte van de module (tegen fysieke impact) en de IP-rating van de modules (tegen intrede van water). In sommige gevallen kunnen actieve veiligheidsmaatregelen geïmplementeerd worden, zoals een actief koelsysteem (vloeibaar of HVAC) dat voorkomt dat cellen die nog niet in TR zijn opwarmen tot kritische temperatuur. Hierbij wordt opgemerkt dat zulke systemen niet in veel EOS'en worden gezien en dat zelfs, indien deze systemen wel aanwezig zijn, de effectiviteit van dergelijke maatregelen significant kan verschillen, afhankelijk van het oorspronkelijke scenario. De effectiviteit van dergelijke maatregelen moet dan per geval en in overleg met het bevoegd gezag geëvalueerd worden.

Vanwege het grote aantal verschillende maatregelen dat hier onder de weerbaarheid van modules valt, is het moeilijk om afzonderlijke faalfrequenties toe te kennen aan elk type veiligheidsmaatregel. Voor de eenvoud wordt een basiswaarde aangenomen voor standaard gevallen, die waarde kan vervolgens aangepast worden d.m.v. een aanpassingsfactor in het geval van aanvullende maatregelen. Dit moet verantwoord worden door het succesvol testen van de weerbaarheid van modules tegen de propagatie van een TR. Breed geïmplementeerde teststandaarden, zoals de UL 9540A, kunnen gebruikt worden voor dat doeleinde.

5.4.4 Weerbaarheid van racks/containers/opslag vakken

In dit onderzoek wordt met de weerbaarheid van racks/containers/opslag vakken vergelijkbare maatregelen bedoeld als bij de weerbaarheid van modules, echter op een hoger niveau. Voorbeelden zoals weerbaarheid tegen brand, structurele integriteit, IP-rating en actieve systemen op module niveau zijn ook van toepassing op rack/container niveau voor EOS'en. Dit geldt ook op het niveau van een opslag vak voor de opslag van energiedragers. Het verschil tussen de twee niveaus ligt in het feit dat de weerbaarheid van racks, containers, en opslag vakken de propagatie van een TR die geïnitieerd wordt in dezelfde unit niet kunnen mitigeren. Met andere woorden, de veiligheidsmaatregelen in deze categorie kunnen alleen de initiatie van een TR voorkomen die veroorzaakt wordt door externe effecten.

Hoewel het (nog) niet gebruikelijk is om brand testen op een volledig EOS rack of container, of op een volledig opslag vak uit te voeren, kan de basiswaarde voor de faalfrequentie van deze maatregelen aangepast worden op dezelfde manier als beschreven voor de weerbaarheid van een module. Dit kan alleen onder de voorwaarde dat voldoende verantwoording wordt gegeven op basis van actuele testresultaten en onder vergunning van het bevoegd gezag.

6 Stappenplan, frequenties en scenario's: Energieopslagsystemen (EOS)

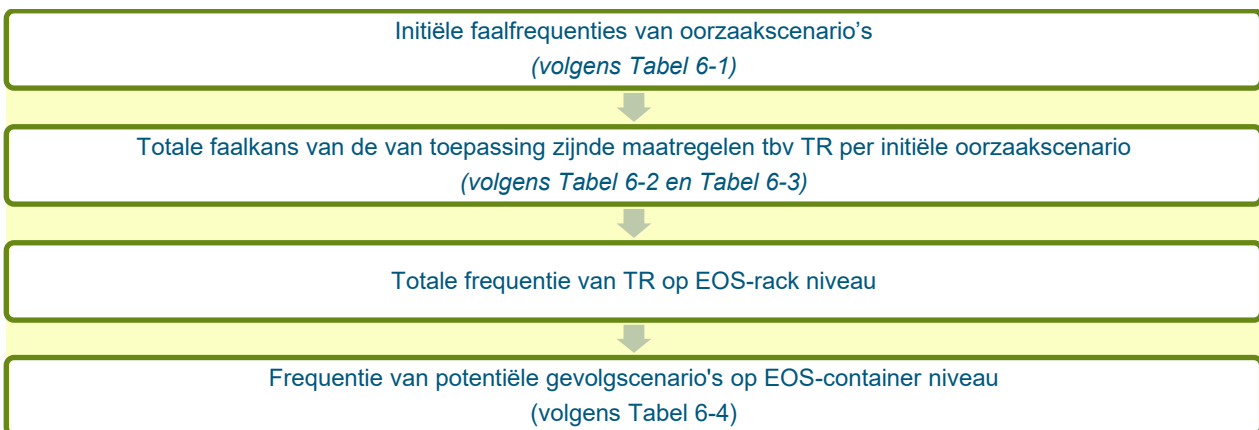
Hoofdstuk 6 bevat de resultaten van onderzoek stappen i, ii., iv., v. en vi.

6.1 Stappenplan voor afleiden overall faalfrequenties

Dit hoofdstuk gaat in op de stappen voor het berekenen van de totale frequentie van een TR in een EOS-rack. De afleiding van de initiële faalfrequenties van de oorzakscenario's vormt de basis voor het berekenen van de totale frequentie van een TR in een EOS. Impliciet is hierin de aanwezigheid van preventieve maatregelen meegenomen. De totale frequentie van een TR wordt verkregen op basis van de afgeleide frequenties van de initiële scenario's en de faalkansen van de van toepassing zijnde preventieve veiligheidsmaatregelen.

De vervolgfrequenties voor het ontstaan van gevolgscenario's van brand, explosie en gifwolk zijn afhankelijk van de effectiviteit van de aanwezige repressieve maatregelen.

De tussenstappen van de berekening, zoals samengevat in Figuur 6-1, dienen gevolgd te worden voor elke EOS-container. Vanzelfsprekend is het niet nodig om alle stappen te herhalen voor het geval dat dezelfde EOS-container gebruikt worden.



Figuur 6-1: Stappenplan voor faalfrequenties van EOS'en

De paragrafen 6.2, 6.3 en 6.4 geven inzicht in en de onderbouwing van respectievelijk de initiële faalfrequentie, de faalfrequenties van de preventieve veiligheidsmaatregelen en vervolgfrequenties voor het ontstaan van de gevolgscenario's.

6.2 Initiële faalkansen en -frequenties per oorzakscenario

Tabel 6-1 geeft een samenvattend overzicht van de initiële faalkansen en -frequenties voor de vijf relevante oorzakscenario's, geïdentificeerd in hoofdstuk 5:

- Technisch falen van energiedragers
- Technisch falen van BOS-onderdelen
- Operationele fouten tijdens het laadproces
- Externe brand
- Mechanische impact van buitenaf

Generieke uitgangspunt bepaling initiële faalkansen en -frequenties

Dit onderzoek maakt onderscheid in twee categorieën EOS'en: stationair en mobiel (zie § 4.2)

Bij de afleiding van de initiële faalfrequentie is het uitgangspunt dat een EOS bestaat uit:

- 50 cellen in één module;
 - 10 modules in één rack;
 - 10 racks in één EOS;
- ofwel 5000 cellen per EOS.

Tevens is de aanname dat het aantal cellen en BOS-componenten gelijk is, ofwel 5000 BOS-componenten per EOS.

Indien de specificaties niet bekend zijn, zijn de hierboven genoemde specificaties te beschouwen als representatieve aannames voor de gangbare EOS'en.

De technische onderbouwing is gegeven in de sub paragrafen.

Gezien de beperkte beschikbaarheid van data in de literatuur is het niet altijd mogelijk een frequentie toe te kennen gebaseerd op concrete argumentatie en theoretische achtergrond. In deze gevallen zijn de voorgestelde waarden gebaseerd op een kwalitatieve vergelijking met vergelijkbare gevallen (analogon) en op informatie uit gesprekken met experts die betrokken zijn bij dit onderzoek. Voor deze gevallen geldt een relatief grotere mate van onzekerheid. In de onderbouwing is expliciet vermeld wanneer dit aan de orde is. De corresponderende waarden kunnen in de toekomst worden aangepast in het geval dat er aanvullende kennis/data beschikbaar komt.

Tabel 6-1: Initiële frequenties per jaar van oorzaakscenario's op basis van het type EOS

Type EOS	Technisch falen van energiedragers *	Technisch falen van BOS-onderdelen (interne brand) *	Operationele fouten tijdens het laadproces	Externe brand (buiten EOS)	Mechanische impact van buitenaf
Stationair EOS	$5,0 \times 10^{-4}$	$1,35 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$8,8 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Mobiel EOS	$5,0 \times 10^{-4}$	$6,39 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$8,8 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-4}$

* Deze waarde hangt af van het aantal componenten en dient aangepast te worden per geval door 6.1.1 en 6.1.2 te volgen. De getallen die in deze tabel zijn opgenomen zijn gebaseerd op een EOS bestaande uit 5000 cellen.

6.2.1 Technisch falen van energiedragers

Een six-sigma aanname is gebruikt om de frequentie voor het technische falen van batterijen of andere componenten van een EOS aan te duiden. De six-sigma benadering wordt breed toegepast in de productie van verschillende producten. Deze benadering gaat uit van één defect product per miljoen producten (DNV, 2019). Daarmee wordt de conservatieve aanname gedaan dat gemiddeld een uit de miljoen geïnstalleerde cellen faalt voor het einde van de levensduur van de cel als direct gevolg van een productiefout. Hierbij wordt tevens aangenomen dat batterijen aan het einde van hun levensduur vervangen worden.

Uitgaande van 5000 cellen per EOS-unit met een levensduur van 10 jaar¹ is de initiële faalfrequentie voor technisch falen $5,0 \times 10^{-4}$ /jaar

¹ Het uitgangspunt dat de levensduur van een EOS 10 jaar is, is overgenomen uit het document van DNV dat voor dit onderzoek is bestudeerd (DNV, 2019).

Corrigeren voor afwijkend aantal cellen

Over het algemeen hangt de kans voor technisch falen van een systeem af van de hoeveelheid componenten die aanwezig is in een systeem: de initiële frequentie van technisch falen is lager voor een klein EOS dan voor een groot EOS, of een EOS-park. De initiële frequentie per jaar kan aangepast worden voor een EOS met een bekend aantal cellen (N) met een levensduur (L) in jaar door gebruik te maken van formule 6-1.

$$F_{tf} = \frac{10^{-6} * N}{L} \tag{6-1}$$

Waarbij:

F_{tf} de frequentie is voor het technische falen van energiedragers per jaar;

N het aantal cellen is in elke EOS unit (een unit is een combinatie van samengenomen racks);

L de levensduur is van het EOS in jaar

6.2.2 Technisch falen van BOS-onderdelen

De basis voor het berekenen van faalfrequenties van het technisch falen van BOS-onderdelen vormt de six-sigma benadering: één defect product per miljoen producten (DNV, 2019).

Uitgaande van 5000 BOS-componenten per EOS-unit met een levensduur van 10 jaar is de basis initiële faalfrequentie voor technisch falen van BOS-onderdelen $5,0 \times 10^{-4}$ /jaar

Externe invloeden zoals intrede van water (of vocht) beïnvloeden deze frequentie. De aanname is dat initiatie van een TR als gevolg van de intrede van water in batterijcellen zeer onwaarschijnlijk is door het lage voltage op celniveau. Echter is er een grotere kans op brand binnen het EOS (BESS-niveau) als gevolg van het vormen van hotspots op andere elektrische componenten als gevolg van de intrede van water en in combinatie daarmee de kans op kortsluiting (AC/DC krachtverdelingsprobleem). Dit kan een TR tot gevolg hebben.

De frequentie voor elektrisch falen (kortsluiting) is aangenomen als 0,1/jaar (DNV, 2019). Deze frequentie wordt beschouwd als een optelsom van alle mogelijke oorzaken van elektrisch falen. Het percentage van de hoeveelheid batterijen waarbij intrede van water de oorzaak voorkomt, is aangenomen als 7% (CEA, insights, 2024). Deze frequenties treden in combinatie op, dienen dus vermenigvuldigd te worden en gelden op EOS-niveau.

Uitgaande van 5000 BOS-componenten per EOS-unit is de initiële faalfrequentie voor technisch falen in combinatie met falen als gevolg van intrede van water in de EOS-unit:

$$5,0 \times 10^{-4} + 0,07 * 0,1 = 7,5 \times 10^{-3}$$

EOS'en zijn standaard voorzien van elektrische beveiligingsmaatregelen en maatregelen voor temperatuur management die de geproduceerde warmte moeten extraheren om de initiatie van een TR te voorkomen. De kans op falen van deze maatregelen is gegeven door de PFD van elektrische beschermingsmaatregelen (PFD_e) en maatregelen voor het managen van de temperatuur (PFD_t), die respectievelijk 0,1 en 0,18 bedragen.

Merk op dat de waarden in Tabel 6-1 de initiële frequentie voor de initiatie van een TR weergeven. Daarom moet het falen van een BOS-component gecombineerd worden met het falen van de daarmee corresponderende elektrische beveiligingsmaatregelen in aanvulling op het falen van de maatregelen voor temperatuur management die de geproduceerde warmte moeten extraheren om de initiatie van een TR te voorkomen.

Vanwege het gebrek aan betrouwbare aanvullende data wordt een gelijk aantal batterijcellen en BOS-componenten aangenomen binnen een EOS-installatie. Daarom dient een vergelijkbare berekening gevolgd te worden als in formule 6-1, met een aanvulling voor de intrede van water. Vanwege de achtergrond data voor intrede van water op BESS-niveau dient de algehele frequentie voor het scenario “falen van BOS-onderdelen” berekend te worden volgens formule 6-2.

$$F_{BOS} = (F_{tf} + F_{water}) \times PFD_e \times PFD_t \quad (6-2)$$

Waarbij:

F_{BOS} de frequentie is voor het scenario “technisch falen van BOS-onderdelen” per jaar; en

F_{tf} de initiële faalkans is voor het technisch falen van energiedragers per jaar volgens vergelijking 6-1; en

PFD_e en PFD_t de kansen zijn op falen (Probability of Failure on Demand) op aanvraag voor elektrische beschermingsmaatregelen en de maatregelen voor het management van de temperatuur. Deze kansen zijn respectievelijk gelijk aan 0,1 (CCPS, 2014) en 0,18 (CEA, insights, 2024) per jaar; en

F_{water} de gecombineerde frequentie is van de intrede van water 0,07/jaar en van elektrisch falen 0,1/jaar (CEA, insights, 2024).

In overweging nemend dat mobiele EOS'en vatbaarder zijn voor dergelijke invloeden – vanwege regelmatig transport en plaatsing op verschillende locaties in vergelijking met stationaire EOS – wordt aangenomen dat de resulterende F_{water} 5 keer hoger is voor mobiele EOS. Met andere woorden, F_{water} is gelijk aan 0,007/jaar voor stationaire EOS en 0,035/jaar voor mobiele EOS. Op het moment van dit onderzoek is er te weinig data beschikbaar om dit verschil nader onderbouwen.

6.2.3 Operationele fouten tijdens het laadproces

Volgens de beschrijving in 5.3.2 is het toekennen van een kwantitatieve waarde voor de faalfrequentie in de categorie “operationele fouten tijdens het laadproces” zeer uitdagend vanwege de variatie in operationele en menselijke factoren. Ten behoeve van de eenvoud is een faalfrequentie aangenomen van 0,01/jaar voor het catastrofaal falen van een omvormer, wat leidt tot onacceptabele laadcondities (DNV, 2019). Deze waarden zijn gebaseerd op een vergelijkbare benadering voor hetzelfde doel in (DNV, 2019). Vanwege de vergelijkbare manier van laden voor mobiele en stationaire EOS'en wordt voor beide types dezelfde waarde aangenomen.

6.2.4 Faalfrequentie als gevolg van externe brand

Een brand in de omgeving van een EOS kan een TR initiëren door het verhogen van de temperatuur binnen het EOS.

De initiële frequentie voor externe branden in de omgeving van stationaire EOS is gekozen op basis van de voorgeschreven frequentie van $8,8 \times 10^{-4}$ /jaar voor brand in PGS-15 opslag loodsen (RIVM, 2015). Er is op het moment van dit onderzoek te weinig betrouwbare data beschikbaar om deze waarde in meer detail te onderbouwen.

Dit scenario refereert naar een brand die niet begint in een EOS en is daarom afhankelijk van externe omstandigheden die kunnen verschillen per geval. De aanname is dat mobiele EOS'en over het algemeen meer blootgesteld worden aan invloeden uit de omgeving vanwege het regelmatige transport en het plaatsen van mobiele EOS'en op verschillende locaties. Daarom wordt voor de initiële frequentie voor een externe brand voor mobiele EOS'en een waarde voorgesteld die een ordegrrootte groter is dan de waarde voor stationaire EOS'en. Ook dit is een aanname in afwezigheid van voldoende betrouwbare aanvullende data.

6.2.5 Faalfrequentie als gevolg van mechanische impact van buitenaf

Een mechanische impact kan een TR kan initiëren door het doorboren van een batterij (of meerdere batterijen).

Hoewel het op het moment van dit onderzoek erg uitdagend is om een frequentie voor het initiële scenario van mechanische impact toe te kennen – voornamelijk vanwege het grote aantal manieren waarop dit kan voorkomen (zoals een voertuig crash, vallende objecten, vallende batterijen, etc.) – is het nodig om de frequentie van dit scenario kwantitatief te duiden. Merk op dat module I en II van het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid op het moment van dit onderzoek geen waarde voorschrijft voor deze categorie maar wel het belang van dit faalmechanisme onderkent (RIVM, 2015). In afwezigheid van betrouwbare data uit literatuur worden de waarden in Tabel 6-1 voorgesteld, gebaseerd op een kwalitatieve vergelijking met de hiervoor beschreven initiële scenario's.

De aanname is, vergelijkbaar met externe brand, dat mobiele EOS'en over het algemeen meer blootgesteld worden aan invloeden uit de omgeving vanwege het regelmatige transport en het plaatsen van mobiele EOS'en op verschillende locaties. Daarom wordt voor de initiële frequentie voor een externe brand voor mobiele EOS'en een waarde voorgesteld die een ordegrrootte groter is dan de waarde voor stationaire EOS'en. Ook dit is een aanname in afwezigheid van voldoende betrouwbare aanvullende data.

6.3 Faalkansen van maatregelen per oorzaakscenario

Er is een grote variatie in de manier waarop cellen, modules, elektrische componenten zijn opgebouwd, en in de verschillende benaderingen voor preventie en beheersing van TR. Daarom worden alleen standaard maatregelen expliciet vastgesteld, met de mogelijkheid voor afwijking op basis van concrete argumentatie en beoordeling door het bevoegd gezag.

Ten behoeve van eenvoud is ervoor gekozen om meerdere maatregelen te groeperen en zo het aantal maatregelen waarvoor de faaldata afgeleid dienen te worden te beperken. Een groter aantal veiligheidsmaatregelen met gedetailleerde uitweiding over onderlinge verschillen zou de onzekerheid in de toegekende waarden wellicht doen toenemen vanwege de zeer gelimiteerde beschikbare data in de literatuur om de toegekende frequenties te onderbouwen.

6.3.1 Basismaatregelen

Volgens de technische onderbouwing zoals gegeven in sectie 5.4, zijn de primaire veiligheidsmaatregelen voor EOS gegeven in Tabel 6-2. Deze waarden zijn ofwel afgeleid van generieke data voor de kans op het falen op aanvraag (PFD) voor vergelijkbare apparaten en componenten, ofwel van inspectierapporten met betrekking op EOS producenten door derden. Voor gevallen waarbij data van beide soorten beschikbaar zijn, is gekozen voor de laatste manier van afleiden. Ten behoeve van eenvoud is een gelijke waarde gehanteerd per veiligheidsmaatregel voor alle initiële scenario's, tenzij die veiligheidsmaatregel niet toepasbaar of effectief is. Op het moment van dit onderzoek is er geen data beschikbaar die een andere werkwijze onderbouwt.

Het wordt expliciet opgemerkt dat "n.v.t." voor sommige initiële scenario's de irrelevantie of ineffectiviteit van die veiligheidsmaatregel impliceert. Bijvoorbeeld, de tolerantie voor cel misbruik is niet relevant voor het technisch falen van de batterij cellen. Daarnaast geldt dat een specifieke veiligheidsmaatregel wel of niet effectief zou kunnen zijn in het voorkomen van de initiatie of propagatie van een TR, afhankelijk van het type initiële scenario en het niveau waarbij de TR getriggerd wordt. Dit is ook eerder in dit rapport besproken in sectie 5.1. Een voorbeeld hiervan is dat het monitoren van BMS/EMS en het isoleren van individuele cellen waarschijnlijk ineffectief zijn in het voorkomen van een TR in het geval van een grote brand buiten het EOS.

Projectgerelateerd

Tabel 6-2: Faalkansen (PFD) van de van toepassing zijnde veiligheidsmaatregelen per oorzaakscenario

Categorie van veiligheidsmaatregel	Technisch falen van energiedragers	Technisch falen van BOS-onderdelen (interne brand)	Operationele fouten tijdens het laadproces	Externe brand (buiten EOS)	Mechanische impact van buitenaf
Cel fouttolerantie	n.v.t.	0,1	0,1	0,1	0,1
BMS en/of EMS-monitoring en isolatie van componenten	0,11	n.v.t.	0,11	n.v.t.	n.v.t.
Weerbaarheid van module	0,01	0,01	0,01	n.v.t.	n.v.t.
Weerbaarheid van rack (en/of container)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0,01	0,14

De tolerantie voor misbruik van batterijcellen wordt doorgaans niet gezien als een sterke veiligheidsmaatregel (ESIC, 2021). Vanwege gebrek aan beschikbare literatuur als onderbouwing van een specifieke waarde, wordt een generieke waarde van 0,1 aangenomen, gebaseerd op een kwalitatieve vergelijking met andere veiligheidsmaatregelen. Daarnaast wordt een gelijke waarde geïmplementeerd in een vergelijkbare studie met hetzelfde doel (DNV, 2019).

Voor de PFD van BMS/EMS maatregelen voor monitoring zijn specifiek twee referenties gebruikt. Een recent rapport van inspecties van verschillende BESS productiefaciliteiten geeft aan dat 11% van de geïnspecteerde BESS units problemen had met het BMS (CEA, insights, 2024). Vanuit een conservatieve benadering wordt in dit onderzoek aangenomen dat “een probleem” impliceert dat een veiligheidsmaatregel ineffectief is in het voorkomen van de propagatie van een potentiële TR. Deze waarde komt overeen met een generieke waarde voor het falen op aanvraag van 0,1, die in de procesindustrie gebruikt wordt voor controlesystemen, alarmen, en interlock systemen (CCPS, 2014).

De weerbaarheid tegen externe brand (warmtepropagatie) of externe impact zou op een vergelijkbare manier optreden tussen modules, racks, en containers. Daarom is ervoor gekozen om een gelijke waarde voor alle gevallen te hanteren waarbij weerbaarheid tegen externe brand of externe impact van toepassing is. De weerbaarheid tegen externe brand is gebaseerd op een generieke waarde (0,01) voor de PFD van brandbestendige isolatie die gebruikt wordt in de procesindustrie (CCPS, 2014). Voor de weerbaarheid tegen mechanische impact zijn de waardes gekozen uit een recent inspectierapport dat aangeeft dat 14% van alle BESS units problemen heeft met materiaal integriteit en robuustheid (CEA, insights, 2024).

Merk op dat de weerbaarheid van een EOS-rack tegen externe brand of fysieke (mechanische) impact geen contributie levert aan het voorkomen van de propagatie van een TR die al is geïnitieerd binnen het rack. Daarom is voor de daarbij corresponderende veiligheidsmaatregelen n.v.t. aangegeven in Tabel 6-2 bij de eerste drie scenario's. Aan de andere kant wordt aangenomen dat de weerbaarheid van individuele modules een relatief kleine bijdrage zullen leveren in vergelijking met de weerbaarheid van het EOS-rack of de EOS-container in het geval van een (grote) externe brand of mechanische impact. Daarom wordt bij de daarbij corresponderende veiligheidsmaatregelen ook n.v.t toegekend in Tabel 6-2.

De toegekende waardes voor weerbaarheid tegen externe brand of externe impact in Tabel 6-2 zijn gebaseerd op inspectierapporten van complete EOS-containers. Er is zorg gedragen in dit onderzoek om deze waardes maar één keer mee te nemen in de bepaling van de totale faalfrequentie.

6.3.2 Afwijking van standaard maatregelen

Zoals beschreven in sectie 6.2.1, zijn faalkansen op het moment van dit onderzoek slechts beschikbaar voor basis veiligheidsmaatregelen die typisch verwacht kunnen worden in alle EOS-installaties. Echter, de beschikbaarheid van dergelijke maatregelen dient per geval beoordeeld te worden. Het gebruik van de waarden in Tabel 6-2 is daarmee enkel verantwoord wanneer de corresponderende veiligheidsmaatregelen aanwezig zijn in de EOS-installatie zoals bedoeld in dit onderzoek. Het zou echter kunnen dat een specifieke EOS-installatie uitgerust is met aanvullende veiligheidsmaatregelen die de totale frequentie van een TR kunnen verlagen, bijvoorbeeld door gebruik te maken van redundante systemen. Daarmee zou het mogelijk kunnen zijn om andere faalkansen te gebruiken dan de expliciet genoemde waarden uit dit onderzoek. Deze afwijkende waarden dienen met voldoende betrouwbaarheid onderbouwd te worden en als zodanig vergund te worden door het bevoegd gezag.

Er moet voorzichtig omgegaan worden met het aanpassen van de waarden in Tabel 6-2. Een aangepaste waarde dient niet gebruikt te worden voor een specifieke veiligheidsmaatregel tegen een initieel scenario waar die maatregel niet relevant voor is.

6.3.3 Aanpassing van faalkansen op basis van het type energiedrager

Een aantal studies noemt verschillen tussen lithium-ion batterijen met verschillende kathode technologieën. In die studies wordt benadrukt dat er een verschil is in de weerbaarheid tegen misbruik en het gedrag van de batterijen tijdens de propagatie van een TR van verschillende kathode technologieën (Said, 2020). Het wordt bijvoorbeeld meermaals genoemd dat LFP (lithium ijzer fosfaat) batterijen een hogere drempelwaarde hebben voor de temperatuur waarbij TR geïnitieerd wordt ten opzichte van NMC (lithium nikkel mangaan kobalt oxide) batterijen (Said, 2020).

In dit onderzoek wordt een voorstel gedaan voor het duiden van deze verschillen door een aanpassingsfactor te introduceren op de PFD van veiligheidsmaatregelen voor de categorie “cel fouttolerantie”. De basiswaarde van 0,1, zoals gerapporteerd in Tabel 6-2 voor “cel fouttolerantie” wordt daarmee gereduceerd met een factor 0,5 voor LFP-batterijen en vergelijkbare technologieën.

Vanwege het grote aantal verschillende batterijtechnologieën zou het niet praktisch zijn om expliciet alle technologieën apart te adresseren. Daarom worden in dit onderzoek vooralsnog de twee meest gebruikte technologieën expliciet genoemd. Voor het toepassen van een aanpassingsfactor, zoals hierboven beschreven is voor LFP-batterijen, dient de keuze voor een lagere PFD verantwoord te worden per geval en vergund te worden door het bevoegd gezag. Hier moet expliciet vermeld worden dat de aanpassingsfactor van 0,5, zoals hierboven genoemd, niet gebaseerd is op literatuur maar op een kwalitatieve vergelijking die alle beschikbare informatie op het moment van dit onderzoek in overweging heeft genomen.

Aangezien de PFD-waarden in Tabel 6-2 gebaseerd zijn op een basis set aan veiligheidsmaatregelen, die verwacht worden in (bijna) alle EOS-containers, is het noodzakelijk om het verschil te adresseren met EOS-containers waar op zijn minst batterijmodules succesvol getest zijn met bekende test methodes en gecertificeerd zijn voor de prestaties van die EOS-containers met betrekking tot het mitigeren van de propagatie van een TR. Voor dergelijke gevallen kan daarom een aanpassingsfactor van 0,1 toegepast worden in de categorie “weerbaarheid van de module” in Tabel 6-2.

Merk op dat enkel de aanwezigheid van een testrapport de effectiviteit van modules als het gaat om de mitigatie van een TR niet garandeert, maar dat succesvolle tests volgens de test criteria gebruikt dienen te worden voor de verantwoording van het verlagen van de PFDs. Merk ook op dat vanwege het gebrek aan beschikbare literatuur om een expliciete waarde te verantwoorden, een orde grootte in dit onderzoek wordt gekozen om de PFD te verlagen in dergelijke gevallen.

Projectgerelateerd

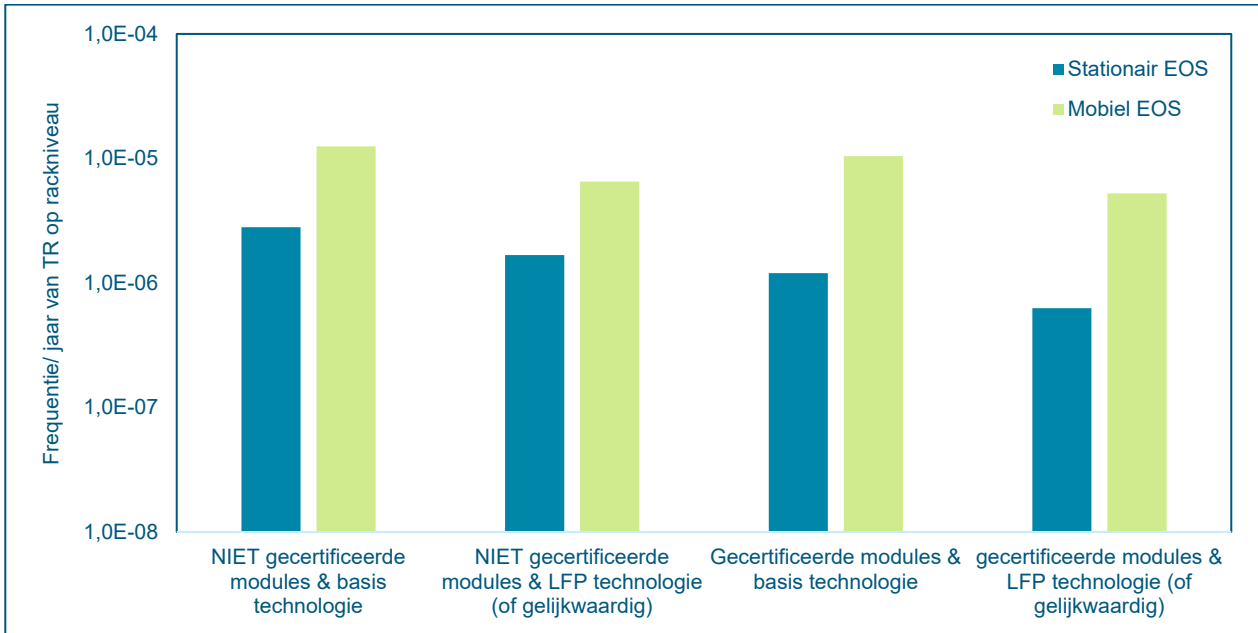
Er moet voorzichtig omgegaan worden met het aanpassen van de waarden in Tabel 6-2. Er dient geen aangepaste waarde te worden gebruikt voor een specifieke maatregel voor initiële scenario's waarbij die betreffende maatregel niet relevant of effectief is.

Samenvattend wordt de totale faalkans van een toepasbare veiligheidsmaatregel per scenario berekend door het vermenigvuldigen van individuele faalkansen, inclusief de mogelijke aanpassingsfactoren. Vier basis alternatieven zijn als voorbeeld gegeven in Tabel 6-3. Deze alternatieven zijn gebaseerd op de verschillen in kathode technologie en op het wel of niet succesvol getest en gecertificeerd zijn van de EOS modules.

Tabel 6-3: Voorbeelden van totale faalkans per oorzaakscenario voor verschillende modules en kathode technologieën

Voorbeelden van alternatieven	Technisch falen van energiedragers	Technisch falen van BOS-onderdelen (interne brand)	Operationele fouten tijdens het laadproces	Externe brand (buiten EOS)	Mechanische impact van buitenaf
NIEUW gecertificeerde modules & basis technologie	$1,1 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$
NIEUW gecertificeerde modules & LFP technologie (of gelijkwaardig)	$1,1 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-3}$
Gecertificeerde modules & basis technologie	$1,1 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$
gecertificeerde modules & LFP technologie (of gelijkwaardig)	$1,1 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-3}$

Door de totale faalkans van de toepasbare veiligheidsmaatregelen te combineren met de initiële frequentie voor de oorzaakscenario's, wordt de totale frequentie van een TR verkregen op rack niveau voor de specifieke EOS-container onder beschouwing. Figuur 6-2 illustreert deze frequenties voor een stationaire en een mobiele EOS-container gebaseerd op de voorbeeld waardes in Tabel 6-3.



Figuur 6-2: Voorbeelden van frequentie van het optreden van thermal runaway op rackniveau (5000 cellen)

6.4 Vervolgkansen voor gevolgscenario's

Voor elke EOS-container worden uiteindelijk drie verschillende gevolgscenario's beschouwd:

- Een TR op het niveau van een enkele module die niet resulteert in een brand of explosie maar wel relevant zou kunnen zijn voor de emissie van gevaarlijke stoffen bij het uitblijven van een ontsteking;
- Een brand die zal uitbreiden naar alle racks in een EOS-container, die relevant is voor warmtestraling en de emissie van gevaarlijke stoffen in de rook. Warmtestraling wordt niet relevant geacht voor de externe veiligheid en daarom niet verder meegenomen in dit rapport;
- Een explosie binnen een EOS-container of EOS-compartment, die relevant is voor overdruk.

Vanwege het grote aantal verschillende mitigerende maatregelen die verschillende EOS-leveranciers implementeren – inclusief maar niet gelimiteerd tot gas en water gebaseerde systemen, aerosol-brand onderdrukkingssystemen, actieve ventilatie apparaten, vloeibare koelsystemen en sparkers – zou het niet praktisch zijn om aparte waarden toe te kennen per maatregel. Dit zou op het moment van dit onderzoek slechts de onzekerheid van de resultaten vergroten. In plaats daarvan worden vier generieke categorieën voorgesteld, die in Tabel 6-4 zijn weergegeven.

Tabel 6-4: Vervolgkansen op TR, brand en explosie op basis van het type mitigerende maatregelen

Nr.	Categorie van mitigerende maatregelen	Thermal runaway op één rack	Brand in EOS systeem (meerdere racks/ gehele container)	Explosie binnen EOS behuizing
1	Basis case (geen voorzieningen zoals 2 t/m 4)	10,0%	45,0%	45,0%
2	Aantoonbare brandbeveiligingsvoorzieningen tegen brandpropagatie tussen meerdere rack	43,3%	11,7%	45,0%
3	Aantoonbare explosie preventievoorzieningen	50,5%	45,0%	4,5%
4	Aantoonbare brandbeveiligings- en explosie preventievoorzieningen (2 en 3 samen)	83,8%	11,7%	4,5%

Het basisgeval dat wordt beschouwd in dit onderzoek is niet uitgerust met enige veiligheidsmaatregelen om de propagatie van een TR op rack-niveau te mitigeren. Vanwege het gebrek aan data ter onderbouwing, is een relatief kleine vervolgekans geselecteerd voor een TR op het niveau van een enkel rack en zijn gelijke waardes gekozen voor brand of explosie. In het geval dat een TR optreedt waarbij afgas vrijkomt is uit literatuur te vinden dat er meestal een (vertraagde) ontsteking plaatsvindt.

In het geval dat effectieve brandveiligheidsmaatregelen (actief of passief) geïmplementeerd zijn om een ongecontroleerde propagatie van een TR van het ene naar het andere rack te voorkomen, dient een lagere vervolgekans gehanteerd te worden voor het vervolgsценario “brand”. Deze reductie ten opzichte van het basisgeval – zoals gegeven in Tabel 6-4 – is gebaseerd op een recent inspectierapport waarin vermeld wordt dat 26% van geïnspecteerde EOS-containers een probleem had met de brandveiligheidssystemen (CEA, insights, 2024). Gebaseerd op een conservatieve aanpak wordt aangenomen dat een probleem met dergelijke maatregelen een indicatie geeft van het ineffectief zijn van deze maatregelen. Een vergelijkbare aanpak is gehanteerd voor EOS-containers die gebruik maken van effectieve preventieve maatregelen tegen een explosie, gebaseerd op een generieke PFD van 0,1 voor noodventilatie die geïnitieerd wordt door controle t.b.v. veiligheid, alarmen en “interlocks” (CCPS, 2014). Als laatste worden, waar zowel brandbeveiliging als preventieve maatregelen tegen explosie worden gebruikt, corresponderende reducties toegepast voor de daarbij horende gevolgsценario's.

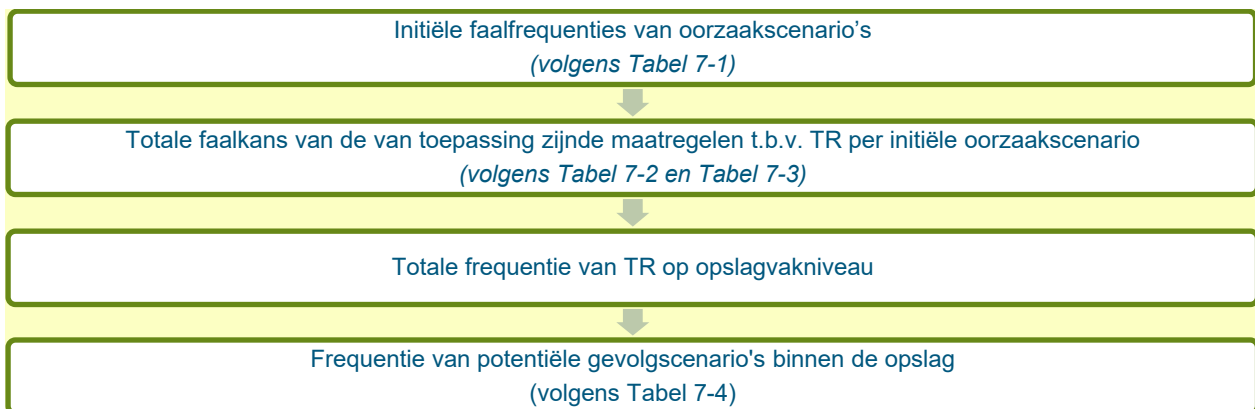
De gereduceerde vervolgekans van een gevolgsценario – door de aanwezigheid van effectieve brandbeveiliging en/of preventieve maatregelen tegen explosie – wordt gecompenseerd door een hogere kans op een TR in een enkel batterij rack. Met andere woorden, de combinatie van de drie mogelijke gevolgsценario's die hierboven zijn genoemd zullen samen altijd een kans geven van 1 (100%). Het betreft hier namelijk mitigerende maatregelen die enkel van toepassing zijn indien er sprake is van een TR.

7 Stappenplan, frequenties en scenario's: Opslagen van energiedragers

Hoofdstuk 7 bevat de resultaten van onderzoekstappen i, ii, iv, v en vi.

7.1 Stappenplan voor afleiden overall faalfrequenties

Deze sectie behandelt de stappen voor het berekenen van de totale frequentie van een TR op het niveau van een opslag vak, alsmede de totale frequentie van een brand in dat opslag vak. De totale frequenties worden verkregen uit de afgeleide frequenties voor de initiële scenario's en de faalkansen van toepasbare veiligheidsmaatregelen. De stappen voor de berekening, zoals samengevat in Figuur 7-1, dienen gevolgd te worden voor elk afzonderlijke opslag vak met energiedragers. Het is niet nodig om deze stappen te herhalen als de opslag bestaat uit dezelfde compartimenten met hetzelfde type energiedragers.



Figuur 7-1: Stappenplan voor faalfrequenties van EOS'en

7.2 Initiële faalfrequenties per oorzaakscenario

Een samenvatting van de initiële frequenties voor de vier relevante oorzaakscenario's wordt gegeven in Tabel 7-1. De technische beschrijving van de onderbouwing per geval wordt gegeven in de onderstaande secties van dit hoofdstuk. Aangezien de beschikbare data in literatuur zeer beperkt is in een aantal gevallen, is een kwalitatieve vergelijking gemaakt tussen de opslag van energiedragers en EOS-containers en zijn, waar van toepassing, vergelijkbare waarden toegekend.

Een vergelijking wordt ook gemaakt met opslag loodsen die binnen de reikwijdte vallen van de PGS-15. De afgeleide waarden zijn uiteindelijk besproken met de experts die betrokken zijn geweest bij de ontwikkelingen van dit onderzoek. Als laatste zijn de gevallen met een relatief hoge mate van onzekerheid duidelijk aangegeven als zodanig in dit hoofdstuk, zodat in het geval van het beschikbaar komen van meer betrouwbare data, de betreffende waarden aangepast kunnen worden.

Tabel 7-1: Initiële frequenties per jaar van oorzaakscenario's voor opslagen van Lithium-ion energiedragers

Type opgeslagen energiedragers	Technisch falen van energiedragers *	Externe brand (binnen opslag)	Mechanische impact	Operationele fouten tijdens het laadproces
Nieuw en remanufactured	$5,0 \times 10^{-5}$	$8,8 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Gebruikt en refurbished	$2,5 \times 10^{-4}$			
Afgedankt	$5,0 \times 10^{-4}$			

* Deze waarden hangen af van het aantal cellen per opslag vak en dient aangepast te worden per geval door 7.1.1 te volgen. De gepresenteerde waarden zijn gebaseerd op een EOS bestaande uit 5000 cellen.

Merk op dat de scenario's "Technisch falen van BOS-onderdelen" niet is meegenomen voor opslag van energiedragers. Dit heeft een aantal redenen. Allereerst zouden er veel gevallen kunnen zijn waar de opslag vakken enkel energiedragers bevatten, zonder afzonderlijke modules voor het balanceren van het systeem (BOS). Ten tweede worden energiedragers over het algemeen niet opgeslagen in de vorm van een volle EOS-container. Dat wil zeggen, functionele brandweer of ventilatiesystemen binnen de unit zullen in het geval van brand op andere componenten – niet de energiedragers – optreden op een gelijkwaardige manier als voor een externe brand. Daarom is het daarbij behorende scenario weggelaten voor de opslag van lithium-ion energiedragers. Het komt echter wel voor dat er opslagen zijn waar EOS'en worden opgeslagen met als doel om ze te verhuren. Hier zit een overlap in de toepassing van PGS 37-1 en PGS 37-2.

Merk ook op dat de relevantie van het scenario "Operationele fouten tijdens het laadproces" afhangt van hoe het laden en testen van energiedragers uitgevoerd wordt. Voor opslag vakken waar dergelijke activiteiten exclusief worden uitgevoerd buiten het opslag vak (of wanneer deze activiteiten exclusief worden uitgevoerd in brandwerende kasten conform de vereisten van PGS 37-2), is er geen noodzaak om dit scenario op te nemen in de vervolgstappen om de totale frequentie van een TR in dat opslag vak te bepalen.

7.2.1 Technisch falen van energiedragers

Een six-sigma aanname gebruikt om de frequentie voor het technisch falen van energiedragers te bepalen. De six-sigma aanpak wordt breed gebruikt in de productie van verschillende producten en neemt aan dat er één defect product wordt gemaakt per miljoen producten (DNV, 2019). Daarbij wordt hier de conservatieve aanname gedaan dat één uit een miljoen geïnstalleerde batterij cellen defect zullen zijn op een dusdanige manier dat het een TR zal initiëren. Dezelfde aanname wordt hier gemaakt voor de levensduur van de batterijcellen als in 6.2.1.

Uitgaande van 500 cellen per opslagvak met een levensduur van 10 jaar is de initiële faalfrequentie voor technisch falen $5,0 \times 10^{-5}$ /jaar

Vanuit een vergelijkbare aanpak als beschreven in 6.1.1 en 6.1.2 dient de initiële frequentie voor deze categorie – uit Tabel 7-1 – aangepast te worden voor elk opslag vak door gebruik te maken van formule 7-1.

$$F_{tf} = \frac{10^{-6} \times N}{L} \tag{7-1}$$

Waarbij:

F_{tf} de frequentie is voor technisch falen van energiedragers per jaar; en

N het aantal cellen is in elk opslag vak; en

L de levensduur is van de batterijcellen in jaar.

7.2.2 Faalfrequentie als gevolg van externe brand

Vergelijkbaar met het geval voor EOS'en, is een extern risico brand in een opslag vak die een TR kan initiëren als gevolg van een temperatuurstijging.

Voor het scenario van een externe brand is de geselecteerde waarde gebaseerd op de voorgeschreven frequentie van $8,8 \times 10^{-4}/\text{jaar}$, die geldt voor brand in PGS 15 opslagloodsen (RIVM, 2015). In principe valt de opslag van energiedragers onder de reikwijdte van PGS 37-2, en hoewel er verschillen zijn tussen opslag volgens PGS 15 en PGS 37-2, is in dit onderzoek een vergelijkbare waarde gebruikt voor de initiële frequentie van een externe brand vanwege het gebrek aan beschikbare data.

7.2.3 Faalfrequentie als gevolg van mechanische impact van buitenaf

Vergelijkbaar met het geval voor EOS'en, is een extern risico mechanische impact die een TR kan initiëren door batterijen te doorboren.

De in 6.1.4. beschreven uitdagingen voor het kwantificeren van de frequentie van mechanische impact zijn ook valide voor opslag van energiedragers. Daarom worden beide waardes gekozen op dezelfde basis. Vergeleken met een stationaire EOS, is de verwachting dat mechanische impact een grotere rol zal spelen voor de opslag van energiedragers vanwege de regelmatige beweging van voertuigen en heftrucks binnen een opslagloods. Daarnaast is de verwachting dat de energiedragers zelf vaker getransporteerd zullen worden (dit brengt een hogere kans op het vallen van energiedragers met zich mee). De bijbehorende initiële frequentie wordt daarom gekozen op een orde grootte hoger voor opslag van energiedragers ten opzichte van stationaire EOS'en. Merk op dat de onderbouwing van dit verschil niet op een meer kwantitatieve manier heeft kunnen plaatsvinden vanwege gebrek aan voldoende betrouwbare data op het moment van dit onderzoek.

7.2.4 Operationele fouten tijdens het laadproces

De aanpak in deze sectie is hetzelfde als beschreven voor EOS-containers in 6.1.3. Vanwege de complexiteit van het toekennen van een kwantitatieve waarde aan de variatie in operationele en menselijke fouten (zie 5.3.2) is een faalfrequentie van 0,01/jaar gekozen zoals voor het catastrofaal falen van een omvormer, wat leidt tot onacceptabele laadcondities. Deze waardes zijn gebaseerd op een vergelijkbare aanpak als voor EOS'en in (DNV, 2019).

Merk op dat dit scenario uitgesloten zou kunnen worden van de stappen voor de berekening, mits de laaden testactiviteiten uitsluitend worden uitgevoerd buiten het opslag vak, of uitsluitend binnen een daarvoor bedoelde brandkast conform de vereisten van de PGS 37-2.

7.3 Faalkansen van maatregelen per oorzaakscenario

Volgens een vergelijkbare aanpak als beschreven in 6.2 (voor EOS'en), worden enkel standaard veiligheidsmaatregelen expliciet beschouwd in dit onderzoek voor de opslag van energiedragers, tenzij het toegestaan is om af te wijken van standaard waardes gebaseerd op concrete argumentatie en in het geval van vergunning door het bevoegd gezag.

Merk ook hier weer op dat een minimaal aantal veiligheidsmaatregelen (of groepen veiligheidsmaatregelen) nodig is om een hoge mate van onzekerheid in de toegekende waardes te voorkomen vanwege de beperkte aard van de beschikbare data in literatuur en de grote variatie in toegepaste veiligheidsmaatregelen.

Aangezien dezelfde categorieën van veiligheidsmaatregelen gebruikt worden voor EOS en opslag van energiedragers, en de technische verantwoording voor de toepasbaarheid en effectiviteit van deze maatregelen al beschreven zijn in 5.4.1 t/m 5.4.4 en 6.2.1, worden sommige beschrijvingen hier niet herhaald. Waar van toepassing wordt een referentie gemaakt naar de bijbehorende secties in hoofdstuk 6 voor de verantwoording van de toegekende waardes.

7.3.1 Basismaatregelen

De primaire veiligheidsmaatregelen voor de opslag van energiedragers worden gegeven in Tabel 7-2. In een vergelijkbare aanpak als voor EOS, zijn faalkansen voornamelijk afgeleid uit generieke PFD-data voor vergelijkbare apparaten en componenten of uit de inspectierapporten over batterijproducenten door derden. Die laatste manier van afleiden krijgt de voorkeur in dit onderzoek voor het geval dat voor beide manieren voldoende data beschikbaar is. Ten behoeve van eenvoud wordt een gelijke waarde toegepast voor een veiligheidsmaatregel voor alle scenario's, tenzij de veiligheidsmaatregel niet toepasbaar of effectief is. Op het moment van dit onderzoek is er geen aanvullende data die een andere aanpak onderbouwt.

Merk op dat, op een vergelijkbare manier als in 6.2.1, "n.v.t." voor sommige initiële scenario's impliceert dat de veiligheidsmaatregel irrelevant of ineffectief is voor die scenario's. Voorbeelden van dergelijke gevallen zijn gegeven in 6.2.1. Specifiek wordt aangenomen dat de categorie "BMS/EMS monitoring" niet relevant is voor opslag van energiedragers aangezien de units niet gekoppeld zijn in een netwerk. Echter wordt een vergelijkbare veiligheidsmaatregel toegepast tijdens het laden of testen van energiedragers.

Tabel 7-2: Faalkansen (PFD) van de van toepassing zijnde veiligheidsmaatregelen per oorzaakscenario

Categorie van veiligheidsmaatregel	Technisch falen van energiedragers	Externe brand (binnen opslag)	Mechanische impact	Operationele fouten tijdens het laadproces
Cel fouttolerantie	n.v.t.	0,1	0,1	0,1
Monitoring en isolatie van energiedragers tijdens laden/ testen	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0,1
Weerbaarheid van module	0,01	n.v.t.	n.v.t.	0,01
Weerbaarheid van opslag vak	n.v.t.	0,01	0,14	n.v.t.

De fouttolerantie voor batterij cellen wordt doorgaans niet gezien als een sterke maatregel (ESIC, 2021). Vanwege het gebrek aan literatuur ter onderbouwing van een specifieke waarde, wordt een waarde van 0,1 toegekend die gebaseerd is op een kwalitatieve vergelijking met andere maatregelen. Deze waarde correspondeert ook met de waarde die wordt geïmplementeerd voor EOS in (DNV, 2019).

Voor het falen van veiligheidsmaatregelen die energiedragers monitoren en kunnen isoleren in het geval van een probleem tijdens het laad- of testproces, wordt een generieke waarde van 0,1 aangenomen die gebaseerd is op de PFD van veiligheidscontrole instrumenten, alarmen, en interlock systemen (SCAI) in de procesindustrie (CCPS, 2014). Merk op dat deze waarde goed overeenkomt met de geïmplementeerde waarde van 0,11 voor EOS die gebaseerd is op inspectierapporten van leveranciers (CEA, insights, 2024).

Vanwege de overeenkomsten tussen EOS en opslag van energiedragers als het gaat om weerbaarheid tegen externe brand (warmte propagatie) en mechanische impact, worden gelijkwaardige waardes aangenomen als in 6.2.1. De weerbaarheid tegen externe brand is gebaseerd op (CCPS, 2014), en de weerbaarheid tegen mechanische impact is gebaseerd op (CEA, insights, 2024). Om een overschatting van de effectiviteit van dergelijke maatregelen te voorkomen (door vergelijkbare waardes voor zowel module als opslag vak te gebruiken), worden de PFD-waardes slechts voor één maatregel gebruikt. Voor meer detail wordt verwezen naar 6.2.1.

7.3.2 Afwijking van standaard maatregelen

Zoals beschreven in 7.2.1, zijn faalkansen op het moment van dit onderzoek alleen beschikbaar voor basismaatregelen als minimumwaarde voor alle opgeslagen van energiedragers. Echter zouden er gevallen kunnen zijn waarbij de veiligheidsmaatregelen niet toepasbaar zijn, dit geldt specifiek voor de weerbaarheid van een opslag vak.

Een voorbeeld van het bovenstaande is het opslaan van energiedragers in niet-metalen containers die wellicht minder weerbaar zijn tegen mechanische impact of externe brand. In dergelijke gevallen dienen de daarbij behorende veiligheidsmaatregelen uitgesloten te worden van de berekening. Met andere woorden, er moet een faalkans van 1 worden gehanteerd in plaats van de gerapporteerde waardes in Tabel 7-2.

Aan de andere kant, als opgeslagen energiedragers uitgerust zijn met aanvullende veiligheidsmaatregelen die de totale frequentie van een TR kunnen verkleinen, bijvoorbeeld d.m.v. redundante systemen, kan de aanvullende bijdrage aan het reduceren van de faalkans meegenomen worden in de bepaling. Het kan daarmee mogelijk zijn om andere faalkansen te gebruiken dan de expliciet aangegeven waardes, zo lang deze waardes op betrouwbare manier verantwoord kunnen worden en vergund kunnen worden door het bevoegd gezag. Er moet voorzichtig omgegaan worden met eventuele aanpassingen aan de waardes die gegeven worden in Tabel 7-2. Er dient geen aangepaste waarde toegepast te worden voor een specifieke maatregel voor initiële scenario's waarvoor die maatregel niet relevant of effectief is.

7.3.3 Aanpassing van faalkansen op basis van het type energiedrager

Vanwege de significante verschillen tussen de opslag van nieuwe/remanufactured energiedragers, gebruikte/refurbished energiedragers en afgedankte energiedragers, wordt aangenomen dat de verschillen in kathode technologie met betrekking tot de tolerantie voor misbruik van de batterij een relatief kleine bijdrage hebben. Er wordt hier daarom geen onderscheid gemaakt tussen batterijen met verschillende kathode technologieën zoals dat wel gedaan is in 6.2.3. In plaats daarvan is aangenomen dat de PFD van fouttolerantie 5 keer groter is dan het standaard geval voor gebruikte/refurbished energiedragers, en 9 keer hoger voor afgedankte energiedragers². De opslag van nieuwe/remanufactured energiedragers is hierbij gekozen als standaard geval. Het dient opgemerkt te worden dat deze aanpassingsfactoren niet zijn gebaseerd op literatuur maar op een kwalitatieve vergelijking en in lijn is met het vervolg van dit rapport.

Vergelijkbaar met het geval voor EOS, zoals beschreven in 6.2.3, is het noodzakelijk om energiedragers waarvoor de batterijmodules succesvol getest zijn conform bekende testmethodes en gecertificeerd zijn voor de prestaties als het gaat om het mitigeren van de propagatie van een TR te onderscheiden van energiedragers waarvoor dit niet geldt. Voor dergelijke geteste en gecertificeerde energiedragers kan een aanpassingsfactor van 0,1 gehanteerd worden voor de categorie "weerbaarheid van de module" in Tabel 7-2 voor nieuwe/remanufactured energiedragers en voor gebruikte/refurbished energiedragers, indien van toepassing. Eenzelfde aanpassing voor afgedankte energiedragers wordt afgeraden vanwege de lage mate van betrouwbaarheid voor dergelijke maatregelen in die gevallen.

Merk op dat enkel de aanwezigheid van een testrapport geen garantie geeft voor de effectiviteit van modules in het limiteren van de propagatie van een TR, maar dat succesvolle tests volgens de testcriteria wel gebruikt kunnen worden voor de verantwoording van het gebruik van een lagere PFD.

Merk ook op dat vanwege het gebrek aan betrouwbare literatuur om een expliciete waarde te onderbouwen, een orde grootte op dit moment gekozen is voor de PFD in dergelijke gevallen. Er dient voorzichtig te worden omgegaan met het aanpassen van de waardes in Tabel 7-2. Er dienen geen aangepaste waarde gebruikt te worden voor een specifieke maatregel voor initiële scenario's voor het geval dat die maatregel niet relevant of effectief is.

² De keuze voor 9x en niet 10x is gemaakt omdat 10x een effectiviteit van 100% zou betekenen voor nieuwe/remanufactured energiedragers. Een effectiviteit van 100% is niet aan te tonen terwijl wel een significant hogere effectiviteit wordt verwacht.

Projectgerelateerd

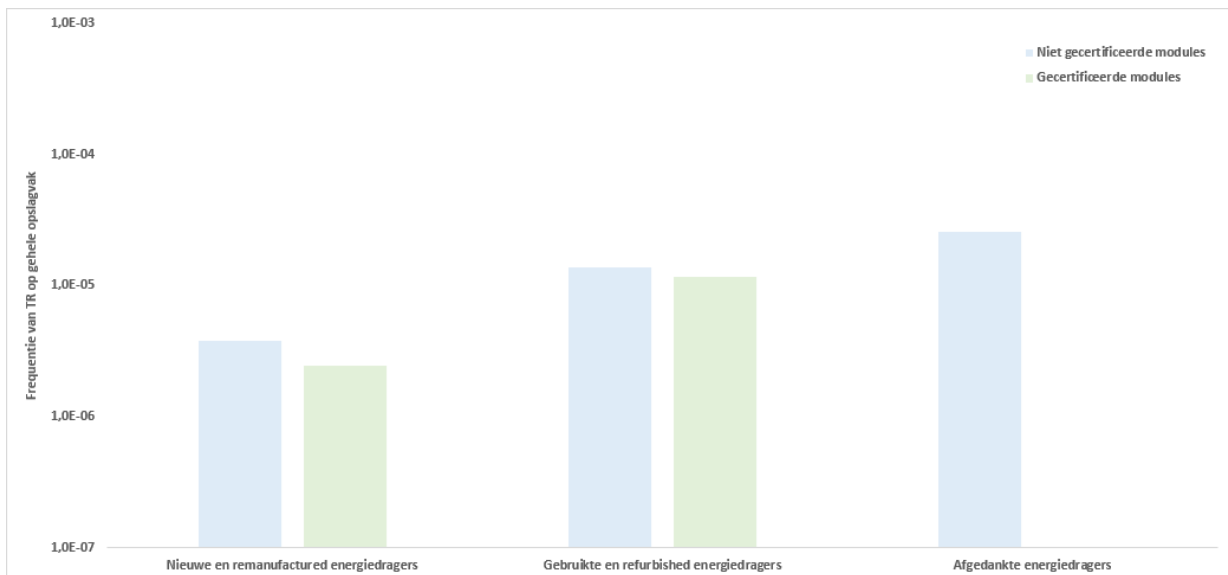
Samenvattend is de totale faalkans van de toepasbare veiligheidsmaatregelen per scenario uitgerekend door het vermenigvuldigen van individuele faalkansen, inclusief de eventuele aanpassingsfactoren. Vijf standaard alternatieven zijn gegeven in Tabel 7-3 als een voorbeeld gebaseerd op het type van opgeslagen energiedragers of de modules succesvol zijn getest en gecertificeerd.

Tabel 7-3: Voorbeelden van totale faalkans per oorzaakscenario voor verschillende modules en kathode technologieën

Voorbeelden van alternatieven	Technisch falen van energiedragers	Externe brand (binnen opslag)	Mechanische impact	Operationele fouten tijdens het laadproces
Nieuw/ remanufactured (<u>NIET</u> gecertificeerde modules)	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$
Nieuw/ remanufactured (gecertificeerde modules)	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-5}$
Gebruikt/ Refurbished (<u>NIET</u> gecertificeerde modules)	$1,0 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-4}$
Gebruikt/ Refurbished (gecertificeerde modules)	$1,0 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^{-5}$
Afgedankt	$1,1 \times 10^{-2}$	$9,0 \times 10^{-3}$	$1,26 \times 10^{-1}$	$9,0 \times 10^{-4}$

Door de totale faalkans van de toepasbare veiligheidsmaatregelen en de initiële frequentie per oorzaak scenario's te combineren, wordt de totale frequentie van een TR in een opslag vak verkregen voor het specifieke type energiedrager. **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** illustreert deze frequenties voor verschillende gevallen die dezelfde zijn als gegeven in Tabel 7-3.

NB: Er is geen verschil tussen niet gecertificeerde modules en gecertificeerde modules in het geval van afgedankte energiedragers aangezien afgedankte energiedragers per definitie niet gecertificeerd zijn.



Figuur 7-2: Voorbeelden van frequentie van het optreden van thermal runaway op opslagvak niveau (500 cellen)

7.4 Vervolgkansen voor gevolgscenario's

Het primaire gevolgscenario dat volgt uit de initiatie van een TR in opgeslagen Lithium-ion energiedragers is – in lijn met de PGS 15 opslagen – een brand in een opslagloods. De omvang van de brand hangt af van meerdere factoren, waaronder de beschikbare energie in de opgeslagen energiedragers, het type opslag, en de prestatie van beschikbare brandbeheersingsmaatregelen. Om een hoge mate van onzekerheid als gevolg van het gebrek aan betrouwbare data om onderscheid te maken tussen verschillende factoren op het moment van dit onderzoek te voorkomen, worden hier drie primaire gevolgscenario's beschouwd:

- Een standaard gevolgscenario waarbij geen toepasbare automatische brandbeheersingsmaatregelen aanwezig zijn in de opslagloods; de resulterende brandgrootte zou dan gelijk zijn aan de maximale oppervlakte van een brandcompartiment (2500 m²);
- Een brand die beheerst wordt binnen een compartiment door de aanwezigheid van toepasbare automatische brandbeheersingsmaatregelen, die de propagatie van een brand naar andere compartimenten in de opslagloods kan voorkomen; de maximale oppervlakte van de brand zou dan 300 m² zijn;
- Een brand die beheerst wordt binnen een enkel opslag vak door het aanwezig zijn van toepasbare brandbeheersingsmaatregelen die de propagatie naar andere opslag vakken voorkomen.

Het is duidelijk dat de gekozen scenario's gebaseerd zijn op de conservatieve aanname dat een TR altijd zal resulteren in een brand of het vormen van een giftige wolk door het vrijkomen van afgas. Een meer gedetailleerde evaluatie van de gevolgscenario's valt buiten de reikwijdte van deze studie. De drie generieke gevolgscenario's worden gegeven in Tabel 7-4.

Tabel 7-4: Vervolgkansen van brand in opslagvoorziening van Lithium-ion energiedragers

Mitigerende maatregelen	TR in één opslagvak (zonder brand)	Brand in één opslag vak ≤ 300 m ²	Brand naar het maximale oppervlakte brand-compartiment ≤ 2500 m ²
Opslagvoorziening zonder gecertificeerd VBB-systeem conform het CCV-certificatieschema	0%	0%	100%
Opslagvoorziening met gecertificeerd VBB-systeem conform het CCV-certificatieschema binnen opslag (max oppervlak 2500 m ²)	5%	90%	5%
Opslagvoorziening met gecertificeerd VBB-systeem conform het CCV-certificatieschema binnen brandcompartiment (max oppervlak 300 m ²)	90%	5%	5%

Vanwege de overeenkomsten tussen de opslag van energiedragers en PGS 15 opslagen zijn vergelijkbare waarden gebruikt voor de kansen op de gevolgscenario's voor de gevolgen van een brand, gebaseerd op de slagingskansen van automatische sprinkler systemen die als representatief gezien worden voor alle types automatische brandbeheersingssystemen. Echter, het dient opgemerkt te worden dat een brand in een Lithium-ion energiedrager zich niet per se hetzelfde gedraagt als een brand van brandbare vaste stoffen of brandbare vloeistoffen die binnen de reikwijdte van de PGS 15 vallen. Op dezelfde manier zou de effectiviteit van verschillende brandbeheersingssystemen voor Lithium-ion batterijen anders kunnen zijn dan de effectiviteit van die systemen voor een brand die valt onder de reikwijdte van de PGS 15. Vanwege het gebrek aan betrouwbare data in literatuur op het moment van dit onderzoek is echter toch gekozen om vergelijkbare waarden te implementeren.

Projectgerelateerd

Voor gevallen waarbij geen automatische brandbeheersingssystemen (VBB-systemen) beschikbaar zijn, wordt aangenomen dat de brand zich zal uitbreiden tot de volledige oppervlakte van de opslagloods. Voor gevallen waarbij dergelijke systemen wel beschikbaar zijn, wordt het maximale brandoppervlak – in het geval van het falen van de brandbeheersingssystemen – aangenomen gelijk te zijn aan de maximale oppervlakte van het brandcompartiment. Voor gevallen waar dergelijke systemen naar behoren werken, wordt de brandoppervlakte aangenomen als een niveau kleiner dan de maximale beschermde oppervlakte van het compartiment dat hoort bij het betreffende VBB-systeem.

8 Conclusies en aanbevelingen

RHDHV heeft in dit onderzoek, in opdracht van het RIVM, de frequenties van potentiële gevolgscenarië's van Lithium-ion EOS'en en opslagen van Lithium-ion energiedragers onderzocht. De aanpak voor het afleiden van de faalfrequenties kent de volgende stappen: (a) onderzoek naar wetenschappelijk statistische methoden, (b) analogon met de vergelijkbare systemen, en (c) expert judgement en discussies met de betreffende stakeholders.

Het primaire gevaar verbonden met het gebruik van Lithium-ion energiedragers zowel in EOS'en als bij de opslag van energiedragers is het optreden van een TR, met als gevolgen brand, gas-/dampwolkexplosie en emissie van gevaarlijke stoffen. Daarom was in dit rapport ingegaan op de primaire mechanismen die ten grondslag liggen aan een mogelijke TR, in combinatie met de van toepassing zijnde veiligheidsmaatregelen ter preventie of mitigatie van de propagatie van een TR tot het gehele EOS-rack of het gehele opslag vak van energiedragers.

Vanwege de beperkte literatuur voor de frequenties van de verschillende oorzaakscenarië's evenals de veiligheidsmaatregelen, zijn de scenarië's en maatregelen voor zover mogelijk gegroepeerd. De primaire categorieën van de oorzaakscenarië's voor het optreden van een TR zijn:

- Het falen van de energiedragers bijvoorbeeld door fouten of beschadigingen in de energiedragers tijdens de fabricage of montage;
- Het falen van andere BOS-onderdelen (Balance Of System) binnen de EOS-behuizing waardoor een brand in het EOS en vervolgens de opwarming van de energiedragers;
- Operationele fouten tijdens het laadproces, met name het laden of ontladen van energiedragers buiten de toegestane grenzen;
- Externe brand buiten EOS of buiten de opslag vak van de energiedragers; en
- Mechanische impact zoals het aanrijden van een EOS of het vallen van energiedragers.

Op eenzelfde manier zijn de primaire categorieën van de van toepassing zijnde maatregelen ter preventie of mitigatie van de propagatie van een TR als volgt:

- De tolerantie van de energiedragers tegen gevaarlijke omstandigheden (fouttolerantie), met name hoge temperatuur, overspanning, mechanische impact;
- Voorzieningen voor monitoren van verschillende EOS componenten, in combinatie met het isoleren van de falende onderdelen voordat een TR kan optreden;
- De weerbaarheid van EOS modules tegen zowel thermische als mechanische impact, met andere woorden, het beperken van warmteoverdracht tussen de modules of mitigeren van schade door fysieke impact van buitenaf; en
- De weerbaarheid van EOS racks/EOS containers/opslag vakken voor energiedragers tegen zowel thermische als mechanische impact, op eenzelfde manier met die van modules.

De afgeleide faalfrequenties zijn afhankelijk van het type EOS (Mobiel of stationair), of het type opgeslagen energiedragers (nieuw/remanufactured, gebruikt/refurbished of afgedankt) en de beschikbaarheid van de succesvol gecertificeerde modules.

Over het algemeen zijn de afgeleide frequenties van een TR op een EOS rackniveau tussen $6,27 \times 10^{-7}$ /jaar en $2,81 \times 10^{-6}$ /jaar voor stationaire EOS'en en tussen $5,24 \times 10^{-6}$ /jaar en $1,25 \times 10^{-5}$ /jaar voor Mobiele EOS'en.

Voor de opslagen van Lithium-ion energiedragers zijn de frequenties van een TR op opslag vak niveau tussen $2,43 \times 10^{-6}$ /jaar en $3,78 \times 10^{-6}$ /jaar voor nieuwe/remanufactured typen, tussen $1,17 \times 10^{-5}$ /jaar en $1,39 \times 10^{-5}$ /jaar voor gebruikte/refurbished energiedragers, en $2,55 \times 10^{-5}$ /jaar voor afgedankte energiedragers.

De vervolgekansen van brand of explosie binnen EOS rack/container zijn op dit moment bepaald op basis van de aanwezigheid van aantoonbare voorzieningen tegen brandpropagatie tussen rack, of ter preventie van explosie. Voor de energiedrageropslagen zijn de vervolgekansen van verschillende branden gebaseerd op de aanwezigheid van gecertificeerde VBB-systemen binnen de opslagvoorziening.

De afgeleide frequenties zijn gebaseerd op de op dit moment beschikbare literatuur. De genoemde waarden kennen in sommige gevallen relatief hogere onzekerheid en de betreffende waardes dienen in de toekomst – in het geval van meer concrete gegevens – herzien (of aangepast) te worden. Bovendien is dit rapport hoofdzakelijk gericht op de maatregelen ten behoeve van preventie van een grootschalige TR. Er is minder aandacht besteed aan de mitigerende maatregelen na het optreden van een grootschalige TR, met name door de vele variaties van brand beheers- en brandbestrijdingsmaatregelen op EOS'en (idem energiedrageropslagen) en de hoge onzekerheden voor een gedetailleerde uitwerking van de faalfrequenties. Een meer gedetailleerd uitwerking van de mitigerende maatregelen zal toegevoegde waarde hebben, mocht er in de toekomst meer concrete informatie van faalfrequenties beschikbaar zijn.

9 Bibliografie

- Boxia Lei, W. Z. (2017). Experimental analysis of thermal runaway in 18650 cylindrical Li-ion cells using an accelerating rate calorimeter. *Batteries*.
- CCPS. (2014). *Guidelines for initiating events and independent protection layers in layer of protection analysis*. Wiley.
- CEA, insights. (2024, February). BESS quality risks; A summary of the most common BESS manufacturing defects. CEA.
- DNV. (2019). *Technical reference for Li-ion battery explosion risk and fire suppression*. Høvik, Norway: DNV .
- EPRI. (2024). *Insights from EPRI's Battery Energy Storage Systems (BESS) Failure Incident Database; Analysis of failure root cause*. EPRI.
- ESIC. (2021). *Energy storage reference fire hazard mitigation analysis*. EPRI.
- Ian S. Mylenbusch, K. C. (2023). *Hazards of lithium-ion battery energy storage systems (BESS), mitigation strategies, minimum requirements, and best practices*. Alabama, USA: Process safety progress.
- Institute of energy storage and novel electric technology. (2021). *Accident analysis of Beijing Jimei Dahongmen 25 MWh DC solar-storage-charging integrated station project*. China electric power technology Co., Ltd.
- RIVM. (2012). *Protocol aanpassing rekenmethodieken Externe Veiligheid*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- RIVM. (2015). *Handleiding risicoberekeningen BEVI; versie 4.3*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- RIVM. (2022). *Beschouwing van voorstel alternatieve benadering voor de berekening van aandachtsgebieden*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- RIVM. (2024). *Onderzoek relevantie energieopslagsystemen voor omgevingsveiligheid*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Said, A. O. (2020). *Dynamics and hazards of cascading failure in lithium ion cell awways: analysis, passive mitigation, and active suppression*. University of Maryland.
- Yong-Un Na, J.-W. J. (2023). *Unraveling the Characteristics of ESS Fires in South Korea: An in-depth analysis of ESS fire investigation outcomes*. Basel, Switzerland: MDPI.

A1 Informatie interviews

De volgende standaardvragen zijn gesteld in de interviews over het afleiden van faalfrequenties voor EOS:

- | nr. | Vraag/ Toelichting |
|-----|---|
| 1 | Herkent u de behoefte voor het afleiden van faalfrequenties ten behoeve van het opstellen van een rekenmethodiek voor risico's omtrent EOS en opslagen met Lithium-ion batterijen? |
| - | Toelichting: Beknopte toelichting van de aanpak met een PPT-dia van oorzaakcategorieën, verdeling van drie niveaus en categorieën van maatregelen |
| 2a | Wat vindt u van het voorstel waarin potentiële brandomvang wordt onderverdeeld in drie niveaus: cel, module, en rack niveau? |
| 2b | Waar ziet u de grootste verschillen tussen EOS (binnen de reikwijdte van PGS37-1) en opslagen van batterijen (binnen de reikwijdte van PGS37-2)? Dit gebaseerd op verschillende niveaus, faal oorzaken, gevolg scenario's |
| 2c | Wat vindt u van de huidige verdeling van opslag met batterijen in PGS37-2 (nieuw, gebruikt, afgedankt, "refurbished", etc.) m.b.t. eventuele invloed op faaloorzaken, faalfrequenties, etc.? |
| 3 | Wat vindt u van het voorstel waarin de vervolgekansen gebaseerd zijn op het succes hebben of het falen van bepaalde bestrijdingssystemen? |
| 4 | Wat vindt u van ons voorstel voor categorieën van veiligheidsbarrières, de opzet per niveau (cel, module, rack) en de respectievelijke vervolgekansen? |
| 5 | Vindt u andere primaire barrières dat we toevallig missen welke invloed zou kunnen hebben op het totale vervolgekans? |
| 6 | Wat vindt u van de verdeling tussen barrières die standaard in EOS te vinden zijn (en dus direct genomen in vervolgekans) en barrières die aanvullend (specifiek per situatie/ EOS-type) zijn? |
| 7 | Wat vindt u van faalfrequenties die afgeleid zijn volgens de hierboven genoemde uitgangspunten met het oog op de ontwikkeling van een rekenmethodiek voor risico's omtrent EOS en opslagen met batterijen? |
| 8 | Zijn er andere suggesties die u ons mee wil geven voor het afleiden van faalfrequenties voor een rekenmethodiek voor risico's omtrent EOS en opslagen met batterijen? |

A2 Verslaglegging interviews

De resultaten van dit onderzoek zijn getoetst aan expert judgement door meerdere interviews af te nemen met experts. Hieronder is een overzicht gegeven van de geïnterviewde partijen:

- Atmetis
- Mlab-testing
- Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV)
- Veiligheidsregio Rotterdam-Rijnmond (VR-RR)
- Veiligheidsregio Haaglanden (VRH)

A3 Uitgebreide beschrijving van faalmechanismen

Faalmechanisme	Toelichting	Relevantie voor EOS	Relevantie voor Opslag	
Single-cel TR	Een scenario waardoor er een enkele cel faalt met als gevolg een TR	Onderdeel van technisch falen van energiedragers	Onderdeel van technisch falen van energiedragers	
Degradation	Technisch falen door het slijten van een batterij			
Cell premature end of life	Het vroegtijdig falen van een cel			
Elektrische hotspots/losse aansluiting	Het vormen van lokaal hete plekken door bijvoorbeeld intrede van water	Onderdeel van technisch falen van BOS-onderdelen	-	
Aardingsfout/isolatiefout	Technisch falen door een fout in de aarding of isolatie		-	
Elektrisch "arken"/aannemersfout	Technisch falen door het ontstaan van een elektrische boog of een fout van de aannemer		-	
Elektrisch ontwerpfout	Technisch falen door een ontwerpfout		-	
Waterschade (overlopen)	Waterschade door het vol- of overlopen van een batterij		Onderdeel van falen van gehele module/opslag vak	
Waterschade (condensatie)	Waterschade door condensatie van water		Onderdeel van technisch falen van energiedragers	
Blootstelling aan zout water	Technisch falen of corrosie door blootstelling aan zout water		Corrosie	
Ophoping van stof/vuil	Technisch falen door de ophoping van stof/vuil in de batterij		-	
Gevaarlijke temperatuur van de module/systeem	Het ontstaan van een TR door een te hoge externe temperatuur		Onderdeel van externe gevaren/mechanische impact	Onderdeel van externe gevaren/mechanische impact
Multi-cel TR	Het scenario waarbij			
Niet-batterij brand buiten het omhulsel	Brand die ontstaat buiten de batterij			
"Impingement" van externe brand	Een brand die wordt gehinderd			
Algemene impact	Impact door bijvoorbeeld een vallend object			
Mechanische schok/vallen	Impact door het vallen van de batterij			
Verscheppen/bouwschade	Schade door verscheppingsactiviteiten of bouwactiviteiten			
Falen van een omvormer	Technisch falen of schade door operationele fouten tijdens het opladen van de batterij	Onderdeel van operationele fouten tijdens het laadproces	-	
Gevaarlijke condities m.b.t. voltage/stroomsterkte	Potentie voor een TR als gevolg van te hoog voltage of te hoge stroomsterkte		-	

Projectgerelateerd

Vergelijking tussen de oorzaakscenario's in dit onderzoek en de oorzaakscenario's vanuit PGS 37-1 en PGS 37-2.

Oorzaakcategorieën in dit onderzoek	Oorzaakscenario's vanuit PGS 37-1: 2023	Oorzaakscenario's vanuit PGS 37-2: 2023
Technisch falen van energiedragers	S1: Fabricage- of montagefout energiedragers S6: Veroudering	S1: Ontwerp- en/of fabricagefout in energiedrager S3: Veroudering tijdens opslag
Technisch falen van BOS-onderdelen (interne brand)	S3- Kortsluiting door water of technische gebreken S8- Interne aanstraling door brand buiten het energiedragercompartiment S10- Hoge of lage temperatuur in het EOS S11- Verkeerde behandeling	-
Operationele fouten tijdens het laadproces	S5- Fouten ontstaan door het laadproces (laden en ontladen)	S2- Fout tijdens laadproces in de opslag
Externe brand	S9- Externe aanstraling (brand)	S6- Externe aanstraling S9- Beïnvloeding door andere stoffen (gemengde opslag) **
Mechanische impact	S2- Beschadiging van de energiedrager doordat deze uit ophanging geraakt S4- Blikseminslag S7- Mechanische impact van buitenaf S12- Vandalisme	S5- Blikseminslag S7- Mechanische impact van buitenaf S8- Beschadiging van energiedrager door vallen

A4 Uitgebreide beschrijving van maatregelen

Maatregel	Toelichting	Relevantie voor EOS	Relevantie voor Opslag
Cel tolerantie tegen fysiek misbruik	Inherente weerbaarheid van de cel tegen fysiek misbruik	Onderdeel van cel fouttolerantie	Onderdeel van cel fouttolerantie
Cel tolerantie tegen thermisch misbruik	Inherente weerbaarheid van de cel tegen thermisch		
Cel/systeem tolerantie tegen elektrisch misbruik	Inherente weerbaarheid van de cel tegen elektrisch misbruik		
Controle op cel kwaliteit	Het voorkomen van het verergeren van schade door regelmatige controle		Inbegrepen in faalfrequentie van cellen
BMS/EMS data en communicatie	Het managen van het batterij of energiesysteem t.b.v. het voorkomen van schade	Onderdeel van BMS/EMS monitoren en isolatie	-
Shutdown van het systeem en loskoppeling	Het voorkomen van propagatie van negatieve effecten door het systeem uit te zetten en los te koppelen.		-
Elektrische beveiliging op site	Het voorkomen van elektrisch misbruik door het aanbrengen van adequate beveiliging		-
Passieve cel bescherming	Cel bescherming waar geen acties voor nodig zijn		Onderdeel van cel fouttolerantie

Projectgerelateerd

BMS/EMS controle (uitschakelen)	Controle op de werking van de batterij door een managementsysteem		-
Temperatuur monitoring en alarmen	Het monitoren van de temperatuur om tijdig een TR te signaleren en te alarmeren		-
Passieve bescherming van het circuit en ontwerp, breakers, fuses, etc.	Bescherming van het elektrische circuit die geen acties behoeft		Onderzoek naar relevantie
Redundante faaldetectie/systeem intelligentie	Overbodige faaldetectie en systeem intelligentie t.b.v. het verkleinen van de faalkans		Inbegrepen in succes frequentie
Adequate metingen en controle	Metingen en controle op de systeemonderdelen		-
Monitoring: isolatie, voltage, temperatuur	Het monitoren van parameters ter indicatie van een TR of het technisch falen van systeemonderdelen		-
BMS-balans algoritme en het schalen van het circuit	Een algoritme om de managementsystemen de balans van het systeem te laten onderhouden		-
Ark ontwerp beveiligingen	Beveiligingen in het ontwerp om te beschermen tegen een elektrische boog		-
Passieve "arc flash protection"	Passieve bescherming tegen een elektrische boog		-
Thermische isolatie/bescherming tegen "cascading"	Isolatie van materialen ter bescherming tegen hoge temperaturen		-
Actieve cel bescherming	Actieve bescherming van de cellen	Onderdeel van weerbaarheid van de module	-
Thermisch management van cellen	Het management van de temperatuur van de cellen		-
Inherente weerbaarheid van module	Weerbaarheid die is ingebouwd en inherent is aan de module		Betreft externe gevaren
Thermisch management van rack/container	Het management van de temperatuur van het rack of de container	Onderdeel van weerbaarheid van rack/container	-
Inherente weerbaarheid van rack/container	Weerbaarheid die is ingebouwd en inherent is aan het rack of de container		Betreft externe gevaren