

# Veiligheid van gesmolten zoutbatterijen



Nederlandse Academie voor  
Crisisbeheersing en Brandweezorg  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
[www.nipv.nl](http://www.nipv.nl)  
[info@nipv.nl](mailto:info@nipv.nl)  
026 355 24 00

## Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2026

|                |                         |
|----------------|-------------------------|
| Auteurs        | T. van Harn en H. Brans |
| Contactpersoon | I. Janssen              |

|       |              |
|-------|--------------|
| Datum | 9 maart 2026 |
|-------|--------------|

|           |              |
|-----------|--------------|
| Coverfoto | Shutterstock |
|-----------|--------------|

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

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

# Inhoud

|          |                                                                                |                                     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
|          | <b>Samenvatting</b>                                                            | <b>4</b>                            |
|          | <b>Inleiding</b>                                                               | <b>6</b>                            |
| <b>1</b> | <b>Onderzoeksmethode</b>                                                       | <b>8</b>                            |
| 1.1      | Literatuurstudie                                                               | 8                                   |
| 1.2      | Veiligheidsanalyse                                                             | 8                                   |
| <b>2</b> | <b>Gesmolten zoutbatterijen (elektrochemische energieopslag)</b>               | <b>10</b>                           |
| 2.1      | Systeembeschrijving                                                            | Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd. |
| 2.2      | Weringsprincipe                                                                | Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd. |
| 2.3      | Subtypen gesmolten zoutbatterijen                                              | 13                                  |
| 2.4      | Toekomstige ontwikkelingen gesmolten zoutbatterijen                            | 14                                  |
| 2.5      | Literatuurstudie veiligheid gesmolten zoutbatterijen                           | 14                                  |
| <b>3</b> | <b>Warmtebatterijen op basis van gesmolten zout (thermische energieopslag)</b> | <b>18</b>                           |
| 3.1      | Systeembeschrijving                                                            | 18                                  |
| 3.2      | Weringsprincipe                                                                | Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd. |
| 3.3      | Subtypen warmtebatterijen                                                      | 19                                  |
| 3.4      | Toekomstige ontwikkelingen warmtebatterijen                                    | 20                                  |
| 3.5      | Literatuurstudie veiligheid warmtebatterijen                                   | 21                                  |
| <b>4</b> | <b>Veiligheidsanalyse</b>                                                      | <b>22</b>                           |
| 4.1      | Ongewenste gebeurtenissen                                                      | 22                                  |
| 4.2      | Oorzaken                                                                       | 22                                  |
| 4.3      | Gevolgen                                                                       | 23                                  |
| 4.4      | Bestrijdbaarheid                                                               | 23                                  |
| <b>5</b> | <b>Conclusie</b>                                                               | <b>26</b>                           |
|          | <b>Referentielijst</b>                                                         | <b>28</b>                           |

# Samenvatting

De energietransitie vraagt om betrouwbare systemen voor energieopslag. Gesmolten zoutbatterijen zijn een technologie die al langere tijd bestaat en wordt toegepast in onder meer telecomback-upsystemen. Nu door de toenemende behoefte aan duurzame en veilige stationaire energieopslag, krijgt deze technologie hernieuwde aandacht. Doelstelling van deze studie is om inzicht te krijgen in de werking en veiligheid van batterijen op basis van gesmolten zout.

In Nederland zijn twee categorieën gesmolten zoutbatterijen beschikbaar: gesmolten zoutbatterijen voor elektriciteitsopslag (*elektrochemische energieopslag*) en warmtebatterijen op basis van gesmolten zout voor *thermische energieopslag*. Beide categorieën maken gebruik van gesmolten (vloeibaar) zout, maar verschillen in functie en toepassing.

Binnen de elektrochemische gesmolten zoutbatterijen bestaan verschillende subtypen, waarvan de natrium-zwavelbatterij en de natrium-metaalchloridebatterij (waaronder de ZEBRA-batterij) de meest voorkomende en commercieel toegepaste varianten zijn. Deze batterijen worden met name ingezet voor stationaire energieopslag en back-uptoepassingen. De werking van elektrochemische gesmolten zoutbatterijen is gebaseerd op de verplaatsing van ionen (elektrisch positief geladen deeltjes) tussen de anode en kathode via een vloeibare zoutelektrolyt tijdens laad- en ontladprocessen. Door de verhoogde bedrijfstemperatuur smelten de zouten, waardoor de verplaatsing van ionen door het gesmolten zout mogelijk wordt.

De thermische gesmolten zoutbatterijen zijn warmtebatterijen op basis van gesmolten zout, waarbij sprake is van thermische energieopslag. In deze systemen wordt gesmolten zout gebruikt als warmteopslagmedium vanwege de hoge warmtecapaciteit en het vermogen om warmte langdurig vast te houden. Toepassingen van deze categorie zijn onder meer nucleaire hybride energiesystemen en industriële warmtebatterijen voor de opslag en levering van proceswarmte of opgewekte warmte uit duurzame energiebronnen.

Uit het onderzoek blijkt dat de thermal runaway – het van lithium-ion batterijen bekende faalmechanisme – niet optreedt bij gesmolten zoutbatterijen. Het elektrolyt bevat namelijk geen brandbare stoffen en kortsluiting leidt niet tot zichzelf versterkende (exotherme) reacties. Wel brengen gesmolten zoutbatterijen andersoortige risico's met zich mee, die vooral samenhangen met de hoge bedrijfstemperaturen. Gevaren ontstaan wanneer constructiematerialen falen door thermische spanningen of corrosie, waardoor zeer heet gesmolten zout kan weglekken. Contact van dit zout met water kan een plotselinge thermische schok veroorzaken: het zout koelt abrupt af, stolt en spat enkele meters weg. Deze hete zoutdeeltjes kunnen bij blootstelling leiden tot letsel bij personen of schade aan de omgeving. Ook blootstelling aan lekkend gesmolten zout kan letsel veroorzaken. Bij elektrochemische natrium-zwavel gesmolten zoutbatterijen geldt aanvullend een brandrisico door de aanwezigheid van zwavel; natrium-nikkelchloride gesmolten zoutbatterijen (onder meer SMC of ZEBRA-batterijen) kennen dit risico niet. Verder is grootschalige rook- of gasvorming bij incidenten met gesmolten zoutbatterijen niet te verwachten.

Het is belangrijk dat incidentbestrijders zich ervan bewust zijn dat bij batterijen op basis van gesmolten zout een hoge inwendige temperatuur normaal is. Afhankelijk van het type gesmolten zoutbatterij reiken temperaturen tot circa 350 °C à 500 °C. Dergelijke hoge temperaturen duiden bij lithium-ion batterijen juist op een thermal runaway, die wordt bestreden met koelwater. Wanneer incidentbestrijders hiermee niet bekend zijn, kunnen warmtebeeldmetingen worden geïnterpreteerd als een afwijkende of escalerende situatie.

Deze onjuiste interpretatie kan risico's met zich meebrengen, omdat bij contact tussen heet gesmolten zout en (koel)water een thermische schok kan optreden. Om deze reden achten wij het van belang dat incidentbestrijders bekend zijn met dit verschijnsel en de interpretatie van temperatuurmetingen bij dit type batterij.

Wanneer zich incidenten voordoen met gesmolten zoutbatterijen, dient de incidentbestrijding zich te focussen op het beheersen van hoge temperaturen en het voorkomen van verdere lekkage van gesmolten zout naar de omgeving. Het uitschakelen van het energie-opslag-systeem, zodat het zout kan afkoelen en stollen, lijkt hierbij in de meeste gevallen de veiligste strategie.

# Inleiding

## Aanleiding

In het kader van de energietransitie in ons land verschuift de elektriciteitsproductie steeds meer naar hernieuwbare bronnen. Omdat de opwekking van elektriciteit uit zon en wind afhankelijk is van het weer, fluctueert ze sterk. Hierdoor kunnen op bepaalde momenten overschotten of tekorten aan elektriciteit ontstaan. Om de elektriciteitsvoorziening betrouwbaar en gelijkmatig te houden, zijn adequate flexibele opties nodig, waaronder energieopslag in de vorm van batterijen. Batterijen zijn daarmee een belangrijk onderdeel van een toekomstbestendige energietransitie. Hoewel gesmolten zoutbatterijen al eerder bestonden dan lithium-ion batterijen, is op dit moment vooral de lithium-ion batterij het meest toegepaste batterijtype. Door de toenemende vraag naar energieopslag komen gesmolten zoutbatterijen echter (opnieuw) in de belangstelling. Overheden en bedrijven investeren immers in de ontwikkeling van nieuwe energieopslagsystemen.

Het lectoraat Energie- en Transportveiligheid van het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) vindt het belangrijk om op de hoogte te blijven van technologieën voor energieopslag die (mogelijk) een rol gaan spelen in de Nederlandse energietransitie, en om te begrijpen wat deze ontwikkelingen kunnen betekenen voor de publieke veiligheid. Daarom publiceerde het lectoraat in 2023 de rapportage [\*Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid\*](#) waarin de veiligheidsaspecten van drie belangrijke nieuwe hoofdcategorieën batterijen werden onderzocht: nieuwe generatie lithium-ion, natrium-ion (sodium-ion in het Engels) en redox-flow batterijen. In deze studie werd geconcludeerd dat bij alle onderzochte nieuwe batterijtypen veiligheidsrisico's blijven bestaan (Brans, 2023), maar de risico's qua aard en omvang van elkaar verschillen.

Batterijtechnologieën op basis van gesmolten zout waren tot op heden nog niet onderzocht door het NIPV, maar kunnen naar verwachting eveneens een rol krijgen binnen de Nederlandse energietransitie (Hanzestrohm, n.d.; The Green Village, n.d.; Solar356, n.d.; BNR, 2025; Energy Storage NL, 2025). Gezien de commerciële beschikbaarheid en de toepassing in stationaire energieopslag achten wij het thans passend om ook deze technologieën te verkennen.

## Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de werking en veiligheidsaspecten van batterijen op basis van gesmolten zout.

## Onderzoeksvragen

Om de doelstelling te bereiken zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

1. Welke verschillende typen batterijen op basis van gesmolten zout zijn anno 2026 in Nederland beschikbaar?
2. Wat zijn de werkingsprincipes van deze typen gesmolten zoutbatterijen?
3. Wat zijn de veiligheidsrisico's van gesmolten zoutbatterijen wanneer gekeken wordt naar kans, effect en bestrijdbaarheid van mogelijke incidenten?

## Afbakening

- > Deze studie richt zich op twee categorieën batterijen waarbij gesmolten zout wordt toegepast, namelijk gesmolten zoutbatterijen als vorm van *elektrochemische energieopslag* en warmtebatterijen op basis van gesmolten zout als vorm van *thermische energieopslag*.
- > Natrium-ion batterijen vallen buiten de scope van dit onderzoek. Hoewel het element natrium in beide batterijtypen een rol speelt, maken natrium-ion batterijen geen gebruik van gesmolten zout en verschillen zij fundamenteel van gesmolten zoutbatterijen wat betreft werkingsprincipe, bedrijfstemperatuur en veiligheidskenmerken. De veiligheid van natrium-ion batterijen wordt wel besproken in de studie [Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid](#).
- > In de literatuur wordt ook gesproken over ontwikkelingen op het gebied van *thermochemische energieopslag* met gesmolten zout. Deze categorie batterijen wordt in deze studie niet besproken, aangezien dergelijke systemen op basis van de uitgevoerde inventarisatie anno 2026 (nog) niet commercieel beschikbaar zijn op de Nederlandse markt.

## Leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt de methode besproken waarmee dit onderzoek is uitgevoerd. Hoofdstuk 2 en 3 behandelen de twee typen zoutbatterijen die centraal staan: in hoofdstuk 2 wordt ingegaan op gesmolten zoutbatterijen, terwijl in hoofdstuk 3 warmtebatterijen op basis van gesmolten zout aan bod komen. Hoofdstuk 4 bevat een analyse van beide typen batterijen met betrekking tot hun veiligheid. In hoofdstuk 5 wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvragen.

# 1 Onderzoeksmethode

## 1.1 Literatuurstudie

Het onderzoek is gestart met een inventarisatie om een algemeen beeld te krijgen van batterijen op basis van gesmolten zout in de Nederlandse context. Hiervoor zijn websites van leveranciers en fabrikanten, mediaberichten en publicaties van energieplatforms en kennisinstellingen bestudeerd. Doel van deze fase was te achterhalen welke typen gesmolten zoutbatterijen momenteel in Nederland beschikbaar zijn.

Op basis van deze achtergrondkennis is vervolgens gericht literatuuronderzoek uitgevoerd naar de veiligheidsaspecten van gesmolten zoutbatterijen. Via Google Scholar is, aan de hand van onderstaande zoektermen, gezocht naar wetenschappelijke en technisch-inhoudelijke literatuur over de werking, inwendige opbouw en veiligheid van deze batterijen:

- > Gesmolten zoutbatterij
- > Gesmolten zoutbatterij veiligheid
- > Gesmolten zoutbatterijen
- > Molten salt battery thermal runaway
- > Molten salt battery
- > Molten salt battery review
- > Molten salt electrolyte
- > Molten salt battery principle
- > Molten salt battery scheme
- > Molten salt battery efficiency
- > Molten salt battery safety
- > Molten salt battery types
- > Molten salt battery energy transition
- > ZEBRA battery
- > NaFSA salt.

## 1.2 Veiligheidsanalyse

De doelstelling van de veiligheidsanalyse was om inzicht te verkrijgen in wat de toepassing van batterijen op basis van gesmolten zout kan betekenen voor kansen op, effecten van en bestrijdbaarheid van incidenten met batterijen op basis van gesmolten zout. Hierbij is de methodiek uit de NIPV-studie uit 2023 als leidraad gebruikt. Deze is gebaseerd op eigen kennis, ervaring en interpretatie van de resultaten uit de literatuurstudie. Op basis van de inventarisatie en literatuurstudie verkregen informatie over de werking, inwendige structuur en gebruikte materialen van gesmolten zoutbatterijen is de veiligheidsanalyse uitgevoerd aan de hand van de criteria zoals weergegeven in Tabel 1.1. Daarbij zijn de kans op incidenten, de aard en ernst van mogelijke effecten en de mate van bestrijdbaarheid systematisch door ons zelf beschouwd.

**Tabel 1.1 Criteria veiligheidsanalyse uit NIPV-rapport *Verkenning Toekomstige Batterijtypen en Veiligheid* uit 2023 (Brans, 2023)**

| Aspect           | Criteria en Toelichting                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kans             | <p><b>Stabiliteit van de materialen</b></p> <p>De stabiliteit van batterijen wordt doorgaans onderverdeeld in thermische, elektrische en mechanische stabiliteit. Een hogere stabiliteitsmarge betekent dat materialen een grotere tolerantie hebben voor temperatuurschommelingen of spanningsverschillen en daardoor minder snel falen bij bijvoorbeeld hoge temperaturen of elektrische storingen.</p> <p><b>Intrinsieke faalmechanismen</b></p> <p>Hieronder worden faalmechanismen verstaan die intrinsiek zijn aan het systeem of het ontwerp van de batterij en die uit zichzelf kunnen optreden tijdens het opladen en ontladen.</p>    |
| Effect           | <p><b>Aard van de effecten</b></p> <p>Mogelijke effecten omvatten brand, het vrijkomen van hete of gesmolten materialen, thermische stralingsbelasting en in beperkte mate het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Explosie- of gasvormingseffecten zoals bij lithium-ion batterijen worden afzonderlijk beschouwd.</p> <p><b>Impact van de effecten</b></p> <p>Afhankelijk van de toegepaste materialen en de aard van de effecten kan de ernst van de gevolgen verschillen.</p>                                                                                                                                                                |
| Bestrijdbaarheid | <p><b>Thermal Runaway</b></p> <p>Bij lithium-ion batterijen is het zichzelf in standhoudende faalmechanisme thermal runaway een groot obstakel voor de bestrijdbaarheid van incidenten. Er wordt onderzocht of sprake kan zijn van soortgelijke of andere (zelfversterkende) processen die de bestrijding bemoeilijken, zoals aanhoudende warmtevrjgave door resterende hoge temperaturen of falende temperatuurregeling.</p> <p><b>Gevaren voor incidentbestrijders</b></p> <p>De bestrijdbaarheid kan worden beperkt door explosiegevaar, hoge temperaturen of risico's voor incidentbestrijders door blootstelling aan toxische stoffen.</p> |

## 2 Gesmolten zoutbatterijen (elektrochemische energieopslag)

Dit hoofdstuk richt zich op gesmolten zoutbatterijen voor *elektrochemische energieopslag*, waarin elektrische energie wordt opgeslagen via elektrochemische reacties. In deze systemen fungeert gesmolten zout als elektrolyt. Elektrolyt is een stof (meestal een mineraal of zout) die zich in water of gesmolten toestand splitst in elektrisch geladen deeltjes (ionen), waardoor stroom wordt geleid.

### 2.1 Achtergrondinformatie

De ontwikkeling van gesmolten zoutbatterijen begon tijdens de energiecrisis in de jaren zeventig van de vorige eeuw. De sterke stijging van de olieprijs in die periode leidde tot inspanningen om alternatieve energie- en opslagsystemen te ontwikkelen die minder afhankelijk waren van fossiele brandstoffen. Gesmolten zoutbatterijen worden sindsdien toegepast in onder andere telecom-back-upsystemen, de mijnbouw en de scheepvaart (Flash Battery, 2022; Solar356, n.d.; Hanzestrohm, n.d.; Armand et al., 2023).

Aangezien in de huidige Nederlandse context van de energietransitie de behoefte naar energieopslag toeneemt, worden gesmolten zoutbatterijen ook hiervoor interessant. De energiedichtheid van gesmolten zoutbatterijen is toereikend voor (grootschalige) stationaire toepassingen (The Green Village, n.d.; Umbrex, n.d.) Verder zijn een aantal belangrijke materialen, zoals zout en gerecycled aluminium ruim beschikbaar en bovendien goed recyclebaar (Energy Storage NL, 2025; Hanzestrohm, n.d.; Hanzestrohm, 2022; The Green Village, n.d.; Umbrex, n.d.; Flash Battery, 2022). Gesmolten zoutbatterijen hebben volgens fabrikanten een potentiële levensduur van maximaal circa 20 jaar bij dagelijks gebruik (Hanzestrohm, n.d.; Hanzestrohm, 2022; Umbrex, n.d.), waardoor ze relatief lang gebruikt kunnen worden.

Gesmolten zoutbatterijen hebben echter ook een aantal beperkingen, zoals de noodzaak van hoge bedrijfstemperaturen, een robuust thermisch beheersysteem, alsook hittebestendige materialen (Armand et al., 2023; Umbrex, n.d.; Flash Battery, 2022; Prieto et al., 2023) en continu energieverbruik om de (hoge) werktemperatuur te handhaven (Armand et al., 2023; Flash Battery, 2022). Verder is de te bereiken laadstroom beperkt (Flash Battery, 2022) en vereisen dergelijke batterijen een (lange) opstarttijd na koude stilstand<sup>1</sup> (Umbrex, n.d.). Hoewel een potentiële levensduur tot circa 20 jaar wordt opgegeven door fabrikanten, blijkt (het voorkomen van) de corrosie van materialen wel een knelpunt bij langdurig gebruik

---

<sup>1</sup> Met koude stilstand wordt in dezen bedoeld: een periode waarin de gesmolten zoutbatterij niet operationeel is en het zout stolt.

(Umbrex, n.d.). Op basis van deze eigenschappen worden gesmolten zoutbatterijen beschouwd als een technologie met een afgebakend toepassingsgebied. Daarom zal het niet altijd mogelijk zijn om lithium-ion batterijen om te wisselen door gesmolten zoutbatterijen. Daarentegen maken de hoge mate van circulariteit en lange levensduur gesmolten zoutbatterijen met name geschikt voor stationaire toepassingen waar veilig-, betrouwbaar- en duurzaamheid zwaarder wegen dan compacte afmetingen of hoge vermogensdichtheid (zoals bij lithium-ion batterijen). Dit verklaart enigszins waarom de technologie al decennialang in stationaire toepassingen terug te vinden is, onder andere in telecom-back-upsystemen, de mijnbouw en de scheepvaart (Tarantino, 2025; Tycorun, 2025; Flash Battery, 2022).

Hoewel gesmolten zoutbatterijen op hoge temperatuur opereren, leidt dit bij correct gebruik niet automatisch tot een lage efficiëntie. In normaal bedrijf zijn deze batterijen goed thermisch geïsoleerd en wordt een groot deel van de benodigde warmte intern opgewekt door weerstandsverliezen tijdens laden en ontladen. Bij continu of frequent gebruik blijft de extra energie-input voor temperatuurhandhaving daardoor beperkt, wat resulteert in een relatief hoge retourefficiëntie van ingekomen en uitgaande elektriciteit (Tarantino, 2025; Tycorun, 2025; Flash Battery, 2022).

In Figuur 2.1 is een opengewerkte module te zien waarin gesmolten zoutbatterijcellen zijn omhuld door een goed warmte-isolerende behuizing. Meerdere van deze gesmolten zoutbatterijcellen worden in goed geïsoleerde modules samengebracht en vormen zo een gesmolten zoutbatterij. Het werkingsprincipe van de gesmolten zoutbatterijcellen wordt in de volgende paragraaf uitgewerkt.



**Figuur 2.1 Demo-model gesmolten zoutbatterijmodule, subtype natrium-nikkelchloride (ZEBRA-batterij, zie ook paragraaf 2.3.2) (bron: Rudolf Simon, 2012)**

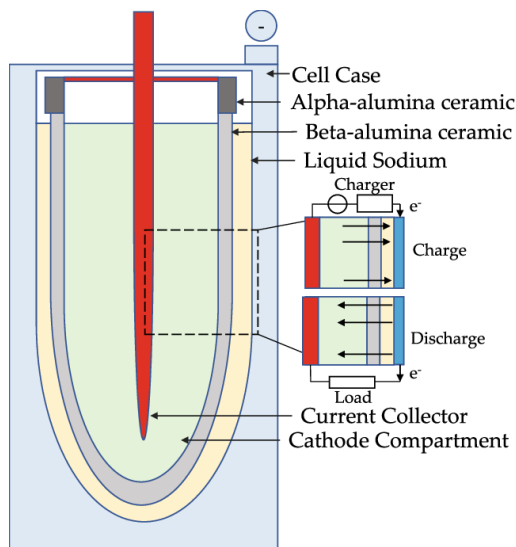
## 2.2 Systeembeschrijving

De werking van gesmolten zoutbatterijen is gebaseerd op de verplaatsing van ionen (elektrisch positief geladen deeltjes) tussen de anode en kathode via een vloeibare zout-elektrolyt tijdens laad- en ontladprocessen. Door de verhoogde bedrijfstemperatuur smelten de zouten, waardoor de verplaatsing van ionen door het gesmolten zout mogelijk wordt.

### Elektrochemische energieopslag

Het werkingsprincipe van gesmolten zoutbatterijen berust op elektrochemische reacties en betreft daarmee een vorm van elektrochemische energieopslag. Lithium-ion- en natrium-ion batterijen (Engels: sodium-ion batteries) zijn eveneens vormen van elektrochemische energieopslag (zie ook Brans, 2023). Ten opzichte van lithium-ion- en natrium-ion batterijen verschillen gesmolten zoutbatterijen in systeemopbouw en het gebruik van een gesmolten zout als elektrolyt, in plaats van een vloeibare elektrolyt met oplosmiddelen of een (toekomstige) vastestof elektrolyt. Hierdoor ligt het operationele temperatuurbereik aanzienlijk hoger.

Tijdens het ontladen van de batterij bewegen ionen zich van anode (minpool) door de elektrolyt (gesmolten zout) richting de kathode (pluspool) (de drie zwarte pijlen bij 'discharging' in Figuur 2.2). Deze ionentransporten gaan gepaard met een elektronenstroom via het externe circuit (weergegeven met  $e^-$  bij 'charger' en 'discharger' in Figuur 2.2), waardoor de opgeslagen energie beschikbaar komt voor aangesloten elektrische apparatuur. Wanneer de batterij weer wordt opgeladen, bewegen (natrium)ionen door de gesmolten elektrolyt en de keramische scheider van de kathode naar de anode, waarbij elektrische energie wordt omgezet in chemische energie die in het systeem wordt opgeslagen (de drie zwarte pijlen bij 'charging' in Figuur 2.2). Tijdens zowel laden als ontladen bewegen de ionen door de scheider, terwijl elektronen uitsluitend via het externe circuit worden getransporteerd (Umbrex, n.d.) (flash battery, 2022) (Hill et al., 2024) (Energy Storage, 2024).



**Figuur 2.2 Schematische weergave van een gesmolten zoutbatterijcel (Marquez et al. 2023)**

Om de elektrolyt en de actieve materialen in gesmolten toestand te houden, wordt de batterij afhankelijk van het toegepaste gesmolten zout op een bedrijfstemperatuur van enkele honderden graden Celsius gehouden. Bij het subtype ZEBRA-batterij (paragraaf 2.3.2) is dit tussen de circa 270 en 350 °C. Hiervoor zijn onafhankelijke elektrische verwarmingsele-

menten in het batterijsysteem geïntegreerd. De gehele constructie is ondergebracht in een beschermende behuizing van materialen die bestand zijn tegen hoge temperaturen en die lekkage van gesmolten zouten voorkomen (flash battery, 2022) (Umbrex, n.d.) (Armand et al., 2023).

De kathode wordt omsloten door een keramische buis van beta-alumina ( $\beta$ -alumina), die fungeert als vaste-ionengeleider en als scheidingsmembraan. Dit keramische materiaal laat uitsluitend natriumionen door en voorkomt het transport van elektronen tussen de elektroden. De keramische buis is geplaatst in een stalen behuizing die fungeert als negatieve elektrode (anode) en die vloeibaar natrium bevat (Energy Storage, 2024) (Armand et al., 2023).

## 2.3 Subtypen gesmolten zoutbatterijen

Er kunnen verschillende gesmolten zouten voor de elektrolyt worden gebruikt, waardoor verschillende subtypen gesmolten zoutbatterijen ontstaan. In Nederland wordt de ZEBRA-batterij (zie paragraaf 2.3.2) door meerdere leveranciers verkocht. De kathode van die batterij bestaat uit nikkel en natriumchloride, waaraan natriumtetrachloroaluminaat ( $\text{NaAlCl}_4$ ) is toegevoegd om het ionentransport mogelijk te maken (Energy Storage, 2024) (Armand et al., 2023). Naast dit subtype zijn er ook andere subtypen op de markt (geweest) of in ontwikkeling. Deze zijn in de basis voor wat betreft werkingsprincipe gelijk, maar verschillen in het gebruik van andere gesmolten zout(combinaties), zoals kaliumchloride (KCl) of magnesiumchloride ( $\text{MgCl}_2$ ) (Umbrex, n.d.).

Er bestaan verschillende varianten gesmolten zoutbatterijen, zowel subtypen die al decennialang worden toegepast, als nieuwe subtypen en alternatieve ontwerpen die zich nog in de onderzoeks- of demonstratiefase bevinden. Op basis van de literatuur wordt in deze rapportage op twee veelvoorkomende subtypen ingegaan: de natriumzwavelbatterij en de natrium-metaalchloridebatterij (SMC en ZEBRA) (Energy Storage, 2024) (Armand et al., 2023) (Liu et al., 2022) (Spoerke et al., n.d.) (Battery University, 2021).

### 2.3.1 Natriumzwavel gesmolten zoutbatterij

De natriumzwavel (NaS) gesmolten zoutbatterij was een van de eerste commercieel toegepaste gesmolten zoutbatterijen. Dit type kwam in de jaren negentig beschikbaar voor stationaire energieopslagtoepassingen en werkt bij temperaturen van circa 300–350 °C (Armand et al., 2023).

### 2.3.2 Natrium-metaalchloride gesmolten zoutbatterij (SMC en ZEBRA)

Sinds de jaren 70 van de vorige eeuw is er ook onderzoek gedaan naar natrium-metaalchloride (natrium-nikkelchloride,  $\text{Na-NiCl}_2$ ) gesmolten zoutbatterijen, ook wel SMC-batterijen<sup>2</sup> genoemd. Een succesvolle variant SMC-batterij die nog steeds op de markt is, werd in 1985 binnen het Zeolite Battery Research Africa Project (ZEBRA) ontwikkeld en heet zodoende de ZEBRA-batterij. De ZEBRA-batterij onderscheidde zich van andere gesmolten batterijen door een langere levensduur en een stabielere werking ten opzichte van eerdere natrium-metaalchloridecellen en natrium-zwavelbatterijen (Armand et al., 2023).

---

<sup>2</sup> SMC = Sodium Metal Chloride.

ZEBRA-batterijen zijn in de loop der jaren door meerdere Europese partijen doorontwikkeld. Momenteel is het Zwitserse bedrijf FzSoNick de enige commerciële producent. Door de energietransitie staat de ZEBRA-technologie opnieuw in de belangstelling vanwege de potentie voor grootschalige, veilige en duurzame energieopslag. In diverse bronnen wordt de ZEBRA-technologie genoemd als een veelbelovende aanvullende technologie ten opzichte van lithium-ion batterijen, met name voor stationaire toepassingen. Vanaf 2022 worden in Nederland ZEBRA-batterijen die zijn geproduceerd door FzSoNick verkocht voor de opslag van hernieuwbare energie (Armand et al., 2023) (flash battery, 2022) (Hanzestrohm, 2022) (solar356, n.d.) (SALTES, n.d.).

## 2.4 Toekomstige ontwikkelingen gesmolten zoutbatterijen

De verdere ontwikkeling van gesmolten zoutbatterijen wordt gedreven door vooruitgang in materiaalkunde, thermisch beheer en batterijontwerp. Onderzoek richt zich onder meer op het verlagen van smeltpunten, het verminderen van corrosiviteit van zouten en het beperken van warmteverlies door verbeterde isolatie, met als doel het energieverbruik en de opstarttijd te reduceren (BNR, 2025) (flash battery, 2022) (Umbrex, n.d.) (solar356, n.d.) (Zhu et al., 2022).

Waar eerder gebruikte zouten sterk corrosief waren en hoge smeltpunten hadden (circa 250 graden Celsius), zijn er naar verluidt inmiddels zoutmengsels beschikbaar met lagere smeltpunten (tot circa 130 graden Celsius) voor warmteopslag. Deze mengsels zijn tevens minder corrosief (solar356, n.d.).

Daarnaast zijn nieuwe elektrochemische varianten in ontwikkeling, zoals de Sodium Alumina Solid State (SAS) Battery, ontwikkeld binnen een joint venture van Altech Chemicals Limited en Fraunhofer IKTS, en een Na-Zn-variant van de ZEBRA-batterij waarbij nikkel wordt vervangen door zink (Armand et al., 2023).

## 2.5 Literatuurstudie veiligheid gesmolten zoutbatterijen

### 2.5.1 Vergelijking met lithium-ion batterijen

Hoewel gesmolten zoutbatterijen op hoge temperaturen werken, is vanwege het andere werkingsprincipe en de andere samenstelling van gesmolten zoutbatterijen de kans op een thermal runaway niet aanwezig. Diverse wetenschappelijke bronnen benoemen daarvoor de volgende redenen:

- > De elektrolyt bevat geen brandbare (of giftige) stoffen (Armand et al., 2023; Hanzestrohm, n.d.; Hanzestrohm, 2022; The Green Village, n.d.; Umbrex, n.d.; Flash Battery, 2022; Warp News, 2025; Cui et al., 2024)
- > Dendrietvorming (een oorzaak van interne kortsluiting<sup>3</sup> in lithium-ion batterijen) is uitgesloten in gesmolten zoutbatterijen dankzij goede scheidingsmembranen (The Green Village, n.d.).
- > Indien er onverhoopt kortsluiting ontstaat door beschadigingen, wordt de vloeibare elektrolyt vast en ontstaan er verder geen gevaarlijke effecten (Hanzestrohm, n.d.) (Hanzestrohm, 2022) (The Green Village, n.d.).

---

<sup>3</sup> De plus- en minpool komen in aanraking.

- > Buiten gebruik is de elektrolyt op kamertemperatuur, waardoor de zouten een vaste structuur hebben. Dit maakt langdurige opslag veiliger dan die van lithium-ion batterijen (Armand et al., 2023).

#### **Thermal runaway bij lithium-ion batterijen<sup>4</sup>**

Een veelgenoemde reden voor het zoeken naar alternatieven voor lithium-ion batterijen betreft veiligheid, met name het voorkomen van thermal runaway. Bij thermal runaway ontstaan ongewenste reacties in de batterijcel, waarbij brandbare en giftige gassen worden gevormd. Deze reacties genereren hitte die tot verdere opwarming leidt, waardoor aangrenzende cellen ook oververhit raken. Dit kan resulteren in een zichzelf in stand houdend exotherm proces dat zich van cel naar cel door een batterijpakket kan verspreiden. De gevormde gassen zorgen voor drukopbouw, waardoor een afblaasklep opent of het batterijpakket kan openbreken. Ontbranding van de gassen kan leiden tot fakkels en branduitbreiding naar de omgeving, terwijl niet-ontstoken gas een explosief mengsel kan vormen. De toxische gassen kunnen bij inademing gezondheidsschade veroorzaken (Brans, 2023).

### **2.5.2 Thermisch gedrag van gesmolten zoutbatterijen**

Op basis van de eerdergenoemde eigenschappen in paragraaf 2.1, kunnen gesmolten zoutbatterijen, in tegenstelling tot lithium-ion, in zowel koude als warme omgevingen worden geplaatst; de gebruikstemperatuurrange is -20 tot 60 °C. Hierom wordt het mogelijk geacht om batterijen in de grond te begraven of midden in de gebouwde omgeving te installeren (The Green Village, n.d.).

Gesmolten zoutbatterijen functioneren bij hoge temperaturen en gebruiken vloeibare zouten. Een stabiel thermisch gedrag is daarvan het gevolg. Onderzoek toont echter aan dat het de beheersing van het zout is die cruciaal is voor veiligheid. Wanneer het zout afkoelt en stolt, krimpt het namelijk aanzienlijk, waardoor interne holtes en spanningen kunnen ontstaan die de warmtedistributie en structurele integriteit beïnvloeden. Het is daarom essentieel de batterij altijd boven het smeltpunt te houden en temperatuurwisselingen te beperken. Contact met water of vocht brengt eveneens risico's met zich mee, omdat water plotselinge thermische schokken kan veroorzaken, het zout kan laten stollen of materialen kan aantasten. Een volledig waterdichte behuizing en corrosiebestendige materialen zijn daarom noodzakelijk. Ook de opstartfase vraagt aandacht, omdat het systeem tijdelijk instabiel is zolang het zout nog niet volledig vloeibaar is. Betrouwbaar thermisch beheer, nauwkeurige monitoring van de zoutconditie en gecontroleerde opwarmscenario's zijn essentieel voor veilig gebruik (Umbrex, n.d.; Cui et al., 2024).

De hoge bedrijfstemperaturen en de gesmolten elektrolyt brengen specifieke veiligheidsrisico's met zich mee, waaronder mogelijke lekkages. Strikte beheersmaatregelen zijn daarom noodzakelijk (Umbrex, n.d.). Het scenario dat gesmolten zout zelf brandt, wordt als onmogelijk beschouwd onder realistische operationele omstandigheden en incidenten, vanwege de hoge ionische concentratie (Nitta, et al., 2023; Prieto et al., 2023).

### **2.5.3 Materiaalcompatibiliteit en einde van de levensduur**

Wanneer ongeschikte materialen worden toegepast, kunnen door de hoge temperaturen, gesmolten zouten en metalen onderdelen corrosie en mechanische verzwakking ontstaan. Dit vergroot de kans op scheurvorming of lekkage. Daarnaast vereist de 'end-of-life' fase zorgvuldige verwijdering van restzouten en elektrolyten om schade aan bodem of water te voorkomen (Shawe, 2025). Naast deze algemene veiligheidsaspecten speelt ook de gebruikte batterijchemie (het subtype gesmolten zoutbatterij) een rol:

<sup>4</sup> Bij natrium-ion batterijen is wel sprake van thermal runaway, volgens een vergelijkbaar faalmechanisme. Dit is uitgebreid beschreven in (Brans, 2023).

- > **Natrium-zwavelbatterijen** werken bij 300–350 °C en bevatten vloeibaar zwavel, dat ontvlambaar is. Dit vereist een robuust containment- en temperatuursysteem om brand en ongecontroleerde reacties te beheersen (Shawe, 2025).
- > **Natrium-nikkelchloridebatterijen** maken gebruik van niet-brandbare en niet-toxische materialen en bevatten geen vrij ontvlambare componenten. Hierdoor treedt bij deze batterijen geen intrinsiek brand- of explosierisico op. De cellen kunnen bovendien in volledig ontladen toestand worden opgeslagen en vervoerd, waardoor zij minder gevoelig zijn voor mechanische belasting en temperatuurschommelingen tijdens transport en opslag (Shawe, 2025).

#### 2.5.4 Experimentele faaltesten met gesmolten zoutbatterijen

Veiligheidsproeven zoals nagelpenetratie, watergietsen en dompeling laten geen kortsluiting, temperatuurstijging of andere afwijkingen zien. Deze proeven werden uitgevoerd op laminaatcellen en kleine MSB-units (molten salt electrolyte batteries) met een NaFSA-KFSA elektrolyt. Het doel was om de intrinsieke veiligheid van de elektrolyt en de celconstructie te beoordelen onder extreme mechanische en omgevingsomstandigheden, inclusief plotselinge penetratie, contact met water en volledige onderdompeling. Hierbij werden geen gevaarlijke reacties zoals brand of explosie waargenomen (Nitta et al., 2013).

# 3 Warmtebatterijen op basis van gesmolten zout (thermische energieopslag)

Dit hoofdstuk behandelt warmtebatterijen op basis van gesmolten zout, een vorm van thermische energieopslag waarbij energie wordt vastgehouden in de vorm van warmte. In deze batterijen dient gesmolten zout als warmteopslagmedium.

## 3.1 Systeembeschrijving

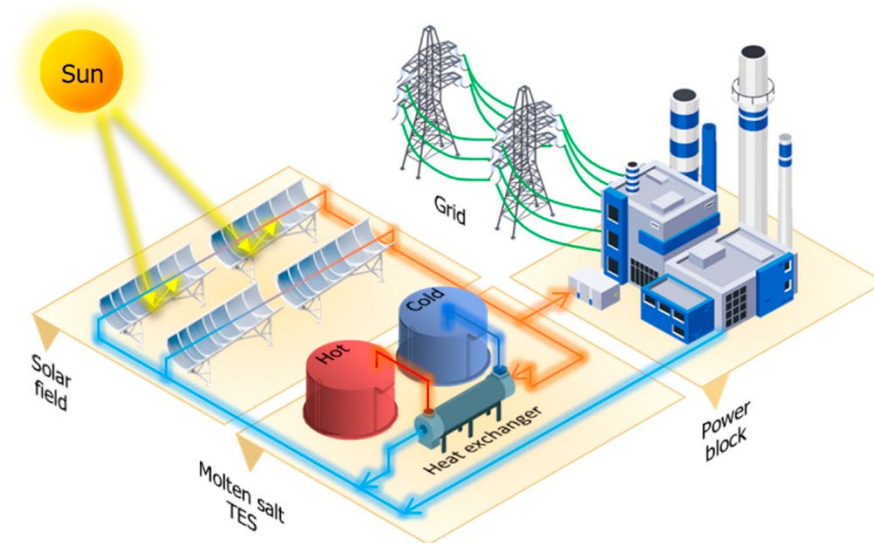
Gesmolten zout kan worden ingezet als warmteopslagmedium vanwege de hoge warmtecapaciteit en goede warmtebehoudende eigenschappen (BNR, 2025; Roper et al. 2022). Op basis van dit werkingsprincipe kunnen warmtebatterijen (thermische batterijen) worden gemaakt. Warmteopslag met gesmolten zout kan in principe ook worden toegepast in de gebouwde omgeving, maar veel projecten richten zich vooralsnog voornamelijk op industriële toepassingen, waar volgens betrokken partijen de grootste verduurzamingswinst te behalen is (solar356, n.d.).

### **Thermische energieopslag**

Onder thermische batterijen worden warmtebatterijen gestaan die erop zijn gericht om energie op te slaan in de vorm van warmte.

Een warmtebatterij met gesmolten zout wordt opgeladen door elektrische energie, bijvoorbeeld afkomstig uit overschotten van zon- en/of windenergie, die via elektrische verwarmingselementen worden omgezet in warmte. Deze warmte wordt gebruikt om het zout op te warmen, waardoor de energie in thermische vorm in het zout wordt opgeslagen. Dit werkingsprincipe is schematisch weergegeven in Figuur 3.1. Daarnaast kunnen ook andere energiestromen worden benut om het zout op te warmen, zoals industriële afvalwarmte (SALTES, n.d.; Energy Storage NL, 2025; Roper et al., 2022; Kooijman, 2025; Innovation Origins, 2025).

Het ontladen van het systeem vindt plaats via een warmtewisselaar waarmee water (al dan niet tot stoom), thermische olie of lucht kan worden verwarmd. In sommige toepassingen kan het gesmolten zout ook direct worden ingezet voor verwarmingsdoeleinden. Het gesmolten zout wordt opgeslagen in speciaal ontworpen opslagcontainers die sterk geïsoleerd zijn om warmteverliezen tot een minimum te beperken (SALTES, n.d.; Energy Storage NL, 2025; Roper et al., 2022; Kooijman, 2025; Innovation Origins, 2025).



**Figuur 3.1 Schematische weergave van grootschalige warmtebatterij op basis van gesmolten zout (Prieto, 2023)**

## 3.2 Subtypen warmtebatterijen

In de literatuur wordt gesproken over verschillende mogelijke initiatieven waarbij gesmolten zout wordt ingezet voor de opslag van warmte.

### 3.2.1 Concentrated solar power plant (CSP)

In een CSP wordt zonlicht gebundeld met spiegels. De warmte die hierdoor ontstaat, wordt gebruikt om gesmolten zout te verwarmen, waardoor de warmte wordt opgeslagen. Deze warmte kan op een later moment worden ingezet om stoom te produceren, waarmee een turbine wordt aangedreven om elektriciteit te genereren. Het systeem bevat twee gesmolten zouttanks: een voor het afgekoelde zout dat opnieuw kan worden verwarmd en een voor het verwarmde zout (Prieto et al., 2023, Roper et al., 2022).

### 3.2.2 Nuclear hybrid energy system (NHES)

Bij een Nuclear Hybrid Energy System (NHES) is een geïntegreerd energiesysteem waarin een kernreactor wordt gekoppeld aan andere energie- of conversiesystemen, zodat de geproduceerde energie flexibel kan worden ingezet. Hier kan ook gesmolten zout voor worden gebruikt (Prieto et al., 2023).

### 3.2.3 Industriële warmtebatterij

Industriële warmteopslag met gesmolten zout kan worden toegepast in systemen waarbij elektriciteit uit hernieuwbare bronnen wordt omgezet in warmte, die wordt opgeslagen in gesmolten zout en later aan industriële processen wordt geleverd. Een dergelijk systeem is onlangs op de Nederlandse markt gebracht. Het is schematisch weergegeven in Figuur 3.2, waarbij de grijze opslagtanks het gesmolten zout bevatten (Kooijman, 2025). Het systeem werkt bij temperaturen tot ongeveer 500 °C en kan naar verluid met één installatie een gehele fabriek van warmte voorzien. Gesmolten zout fungeert als thermisch opslagmedium

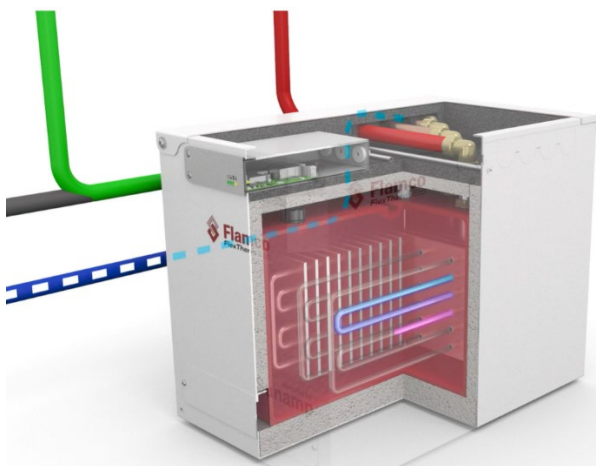
vanwege de hoge warmtecapaciteit en het vermogen om warmte langere tijd vast te houden (Kooijman, 2025; Innovation Origins, 2025).



**Figuur 3.2 Thermische energieopslag in opslagtanks met gesmolten zout (bron: Kooijman, 2025)**

### 3.2.4 Residentiele warmtebatterij

Op kleinere schaal kan gesmolten zout ook als thermisch opslagmedium voor een residentiële warmtebatterij (warmte-thuisbatterij) worden gebruikt (Figuur 3.3). Bij het type warmtebatterij in figuur 3.3 is een zout gebruikt dat bij een lagere temperatuur smelt (circa 70°C), waardoor het geschikt is voor de warmwatervoorziening. Het water wordt hierbij verwarmd doordat warmte uit het gesmolten zout wordt overgedragen via een warmtewisselaar (leidingen in het grijs), die is omgeven door het zout (in het rood)



**Figuur 3.3 Residentiele warmtebatterij (bron: Flamco, 2019)**

## 3.3 Toekomstige ontwikkelingen warmtebatterijen

Innovatie rondom warmtebatterijen met gesmolten zout richt zich op het verbeteren van de isolatiewaarden van tanks waardoor er minder warmte verloren gaat aan de omgeving. Daarnaast wordt getracht om nieuwe zoutsamenstellingen te verkrijgen met lagere smeltpunten en een hogere energieopslagcapaciteit (Innovation Origins, 2025; Saltes, n.d.).

## 3.4 Literatuurstudie veiligheid warmtebatterijen

Voor wat betreft de veiligheid van warmtebatterijen op basis van gesmolten zout is het vooral belangrijk om te kijken naar de (grote) opslagtanks van gesmolten zout. Uit de wetenschappelijk literatuur zijn drie factoren naar voren gekomen die de integriteit en veiligheid van warmteopslag door middel van gesmolten zout in dergelijke tanks beïnvloeden (Prieto et al., 2023):

- > Corrosiebestendigheid (paragraaf 3.4.1)
- > Thermomechanische<sup>5</sup> belastingen (paragraaf 3.4.2)
- > Afdichtingen en lekpreventie (paragraaf 3.4.3).

### 3.4.1 Corrosiebestendigheid

Gesmolten zout is corrosief en wordt corrosiever naarmate de temperatuur ervan stijgt. De materialen waaruit gesmolten zouttanks zijn opgebouwd, moeten daarom bestand zijn tegen corrosie door het zout bij hoge temperaturen. Onvoldoende materiaalcompatibiliteit kan leiden tot versnelde corrosie, waardoor de tanks degraderen en mogelijk constructieschade ontstaat, met lekkage van gesmolten zout als gevolg (Prieto et al., 2023).

### 3.4.2 Thermomechanische belastingen

De installatie moet voldoende weerstand bieden tegen thermische spanningen die kunnen ontstaan door de verschillende temperaturen waarin het zout zich kan bevinden. Wanneer het zout afkoelt en stolt, krimpt het aanzienlijk, waardoor interne holtes en spanningen kunnen ontstaan die de warmtedistributie en structurele integriteit beïnvloeden. Onvoldoende rekening houden met thermische uitzetting en krimp kan leiden tot vermoeiing, scheurvorming en aantasting van de constructie, met lekkage van zouten als gevolg. Daarom dienen alle aansluitingen op hoofdleidingen en vaste apparatuur uitgevoerd te worden, zodat ze voldoende kunnen expanderen (Prieto et al., 2023).

### 3.4.3 Afdichting en lekpreventie

Een zorgvuldige afdichting van de tank is essentieel om lekkages te voorkomen. Vanwege de thermomechanische belasting worden bijvoorbeeld alle aansluitingen op hoofdleidingen en vaste apparatuur uitgevoerd met expansievoegen. Regelmatige inspectie, monitoring en onderhoud zijn noodzakelijk om degradatie van afdichtingen en potentiële lekpunten tijdig te detecteren en te verhelpen (Prieto et al., 2023).

---

<sup>5</sup> Uitzetten en krimpen van materialen door warmte.

# 4 Veiligheidsanalyse

Op basis van de kennis uit de voorgaande hoofdstukken (2 en 3) wordt in dit hoofdstuk een veiligheidsanalyse uitgevoerd voor batterijen die gebruikmaken van gesmolten zout. Hierbij is gekeken naar de factoren die bijdragen aan de kans op een incident, wat mogelijke effecten kunnen zijn van een incident met gesmolten zout, en wat voor invloed deze effecten hebben op de bestrijdbaarheid.

## 4.1 Ongewenste gebeurtenissen

Op basis van de literatuur uit paragrafen 2.5 en 3.5 komen voor beide hier beschreven categorieën gesmolten-zoutbatterijen dezelfde typen ongewenste gebeurtenissen naar voren. Hoewel de systemen verschillen in werkingsprincipe (elektrochemische opslag respectievelijk thermische opslag), zijn de onderliggende risico's identiek, omdat ze in beide gevallen voortkomen uit het ongecontroleerd vrijkomen van gesmolten zout. De twee mogelijke incidenten zijn:

1. Het vrijkomen van zeer heet gesmolten zout als gevolg van lekkage door thermische instabiliteit of corrosie.
2. Thermische schok door lekkage van vrijgekomen gesmolten zout dat in contact komt met water of vocht.

Deze risico's zijn weergegeven in de vorm van een gebeurtenissenschema in Figuur 4.1. Omdat de risico's voor beide batterijcategorieën overeenkomen, worden ze in dit hoofdstuk gezamenlijk beschouwd als één algemene categorie: batterijen op basis van gesmolten zout.



Figuur 4.1 Gebeurtenissenschema bij falen van gesmolten zoutbatterijen

## 4.2 Oorzaken

Gesmolten zout kan vrijkomen wanneer de constructie en/of de hiervoor gebruikte materialen falen. De kans op falen wordt hierbij bepaald door de mate waarin de gebruikte materialen en constructie bestand zijn tegen de hoge werkingstemperatuur, temperatuurverschillen en corrosieve eigenschappen van gesmolten zout. Deze risico's kunnen alleen ontstaan wanneer de batterij in gebruik is; wanneer het systeem (gecontroleerd) afgekoeld en buiten bedrijf is, zal het zout zich namelijk in gestolde toestand bevinden.

## 4.3 Gevolgen

Wanneer de constructie faalt, kan er lekkage ontstaan waardoor gesmolten zout vrijkomt. Wanneer gesmolten zout in aanraking komt met brandbare voorwerpen in de omgeving kan brand ontstaan, en personen kunnen letsel oplopen als zij in contact komen met gesmolten zout.

Wanneer gesmolten zout plotseling in aanraking komt met (koel)water, kan er een thermische schok plaatsvinden. Het water verdampt direct waardoor het gesmolten zout zeer snel afkoelt en stolt. De snelle verdamping en stolling kunnen het gesmolten zout mechanisch doen opspatten, waardoor het enkele meters verder in de omgeving terechtkomt (Figuur 4.2). Het zout is niet direct afgekoeld; zoutdeeltjes zullen nog heet genoeg zijn om verwondingen te veroorzaken.



**Figuur 4.2 Thermische schok bij gesmolten zout in plotseling contact met (koel)water (bron: The Slow Mo Guys, 2024)**

Bij natrium-zwavelbatterijen bestaat er vanwege het brandbare component zwavel een brandrisico. Tevens is zwavel licht toxisch. Natrium-nikkelchloridebatterijen kennen geen intrinsiek brandrisico en toxische emissie bij incidenten.

## 4.4 Bestrijdbaarheid

Een belangrijk onderscheid van gesmolten zoutbatterijen ten opzichte van lithium-ion en natrium-ion batterijen is dat zij tijdens normaal bedrijf een hoge inwendige temperatuur hebben. Afhankelijk van het type kan die temperatuur oplopen tot circa 350 °C a 500 °C. Een thermal runaway-mechanisme zoals dat bij lithium-ion batterijen voorkomt, is bij gesmolten zoutbatterijen niet van toepassing. De elektrochemische processen zijn niet zelfversterkend en vereisen juist een verhoogde temperatuur om in stand te blijven. Bij falen of afkoeling neemt de activiteit af en stopt het proces zodra de elektrolyt stolt, waardoor verdere warmteontwikkeling vanzelf wordt beëindigd.

Vanwege de hoge bedrijfstemperaturen is het relevant dat incidentbestrijders zich realiseren dat een hoge temperatuur, zoals zichtbaar op een warmtebeeldcamera, bij dit batterijtype normaal is. Dit is anders dan bij lithium-ion batterijen, waar een snel oplopende temperatuur juist kan wijzen op een gevaarlijke situatie, namelijk het ontstaan van een thermal runaway.

In de praktijk kan dit verschil tot verwarring bij incidentbestrijders leiden wanneer niet direct duidelijk is dat het om een gesmolten zoutbatterij gaat. Bovendien is actieve koeling met (koel)water op basis van de veiligheidsanalyse doorgaans geen geschikte aanpak, anders dan bij lithium-ion-en natrium-ion batterijen. Contact tussen heet gesmolten zout en water kan namelijk een thermische schok veroorzaken, waarbij het zout abrupt stolt en kan opspatten.

Voor incidenten met gesmolten zoutbatterijen ligt het op basis van deze eigenschappen meer voor de hand om het systeem uit te schakelen, zodat de zouten gecontroleerd kunnen afkoelen en stollen. Zodra het zout gestold is, neemt het risico op blootstelling aan hoge temperaturen sterk af en is de situatie beter beheersbaar.

## 4.5 Beschouwing

Met de opgedane kennis in de vorige hoofdstukken is in Tabel 4.1 een veiligheidsanalyse gemaakt met betrekking tot de grootte van de kans, de ernst van de effecten en de mate van bestrijdbaarheid. Dit is visueel weergegeven in de vorm van radardiagrammen in Figuur 4.3.

**Tabel 4.1 Veiligheidsanalyse gesmolten zoutbatterijen**

| Type                                         | Kans                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Effect                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Bestrijdbaarheid                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Natrium-Zwavel</b>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; De kans op een incident ontstaat bij materiaal- en constructiefalen door thermische spanningen en corrosie.</li> <li>&gt; Risico's treden met name op wanneer de batterij operationeel is.</li> </ul>                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Ongecontroleerd vrijkomen van gesmolten zout.</li> <li>&gt; Brandwonden door contact met gesmolten zout.</li> <li>&gt; Brand door vlamvatten van zwavel.</li> </ul>                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Thermal runaway niet van toepassing.</li> <li>&gt; Richt zich op het afkoelen / stollen door uitschakeling van het proces.</li> <li>&gt; Contact tussen water en gesmolten zout moet worden vermeden.</li> <li>&gt; Door de aanwezigheid van zwavel kan brand ontstaan, waardoor de bestrijdbaarheid complexer wordt geacht dan bij de overige types zoutbatterijen.</li> </ul> |
| <b>Natrium-metaalchloride (SMC en ZEBRA)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; De kans op een incident ontstaat bij materiaal- en constructiefalen door thermische spanningen en corrosie.</li> <li>&gt; Risico's treden met name op wanneer de batterij operationeel is.</li> </ul>                                                                                                                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Ongecontroleerd vrijkomen van gesmolten zout.</li> <li>&gt; Brandwonden door contact met gesmolten zout.</li> </ul>                                                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Thermal runaway niet van toepassing.</li> <li>&gt; Richt zich op het afkoelen / stollen door uitschakeling van het proces.</li> <li>&gt; Contact tussen water en gesmolten zout moet worden vermeden.</li> </ul>                                                                                                                                                                |
| <b>Warmtebatterij (thermische batterij)</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; De kans op een incident ontstaat bij materiaal- en constructiefalen door thermische spanningen en corrosie.</li> <li>&gt; Risico's treden met name op wanneer de batterij operationeel is.</li> <li>&gt; Er kunnen verschillende zoutsamenstellingen zijn toegepast die verschillen in corrosiviteit.</li> <li>&gt; Grotere hoeveelheden gesmolten zout vergeleken met de overige types.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Ongecontroleerd vrijkomen van gesmolten zout.</li> <li>&gt; Brandwonden door contact met gesmolten zout.</li> <li>&gt; Vaten met gesmolten zout zijn groter, waardoor grotere hoeveelheden gesmolten zout kunnen vrijkomen dan bij de overige types zoutbatterijen.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Thermal runaway niet van toepassing.</li> <li>&gt; Richt zich op het afkoelen / stollen door uitschakeling van het proces.</li> <li>&gt; Contact tussen water en gesmolten zout moet worden vermeden.</li> </ul>                                                                                                                                                                |



**Figuur 4.3 Radardiagram veiligheidsanalyse gesmolten zoutbatterijen**

# 5 Conclusie

In dit hoofdstuk worden de onderzoeksvragen beantwoord.

## 1. Welke verschillende typen batterijen op basis van gesmolten zout zijn anno 2026 in Nederland beschikbaar?

Uit de studie is gebleken dat er anno 2026 op de Nederlandse markt twee categorieën batterijen op basis van gesmolten zout worden aangeboden. De eerste categorie betreft elektrochemische gesmolten zoutbatterijen, waarin elektrische energie wordt opgeslagen door middel van elektrochemische reacties. In deze batterijen fungeert gesmolten zout als elektrolyt, waardoor ionentransport tussen anode en kathode mogelijk wordt bij verhoogde temperaturen. Binnen deze categorie bestaan verschillende subtypen, waarvan de natrium-zwavelbatterij en de natrium-metaalchloridebatterij (waaronder de ZEBRA-batterij) de meest voorkomende en commercieel toegepaste varianten zijn. Deze batterijen worden met name ingezet voor stationaire energieopslag en back-up-toepassingen.

De tweede categorie bestaat uit warmtebatterijen op basis van gesmolten zout, waarbij sprake is van thermische energieopslag. In deze systemen wordt gesmolten zout gebruikt als warmteopslagmedium vanwege de hoge warmtecapaciteit en het vermogen om warmte langdurig vast te houden. Toepassingen van deze categorie zijn onder meer geconcentreerde zonne-energiesystemen (CSP), nucleaire hybride energiesystemen en industriële warmtebatterijen voor de opslag en levering van proceswarmte.

Hoewel beide categorieën gebruikmaken van gesmolten zout, verschillen zij in het type energie dat wordt opgeslagen en geleverd en in hun werkingsprincipe.

## 2. Wat zijn de werkingsprincipes van deze typen gesmolten zoutbatterijen?

Gesmolten zoutbatterijen werken met een zout dat door verhitting vloeibaar wordt, waardoor elektrisch geladen deeltjes zich kunnen verplaatsen. In de batterij bevindt zich een scheidingslaag die fungeert als een selectieve doorgang: deze laat de geladen deeltjes (ionen) door, zodat zij van de ene elektrode naar de andere kunnen bewegen, maar houdt elektronen tegen. Daardoor worden de elektronen gedwongen via een extern circuit te stromen, wat elektrische energie oplevert. Bij het opladen verloopt dit proces omgekeerd en wordt elektrische energie opnieuw in chemische vorm opgeslagen. Om het zout vloeibaar te houden, wordt de batterij continu verwarmd en goed geïsoleerd.

Bij warmtebatterijen op basis van gesmolten zout is het werkingsprincipe gericht op thermische energieopslag. In deze systemen wordt elektrische energie of restwarmte gebruikt om het zout te verwarmen. De energie wordt zodoende opgeslagen in de vorm van warmte in het gesmolten zout. Tijdens ontladen wordt deze warmte via warmtewisselaars overgedragen aan water, lucht of thermische olie, die vervolgens kunnen worden ingezet voor industriële processen of andere toepassingen. Het zout wordt opgeslagen in speciaal ontworpen, sterk geïsoleerde tanks om warmteverliezen te minimaliseren en de energie langdurig beschikbaar te houden.

### **3. Wat zijn de veiligheidsrisico's van gesmolten zoutbatterijen, wanneer gekeken wordt naar kans, effect en bestrijdbaarheid van mogelijke incidenten?**

De kans op incidenten met gesmolten zoutbatterijen wordt voornamelijk bepaald door de mate waarin constructie en materialen bestand zijn tegen hoge bedrijfstemperaturen, thermische spanningen en de corrosieve eigenschappen van gesmolten zout. Incidenten kunnen ontstaan wanneer deze materialen falen, bijvoorbeeld door langdurige thermische belasting, corrosie of onvoldoende beheersing van temperatuurwisselingen.

De mogelijke effecten van een incident hangen samen met het vrijkomen van zeer heet gesmolten zout. Bij constructiefalen kan lekkage optreden, waarbij contact met brandbare materialen brand kan veroorzaken en contact met personen kan leiden tot letsel. De ernst van de effecten is mede afhankelijk van de toegepaste batterijchemie. In vergelijking met natrium-zwavelbatterijen bevatten natrium-nikkelchloride batterijen geen vrij ontvlambare actieve stoffen, waardoor bij falen geen intrinsiek brand- of explosierisico optreedt.

Voor de bestrijdbaarheid van incidenten met gesmolten zoutbatterijen is het van belang dat incidentbestrijders zich bewust zijn dat een hoge inwendige bedrijfstemperatuur inherent is aan de werking van deze systemen (afhankelijk van het type tot circa 350 °C of 500 °C). Een snel oplopende temperatuur kan juist bij lithium-ion batterijen duiden op falen of het ontstaan van een thermal runaway. Dit faalmechanisme is bij gesmolten zoutbatterijen niet van toepassing: wanneer een dergelijke batterij faalt, stopt het elektrochemische proces doorgaans vanzelf, zodra de temperatuur daalt en het zout stolt. Dan is in de regel ook geen sprake meer van explosiegevaar of grootschalige toxische emissies.

Voorkomen dient te worden dat de intern hoge temperaturen bij gesmolten zoutbatterijen bij incidentbestrijders tot verwarring leiden. Bij lithium-ion batterijen vormt die hoge temperatuur een gevaar (en dus is koelen noodzakelijk), bij de gesmolten zout batterijen is dit normaal (en levert koelen juist een gevaar op). Contact tussen heet gesmolten zout en (koel)water kan een namelijk thermische schok veroorzaken, waarbij het zout abrupt stolt en hete zoutdeeltjes kunnen wegspatten, met risico op letsel voor aanwezige hulpverleners of omstanders tot gevolg. Om die reden is het onverstandig om bij incidenten met gesmolten zoutbatterijen (koel)water als bestrijdingsmiddel in te zetten. Op basis van de veiligheidsanalyse lijkt in de meeste gevallen het uitschakelen van het systeem (door de operator) de effectiefste en veiligste strategie. Dan kan het zout gecontroleerd afkoelen en stollen. Zodra dit gebeurd is, neemt het risico op blootstelling aan hoge temperaturen logischerwijs af.

# Referentielijst

Armand, M., Ortiz-Vitoriano, N., Olarte, J., Ferret, R., & Salazar, A. (2023). Salt Batteries: Opportunities and applications of storage systems based on sodium nickel chloride batteries. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2023/740064/IPOL\\_IDA\(2023\)740064\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2023/740064/IPOL_IDA(2023)740064_EN.pdf)

Battery University. (2021). Why does Sodium-sulfur need to be heated. Geraadpleegd in januari 2026. [https://www.batteryuniversity.com/article/bu-210a-why-does-sodium-sulfur-need-to-be-heated#google\\_vignette](https://www.batteryuniversity.com/article/bu-210a-why-does-sodium-sulfur-need-to-be-heated#google_vignette)

BNR. (2025). Deze warmtebatterij kan de industrie van het gas halen. Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.bnr.nl/podcast/duurzaam/10583497/deze-warmtebatterij-kan-de-industrie-van-het-gas-halen>

Brans, H. (2023). Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/10/20230712-NIPV-Verkenning-toekomstige-batterijtypen-en-veiligheid.pdf>

Cui, D. Y., Li, X. X., Dai, Y., Zou, Y., Chen, J. G., & Cai, X. Z. (2024). Accident scenario analysis and control scheme design for a micro Molten Salt Reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 172, 105208. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105208>

Energy Storage. (2024). Technology: Molten-Salt Battery. Geraadpleegd in januari 2026. [https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/FactSheet\\_Electrochemical\\_Molten-Salt-Battery.pdf](https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/FactSheet_Electrochemical_Molten-Salt-Battery.pdf)

Energy Storage NL. (2025). Saltes inspireert met gesmolten zout voor industriële decarbonisatie. Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.energystoragenl.nl/2025/06/25/thermalpod-warmteopslag-gesmolten-zout/>

Flamco (2019). Flamco FlexTerm Eco. Geraadpleegd in januari 2026. <https://flamco.aalberts-hfc.com/uk-en/pageid/landingpage-flextherm-eco>

flash battery. (2022). Molten-salt batteries: pros and cons of a 40-year-old “innovation.” Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.flashbattery.tech/en/blog/molten-salt-batteries-operation-and-limits/>

Hanzestrohm. (n.d.). Fortona zoutbatterijsysteem. Geraadpleegd in januari 2026. <https://hanzestrohm.nl/fortona/zoutbatterijsysteem/>

Hanzestrohm. (2022). Fortona lanceert Europese zoutbatterij. Geraadpleegd in januari 2026. <https://hanzestrohm.nl/fortona/nieuws/fortona-lanceert-europese-zoutbatterij/>

Hill, R. C., Gross, M. S., Percival, S. J., Peretti, A. S., Small, L. J., Spoerke, E. D., & Cheng, Y.-T. (2024). Molten sodium batteries: advances in chemistries, electrolytes, and interfaces. *Frontiers in Batteries and Electrochemistry*. <https://doi.org/10.3389/fbael.2024.1369305>

Innovation Origins. (2025). Startup met zoutbatterij bekroond met innovatieprijs. Geraadpleegd in januari 2026. <https://ioplus.nl/nl/posts/startup-met-zoutbatterij-bekroond-met-innovatieprijs>

Kooijman, M. (2025). Warmtebatterij met gesmolten zout biedt hoop: “De industrie heeft het zwaar, maar wij hebben een oplossing.” Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.change.inc/transities/energie-transitie/warmtebatterij-met-gesmolten-zout-biedt-hoop-de-industrie-heeft-het-zwaar-maar-wij-hebben-een-oplossing>

Liu, H., Zhang, X., He, S., He, D., Shang, Y., & Yu, H. (2022). Molten salts for rechargeable batteries. *Materials Today*, 60, 128–157. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.09.005>

Nitta, K., Inazawa, S., Sakai, S., Fukunaga, A., Itani, E., Numata, K., Hagiwara, R., & Nohira, T. (2013). Development of molten salt electrolyte battery. *SEI Technical Review*, 33–39. <https://global-sei.com/technology/tr/bn76/pdf/76-06.pdf>

Prieto, C., Blindu, A., Cabeza, L. F., Valverde, J., & García, G. (2023). Molten Salts Tanks Thermal Energy Storage: Aspects to Consider during Design. *Energies*, 17(1), 22. <https://doi.org/10.3390/en17010022>

The Slow Mo Guys, 2024. Molten Salt Explosion at 82,000 FPS <https://www.youtube.com/watch?v=ZaLmlh4-Qg>

Roper, R., Harkema, M., Sabharwall, P., Riddle, C., Chisholm, B., Day, B., & Marotta, P. (2022). Molten salt for advanced energy applications: A review. *Annals of Nuclear Energy*, 169, 108924. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108924>

SALTES. (n.d.). How our technology works. Retrieved <https://www.saltes.energy/technology>  
Shawe, R. (2025). Environmental and Energy Implications of Molten Salt Batteries in New York State. *Journal of Sensors, IoT & Health Sciences*, 3(3), 76–89. <https://doi.org/10.69996/jsihs.2025015>

Solar356. (n.d.). De Thermalpod werkt hetzelfde als een frituurpan. Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.solar365.nl/nieuws/de-thermalpod-werkt-hetzelfde-als-een-frituurpan-66ACB0B1.html>

Simon, Rudolf (2012). FZSoNick 48TL200. Geraadpleegd in januari 2026. [https://en.wikipedia.org/wiki/Molten-salt\\_battery#/media/File:Molten\\_Salt\\_Battery\\_\(Zebra\).JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Molten-salt_battery#/media/File:Molten_Salt_Battery_(Zebra).JPG)

Spoerke, E. D., Gross, M. M., Small, L. J., & Percival, S. J. (n.d.). Sodium-based Battery Technologies. Geraadpleegd in januari 2026. [https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/2022/02/ESHB\\_Ch4\\_Sodium\\_Spoerke-1.pdf](https://www.sandia.gov/app/uploads/sites/163/2022/02/ESHB_Ch4_Sodium_Spoerke-1.pdf)

Tarantino, J. (2025). Molten Salt Battery Innovations. The Environmental Blog. Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.theenvironmentalblog.org/2025/07/molten-salt-battery-innovations/>

The Green Village. (n.d.). Duurzame batterij voor gebruik in gebouwen. Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.thegreenvillage.org/project/exergy-storage/>

Tycorun. (2025). Salt Battery: Emerging Technology for safe and Sustainable Energy Storage. Geraadpleegd in januari 2026. [https://www.tycorun.com/blogs/news/salt-battery?srltid=AfmBOopBmt\\_4mu8WT6S28HPHqy6HSMESbBH9h7Sigt7FoUa6960gwiCu](https://www.tycorun.com/blogs/news/salt-battery?srltid=AfmBOopBmt_4mu8WT6S28HPHqy6HSMESbBH9h7Sigt7FoUa6960gwiCu)

Umbrex. (n.d.). Molten Salt Battery. Geraadpleegd in januari 2026. <https://umbrex.com/resources/energy-industry-glossary/energy-storage-glossary/molten-salt-battery/#:~:text=Electrolyte:>

Warp news. (2025). Denmark's first molten salt battery can power 100,000 homes for 10 hours. Geraadpleegd in januari 2026. <https://www.warpnews.org/energy/denmarks-first-molten-salt-battery-can-power-100-000-homes-for-10-hours/>

Zhu, Y. G., Leverick, G., Accogli, A., Gordiz, K., Zhang, Y., & Shao-Horn, Y. (2022). A high-rate and high-efficiency molten-salt sodium–oxygen battery. *Energy & Environmental Science*, 15(11), 4636–4646. <https://doi.org/10.1039/D2EE01774A>