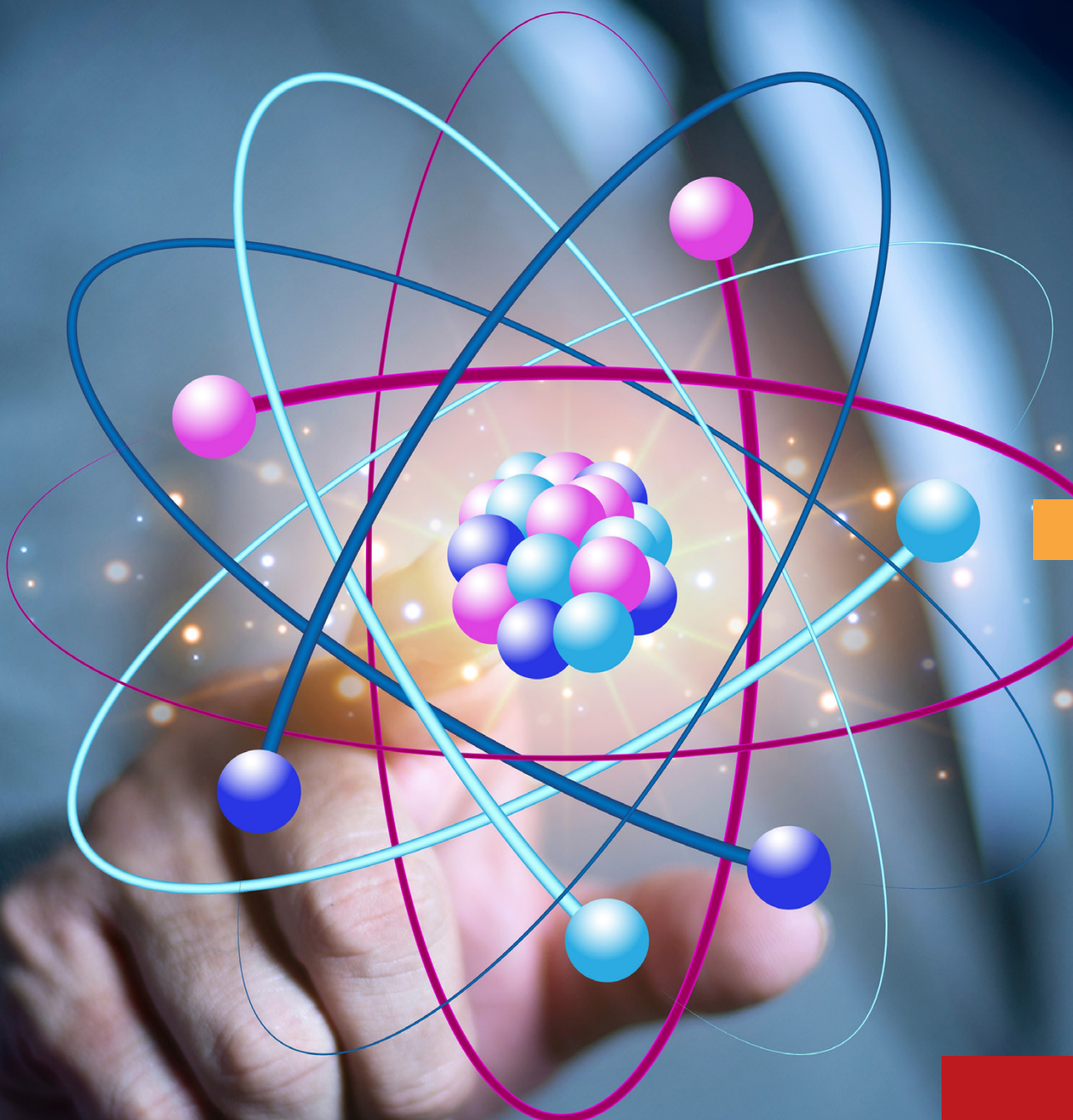


Veiligheidsanalyse van zes innovaties in de energietransitie



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

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2026

Auteurs	T. van Harn en M. Spoelstra
Contactpersoon	I. Janssen
Datum	9 juni 2026
Foto cover	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.

Samenvatting

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) onderzocht wat zes nieuwe energie-innovaties betekenen voor veiligheid. De betreffende innovaties zijn geselecteerd, omdat ze op termijn een grote rol spelen kunnen spelen in de energietransitie, maar momenteel nog maar beperkt zijn toegepast. Op basis van literatuuronderzoek zijn per innovatie de belangrijkste aandachtspunten op het gebied van risicobeheersing, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding in kaart gebracht.

Battolyser

Een battolyser kan fungeren als batterij voor het opslaan en leveren van elektriciteit, maar ook als een electrolyser voor de productie van waterstof. Bij een battolyser is een thermal runaway uitgesloten. De risico's hebben vooral betrekking op productie en opslag van waterstof, omdat de effecten van incidenten buiten de installatie kunnen komen. Door middel van monitoring van bedrijfscondities, gasdetectie, ventilatie en goede noodprocedures kunnen risico's worden beheerst. Bestrijding van een incident met waterstof richt zich op snelle detectie en het gecontroleerd buiten bedrijf stellen van de battolyser.

Liquid Air Energy Storage (LAES)

Bij LAES wordt energie opgeslagen door lucht vloeibaar te maken en te expanderen op het moment dat energie nodig is. De belangrijkste risico's van LAES zijn drukopbouw, zuurstofverdringing of -verrijking en materiaalverbrossing. Deze risico's worden veroorzaakt door de zeer lage temperatuur van vloeibare lucht (-194 °C). Vloeibare lucht bestaat uit vloeibare stikstof en vloeibare zuurstof: deze stoffen zijn niet brandbaar of toxisch, maar een te hoog zuurstofgehalte vergroot het brandgevaar. Maatregelen om risico's te beheersen zijn drukontlasting, adequate ontluchting, thermische isolatie, zuurstofmonitoring en het voorkomen van ijsvorming en materiaalverbrossing. De effecten voor de omgeving beperken zich meestal tot de directe nabijheid van de installatie in de vorm van koude gaswolken die het zicht kunnen ontnemen. Incidentbestrijding richt zich op het stoppen of beheersen van cryogene uitstroom en het veilig benaderen van installaties met mogelijke afwijkende zuurstofconcentraties.

Supergeleidende kabels

Supergeleidende kabels transporteren bij zeer lage temperaturen grote hoeveelheden elektriciteit zonder noemenswaardige verliezen. Uitval van het cryogeen koelsysteem kan leiden tot het verlies van de supergeleidende eigenschappen en tot plaatselijke oververhitting. De kabel zelf heeft weinig impact op de omgeving, omdat er nauwelijks sprake is van een elektromagnetisch veld. Veilig optreden vraagt dat hulpdiensten snel kunnen vaststellen of de kabel spanningsloos is en of het koelsysteem stabiel is. De inzet bij incidenten is daarom primair gericht op het gecontroleerd uitschakelen en isoleren van zowel de elektrische als de cryogene delen van het systeem.

Draadloos opladen

Bij draadloos opladen van elektrische voertuigen wordt energie overgebracht zonder dat gebruikgemaakt hoeft te worden van kabels. Draadloos opladen brengt risico's met zich mee door elektromagnetische velden en lokale warmteontwikkeling in en rond het systeem. Deze

risico's zijn sterk locatiegebonden en vooral relevant in de directe omgeving. Maatregelen om de risico's te beheersen, zijn het afschermen van het magnetische veld, het tijdig stoppen van laden bij aanwezigheid van ongewenste objecten en het borgen van een goede compatibiliteit van systemen. Bij incidenten is het belangrijk dat het systeem snel kan worden uitgeschakeld en dat het herkenbaar is.

Thermochemische opslag

Bij thermochemische opslag wordt warmte opgeslagen of afgegeven via omkeerbare reacties of processen. Afhankelijk van de toepassing en de temperatuur worden verschillende vaste stoffen gebruikt. Sommige van deze stoffen kunnen bij lekkage of nevenreacties toxische of brandbare gassen geven, maar de hoeveelheden zullen beperkt zijn. Risico's zijn beheersbaar als gesloten systemen worden gebruikt en als thermochemische opslag wordt toegepast in een gecontroleerde omgeving. De gevolgen voor de omgevingsveiligheid blijven meestal beperkt, doordat bij een incident slechts een beperkte hoeveelheid vaste stof vrijkomt en de verspreiding gering is. Voorkomen moet worden dat de vaste stof verwaait of in aanraking komt met water.

Kraken van ammoniak

Bij het kraken van ammoniak wordt ammoniak bij hoge temperatuur omgezet in waterstof en stikstof. Risico's zijn het vrijkomen van ammoniak (toxisch) en waterstof (brandbaar), hoge temperaturen en materiaaldegradatie. Voor omgevingsveiligheid zijn vooral verlading en opslag van waterstof bepalend. Maatregelen om risico's te beperken zijn het toepassen van ammoniak- en waterstofbestendige materialen, monitoring van druk en temperatuur, gasdetectie rond kritieke installatieonderdelen en voorzieningen om de installatie bij afwijkingen gecontroleerd stil te leggen. Bij vrijkomen van ammoniak richt de inzet zich op afstand houden, afzetten en het beperken van blootstelling, eventueel met waterschermen. Bij vrijkomen van waterstof richt de inzet zich op het houden van afstand, het verwijderen van ontstekingsbronnen en het veiligstellen van de omgeving.

Analyse en duiding

- > Het combineren van opslag, conversie en transport in één systeem vergroot de flexibiliteit om met fluctuaties in vraag en aanbod van energie om te gaan, maar leidt ook tot een sterkere onderlinge afhankelijkheid van systeemonderdelen.
- > De onderzochte innovaties laten geen nieuwe risico's zien, maar het risicobeeld verschuift wel, doordat risico's in andere combinaties en in nieuwe omgevingen voorkomen.
- > De complexiteit van systemen neemt toe, omdat onderdelen en processen vaker gekoppeld worden. Systemen worden daardoor gevoeliger voor storingen en voor de snelle verspreiding daarvan. De onderzochte innovaties laten zien dat risicobeheersing in toenemende mate vraagt om monitoring, detectie en de mogelijkheid om systemen tijdig en gecontroleerd te stabiliseren of uit te schakelen.
- > Risico's die bekend zijn uit industriële omgevingen en specifieke technische systemen kunnen door de implementatie van innovatieve technologieën voorkomen in andere omgevingen, zoals stedelijke gebieden en energiehubs.
- > Bij de onderzochte innovaties is incidentbestrijding sterker afhankelijk van samenwerking met beheerders en systeemdeskundigen, omdat veilig optreden vaak pas mogelijk is, nadat installaties gecontroleerd zijn gestabiliseerd of zijn uitgeschakeld.

Inhoud

	Inleiding	7
1	Battolyser	9
1.1	Wat is een battolyser?	9
1.2	Veiligheidsrisico's battolyser	10
1.3	Risicobeheersing	11
1.4	Omgevingsveiligheid	11
1.5	Incidentbestrijding	11
2	Liquid air energy storage (LAES)	13
2.1	Wat is LAES?	13
2.2	Veiligheidsrisico's LAES	14
2.3	Risicobeheersing	15
2.4	Omgevingsveiligheid	16
2.5	Incidentbestrijding	17
3	Supergeleidende kabels	18
3.1	Wat zijn supergeleidende kabels?	18
3.2	Veiligheidsrisico's supergeleidende kabels	19
3.3	Risicobeheersing	20
3.4	Omgevingsveiligheid	21
3.5	Incidentbestrijding	21
4	Draadloos opladen	22
4.1	Wat is draadloos opladen?	22
4.2	Veiligheidsrisico's draadloos opladen	23
4.3	Risicobeheersing	24
4.4	Omgevingsveiligheid	26
4.5	Incidentbestrijding	26
5	Thermochemische opslag	27
5.1	Wat is thermochemische opslag?	27
5.2	Veiligheidsrisico's thermochemische opslag	29
5.3	Risicobeheersing	29
5.4	Omgevingsveiligheid	29
5.5	Incidentbestrijding	30
6	Kraken van ammoniak	31
6.1	Wat is kraken van ammoniak?	31
6.2	Veiligheidsrisico's kraken van ammoniak	32
6.3	Risicobeheersing	32
6.4	Omgevingsveiligheid	33
6.5	Incidentbestrijding	34
7	Analyse en duiding	36

Bijlage 1 Selectie van innovaties	40
Bronnen	46

Inleiding

TNO heeft op verzoek van de Topsector Energie Systemintegratie onderzoek gedaan naar innovaties die op de lange termijn (10 - 30 jaar) impact kunnen hebben op het energiesysteem (Kooiman & van Tuyll, 2025). De scope van het TNO-onderzoek betrof het gehele energiesysteem van winning en omzetting van energiebronnen tot het voorzien in de energiefunctie, zoals verwarmen, mobiliteit of een industrieel proces. De innovaties zijn afkomstig uit een database van de International Energy Agency (IEA) en zijn geselecteerd op basis van hun Technical Readiness Level (TRL) (IEA, 2026).¹ Innovaties met een TRL van 7 ('pre-commercial demonstration') of minder zijn door TNO geselecteerd, waarna de selectie verfijnd is op basis van interesse vanuit de Topsector. Uiteindelijk heeft TNO 180 innovaties geselecteerd die gestructureerd zijn aan de hand van diverse thema's (elektriciteit, industrie, mobiliteit, gebouwde omgeving en warmtenetten). Het TNO-rapport geeft korte beschrijvingen van de innovaties en geeft aan welke innovaties tot grote fundamentele veranderingen kunnen leiden in het Nederlandse energiesysteem. TNO heeft geen onderzoek gedaan naar de veiligheidsaspecten van de innovaties.

Onderzoekers van het NIPV hebben begin 2025 het TNO-rapport gelezen en onderzocht welke innovaties relevant kunnen zijn voor de onderwerpen waar het lectoraat zich mee bezig houdt, te weten de veilige energietransitie, onder te verdelen in risicobeheersing, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding. Er zijn zeven innovaties geselecteerd (zie Bijlage 1 voor de totstandkoming van deze selectie):

1. Battolyser
2. Liquid air energy storage (LAES)
3. Supergeleidende kabels
4. Draadloos opladen
5. Thuisbatterij
6. Thermochemische opslag
7. Kraken van ammoniak.

Dit rapport beschrijft zes van de zeven innovaties. De thuisbatterij is niet meegenomen, omdat het lectoraat hier al veel onderzoek naar heeft gedaan (zie onder andere (Harn et al., 2026)).

Doel en onderzoeksvragen

Het doel van het onderzoek is om te bepalen welke invloed de zes innovaties hebben op de aspecten risicobeheersing, incidentbestrijding en omgevingsveiligheid. Om dit doel te bereiken zijn de volgende onderzoeksvragen opgesteld:

¹ TRL's zijn een gestandaardiseerd systeem waarmee ingeschat kan worden hoever een technologie gevorderd is in haar ontwikkeling. Het systeem is ontwikkeld door de NASA en bevat normaal gesproken 9 niveaus. Het systeem dat de IEA gebruikt gaat verder en bevat 12 niveaus.

1. Wat houden de innovaties in?
2. Wat zijn de mogelijke veiligheidsrisico's van deze innovaties?
3. Welke maatregelen zijn nodig om de veiligheidsrisico's van deze innovaties te beheersen?
4. Welke invloed hebben deze innovaties op omgevingsveiligheid?
5. Welke invloed hebben deze innovaties op incidentbestrijding?

Aanpak

Per innovatie is deskresearch uitgevoerd, gericht op relevante wetenschappelijke artikelen en rapporten die gevonden zijn met behulp van Google, Google Scholar, Science Direct en CoPilot. Hierbij zijn zoektermen gebruikt zoals:

- > Battolysers: prompt CoPilot *'Geef wetenschappelijk bronnen over battolysers en over de risico's die daarmee gepaard gaan'*.
- > Liquid air energy storage (LAES): *liquid air energy storage*, *liquid air energy storage principle*, *liquid air energy storage safety* en *liquid air safety*.
- > Supergeleidende kabels: *superconducting high voltage cables*, *superconducting high voltage cables principle* en *superconducting high voltage cables safety*.
- > Draadloos opladen: *electric vehicles wireless charging*, *electric vehicles wireless charging principle* en *electric vehicles wireless charging safety*.
- > Thermochemische opslag: prompt CoPilot: *'Geef wetenschappelijk bronnen over thermochemische opslag en over de risico's die daarmee gepaard gaan'*.
- > Kraken van ammoniak: prompt CoPilot: *'Geef wetenschappelijk bronnen over het kraken van ammoniak en over de risico's die daarmee gepaard gaan'*.

Om de relevantie van de verkregen bronnen te bepalen, zijn abstracts van artikelen, samenvattingen van rapporten en inhoudsopgaven bestudeerd. Per technologie zijn op deze manier enkele kernbronnen geselecteerd, aangevuld met bronnen die via verwijzingen in artikelen en rapporten zijn gevonden (de 'sneeuwbalmethode'). Waar nodig, is met hulp van CoPilot gericht gezocht naar bronnen om meer informatie over deelonderwerpen te krijgen. De meeste bronnen gaven wel inzicht in de werking van de desbetreffende innovatie, maar niet of nauwelijks in de bijbehorende veiligheidsrisico's. In dat geval zijn risico's en maatregelen bepaald aan de hand van overeenkomstige systemen ('analogons').

Per innovatie is een hoofdstuk geschreven met een indeling die de onderzoeksvragen volgt (risicobeheersing, omgevingsveiligheid, incidentbestrijding). Deze opzet maakt het mogelijk de bevindingen op hoofdlijnen samen te brengen en overeenkomsten, verschillen en eventuele aandachtspunten te identificeren.

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 tot en met 6 wordt per technologie ingegaan op de werking, de belangrijkste veiligheidsrisico's en mogelijke maatregelen, met aandacht voor risicobeheersing, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding. In hoofdstuk 7 worden de bevindingen samengebracht en worden de belangrijkste overkoepelende aandachtspunten voor veiligheid in de energietransitie benoemd.

1 Battolyser

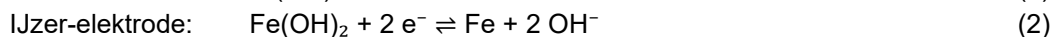
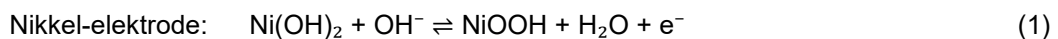
1.1 Wat is een battolyser?

De term 'battolyser' is een samentrekking van de woorden 'batterij' en 'electrolyser'. Een battolyser kan zowel fungeren als een batterij voor het opslaan en leveren van elektriciteit als een electrolyser voor de productie van waterstof. De battolyser combineert een nikkel-ijzerbatterij met een alkalische elektrolyser.

In een battolyser wordt de batterij ingezet voor kortetermijnopslag waarmee kleine schommelingen in de elektriciteitsvoorziening kunnen worden opgevangen. Bij een overschot aan hernieuwbare elektriciteit wordt deze eerst opgeslagen in de batterij. Wanneer de batterij volledig is opgeladen en er nog steeds elektriciteit beschikbaar is, wordt overgeschakeld op de productie van waterstof. Deze waterstof fungeert als vorm van langetermijnopslag en kan op een later moment weer worden benut voor elektriciteitsproductie, bijvoorbeeld via een brandstofcel (Battolyser Systems, n.d.; Mangel Raventos, 2023).

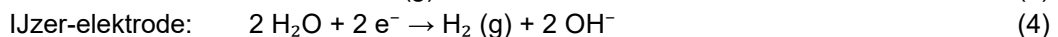
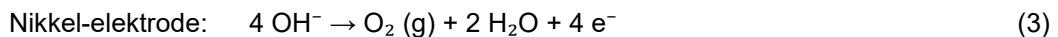
Het werkingsprincipe van de battolyser is te verdelen in de volgende drie processen (Möller-Gulland & Mulder, 2024) :

1. Laden: groene stroom wordt gebruikt om de nikkel-ijzerbatterij op te laden volgens onderstaande halfreacties:

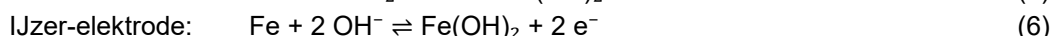
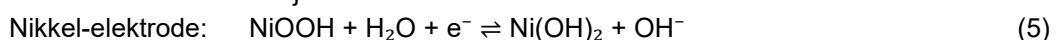


De OH^- -ionen worden getransporteerd door de alkalische KOH-elektrolytoplossing en passeren een membraan die de twee elektrodes van elkaar gescheiden houdt. Tijdens het laden worden ijzer (Fe) en nikkeloxyhydroxide (NiOOH) gevormd. Dit zijn katalysatoren voor de vorming van respectievelijk waterstof en zuurstof tijdens elektrolyse.

2. Elektrolyse ('overladen'): als de batterij vol is, gaat de battolyser automatisch verder als een electrolyser waarbij waterstof en zuurstof worden gevormd. In het alkalisch milieu vinden de volgende halfreacties plaats aan de elektrodes:



3. Ontladen: op het moment dat er stroom nodig is, kan de nikkel-ijzerbatterij ontladen worden, waarbij halfreacties (1) en (2) in omgekeerde volgorde plaatsvinden. Daardoor stromen elektronen van de ijzerelektrode naar de nikkelelektrode en leveren zo elektriciteit:



De battolyser is ontwikkeld aan de Technische Universiteit Delft en inmiddels getest in experimentele opstellingen en in pilotopstellingen. Momenteel wordt zij verder doorontwikkeld richting praktische toepassing. Er wordt onderzoek gedaan naar de eigenschappen van de elektrode, de samenstelling van de elektrolyt, de gasafvoer tijdens elektrolyse en de invloed

van additieven om de efficiëntie en betrouwbaarheid van battolysers te vergroten en opschaaling mogelijk te maken (Mangel Raventos, 2023; TU Delft, 2024).



Figuur 1.1 Battolyser op industriële schaal bij RWE Magnum energiecentrale (Foto: (RWE, 2023))

1.2 Veiligheidsrisico's battolyser

De veiligheidsrisico's van een battolyser zijn een combinatie van de risico's die horen bij een electrolyser en de risico's die samenhangen met een batterij. Door het voortdurend (over)laden en ontladen van de battolyser verouderen elektrodes en verandert de samenstelling van de elektrolyt. Dit heeft invloed op de capaciteit en efficiëntie van de battolyser. Deze risico's zijn dus vooral procestechnisch van aard (Abarro et al., 2023). Als de elektrolyt vrijkomt door bijvoorbeeld schade van buitenaf, kunnen mensen brandwonden oplopen als zij in contact komen met de basische vloeistof (Carl Roth, 2024).

Bij een battolyser is een ongecontroleerde exotherme reactie ('thermal runaway) niet mogelijk, omdat het werkingsprincipe anders is dan dat van lithium-ion batterijen. Een battolyser maakt gebruik van een waterige, niet-brandbare KOH-elektrolyt, waardoor een thermal runaway niet kan optreden. Bij 'overladen' wordt de extra elektrische energie functioneel benut voor elektrolyse, waarbij water wordt gesplitst in waterstof en zuurstof (Iranzo & Mulder, 2021).

Waterstof is een zeer ontvlambaar gas met een breed ontvlambaarheidsgebied van 4 – 75 vol.% in lucht. In een omgeving met zuurstof in plaats van lucht is het ontvlambaarheidsgebied nog groter, namelijk 4 – 94 vol.%. Tijdens elektrolyse bestaat het risico dat de gevormde waterstof en zuurstof met elkaar mengen, waardoor een zeer brandbaar en explosief gasmengsel kan ontstaan. Dit kan zowel in de cellen van de electrolyser gebeuren als daarbuiten, bijvoorbeeld in gasafscheiders en koelers (PGS 40, 2026). Daarnaast bestaat het

risico dat waterstof vrijkomt, bijvoorbeeld bij de gasafscheider, bij aansluitingen en bij de opslag van waterstof. Ontsteking van vrijgekomen waterstof kan leiden tot een wolkbrand, een fakkelbrand of een explosie (Vyazmina et al., 2025).

1.3 Risicobeheersing

De procestechnische risico's van een battolyser kunnen worden beperkt door het bewaken van laad- en ontladcondities en het monitoren van bedrijfsparameters zoals spanning, temperatuur en rendement. De risico's bij het vrijkomen van de basische elektrolyt kunnen worden beperkt door een robuuste uitvoering van de battolyser, lekdichte systemen en duidelijke onderhoudsprocedures (Abarro et al., 2023). Het risico op letsel wordt verminderd door het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen en de aanwezigheid van oog- en nooddouchevoorzieningen (Carl Roth, 2024).

Het mengen van waterstof en zuurstof kan beperkt worden door een robuust ontwerp van de elektrolyser, het beheersen van druk- en debietverschillen over het membraan, monitoring van membraandegradatie en het toepassen van instrumentele beveiligingen zoals gasanalyse en automatische uitschakeling. Het vrijkomen van waterstof kan beperkt worden door gebruik te maken van geschikte materialen, door het aantal verbindingen te beperken en door goed onderhoud te plegen. De gevolgen van het vrijkomen van waterstof worden beperkt door vroegtijdige detectie van lekkages, het toepassen van effectieve ventilatie, het beheersen van ontstekingsbronnen (ATEX-zonering) en door waterstof gecontroleerd af te blazen (NEN, 2025; PGS 40, 2026).

1.4 Omgevingsveiligheid

De risico's voor de omgeving worden bij een battolyser voornamelijk veroorzaakt door het onbedoeld vrijkomen van waterstof, omdat de effecten hiervan verder reiken dan bij het vrijkomen van de elektrolytoplossing.

Als waterstof direct ontsteekt, ontstaat een fakkelbrand. De lengte van de fakkel wordt bepaald door de druk waarmee waterstof vrijkomt en door de grootte van de uitstroomopening. De duur van de fakkelbrand wordt bepaald door de inhoud van het waterstofbevattende systeem. Als waterstof vertraagd ontsteekt, kan er een wolkbrand zonder overdrukeffecten ontstaan of een explosie met overdrukeffecten. De grootte van de wolkbrand en de explosie zijn afhankelijk van de hoeveelheid waterstof die vrijkomt en van het tijdstip waarop de wolk ontsteekt (Spoelstra, 2020).

De overdruk van een explosie reikt verder dan de warmtestraling van een wolkbrand en van een fakkelbrand. Bij een fakkelbrand gaat het om afstanden van 10 à 20 m, terwijl het bij een explosie om afstanden tot zo'n 40 m gaat (WVIP, 2023).

1.5 Incidentbestrijding

Het beperken van de gevolgen van het vrijkomen van waterstof begint bij het vroegtijdig detecteren van afwijkingen en door de battolyser in een veilige toestand te brengen, waarbij de

toevoer van waterstof wordt gestopt. Bij ontsteking van waterstof kunnen hulpdiensten doorgaans weinig doen gezien de snelheid waarmee een wolkbrand, fakkelbrand en explosie zich ontwikkelen. De inzet van brandweer richt zich dan vooral op het blussen van secundaire branden en het voorkomen van escalatie. Als waterstof niet ontstoken is, zullen hulpdiensten afstand houden, totdat zeker is dat toevoer van waterstof is gestopt en het gas voldoende verdund is (Spoelstra, 2020). Noodprocedures en het oefenen daarvan dragen eraan bij dat medewerkers en hulpdiensten in noodsituaties snel en gecoördineerd kunnen handelen.

2 Liquid air energy storage (LAES)

2.1 Wat is LAES?

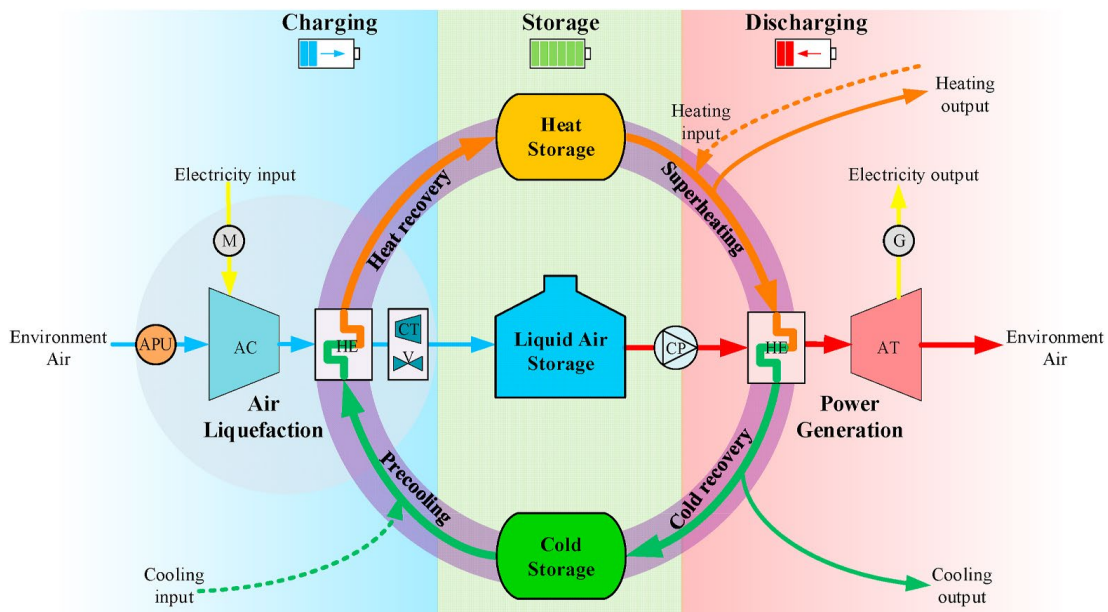
LAES (Liquid Air Energy Storage) is een vorm van energieopslag waarbij omgevingslucht wordt samengeperst en sterk gekoeld, zodat deze vloeibaar wordt. De vloeibare lucht wordt opgeslagen en kan later weer worden benut om energie op te wekken. Omdat vloeibare lucht extreem koud (cryogeen)² is, wordt LAES ook wel aangeduid als een cryogene batterij. In Figuur 2.1 op de volgende pagina wordt het werkingsprincipe weergegeven, onderverdeeld in drie fasen (She et al., 2025):

1. Laadfase (blauw): Omgevingslucht wordt na zuivering in een luchtzuiveringsunit (APU) gecomprimeerd in een luchtcompressor (AC) die met hernieuwbaar opgewekte elektriciteit is aangedreven door een elektromotor (M). De hierbij vrijkomende compressiewarmte wordt via een warmtewisselaar (HE) overgedragen aan een thermisch medium³ en (tijdelijk) opgeslagen. Vervolgens wordt een deel van de samengeperste lucht geëxpandeerd in een koudeturbine (CT), waardoor de temperatuur van deze lucht verder daalt. Deze koude luchtstroom wordt gebruikt om de resterende lucht verder af te koelen tot het condensatiepunt, waardoor minder elektriciteit nodig is om de lucht vloeibaar te maken.
2. Opslagfase (groen): De vloeibare lucht wordt opgeslagen in een geïsoleerde cryogene tank. Afhankelijk van de systeemconfiguratie kunnen zowel de eerder opgeslagen compressiewarmte als de in fase 3 gegenereerde koude worden opgeslagen in afzonderlijke opslagunits (zie punt 3).
3. Ontlaadfase (rood): De vloeibare lucht wordt met behulp van een cryopomp (CP) naar een hogere druk gebracht en vervolgens verdampt met behulp van eerder opgeslagen compressiewarmte. De gasvormige lucht expandeert daarna in een lucht turbine (AT), die een generator (G) aandrijft om elektriciteit op te wekken. De koude die vrijkomt bij het verdampen wordt via een warmtewisselaar (HE) overgedragen aan een thermisch medium⁴ en kan worden opgeslagen voor hergebruik.

² Lucht wordt vloeibaar bij -194 °C.

³ Thermisch medium dat warmte-energie in zich opneemt (opslaat), transporteert en later weer kan afgeven.

⁴ Thermisch medium dat door onttrekking van warmte op lage temperatuur is gebracht en die lage temperatuur (koude) transporteert.



Figuur 2.1 Werkingsprincipe LAES (She et al., 2025)

Onderzoek naar LAES richt zich vooral op het verhogen van de efficiëntie en het verlagen van de systeemkosten. Daarbij spelen verbeteringen in koude- en warmterugwinning een centrale rol, omdat deze processen sterk bepalen hoeveel energie tijdens het ontladen daadwerkelijk kan worden teruggewonnen. Daarnaast groeit de aandacht voor hybride configuraties waarbij LAES wordt gekoppeld aan externe warmte- of koudebronnen, zoals industriële processen, om het rendement te verhogen. Deze innovaties moeten LAES concurrerder maken binnen de energiemarkt (She et al., 2025).

2.2 Veiligheidsrisico's LAES

Vloeibare lucht bestaat uit een mengsel van vloeibaar stikstof en vloeibare zuurstof⁵ (GML, n.d.). Het koude mengsel is niet toxisch en niet brandbaar, maar kan door de lage temperatuur en door expansie bij onbedoelde verdamping risico's met zich meebrengen (LAEN, n.d.-a; Rabi et al., 2023). Vloeibare zuurstof brengt daarnaast nog een extra risico met zich mee, namelijk het brandbevorderend vermogen ervan (LAEN, n.d.-a). In deze paragraaf worden de veiligheidsrisico's van vloeibare lucht toegelicht.

2.2.1 Lage temperatuur

Vloeibare lucht van -194 °C kan bij blootstelling direct gezondheidsschade veroorzaken. Contact met vloeibare lucht, koude dampen of sterk afgekoelde oppervlakken kan leiden tot koude brandwonden en bevriezing van huid en weefsel. Inademing van koude dampen kan schadelijk zijn voor de luchtwegen en longen. Daarnaast kan onderkoeling optreden, afhankelijk van de blootstellingsduur en omstandigheden (LAEN, n.d.-a, n.d.-b).

2.2.2 Drukopbouw

Bij opwarming verdampen cryogene vloeistoffen snel en zetten uit tot ongeveer 700–800 keer hun vloeibare volume. Deze verdamping treedt ook tijdens opslag en stilstand continu op door warmtelek uit de omgeving. In vaten, leidingen of andere systeemdelen kan daar-

⁵ 21% zuurstof, 78% stikstof, 0,9% argon en 0,1% CO₂, methaan en stikstofdioxides.

door overdruk ontstaan als er geen sprake is van voldoende ontluchting en drukontlasting. Dit risico is inherent aan cryogene opslag en processen en kan in ernstige gevallen leiden tot lekkage, falen van leidingen, bezwijken van appendages en schade aan de opslagtank (LAEN, n.d.-a).

2.2.3 Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE)

Een BLEVE is een explosie die kan optreden wanneer een drukvat met een vloeistof bezwijkt, terwijl die vloeistof door de hoge druk op een temperatuur boven het normale kookpunt wordt gehouden. Door de plotselinge drukverlaging raakt de vloeistof oververhit ten opzichte van de nieuwe druk, waardoor in zeer korte tijd grootschalige dampvorming optreedt en het explosieve effect verder toeneemt. Een BLEVE kan optreden bij vloeibare lucht, maar de gevolgen daarvan zijn doorgaans minder ernstig dan bij brandbare stoffen, omdat bij vloeibare lucht geen verbranding optreedt (Air Products, 2014; EIGA, n.d.-a; LAEN, n.d.-a).

2.2.4 Materiaalstructuur en integriteit

De combinatie van cryogene temperaturen en hoge drukken kan materiaaleigenschappen nadelig beïnvloeden. Materialen die bij omgevingstemperatuur taai zijn, kunnen bij lage temperaturen bros worden. Dit vergroot de kans op scheurvorming, mechanisch falen en lekkages (EIGA, n.d.-a; Rabi et al., 2023).

2.2.5 Zuurstoftekort

Verdamping van vloeibare lucht kan leiden tot zuurstofverdringing. Als vloeibare lucht verdamppt, ontstaat een grote hoeveelheid koud gas dat zwaarder is dan de omgevingslucht met dezelfde samenstelling. Als dit in een besloten of slecht geventileerde ruimte gebeurt, kan laag bij de grond sprake zijn van een gevaarlijk laag zuurstofniveau, met kans op verstikking als gevolg (Air Products, 2014; LAEN, n.d.-a).

2.2.6 Zuurstofverrijking

Vloeibare stikstof verdamppt gemakkelijker dan vloeibare zuurstof. Daardoor verdamppt uit vloeibare lucht relatief meer stikstof dan zuurstof, waardoor de achterblijvende vloeibare lucht geleidelijk zuurstofrijker wordt. Zuurstofverrijking kan daarnaast optreden doordat zuurstof uit de omgevingslucht condenseert op sterk afgekoelde, niet-geïsoleerde oppervlakken, zoals leidingen en appendages. Onder ongunstige omstandigheden kan het zuurstofgehalte in de vloeibare fase hierdoor oplopen tot ongeveer 50 %. Een verhoogd zuurstofgehalte vergroot het brandgevaar aanzienlijk: veel brandbare materialen kunnen in zuurstofrijke omstandigheden eerder en intensiever branden dan in normale lucht (Air Products, 2014; LAEN, n.d.-a; Rabi et al., 2023).

2.3 Risicobeheersing

Deze paragraaf beschrijft maatregelen om de in paragraaf 2.2 genoemde risico's te beperken. De nadruk ligt echter bij vloeibare zuurstof vanwege het brandbevorderend vermogen van zuurstof (LAEN, n.d.-a).

2.3.1 Lage temperatuur

- > Thermische isolatie van installaties en onderdelen.
- > Dragen van beschermende kleding in nabijheid van de installatie.

- > Dragen van niet-absorberende handschoenen, bijvoorbeeld van leer of pvc, bij aanraking van het systeem of onderdelen die in contact staan met vloeibare lucht of koude damp.
- > Dragen van een veiligheidsbril of gelaatsschermbij de installatie (Air Products, 2014; LAEN, n.d.-a).

2.3.2 Drukopbouw

- > Gebruik van drukontlastingsvoorzieningen.
- > Beschermen van ontluuchtingsleidingen tegen ijsvorming en verstopping.
- > Voorkomen van lekkage van cryogene vloeistof naar kleine of afgesloten ruimten.
- > Inspectie van isolatie op ijs- of condensvorming en op snelle drukstijging.
- > Vermijden van contact tussen cryogene vloeistoffen en water of andere vloeistoffen (Air Products, 2014; LAEN, n.d.-a).

2.3.3 BLEVE

- > Gebruik van drukontlastingsvoorzieningen.
- > Gebruik van tanks met voldoende brandwerendheid.
- > Vermijden van brandbare materialen in de omgeving van cryogene opslagtanks (LAEN, n.d.-a).

2.3.4 Materiaalstructuur en integriteit

- > Gebruik van materialen die geschikt zijn voor cryogene temperaturen. Vermijd materialen die bij lage temperaturen bros worden of onder spanning kunnen breken.
- > Rekening houden met mechanische eigenschappen en thermisch gedrag over het volledige temperatuurbereik (LAEN, n.d.-b).

2.3.5 Zuurstoftekort (LAEN, n.d.-b)

- > Zorgen voor voldoende ventilatie in ruimten waar met cryogene gassen wordt gewerkt.
- > Gebruik van zuurstofmeters (Air Products, 2014).

2.3.6 Zuurstofverrijking

- > Voorkomen dat zuurstofrijke stromen in contact komen met brandbare stoffen.
- > Gebruik van goed geïsoleerde systemen.
- > Monitoren van het zuurstofgehalte in vloeibare lucht.
- > Monitoren van het zuurstofgehalte in besloten ruimten (Air Products, 2014; LAEN, n.d.-a; Rabi et al., 2023).

2.4 Omgevingsveiligheid

Hoewel vloeibare lucht niet brandbaar en niet toxisch is, hebben incidenten met cryogene opslag van vloeibare lucht effect op de omgeving. Bij het vrijkomen of afblazen van cryogene gassen kunnen zuurstofarme of juist zuurstofverrijkte atmosferen ontstaan, koude gaswolken en in uitzonderlijke gevallen drukeffecten bij het falen van een drukhoudend systeem. Ook kan bij het vrijkomen van cryogene vloeistoffen en dampen mistvorming optreden, doordat vocht uit de lucht condenseert. De omvang van de effecten hangt onder meer af van de opgeslagen hoeveelheid en de situering van de installatie. Daarom moet bij cryogene opslag nagedacht worden over de locatie van ontluuchtingen, veiligheidskleppen en afblaaspunten, en rekening worden gehouden met de aanwezigheid van personen en installaties in de

omgeving en met de bereikbaarheid van de installatie voor hulpdiensten (EIGA, n.d.-b; PGS, 2026b).

2.5 Incidentbestrijding

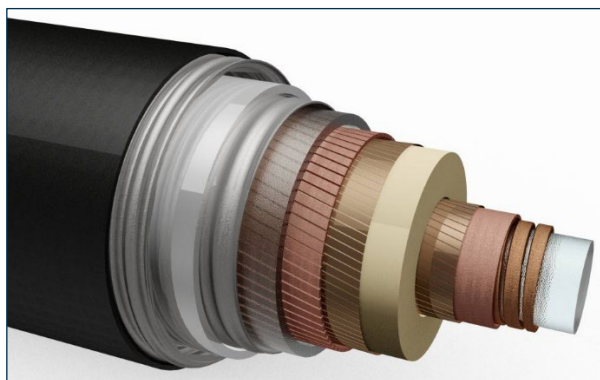
Bij LAES wordt de incidentbestrijding voornamelijk bepaald door de aanwezigheid van cryogene vloeistoffen. Voor cryogene opslag en het veilig omgaan met cryogene gassen bestaan al richtlijnen voor incidentbestrijding (EIGA, n.d.-b; PGS, 2026b). Incidentbestrijding is gericht op het stoppen van de toevoer van cryogene vloeistof of verdampt gas, waarbij voorkomen moet worden dat drukontlastingsvoorzieningen verstopt raken. Ook moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid van zuurstoftekort (Air Products, 2014). Incidentbestrijding kan bemoeilijkt worden door verminderd zicht, doordat vocht in lucht condenseert en een wolk vormt.

3 Supergeleidende kabels

3.1 Wat zijn supergeleidende kabels?

In supergeleidende kabels worden materialen gebruikt die onder hun kritische temperatuur geen weerstandsverliezen kennen en daardoor grotere hoeveelheden elektriciteit transporteren dan conventionele elektriciteitskabels. Dit biedt mogelijkheden voor compactere kabelontwerpen. Supergeleidende kabels moeten op cryogene temperatuur worden gehouden (Noe et al., 2026; Thomas et al., 2016).

Figuur 3.1 toont de opbouw van een supergeleidende kabel. Deze bestaat uit supergeleidende kernen en isolerende lagen, omgeven door een cryogene huls waarin vloeibare stikstof circuleert. De thermische isolatie en de buitenmantel moeten ervoor zorgen dat de lage bedrijfstemperatuur die nodig is voor de supergeleiding, gehandhaafd blijft (Xie et al., 2020).



Figuur 3.1 Grafische weergave van een supergeleidende kabel (Foto: Karlsruhe Institute of Technology (KIT))

Een supergeleidende kabel maakt onderdeel uit van een systeem dat bestaat uit kabelsegmenten, verbindingen, eindsluitingen, een koelinstallatie en een monitoringsysteem. Vloeibare stikstof circuleert door het systeem om de vereiste cryogene bedrijfstemperatuur te handhaven, terwijl temperatuur- en druksensoren de bedrijfscondities bewaken. Het functioneren van supergeleidende kabels hangt dus samen met de aanwezigheid van een continu en gecontroleerd koelsysteem (Xie et al., 2020).

Supergeleidende kabels worden gezien als een mogelijke oplossing voor netverzwaren op locaties waar de beschikbare ruimte beperkt is, zoals in stedelijke gebieden. In dergelijke gebieden kan de compacte uitvoering een voordeel bieden ten opzichte van conventionele boven- en ondergrondse hoogvermogenskabels die meer ruimte nodig hebben. Daarnaast worden toepassingen onderzocht voor grootschalig elektriciteitstransport, industriële installaties, datacenters, spoorwegsysteem en luchtvaart (Kooiman & van Tuyll, 2025; Noe et al., 2026; Thomas et al., 2016).



Figuur 3.2 Test-opstelling van een supergeleidende kabel in het project SuperLink (Foto: NKT 2024)

Voordelen van supergeleidende kabels zijn dat er geen elektromagnetisch veld ontstaat en dat er slechts in beperkte mate sprake is van warmte-uitwisseling met de omgeving. Het nadeel is echter dat supergeleidende kabels afhankelijk zijn van koeling, wat gevolgen heeft voor de complexiteit, betrouwbaarheid en kosten van het systeem (Kooiman & van Tuyll, 2025; Noe et al., 2026; Thomas et al., 2016).

De ontwikkeling van de technologie richt zich vooral op het verbeteren van de technische en economische haalbaarheid. Daarbij ligt de nadruk onder andere op het optimaliseren van cryogene koelsystemen en cryostaten. Daarnaast wordt gewerkt aan kabelontwerpen die nog compacter en flexibeler zijn en tegelijkertijd een hogere transportcapaciteit mogelijk maken (Noe et al., 2026).

3.2 Veiligheidsrisico's supergeleidende kabels

3.2.1 Afhankelijkheid van koelsysteem

Supergeleidende kabels zijn afhankelijk van een koelsysteem. De betrouwbaarheid van dit koelsysteem bepaalt in hoge mate de betrouwbaarheid van het kabelsysteem als geheel. Verstoring of uitval van de koeling kan leiden tot uitval van de kabel. Uit de praktijk blijkt dat lekkages in kabels of terminals en onvoldoende betrouwbare koeling en thermische isolatie aandachtspunten zijn voor een betrouwbare werking. Daarbij moet het cryogene medium tijdens het in bedrijf zijn binnen de vereiste bedrijfscondities blijven en mag het niet ongewenst overgaan in de gasfase. Ook vraagt de cryogene installatie om een betrouwbare hulpvoeding om temperatuur en druk van het koelmiddel over de lengte van het systeem binnen de vereiste grenzen te houden (Noe et al., 2026; Scarlet, 2023; Thomas et al., 2016).

3.2.2 Quench en plaatselijke oververhitting

Een ander risico is het verlies van de supergeleidende eigenschap op een bepaald punt in de kabel. Dit wordt een quench genoemd. Op dat moment ontstaat op die plek elektrische weerstand, waardoor warmteontwikkeling optreedt. Omdat die warmte zich niet altijd direct over een groter deel van de kabel verspreidt, kan plaatselijke oververhitting ontstaan. Dit kan leiden tot beschadiging van de kabel (Noe et al., 2026; Scarlet, 2023).

3.2.3 Elektrische isolatie

Naarmate de spanning hoger wordt, nemen ook de eisen aan de elektrische isolatie van supergeleidende kabels toe. Zonder adequate isolatie en een goede verdeling van het elektrische veld kan de isolatie plaatselijk beschadigen. Bij langere en grootschalige toepassingen vormt juist de combinatie van hoogspanningsisolatie en thermische isolatie een belangrijke ontwerpuitdaging. Daarnaast moet de isolatie ook bestand zijn tegen verhoogde spanningsbelasting bij aardfouten (Noe et al., 2026; Scarlet, 2023; Thomas et al., 2016).

3.2.4 Beheersing van temperatuur en druk over de kabellengte

Bij supergeleidende kabels veranderen temperatuur en druk over de lengte van het kabelsysteem. Wanneer deze veranderingen onvoldoende worden beheerst, kan de kabel buiten de vereiste bedrijfscondities raken. Daardoor kan de supergeleidende werking plaatselijk verloren gaan of kan de betrouwbaarheid van het systeem afnemen. De lengte van een supergeleidende kabel wordt daarom beperkt door de mate waarin temperatuur en druk over het tracé beheerst kunnen worden. Bij langere afstanden kunnen tussenkoelstations nodig zijn om de supergeleidende werking te waarborgen (Noe et al., 2026).

3.2.5 Cryogene risico's

Het gebruik van cryogene stoffen brengt risico's met zich mee die zijn omschreven in paragraaf 2.2.1.

3.3 Risicobeheersing

3.3.1 Monitoring en aansturing

Voor een veilige inzet bij incidenten met supergeleidende kabelsystemen is het van belang dat hulpdiensten het systeem spanningsloos kunnen maken, of laten maken door de netbeheerder of andere bevoegde beheerder. Daarbij moet niet alleen de elektrische voeding worden uitgeschakeld, maar moet ook duidelijk zijn of het systeem volledig is ontladen en thermisch in een stabiele toestand is gebracht. Risicobeheersing vraagt daarom om vastgelegde uitschakelprocedures, duidelijke verantwoordelijkheidsverdeling, 24/7 bereikbaarheid van deskundige operators en een voor de hulpdiensten direct beschikbare bevestiging van de veilige toestand van het systeem. Daarnaast is het wenselijk dat in het ontwerp voorzieningen zijn opgenomen waarmee delen van het systeem selectief buiten bedrijf kunnen worden gesteld en dat hulpdiensten beschikken over actuele informatie over de locatie van afsluiters, aardingspunten, koelinstallaties en overige kritieke componenten. Hierdoor kan tijdens een incident sneller worden beoordeeld welke gevaren nog aanwezig zijn en onder welke voorwaarden veilig kan worden opgetreden.

3.3.2 Herkenbaarheid van infrastructuur

Voor een veilige incidentbestrijding is het van belang dat voor hulpdiensten direct zichtbaar is waar zich kritieke onderdelen van het supergeleidende kabelsysteem bevinden, zoals koelstations, afsluiters en overige systeemcomponenten. Ook moet duidelijk zijn welk

koelmiddel wordt toegepast, omdat dit bepalend is voor de aard van de risico's en de benodigde veiligheidsmaatregelen. Dit vraagt om eenduidige markering en actuele informatievoorziening voor de hulpdiensten.

3.4 Omgevingsveiligheid

Omdat supergeleidende kabels compact kunnen worden uitgevoerd en buiten de kabel nagenoeg geen elektromagnetisch veld optreedt, zijn de effecten op de directe omgeving beperkt. Ook treedt geen opwarming van de bodem op zoals bij conventionele ondergrondse kabels (Thomas et al., 2016). Daar staat tegenover dat supergeleidende kabelsystemen aanvullende cryogene infrastructuur vereisen, zoals cryostatens, leidingen, pompen, tanks en koelinstallaties. Bij langere tracés kunnen daar tussenkoelstations en retourleidingen bijkomen.

Voor een veilige toepassing in de openbare ruimte zijn een robuust ontwerp, betrouwbare koeling, goede thermische isolatie, beheersing van temperatuur en druk, adequate elektrische isolatie en een duidelijke inpassing van systeemdelen in de omgeving van belang. Relevante aandachtspunten zijn onder meer de aanwezigheid van personen, de positionering van andere energie-infrastructuur en de bereikbaarheid van de installatie voor hulpdiensten.

3.5 Incidentbestrijding

Op basis van de in paragraaf 3.2 weergegeven risico's nemen wij aan dat de inzet van hulpdiensten zich bij incidenten met supergeleidende kabelsystemen in eerste instantie richt op afstand houden en het veiligstellen en gecontroleerd buiten bedrijf stellen van de kabel en het koelsysteem. Zolang niet zeker is of het systeem spanningsloos en thermisch stabiel is, ligt een terughoudende benadering voor de hand. De inzet zal in sterke mate afhankelijk zijn van de mogelijkheid om het systeem via ingebouwde beveiligingen, monitoring en beheersystemen in een veilige toestand te brengen.

Omdat supergeleidende kabels afhankelijk zijn van actieve koeling, kunnen bij incidenten verstoringen van het koelsysteem, cryogene lekkages en verlies van de vereiste bedrijfscondities optreden. Dit kan leiden tot plaatselijke oververhitting, beschadiging van de isolatie en uitval van de kabel. Bij grotere lekkages bestaat bovendien het risico dat cryogene koelmiddelen zuurstof verdringen en verstikkingsgevaar veroorzaken. Daarnaast moet rekening worden gehouden met de mogelijk aanwezigheid van restlading, waardoor gecontroleerde uitschakeling en aarding van het systeem voorwaarden zijn voor veilig optreden. Voor effectief en veilig optreden is het van belang dat hulpdiensten vooraf weten waar zich kabeldelen, koelinstallaties en overige systeemcomponenten bevinden (Scarlet, 2024; Thomas et al., 2016).

4 Draadloos opladen

4.1 Wat is draadloos opladen?

Draadloos opladen van elektrische voertuigen vindt plaats door middel van inductieve energieoverdracht tussen een zenderspoel in de laadinfrastructuur en een ontvangerspoel in het voertuig. Elektrische energie wordt daarbij zonder fysieke kabelverbinding van de laadinfrastructuur naar het voertuig overgebracht (Kooiman & van Tuyll, 2025).

Een spoel is een opgerolde geleidende draad. Wanneer er elektrische stroom door een spoel loopt, ontstaat een magnetisch veld. Als door de spoel wisselstroom loopt, veranderen de richting en sterkte van die stroom voortdurend. Daardoor verandert ook het magnetische veld rond de spoel continu. Wanneer dit veranderende magnetische veld een andere spoel bereikt, wordt daarin elektrische spanning opgewekt (All about circuits, n.d.).

Het werkingsprincipe van draadloos opladen bestaat uit drie stappen (Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020):

1. Omzetting aan de infrastructuurzijde: Elektriciteit uit het net wordt omgezet in hoogfrequente wisselstroom. Deze voedt een zenderspoel in of op de laadinfrastructuur, die een magnetisch veld opwekt.
2. Draadloze energieoverdracht: Het opgewekte magnetische veld koppelt met een ontvangerspoel in het voertuig. In deze spoel wordt elektrische spanning opgewekt.
3. Omzetting aan de voertuigzijde: De ontvangen hoogfrequente energie wordt in het voertuig weer omgezet naar een bruikbare elektrische vorm om de tractiebatterij op te laden.



Figuur 4.1 Draadloos opladen van voertuig (Foto: Shutterstock)

Inductief laden kan zowel stationair als dynamisch plaatsvinden. Bij stationair laden gebeurt de energieoverdracht op vaste locaties, zoals parkeerplaatsen. Bij dynamisch laden wordt tijdens het rijden geladen via inductiespoelen die in of onder het wegdek zijn aangebracht. Dynamisch laden kan de benodigde accucapaciteit verkleinen, waardoor kleinere en lichtere batterijen mogelijk worden. Daar staat tegenover dat de techniek gepaard gaat met hogere kosten en gevoeligheid voor efficiëntieverlies, bijvoorbeeld als gevolg van uitlijnfouten en de afstand tussen zender- en ontvangerspoel (Kooiman & van Tuyll, 2025; Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020).



Figuur 4.2 Wegdeel voor het draadloos opladen van voertuigen (Foto: Shutterstock)

4.2 Veiligheidsrisico's draadloos opladen

Doordat bij inductief laden geen fysieke kabels of blootliggende geleiders aanwezig zijn, worden risico's zoals vlambogen en directe blootstelling aan geleidende delen vermeden. Inductief laden introduceert echter ook eigen veiligheidsvraagstukken die in deze paragraaf worden toegelicht (Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020).

4.2.1 Elektromagnetische velden

Inductieve laadsystemen dragen elektrische energie over via magnetische velden. Hierbij kunnen sterke elektromagnetische velden rond het systeem ontstaan. Een deel van de magnetische flux kan buiten het beoogde overdrachtstraject terechtkomen en als lekveld in de omgeving aanwezig zijn. Zonder beheersmaatregelen kunnen deze lekvelen de blootstellingslimieten overschrijden (ICNIRP, 2020; Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020; SAE, 2016).

4.2.2 Opwarming van metalen

Metalen voorwerpen die zich in of nabij de laadzone bevinden, kunnen energie opnemen en daardoor opwarmen. Daarnaast gaat overdracht van hoog vermogen gepaard met

warmteontwikkeling in het systeem zelf. Hierdoor zijn thermische effecten een aandachtspunt voor veilige toepassing (Elymany et al., 2025; Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020).

4.2.3 Hete systeemzone

Tijdens bedrijf kan zich rond het systeem een hete zone voordoen waarin verhoogde temperaturen optreden. Deze zone kan risico's opleveren voor personen, dieren of objecten die zich in de directe nabijheid van het systeem bevinden (Mohamed et al., 2020).

4.2.4 Uitlijnfouten en systeemprestaties

Voor een goede energieoverdracht is voldoende uitlijning tussen zender- en ontvangerspoel noodzakelijk. Afwijkingen in positie verminderen de koppeling tussen beide spoelen en leiden tot prestatieverlies. Uitlijnfouten zijn daarmee in de eerste plaats een technisch aandachtspunt, maar kunnen ook relevant zijn voor veiligheid wanneer daardoor de hoeveelheid lekvelen of warmteontwikkeling toeneemt (Elymany et al., 2025; Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020).

4.2.5 Interoperabiliteit en standaardisatie

Een aanvullend aandachtspunt betreft de interoperabiliteit⁶ tussen verschillende voertuigen en laadsystemen. Het ontbreken van uniforme standaarden en compatibiliteit tussen systemen kan de veilige en brede toepassing van inductief draadloos laden belemmeren. Voor een verantwoorde uitrol zijn standaardisatie, eenduidige testmethoden en afstemming tussen voertuig- en laadinfrastructuur van belang (Mansour et al., 2026; SAE, 2016).

4.3 Risicobeheersing

Om de risico's van inductief draadloos laden te beperken, zijn maatregelen nodig op het gebied van ontwerp, detectie, beveiliging, normering en herkenbaarheid van infrastructuur (Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020; SAE, 2016).

4.3.1 Monitoring en aansturing

Voor een veilige inzet bij incidenten met draadloze laadsystemen is het van belang dat hulpdiensten het systeem spanningsloos kunnen maken. Risicobeheersing vraagt daarom om vooraf vastgelegde uitschakelprocedures en bij voorkeur 24/7 bereikbaarheid van deskundige operators en een voor de hulpdiensten direct beschikbare bevestiging van de veilige toestand van het systeem. Daarnaast is het wenselijk dat in het ontwerp voorzieningen zijn opgenomen waarmee delen van het systeem selectief buiten bedrijf kunnen worden gesteld en dat hulpdiensten beschikken over actuele informatie over de locatie van afsluiters, aardingspunten, koelinstallaties en overige kritieke componenten. Hierdoor kan tijdens een incident sneller worden beoordeeld welke gevaren nog aanwezig zijn en onder welke voorwaarden veilig kan worden opgetreden.

4.3.2 Elektromagnetische velden

Om elektromagnetische lekvelen te beperken, worden afschermingsmaatregelen toegepast. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen (Elymany et al., 2025; Mohamed et al., 2020):

⁶ Comptabiliteit tussen verschillende toepassingen.

- > Passieve afscherming: toepassing van magnetische en/of geleidende materialen om veldlijnen te sturen en lekvelen te beperken.
- > Actieve afscherming: toepassing van aanvullende windingen die een tegengesteld veld opwekken.
- > Reactieve afscherming: toepassing van een extra resonante spoel die zonder afzonderlijke voeding een compenserend veld opwekt.

Daarnaast worden ferrietmaterialen en aluminium afschermingen toegepast om het magnetische veld binnen het laadpad te houden en de blootstelling in de omgeving te verminderen. De keuze voor een bepaalde afscherming hangt onder meer samen met het vermogensniveau en de vereiste beperking van blootstelling in de omgeving (ICNIRP, 2020; Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020; SAE, 2016).

4.3.3 Opwarming van metalen

Om opwarming van metalen objecten te voorkomen, is detectie van metalen voorwerpen in of nabij de laadzone nodig. Dergelijke detectievoorzieningen moeten voorkomen dat het systeem in bedrijf blijft wanneer zich een ongewenst metalen object binnen het invloedsgebied bevindt. Daarnaast moet het systeem zodanig worden ontworpen dat warmteafvoer van componenten is geborgd en oververhitting wordt beperkt (Elymany et al., 2025; Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020).

4.3.4 Hete systeemzones

Naast detectie van metalen objecten is ook detectie van personen of dieren van belang. Het doel daarvan is te voorkomen dat personen of dieren toegang krijgen tot de zone waarin tijdens bedrijf verhoogde temperaturen kunnen optreden. Voor een veilige toepassing zijn daarom voorzieningen nodig die de aanwezigheid van personen of dieren kunnen waarnemen en zo nodig het systeem uitschakelen of het laadproces stoppen (Mohamed et al., 2020).

4.3.5 Uitlijnfouten

Om prestatieverlies en ongewenste afwijkingen in de energieoverdracht te beperken, moet het systeem voldoende tolerant zijn voor beperkte uitlijnfouten tussen voertuig en laadinfrastructuur. Dit kan worden ondersteund door het ontwerp van het laadpad, communicatiefuncties voor uitlijning en ontwerpkeuzes die de gevoeligheid voor verkeerde uitlijning verminderen (Mansour et al., 2026).

4.3.6 Interoperabiliteit en normering

Voor een veilige en breed toepasbare uitrol van inductief draadloos laden zijn interoperabiliteit en standaardisatie belangrijke randvoorwaarden. Uniforme normen en testmethoden zijn nodig om compatibiliteit tussen voertuigen, laadsystemen en infrastructuur te ondersteunen en om eisen aan veiligheid, elektromagnetische blootstelling en systeemprestaties te borgen (ICNIRP, 2020; Mansour et al., 2026; SAE, 2016).

4.3.7 Herkenbaarheid van infrastructuur

Bij dynamische systemen kunnen delen van de laadinfrastructuur in of onder het wegdek zijn aangebracht. Voor veilig beheer en incidentbestrijding is het daarom wenselijk dat laadzones en relevante systeemdelen herkenbaar en waar mogelijk gemarkeerd zijn. Dit ondersteunt het veilig buiten bedrijf stellen van het systeem en helpt hulpdiensten en beheerders om de aanwezigheid van laadinfrastructuur tijdig te onderkennen.

4.4 Omgevingsveiligheid

Bij draadloos opladen hangen de omgevingsveiligheidsrisico's vooral samen met elektromagnetische velden en thermische effecten in en rond de laadzone. Omdat deze effecten in beginsel lokaal van aard zijn, is het risicopotentieel vooral beperkt tot de directe nabijheid van het systeem. Voor dynamische toepassingen vraagt de integratie van laadinfrastructuur in of onder het wegdek wel extra aandacht, onder meer vanwege de herkenbaarheid van systeemdelen en de nadelige invloed van vocht, vuil en temperatuur op de werking. Een veilige toepassing in de openbare ruimte is daarom afhankelijk van zorgvuldig ontwerp, afscherming, detectievoorzieningen, herkenbare inpassing in infrastructuur en naleving van relevante normen voor elektromagnetische blootstelling, veiligheid en systeemcompatibiliteit (ICNIRP, 2020; Mansour et al., 2026; Mohamed et al., 2020; SAE, 2016).

4.5 Incidentbestrijding

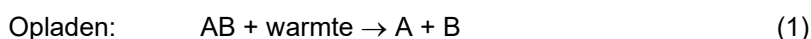
Bij incidenten met draadloze laadsystemen ligt de nadruk op het beëindigen van de energieoverdracht en het gecontroleerd buiten bedrijf stellen van het systeem. Zolang niet zeker is dat het systeem is uitgeschakeld, is terughoudend optreden verstandig. Daarbij staan afstand houden, het afzetten van de laadzone en het voorkomen van blootstelling van personen, dieren en materialen centraal.

Bij dynamische systemen moet rekening worden gehouden met laadinfrastructuur die in of onder het wegdek is aangebracht en daardoor niet direct zichtbaar of bereikbaar is. De mogelijkheden voor incidentbestrijding zijn daarom in sterke mate afhankelijk van de mate waarin het systeem via ingebouwde beveiligingen, detectievoorzieningen en beheerssystemen in een veilige toestand kan worden gebracht.

5 Thermochemische opslag

5.1 Wat is thermochemische opslag?

Thermochemische energieopslag (TCES) is een vorm van thermische energieopslag waarbij gebruik wordt gemaakt van omkeerbare chemische reacties of van absorptie-desorptieprocessen om warmte op te slaan en af te geven:



Stof AB bestaat uit een thermochemische stof A waaraan een stof B (chemisch) gebonden is. Stof A wordt de 'sorbent' genoemd en stof B de 'sorbate'. Tijdens het opladen wordt warmte toegevoerd aan stof AB waardoor deze uiteenvalt in stoffen A en B. De warmte die hiervoor nodig is, is afkomstig van een externe warmtebron zoals restwarmte uit de industrie of zonnewarmte. Op het moment dat warmte nodig is, worden stoffen A en B weer bij elkaar gebracht en wordt stof AB gevormd. Dit wordt 'ontladen' genoemd, omdat bij deze reactiewarmte vrijkomt (Airò Farulla et al., 2020). Omdat het opladen en ontladen vrijwel zonder verlies van energie gebeurt, kan warmte met behulp van deze techniek langdurig en compact worden bewaard.

Er zijn twee vormen van thermochemische opslag (Kwasi-Effaha & Okpako, 2025):

- > Bij sorptie hecht een gas of een damp zich aan het oppervlak van een thermochemische stof (adsorptie) of wordt erin opgenomen (absorptie). Voorbeelden van thermochemische stoffen die hiervoor gebruikt worden, zijn:
 - Adsorptie: zeolieten⁷ en metaal-organische raamwerken (MOF)⁸: hierbij wordt waterdamp bij lage temperaturen geadsorbeerd aan de binnenoppervlakken van deze materialen en bij hogere temperaturen weer afgestaan.
 - Absorptie: gehydrateerde zouten, bijvoorbeeld gehydrateerd magnesiumsulfaat:
$$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O} + \text{warmte} \rightarrow \text{MgSO}_4 + 7 \text{H}_2\text{O}$$
- > Bij een chemische reactie of een redoxreactie reageert een thermochemische stof met een gas of vloeistof en worden andere stoffen gevormd. Voorbeelden hiervan zijn:
 - Metaaloxiden, bijvoorbeeld magnesiumhydroxide:
$$\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{warmte} \rightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$$
 - Carbonaten, bijvoorbeeld calciumcarbonaat:
$$\text{CaCO}_3 + \text{warmte} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$$

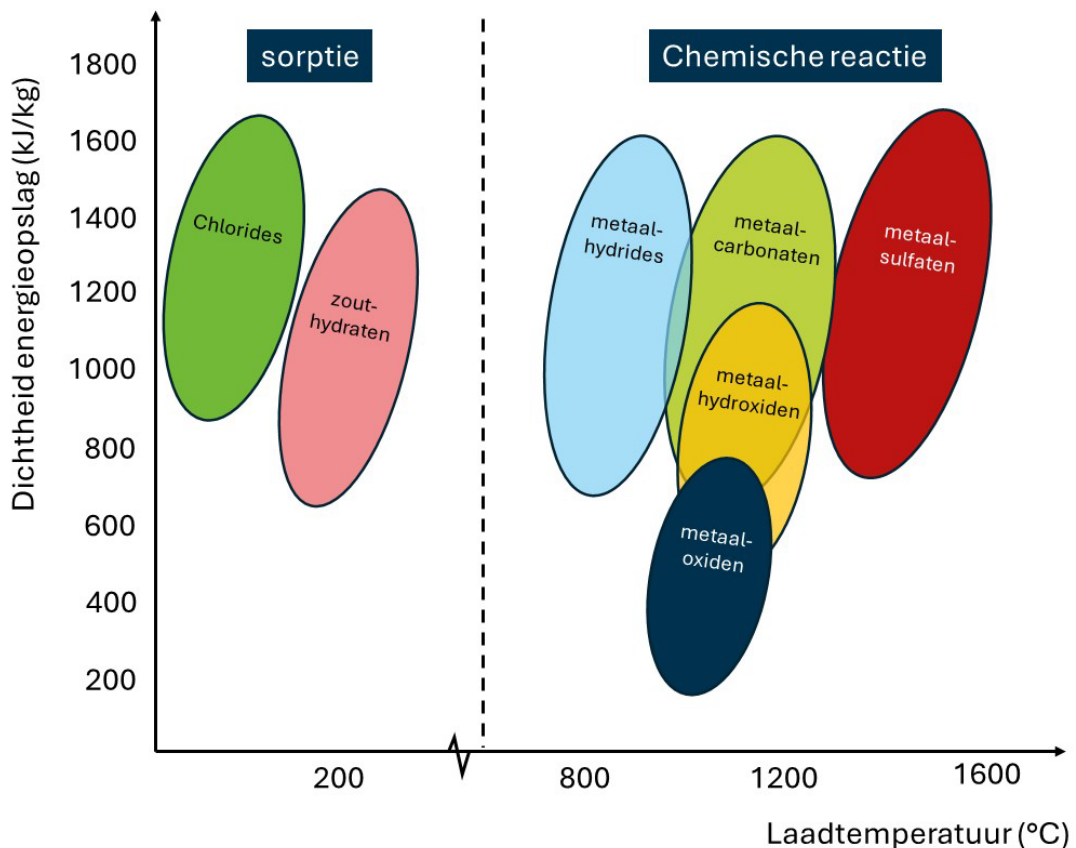
⁷ Zeolieten zijn mineralen die veel water kunnen opnemen [An Overview of Zeolites: From Historical Background to Diverse Applications | MDPI](#).

⁸ Metaal-organische raamwerken (in het Engels metal-organic frameworks (MOF)) zijn poreuze structuren met een zeer groot inwendig oppervlak. Ze bestaan uit metaalionen of metaalclusters en organische moleculen ('linkers'); deze laatste houden de structuur bij elkaar. https://www.ict.fraunhofer.de/content/dam/ict/en/documents/media/em/EM_Metal_organic_frameworks_V01_en.pdf

Thermochemische energieopslag wordt als veelbelovend gezien, omdat er veel energie mee opgeslagen kan worden zonder noemenswaardige energieverliezen, de techniek geschikt is voor seizoensopslag en omdat ze weinig ruimte in beslag neemt (Padamurthy et al., 2025). Nadelen zijn er echter ook en hebben betrekking op de gebruikte systemen, het type thermochemische stof en de kinetiek van de chemische reacties:

- > In open systemen ontstaat materiaalverlies doordat gevormde producten niet worden gerecicleerd. Gesloten systemen hebben als nadeel dat ze complexer en duurder zijn (Padamurthy et al., 2025).
- > De stabiliteit van thermochemische materialen moet verbeterd worden, omdat bij herhaald gebruik processen kunnen optreden als zelf-oplossen (deliquescentie), hydrolyse, volumeveranderingen, barstvorming en samenklontering (Kiyabu et al., 2026):
 - Zouten als CaCl_2 en hydraten als $\text{MgSO}_4 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ worden bij hoge luchtvochtigheid vloeibaar door opname van water (deliquescentie).
 - Hydratatie leidt tot volumetoename waardoor scheurtjes ontstaan en verlies van porositeit optreedt.

Thermochemische opslag is zowel geschikt voor lage temperaturen (rond 40–150 °C) als voor zeer hoge temperaturen (500–1000 °C of meer). Voor lage temperaturen zijn zeolieten en MOF's geschikt, voor middentemperaturen zouthydraten en voor hoge temperaturen carbonaten en oxiden. Figuur 5.1 geeft voor diverse thermochemische stoffen de temperatuurrange aan waarbinnen zij gebruikt worden voor thermochemische opslag.



Figuur 5.1 Diverse thermochemische stoffen en hun energiedichtheden. Figuur gebaseerd op (Yang et al., 2023)

Thermochemische opslag kan gebruikt worden in de gebouwde omgeving (verwarming, warm kraanwater), de industrie (droging, proceswarmte) en in de energiesector (koppeling met power-to-heat-systemen, flexibilisering van warmte-netten) (Airò Farulla et al., 2020). De technologie is echter nog niet ver genoeg ontwikkeld om op grote schaal toegepast te kunnen worden (Kassem & Moscariello, 2025).

5.2 Veiligheidsrisico's thermochemische opslag

Sommige thermochemische stoffen kunnen gevaarlijk zijn als ze lekken of verkeerd worden opgeslagen. De risico's die op kunnen treden, zijn (Kassem & Moscariello, 2025; Kiyabu et al., 2026):

- > Diverse zouten kunnen ongewenste nevenreacties geven, waarbij corrosieve en toxische gassen ontstaan. Zo reageren chloor- en broomzouten met vocht uit de lucht (hydrolyse), waarbij respectievelijk zoutzuur (HCl) en waterstofbromide (HBr) vrijkomen. Als natriumsulfide (Na_2S) reageert met kooldioxide uit de lucht (CO_2), wordt het giftige waterstofsulfide (H_2S) gevormd.
- > Ammoniaten en methanolaten geven bij opname van warmte respectievelijk ammoniak (NH_3) en methanol (CH_3OH). Deze stoffen zijn toxisch en brandbaar.

5.3 Risicobeheersing

De risico's van thermochemische stoffen kunnen op diverse manieren beheerst worden. Enkele belangrijke maatregelen zijn (Kiyabu et al., 2026):

- > Het vermijden van thermochemische stoffen waarbij door de techniek zelf of door nevenreacties gevaarlijke stoffen kunnen ontstaan.
- > Gesloten systemen gebruiken voor toxische of deliquescente materialen en open systemen alleen toepassen met veilige zouthydraten.
- > Thermochemische opslag beperken tot omgevingen waar gecontroleerd met gevaarlijke stoffen wordt omgegaan (dus liever industriële toepassingen dan huishoudelijke toepassingen).
- > Het reguleren van de luchtvochtigheid en bedrijfstemperatuur om deliquescentie te voorkomen.
- > Het stabiliseren van thermochemische stoffen door bijvoorbeeld gebruik te maken van poreuze macrodeeltjes, vezelversterking of kleinere deeltjes

5.4 Omgevingsveiligheid

De impact van incidenten met thermochemische opslagsystemen is naar de mening van de onderzoekers beperkt van omvang, omdat het om vaste stoffen gaat die zich bij beschadiging van de opslag nauwelijks verspreiden buiten de installatie. Wel kan bij blootstelling aan lucht of vocht een beperkte hoeveelheid gevaarlijke stoffen ontstaan als gevolg van nevenreacties. Deze emissies blijven naar verwachting beperkt in omvang. Het is daarom niet aanmerkelijk dat incidenten met thermochemische opslagsystemen leiden tot significante risico's voor omwonenden.

5.5 Incidentbestrijding

Een incident bij of met een thermochemische opslag moet beschouwd worden als een incident met een gevaarlijke stof (IBGS). Bij een IBGS-incident zal de brandweer altijd verifiëren met welke gevaarlijke stof ze te maken heeft.

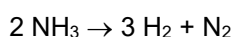
Thermochemische systemen zijn nog in ontwikkeling, waardoor de aanwezige hoeveelheid thermochemische stof beperkt is. Bij opschaling van de techniek, kunnen volumes groter worden.

Thermochemische stoffen zijn vaste stoffen. Bij een incident verspreidt de inhoud van een thermochemisch systeem daarom minder ver dan vloeistoffen of gassen. De vaste stof kan afgedekt worden en verzameld worden in droge luchtdichte vaten. Hierbij moet rekening worden gehouden met mogelijke drukopbouw als het materiaal vochtig is. In sommige systemen kunnen daarnaast beperkte hoeveelheden gevaarlijke stoffen zoals methanol of ammoniak vrijkomen; deze dampen moeten overeenkomstig de IBGS-procedure worden gedetecteerd en beheerst. Voorkomen moet worden dat de vaste stof verwaait of in aanraking komt met water (Brandweer Nederland, 2020).

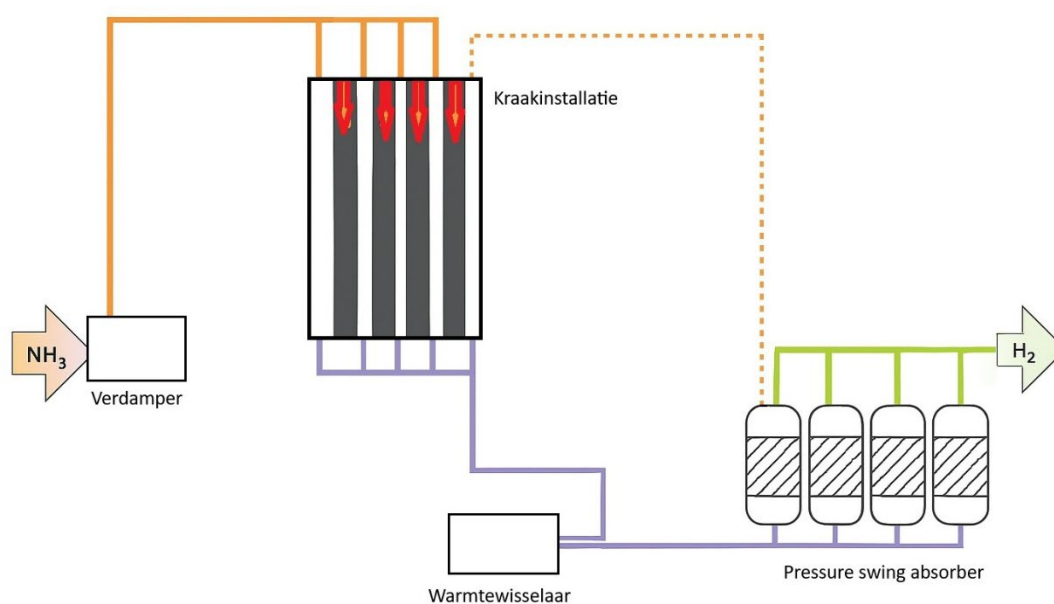
6 Kraken van ammoniak

6.1 Wat is kraken van ammoniak?

Door ammoniak te kraken bij hoge temperatuur en lage druk wordt het ontleed, waardoor waterstof en stikstof ontstaan. Om de reactie te laten plaatsvinden, is een katalysator nodig.⁹ De reactievergelijking voor het kraken van ammoniak is:



Waterstof is het gewenste eindproduct en kan nog wat ammoniak bevatten. Daarom wordt waterstof gezuiverd om het laatste beetje ammoniak te verwijderen. Dit gebeurt veelal met 'pressure swing absorbers' (PSA's). De stikstof die bij het kraken van ammoniak ontstaat, is onschadelijk en wordt meestal uitgestoten. Het principe van het kraken van ammoniak is weergegeven in Figuur 6.1.



Figuur 6.1 Schematische weergave van ammoniakkraker, gebaseerd op (Pach, 2022)

Het kraken gebeurt in meerdere parallelle buizen waar de ammoniak doorheen stroomt, terwijl de buizen van buitenaf worden verwarmd met branders. Deze techniek is het verst ontwikkeld, maar wordt nog niet op grote schaal toegepast. Voor opschaling zijn vooral een hogere energie-efficiëntie en lagere kosten nodig. Daarom wordt onderzocht of gedeeltelijke verbranding van ammoniak en/of waterstof in de reactorbuizen de warmtelevering kan verbeteren en of goedkopere alternatieve katalysatoren vergelijkbare prestaties kunnen leveren (Spatolisano et al., 2023).

⁹ Een katalysator versnelt een chemisch proces zonder zelf te worden verbruikt.

6.2 Veiligheidsrisico's kraken van ammoniak

Het proces van het kraken van ammoniak vindt plaats in een aantal installatie-onderdelen, elk met zijn eigen risico's:

- > Toevoer en opwarmen van ammoniak
- > Kraakreactor met katalysatorbedden
- > Pressure Swing Absorber
- > Opslag en transport van waterstof.

6.2.1 Toevoer en opwarmen van ammoniak

Vloeibare ammoniak moet worden verdampt en opgewarmd ten behoeve van het kraakproces. In deze fase kan ammoniak ontsnappen door lekkage of defecte appendages. Een van de faaloorzaken is corrosie. Als ammoniak in contact komt met water, ontstaat een basisch milieu dat bepaalde metalen aantast, met name koper (Brouwer, 2026).

Als ammoniak vrijkomt en ingeademd wordt, veroorzaakt dit sterke irritatie van de slijmvliezen en van de luchtwegen (OCI, 2025).

6.2.2 Kraakreactor met katalysatorbedden

De kraakreactor werkt bij hoge temperaturen, waardoor de metalen wand van de reactor stikstof uit ammoniak kan opnemen. Als meer stikstof wordt opgenomen dan het metaal kan oplossen, ontstaan nitriden die het metaal bros kunnen maken. Dit proces heet nitridatie (ALURVS, n.d.; Galetz et al., 2026).

6.2.3 Pressure Swing Absorber

PSA-systemen werken met drukwisselingen. In de metalen wanden van deze systemen kunnen als gevolg hiervan vermoeiingscheurtjes ontstaan. Als deze scheurtjes uitgroeien tot grotere scheuren, kan waterstof vrijkomen (Wagner, 2024).

6.2.4 Opslag en transport van waterstof

De gezuiverde waterstof wordt veelal opgeslagen onder druk om op die manier vervoerd te worden, of wordt via buisleidingen naar de plek van bestemming gebracht. Er is altijd een kans dat waterstof onverhoopt vrijkomt. Waterstof is een zeer licht ontvlambaar gas dat eenvoudig ontstoken kan worden. Afhankelijk van de omstandigheden kan hierbij een wolkbrand, een fakkelbrand en/of een explosie ontstaan (Spoelstra, 2025).

6.3 Risicobeheersing

6.3.1 Toevoer en opwarmen van ammoniak

Om lekkage van ammoniak te voorkomen, is een scala aan maatregelen nodig. Te denken valt aan (PGS, 2026a):

- > Het veilig ontwerpen van de installatie.
- > Het gebruik van ammoniakbestendige materialen.
- > Het beschermen van installatiedelen tegen mechanische belasting.
- > Het periodiek uitvoeren van inspecties (corrosie, scheuren, wanddikte).
- > Het toepassen van overdrukbeveiliging daar waar drukopbouw kan ontstaan.
- > Het monitoren van druk en temperatuur in combinatie met automatische alarmering.
- > Het toepassen van ammoniakdetectie rondom leidingen en verdamper.

6.3.2 Kraakreactor met katalysatorbedden

De belangrijkste maatregel om nitridatie te beperken, is gelegen in de materiaalkeuze. Bij voorkeur wordt een legering gebruikt die rijk is aan nikkel, omdat de oplosbaarheid van stikstof dan afneemt. Daarnaast kunnen kleine hoeveelheden zuurstof of water voor een beschermend oxidelaagje zorgen en nitridatie vertragen. Door middel van inspecties moet eventuele mechanische degradatie van de reactorwanden in de gaten worden gehouden (Galetz et al., 2026).

6.3.3 Pressure Swing Absorber

Een belangrijke maatregel om vermoeiing en scheurvorming te voorkomen, is de keuze van het gebruikte staal, omdat dit de mechanische integriteit moet waarborgen. Daarbij moet worden gekeken naar de hardheid, sterkte, het koolstofgehalte en de taaiheid van het materiaal. Het monitoren van drukcycli van PSA's en andere relevante parameters levert input voor de fitness-for-service-methode (FFS), waarmee wordt bepaald of een PSA veilig kan blijven functioneren of dat reparatie of versnelde inspectie nodig is (AIGA, 2017).

6.3.4 Opslag en transport van waterstof

Maatregelen om uitstroom van waterstof te voorkomen of te beperken richten zich met name op lekpreventie, monitoring en snel ingrijpen. Om lekkages te voorkomen, moeten installaties ontworpen en onderhouden worden om verbindingen, kleppen en regelaars lekdicht te houden. Afwijkingen worden gesignaleerd door druk, temperatuur en debieten te monitoren. Bij afwijkingen kan dan automatisch of handmatig worden ingegrepen. Bij beginnende lekkages beperken doorstroombegrenzers en overdrukbeveiligingen de hoeveelheid waterstof die kan vrijkomen (Spoelstra, 2020). Kleine lekkages kunnen worden opgespoord met detectie, terwijl passieve en/of actieve ventilatie ophoping van waterstof voorkomt (Stähler & Spoelstra, 2025).

Voor transport van waterstofdruksystemen over de weg moet het ADR worden gevolgd, terwijl bij transport door buisleidingen het toegepaste materiaal bestand moet zijn tegen vermoeiing en verbrossing (Spoelstra, 2026).¹⁰

6.4 Omgevingsveiligheid

Het kraken van ammoniak is een techniek die al lang bekend is, maar die vooral op kleine schaal wordt toegepast. Met behulp van katalysatoren op basis van nikkel wordt maximaal 1.500 kg waterstof per dag geproduceerd (Spatolisano et al., 2023). De stap naar industriële opschaling is onlangs gezet door Air Liquide, dat in Antwerpen een pilot is gestart waarbij tot 30 ton per dag verwerkt kan worden (Air Liquide, 2025). Bij een omzetting van 75 % (aanne name van de onderzoekers) levert dit per dag zo'n 4.000 kg waterstof op.

Hoe groot de risico's en de effecten van een ammoniakkraker zijn, is momenteel nog niet duidelijk. Er zijn in Nederland geen ammoniakkrakers gebouwd en geen risicoanalyses beschikbaar. Wel is bekend dat het vrijkomen van grote hoeveelheden ammoniak effecten in de nabije en verre omgeving geeft (Gant et al., 2025).

De gemeente Amsterdam heeft verkennende risicoberekeningen laten uitvoeren naar onder andere een ammoniakkraker. In die berekeningen waren ook schepen, een ammoniakterminal en verlading betrokken. Uit die berekeningen bleek dat het risicobeeld niet bepaald wordt

¹⁰ Transport van gasvormige waterstof onder druk via binnenvaart en via spoor komt in de praktijk niet voor.

door de kraakinstallatie, maar door verlading¹¹ en in mindere mate door waterstofopslag en waterstoftransport (DNV, 2025).

6.5 Incidentbestrijding

6.5.1 Toevoer en opwarmen van ammoniak

Bij het vrijkomen van vloeibare ammoniak kunnen een ammoniakwolk en een plas gevormd worden. Afhankelijk van de grootte van de lekkage, de lokale omstandigheden en het doel van de inzet kunnen de volgende inzetacties worden toegepast (Zweverink & Spoelstra, 2025):

- > Beperken van de uitstroom
- > Bevorderen van de vorming van een koudkokende plas (recondenseren)
- > Beperken van de omvang van een koudkokende plas
- > Beperken van (plas)verdamping
- > Beperken van de ammoniakconcentratie in de wolk
- > Beperken van het aantal slachtoffers.

Bij het bestrijden van een ammoniaklek kunnen waterschermen worden ingezet. Daarbij moet worden gelet op de juiste plaatsing: enerzijds om de effectiviteit van waterschermen te maximaliseren en anderzijds om te voorkomen dat water in een ammoniakplas terecht komt, want dat bevordert de verdamping (Antea Group, 2026).

6.5.2 Kraakreactor met katalysatorbedden

Vanwege de hitte van een kraakinstallatie, is een inzet van de brandweer bij een incident defensief van aard: afstand houden en koelen van omliggende leidingen en installaties om escalatie te voorkomen. Een incident kan alleen gestopt worden door procesoperators die gecontroleerd de toevoer van ammoniak stoppen en van de brandstof die de branders van de kraker voedt (SafeworldHSE, 2024).

6.5.3 Pressure Swing Absorber

Een incident bij of met de PSA's kan naar de mening van de onderzoekers alleen gestopt worden door ze gecontroleerd uit te schakelen. Een brand in of bij de PSA's is slecht zichtbaar, omdat waterstof en ammoniak geen koolstof bevatten. Om de brand te lokaliseren kan de brandweer warmtebeeldcamera's gebruiken.

6.5.4 Opslag en transport van waterstof

De incidenten die mogelijk zijn bij de opslag en transport van waterstof in hogedruksystemen, zijn als volgt in te delen:

- > afblazen van een waterstoftank
- > aanstralen van een waterstoftank
- > waterstoflekkage
- > waterstofbrand (fakkelfbrand).

De inzet van de brandweer verschilt per type incident. De brandweer kan weinig doen bij het afblazen van een waterstoftank of bij een fakkelfbrand. Bij een fakkelfbrand kan ze wel secundaire branden proberen te voorkomen. Bij het aanstralen van een waterstoftank door een

¹¹ De plaatsgebonden risicocontouren van ammoniakterminals worden bepaald door verlading, omdat daar de grootste kans op falen is, en er sprake is van een groot effectgebied.

externe brand, kan de tank gekoeld worden, zolang deze geen beveiliging heeft in de vorm van een TPRD (thermal pressure relief device).¹² Bij een lekkage van waterstof bestaat de kans op ontsteking met een brand en/of explosie als gevolg. Daarom richt de inzet zich op het houden van afstand, het verwijderen van ontstekingsbronnen en het veiligstellen van de omgeving (Brandweer Nederland, 2019).

¹² Koelen kan het openen van de TPRD kan vertragen of verhinderen, terwijl dat juist nodig is om een explosie van de waterstoftank te voorkomen.

7 Analyse en duiding

In hoofdstukken 1 tot en met 6 zijn per innovatie de onderzoeksvragen beantwoord. Daarbij is ingegaan op de werking van de technologieën, de bijbehorende risico's en de gevolgen voor risicobeheersing, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding. Dit roept de vraag op welk gezamenlijk veiligheidsbeeld ontstaat wanneer deze innovaties worden gezien als onderdeel van een veranderend energiesysteem of veranderende energie-infrastructuur. Dit hoofdstuk gaat daarom in op patronen in risico's en veiligheidsmaatregelen, op verschuivingen ten opzichte van het huidige energiesysteem en op de implicaties daarvan voor risicobeheersing, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding.

7.1 Veranderingen binnen het energiesysteem

Kenmerkend is dat energieopslag, conversie en transport vaker worden gecombineerd in één systeem, zoals bij de battolyser en thermochemische opslag. Dit vergroot de flexibiliteit en efficiëntie, maar introduceert ook nieuwe technische afhankelijkheden en aanvullende veiligheidsvraagstukken.

- > De innovaties betreffen zowel nieuwe vormen van opslag (zoals batterijen, waterstof, warmte, cryogene en thermochemische systemen), als nieuwe vormen van transport en overdracht, waaronder supergeleidende kabels en draadloos laden.
- > De innovaties kenmerken zich door actieve omzetting tussen energievormen, zoals elektriciteit, warmte en chemisch gebonden energie.
- > De onderzochte innovaties laten zien dat energie in toenemende mate wordt opgeslagen, omgezet en op andere manieren wordt overgedragen, wat past bij een energiesysteem met veel hernieuwbare opwekking waarin fluctuaties in aanbod vragen om meer flexibiliteit.
- > Ten opzichte van het huidige energiesysteem voegen de onderzochte innovaties extra processtappen, systeemonderdelen en infrastructuur toe. Het energiesysteem wordt daarmee technischer en gelaagder, met een toenemende afhankelijkheid van het handhaven van specifieke bedrijfscondities zoals temperatuur, druk en chemische samenstelling.
- > Energieopslag, conversie en transport worden vaker gecombineerd in één systeem, zoals bij de battolyser en thermochemische opslag. Dit vergroot de flexibiliteit en efficiëntie, maar introduceert ook nieuwe technische afhankelijkheden en aanvullende veiligheidsvraagstukken.

7.2 Verschuivingen in het risicobeeld

- > De onderzochte innovaties introduceren geen fundamenteel nieuwe risico's, maar verschuiven het risicobeeld doordat bekende risico's in andere combinaties, in andere situaties en in andere omgevingen voorkomen.

- > Bij innovaties als de battolyser, thermochemische opslag en supergeleidende kabels is veiligheid afhankelijk van het gelijktijdig handhaven van specifieke bedrijfscondities, zoals temperatuur, druk en elektrische isolatie, met name bij systemen waarin opslag, conversie en/of transport in één installatie zijn geïntegreerd.
- > Bij innovaties zoals LAES en supergeleidende kabels neemt de complexiteit toe doordat het systeem uit veel processtappen en systeemonderdelen bestaat, waardoor de keten van technische afhankelijkheden langer wordt en verstoringen zich via meerdere schakels kunnen voortplanten.¹³

7.3 Implicaties voor risicobeheersing

- > De innovaties laten zien dat risicobeheersing zich in toenemende mate moet richten op het handhaven van veilige bedrijfscondities, omdat de onderzochte innovaties daar direct van afhankelijk zijn.
- > Monitoring van bedrijfscondities en ondersteunende systemen is nodig om afwijkingen tijdig te herkennen, voordat deze kunnen doorwerken naar andere delen van de innovatie.
- > Bij afwijkende bedrijfscondities is automatisch of gecontroleerd uitschakelen belangrijk, omdat verstoringen in geïntegreerde systemen snel kunnen doorwerken en escaleren.
- > De onderzochte innovaties laten zien dat technieken complexer worden en dat het aantal processtappen en systeemonderdelen toeneemt. Hierdoor neemt ook het aantal mogelijke storingspunten toe, wat maakt dat nog meer belang gehecht moet worden aan onderhoud en inspectie.
- > Noodprocedures en mogelijkheden om systemen gecontroleerd buiten bedrijf te stellen zijn essentieel, omdat veilig optreden bij incidenten vaak afhankelijk is van het stabiliseren van het gehele systeem.
- > Omdat veilig optreden door hulpdiensten vaak afhankelijk is van het gecontroleerd buiten bedrijf stellen en van het stabiliseren van het volledige systeem, zijn vooraf vastgelegde noodprocedures nodig en voorzieningen om systemen veilig te kunnen uitschakelen.

7.4 Betekenis voor omgevingsveiligheid

- > Risico's die bekend zijn uit industriële omgevingen en specifieke technische systemen kunnen door de implementatie van innovatieve technologieën voorkomen in andere omgevingen zoals in stedelijke gebieden en bij energiehubs.
- > De betekenis hiervan voor omgevingsveiligheid verschilt per innovatie en per omgeving. Bij innovaties als draadloos opladen en thermochemische opslag zijn de effecten naar de directe omgeving beperkt, terwijl bij innovaties als de battolyser en het kraken van ammoniak risico's ook buiten de terreingrens van de installaties aanwezig kunnen zijn.

¹³ Dit komt overeen met het beeld dat geschetst wordt door socioloog Charles Perrow die in zijn boek *Normal accidents* stelt dat in bepaalde complexe en strak gekoppelde technologische systemen ernstige ongelukken onvermijdelijk zijn, omdat de systemen zelf die risico's produceren. Dit betekent dat veiligheid niet alleen beter wordt door regels of techniek, maar ook dat men moet accepteren dat niet alles onder controle te krijgen is (Perrow, 2011).

7.5 Gevolgen voor incidentbestrijding

- > Hulpdiensten krijgen bij incidenten vaker te maken met technisch complexe installaties waarin meerdere energievormen, stoffen en hulpsystemen samenkomen.
- > De inzet bij incidenten zal bij innovaties als supergeleidende kabels en de battolyser primair gericht zijn op het veiligstellen van het systeem, inclusief het gecontroleerd (gedeeltelijk) buiten bedrijf stellen daarvan.
- > Voor veilig optreden is het noodzakelijk dat hulpdiensten systemen kunnen herkennen en kunnen vaststellen of installaties spanningsloos, drukloos of thermisch stabiel zijn.
- > Bij LAES en supergeleidende kabels zijn niet alle systeemdelen zichtbaar of direct bereikbaar. Incidentbestrijding vraagt daarom vaker om afstemming met beheerders en systeemdeskundigen, onder meer over actuele systeeminformatie en uitschakel- en toegangprocedures.

7.6 Handelingsimplicaties voor de brandweer

De zes onderzochte innovaties hebben mogelijk gevolgen voor de adviezen die de brandweer geeft op het gebied van risicobeheersing en omgevingsveiligheid, en voor de inzet tijdens incidentbestrijding. Wij hebben daartoe de veiligheidsrisico's kwalitatief beoordeeld op basis van ons eigen expert judgement en daarbij vooral gekeken of de brandweer nieuwe dingen moet leren, regelen of aanpassen ten opzichte van de huidige kennis, doctrines en handelingsperspectieven. Voor de kwalitatieve beoordeling is de volgende indeling gebruikt:

- > **Groen:** geen aanpassingen, want bestaande kennis en procedures volstaan.
- > **Oranje:** aandacht gewenst, omdat beperkte aanpassingen nodig zijn (kennis, herkenning, procedures).
- > **Rood:** actie nodig, omdat een nieuwe doctrine, opleiding en/of inzetconcept nodig zijn.

Tabel 7.1 Beoordeling van handelingsimplicaties voor de brandweer per innovatie

	Risicobeheersing	Omgevingsveiligheid	Incidentbestrijding
Battolyser	Waterstof is bekend, maar combinatie batterij en elektrolyse vraagt extra aandacht.	Effecten zijn bekend.	Inzet als bij waterstof-incident.
Liquid air energy storage	Cryogene stoffen zijn bekend, maar niet wijdverbreid in energietoepassingen.	Effecten zijn bekend, maar context is nieuw.	Aansluiten bij bestaande cryogene richtlijnen, maar kennis is niet overal aanwezig.
Supergeleidende kabels	Nieuwe afhankelijkheid van koelsystemen en systeemintegriteit.	Effecten zijn beperkt.	Inzet brandweer afhankelijk van in veilige toestand brengen door beheerder. Bekendheid gewenst met ligging kabel en toebehoren. Nieuw type inzet voor brandweer.

	Risicobeheersing	Omgevingsveiligheid	Incidentbestrijding
Draadloos opladen	Nieuwe risico's (elektromagnetische velden, opwarming metalen) vragen ontwerpmaatregelen en kennis bij brandweer.	Effecten zijn lokaal en beperkt	Onzichtbare infrastructuur (in wegdek), uitschakelbaarheid en herkenning zijn issues. Nieuw type inzet voor brandweer.
Thermochemische opslag	Stofafhankelijk, vraagt selectie en beheersing.	Effecten zijn lokaal en beperkt.	Past binnen IBGS (gevaarlijke stoffen), standaardprocedures zijn toepasbaar.
Kraken van ammoniak	Ammoniak en waterstof zijn bekend, maar de combinatie vraagt extra aandacht.	Nieuwe schaal en/of nieuwe locaties kunnen aandacht vragen.	Combinatie complex, maar inzetprincipes bekend (afstand, isoleren, specialisten).

Bijlage 1 Selectie van innovaties

TNO onderzocht of innovaties een fundamentele verandering teweegbrengen in het energiesysteem (disruptief). Hierbij is gekeken naar de mogelijkheid of een innovatie tot nieuwe toepassingen of prestaties leidt, die afwijken van de huidige verwachtingen (transformatief) en naar de mogelijke impact van de innovatie.

Twee voorbeelden: Spotify en Booking.com hebben beide een fundamentele verandering teweeggebracht in respectievelijk de muziek- en toeristenbranche en waren nieuwe toepassingen die geheel afweken van wat tot dan toe gebruikelijk was. Hun impact is daarmee enorm geweest.

Volgens het rapport zijn er 180 innovaties onderzocht; het noemt er echter 161. Van 129 innovaties wordt in een bijlage een beschrijving gegeven, van 32 andere staat die beschrijving in de hoofdtekst. De indeling die in het rapport wordt aangehouden, staat weergegeven in Tabel B1.1.

Tabel B1.1 Thema's en subthema's in het TNO-rapport

Elektriciteit	Industrie	Mobiliteit	Gebouwde omgeving	Warmtenetten
Grootschalige opwekking	Biomassa	Wegtransport	Maatschappelijk	(Zeer) lage temperatuur warmtenetten
Lange termijn opslag	Foton-to-chemicals	Scheepvaart	Digitalisering	Digitalisering
Korte termijn opslag – batterijtechnieken	High value chemicals	Luchtvaart	Opslag	Aardwarmte als bron
Infrastructuur	Elektrificatie industriële warmtevraag	Algemeen	Speciale materialen	
Niche innovaties	Overige industrie		Warmtepompen	
Balancerings-systemen	IJzer en staal		Constructieve aanpassingen	
CCUS-technieken			Natuur	

Impactvolle innovaties voor veilige energietransitie

Aan CoPilot is gevraagd welke innovaties relevant kunnen zijn voor het lectoraat Energie- en Transportveiligheid. Hierbij is als voorwaarde gesteld dat de innovatie disruptief en/of transformatief moest zijn. CoPilot kwam met 24 innovaties. Vervolgens is gevraagd om per innovatie een veiligheidsbeschouwing te geven op het gebied van a) risicobeheersing, b) incidentbestrijding en c) omgevingsveiligheid. De resultaten staan in Tabel B1.2.¹⁴

Tabel B1.2 Resultaten CoPilot: innovaties die relevant kunnen zijn voor lectoraat ETV

Nr.	Thema	Innovatie	Risicobeheersing	Incidentbestrijding	Omgevingsveiligheid
1		Tandemcellen: zonnecellen met meerdere lagen die verschillende lichtspectra benutten voor hogere efficiëntie.	Brandwerende integratie, temperatuurmonitoring	Brand in PV-panelen, moeilijk detecteerbaar, overslagrisico	Rookdepositie, geveloverslag, toxische dampen
2		Zon-PV nanowires: ultradunne zonnecellen met nanodraden die licht efficiënter omzetten in elektriciteit.	Elektrische isolatie, materiaalveiligheid	Snelle brandontwikkeling, moeilijk blusbaar door fijne structuur	Nanodeeltjesverspreiding, rookinhalatie, geveloverslag
3	Elektriciteit	Flowbatterij: opslagsysteem waarbij energie wordt opgeslagen in vloeibare elektrolyten in tanks.	Veilig ontwerp, chemische monitoring, compartimentering	Blussen met geschikte middelen, rookbeheersing, toegang tot tanks	Chemische rook, bodemverontreiniging bij lekkage
4		Battolyser: combinatie van batterij en elektrolyser die stroom opslaat én waterstof produceert.	Waterstofdetectie, ventilatie, explosiebeveiliging	Combinatie elektrochemisch en gasincident, specialistische blusstrategie	Explosiegevaar, waterstofverspreiding, domino-effect
5		Zinc-Mn oxide batterij: waterige batterij met zink en mangaan, veilig en goedkoop voor grootschalige opslag.	Waterige elektrolyt, corrosiebeheersing	Lage intensiteit brand, rookontwikkeling, blusbaar met water	Lage milieu-impact, rookverspreiding, beperkte evacuatie
6		Liquid CO₂ storage: energieopslag via vloeibare CO ₂ die bij expansie een turbine aandrijft.	Drukbeveiliging, cryogene isolatie, ventilatievoorzieningen	Explosie bij drukverlies, bevroeringsgevaar, turbineveiligheid	CO ₂ -uitstoot bij lekkage, verstikkingsgevaar, infrastructuurschade

¹⁴ De prompts zijn niet meer beschikbaar, omdat de gesprekshistorie van CoPilot niet is bewaard.

Nr.	Thema	Innovatie	Risicobeheersing	Incident- bestrijding	Omgevings- veiligheid
7		Sodium-ion batterij: batterijtechnologie op basis van natrium, goedkoper en veiliger dan lithium-ion.	Compartmentering, rookdetectie	Brand met rookontwikkeling, minder explosief dan lithium-ion	Rookverspreiding, toxische dampen, beperkte milieuschade
8		Liquid air energy storage: opslag van energie door lucht vloeibaar te maken en later uit te zetten voor stroom.	Cryogene isolatie, drukbeheersing, rest-warmtebeheer	Bevriezing, explosie bij expansie	Luchtverplaatsing, geluidsoverlast, verstikkingsgevaar
9		Solid-state batterij: batterij met vaste elektrolyt, veiliger en met hogere energiedichtheid dan lithium-ion.	Thermische isolatie, rookdetectie, veilige plaatsing	Brand met minder rook dan lithium-ion, moeilijk detecteerbaar	Rookinhalatie, beperkt explosiegevaar, toxische dampen
10		Superconducting HV-kabels: hoogspanningskabels met supergeleiding voor verliesvrij transport van elektriciteit.	Koelinstallatiebeheer, afscherming, noodstopvoorzieningen	Elektrotechnische incidenten, hoge stroomsterkte, explosiegevaar	Stroomuitval, brand, elektromagnetische interferentie
11	Mobiliteit	Smart charging: slimme laadtechnologie die het opladen van EV's afstemt op netbelasting en aanbod.	IT-beveiliging, load balancing, veilige plaatsing laadpleinen	Brand in voertuigen of laadstations, elektrische risico's	Brandoverslag naar gebouwen, rookverspreiding in parkeergarages
12		Inductive charging (dynamisch): draadloos laden van voertuigen tijdens het rijden via inductiespoelen in het wegdek.	Afscherming inductiespoelen, detectie van storingen	Moeilijke toegang tot ondergrondse systemen, elektrocutiegevaar	Ondergrondse brand, schade aan wegdek, rookverspreiding
13	Gebouwde omgeving	Thuisbatterij: energieopslag in woningen, vaak gekoppeld aan zonnepanelen voor lokaal gebruik.	Brandwerende behuizing, rookdetectie, veilige plaatsing	Brand in woning, rookontwikkeling, moeilijk blusbaar in besloten ruimte	Rookinhalatie, brandoverslag, toxische dampen
14		Thermochemische opslag: warmteopslag via chemische reacties die energie langdurig en verliesvrij vasthouden.	Scheiding reactieve stoffen, ventilatie, compatibiliteit	Brand of explosie bij onbedoelde reactie, rookontwikkeling	Milieuschade bij lekkage, rookverspreiding, evacuatie

Nr.	Thema	Innovatie	Risicobeheersing	Incident- bestrijding	Omgevings- veiligheid
15		Vuilleumier heat pump: warmtepomp zonder compressor, maakt gebruik van helium en temperatuurverschillen.	Veilig gasgebruik (helium), thermische isolatie	Thermisch incident zonder koelmiddel, lage bluscomplexiteit	Beperkte impact, lage milieubelasting
16		Thermo-acoustic heat pump: warmtepomp die werkt met geluidsgolven in plaats van een compressor.	Geluidsbeheersing, gasveiligheid, onderhoudsprotocollen	Thermisch incident zonder koelmiddel, lage bluscomplexiteit	Beperkte impact, lage milieubelasting
17		Metal hydride heat pump: warmtepomp die waterstof opslaat en gebruikt voor warmteoverdracht zonder bewegende delen.	Waterstofveiligheid, drukbeheersing, onderhoudsprotocollen	Waterstoflekage, explosie bij falen, moeilijk detecteerbaar	Explosiegevaar, gasverspreiding, impact op burens
18		Membrane heat pump: warmtepomp met membraantechnologie voor efficiënte warmteoverdracht zonder koelmiddel.	Membraanintegriteit, gasveiligheid, onderhoudsprotocollen	Thermisch incident, rookontwikkeling, beperkte bluscomplexiteit	Beperkte impact, rookverspreiding
19		Direct current buildings system: gebouwsysteem dat werkt op gelijkstroom, direct gevoed door zonnepanelen zonder omzetting.	DC-netbeveiliging, overspanningsbeveiliging, brandwerende bekabeling	Brand door kortsluiting, moeilijk detecteerbaar, electrocutiegevaar	Brandoverslag, rookverspreiding, netstoringen in woonomgeving
20	Waterstof	Underground reforming with CCUS: waterstofproductie ondergronds met directe CO ₂ -opslag in geologische formaties.	Geologische monitoring, drukbeheersing	Ondergrondse explosie of gasuitstoot, moeilijk bereikbaar	Bodemverontreiniging, seismische activiteit, drinkwaterimpact
21		Seawater electrolysis: waterstofproductie uit zeewater via elektrolyse, geschikt voor offshore toepassingen	Corrosiebeheersing, offshore veiligheid, elektrolysebeveiliging	Elektrochemisch incident, waterstoflekage, moeilijk bereikbaar	Milieu-impact op zee, gasverspreiding, corrosie van installaties

Nr.	Thema	Innovatie	Risicobeheersing	Incidentbestrijding	Omgevingsveiligheid
22		Hydrogen turbo compressors: compressoren die waterstof tot hoge druk brengen voor transport of opslag.	Hogedruktraining, explosiebeveiliging, lekkagedetectie	Explosie bij leidingbreuk, gaswolk, snelle escalatie	Explosie-impact, drukgolf, schade aan gebouwen
23		Hydrogen deblanding: technologie om waterstof uit aardgasnetwerken te scheiden bij de eindgebruiker.	Netmonitoring, membraanveiligheid, gasdetectie	Explosie bij mengfout, terugslag in net, moeilijk detecteerbaar	Waterstofverspreiding, gasexplosie in woningen
24		Ammonia cracking: proces om ammoniak om te zetten in waterstof, vaak gebruikt voor transportdoeleinden.	NOx-detectie, ventilatie, hoge temperatuurbeveiliging	Explosie bij kraken, giftige dampen, rookontwikkeling	NOx-uitstoot, rookverspreiding, evacuatie bij lekkage

Analyse van de resultaten

Het aantal voor dit onderzoek relevante innovaties kan naar beneden worden gebracht door te kijken naar de TRL van de innovaties. Bij een TLR van 6 is sprake van een prototype, maar bij lagere TRL's is de innovatie nog (lang) niet uitontwikkeld en kan het nog lang duren voordat ze geïmplementeerd wordt. Innovaties met een TLR van vijf of lager kunnen dan verwijderd worden.

De innovaties uit Tabel B1.2 die volgens het TNO-rapport de grootste impact hebben, zijn:

- > Tandemcellen (#1)
- > Zon-PV nanowires (#2)
- > Flowbatterij (#3)
- > Battolyser (#4)
- > Natrium-ion batterij (#7)
- > Superconducting HV-kabels (#10)
- > Smart charging (#11)
- > Thermochemische opslag (#14).

De zeven innovaties uit Tabel B1.2 die naar de mening van de onderzoekers het meest relevant zijn voor de thema's risicobeheersing, incidentbestrijding en omgevingsveiligheid, zijn:

1. Battolyser (#4)
2. Liquid air energy storage (#8)
3. Superconducting HV-kabels (#10)
4. Inductive charging (#12)
5. Thuisbatterij (#13)
6. Thermochemische opslag (#14)
7. Ammonia cracking (#24).

Er zijn in de resultaten van CoPilot door ons geen vreemde dingen aangetroffen ('hallucinaties'). De beschrijvingen van de innovaties en de doorwerking op risicobeheersing, incidentbestrijding en omgevingsveiligheid zijn wat ons betreft plausibel. Het kan natuurlijk altijd zo zijn dat een innovatie ontbreekt, maar om dat te achterhalen zijn tijd en kennis nodig. De robuustheid van CoPilot is niet onderzocht door de vraag nogmaals te stellen.

Bronnen

- Abarro, J. M. E., Gavan, J. N. L., Loresca, D. E. D., Ortega, M. A. A., Esparcia, E. A., & Paraggua, J. A. D. R. (2023). A Tale of Nickel-Iron Batteries: Its Resurgence in the Age of Modern Batteries. *Batteries*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/batteries9070383>
- AIGA. (2017). Hydrogen Pressure Swing Adsorber (PSA) Mechanical Integrity Requirements. In *Doc 210/17*. https://asiaiga.org/uploaded_docs/en_AIGA_100_18_Hydrogen_PSA_Mechanical_Integrity_Ver_08-2018.pdf
- Air Liquide. (2025). *World first: Air Liquide's innovative technology converts Ammonia into Hydrogen at industrial scale, paving the way for new low-carbon supply chains*. <https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2025-11-13/world-first-air-liquides-innovative-technology-converts-ammonia-hydrogen-industrial-scale-paving-way>
- Air Products. (2014). *Safe handling of cryogenic liquids*. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&escr=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj3pPEob2TAxVIhf0HHXxIM4AQFnoECB8QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.airproducts.com%2F-%2Fmedia%2Ffiles%2Fen%2F900%2F900-13-079-us-safe-handling-of-cryo-liquids-safetygram-16>
- Airò Farulla, G., Cellura, M., Guarino, F., & Ferraro, M. (2020). A Review of Thermochemical Energy Storage Systems for Power Grid Support. *Applied Sciences*, 10(9), 3142. <https://doi.org/10.3390/app10093142>
- All about circuits. (n.d.). *Magnetic Fields and Inductance*. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-15/magnetic-fields-and-inductance>
- ALURVS. (n.d.). *Hoge-temperatuur corrosie van roestvast staal*. Retrieved April 30, 2026, from <https://www.alurvs.nl/roestvast-staal/artikellijst/7921/>
- Antea Group. (2026). *Onderzoek Risico's, effecten en handelingsperspectief bij incidenten met waterstofdragers*. <https://open.overheid.nl/documenten/b10b5d2b-b073-4bdd-bddb-25bb7ca032fa/file>
- Battolyser Systems. (n.d.). *Technology*. <https://www.battolysersystems.com/technology>
- Brandweer Nederland. (2019). *Aandachtskaart waterstof (drukhouder, gasvormig)*. <https://archieff.nipv.nl/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/20190628-BRWNL-Aandachtskaart-H2-Algemene-procedure.pdf>
- Brandweer Nederland. (2020). *Operationeel naslagwerk Incidentbesrijding gevaarlijke stoffen (IBGS)*.
- Brouwer, M. (2026). *Safety workshop: Major Safety Hazards Urea Plants*. Nitrogen+ Syngas 2026 Expoconference.
- Carl Roth. (2024). *Veiligheidsinformatieblad Kaliumhydroxide-oplossing*. 1–13. https://www.carlroth.com/downloads/sdb/nl/K/SDB_K017_NL_NL.pdf
- DNV. (2025). *Onderzoek Omgevingsveiligheid energietransitie*. [https://www.maatregelenwiki.nl/sites/default/files/2025-05/DNV Omgevingsveiligheid Energietransitie Amsterdam - Finaal.pdf](https://www.maatregelenwiki.nl/sites/default/files/2025-05/DNV%20Omgevingsveiligheid%20Energietransitie%20Amsterdam%20-%20Finaal.pdf)
- EIGA. (n.d.-a). *Safe design and operation of cryogenic enclosures*. <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC170.pdf>
- EIGA. (n.d.-b). *Safe location of oxygen, nitrogen, and argon gas vents*. <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC154.pdf>
- Elymany, M. M., Mohamed, A. A. S., Shaier, A. A., Enany, M. A., Metwally, H., & Selem, S. I. (2025). Safety assessment of electromagnetic fields of different transmitters and receivers for EVs static charging. *Scientific Reports*, 15(1), 15193. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97881-9>
- Galetz, M. C., Beck, K., Schlereth, C., & Oskay, C. (2026). Alloy Solutions for Ammonia Cracking : A Review. *Materials and Corrosion*, 77, 923–934.

- <https://doi.org/10.1002/maco.70114>
- Gant, S., Chang, J., Hetherington, R., Hanna, S., Tickle, G., Spicer, T., McMasters, S., Fox, S., Meris, R., Bradley, S., Miner, S., King, M., Simpson, S., Mazzola, T., McGillivray, A., Tucker, H., Björnham, O., Carissimo, B., Fabbri, L., ... Aasen, A. (2025). Pressure-liquefied ammonia jet dispersion: Multi-model intercomparison using Desert Tortoise and FLADIS field data. *Atmospheric Environment: X*, 28(October).
<https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100389>
- GML. (n.d.). *The Earth's Atmosphere*. https://gml.noaa.gov/education/carbon_toolkit/
- Harn, T. van, Brans, H., & Zweverink, B. (2026). *Incidentbestrijding lithium-ion thuisbatterijen*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2026/03/20260326-NIPV-Rapport-Incidentbestrijding-Thuisbatterijen.pdf>
- ICNIRP. (2020). *International commission non-ionizing Radiation protection GUIDELINES for limiting exposure to electromagnetic fields*.
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf>
- IEA. (2026). *ETP Clean Energy Technology Guide*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>
- Iranzo, A., & Mulder, F. M. (2021). Nickel-iron layered double hydroxides for an improved Ni/Fe hybrid battery-electrolyser. *Materials Advances*, 2(15), 5076–5088.
<https://doi.org/10.1039/d1ma00024a>
- Kassem, M. A., & Moscariello, A. (2025). Exploring heat storage: innovations, risks, and future directions for sustainable energy. *International Journal of Sustainable Energy*, 44(1), 1–42. <https://doi.org/10.1080/14786451.2025.2513328>
- Kiyabu, S., Shkatulov, A., Ahmed, A., Greene, S. M., Huinink, H. P., & Siegel, D. J. (2026). Materials for thermochemical energy storage and conversion: attributes for low-temperature applications. *Materials Horizons*, 13(5).
<https://doi.org/10.1039/d5mh01794g>
- Kooiman, A., & van Tuyll, M. (2025). *Technologie radar - Welke disruptieve technologieën gaan impact hebben op ons energiesysteem?*
- Kwasi-Effaha, C. C., & Okpako, O. (2025). Comprehensive review of emerging trends in thermal energy storage mechanisms, materials and applications. *Frontiers in Energy Research*, 13(August), 1–35. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1651471>
- LAEN. (n.d.-a). *Chapter 9: Safety*. Retrieved April 30, 2026, from <https://liquidair.org.uk/full-report/report-chapter-nine/>
- LAEN. (n.d.-b). *Liquid Air in Power and Transport Applications*. Retrieved April 30, 2026, from <https://liquidair.org.uk/about-liquid-air#ql-safety>
- Mangel Raventos, A. (2023). *Towards upscaling the Battolyser - An Intergrated Ni-Fe Alkaline Battery and Electrolyser A combined modeling and experimental study*. https://repository.tudelft.nl/file/File_54d740ab-df56-4625-b3e2-be8714b3a54e?preview=1
- Mansour, H. S. E., Samir, M., Elhady, B., & Abdelmaksoud, S. (2026). Wireless charging systems for electric vehicles: Review. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 5(5), 100371. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2025.100371>
- Mohamed, A. A. S., Shaier, A. A., Metwally, H., & Selem, S. I. (2020). A comprehensive overview of inductive pad in electric vehicles stationary charging. *Applied Energy*, 262, 114584. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114584>
- Möller-Gulland, R., & Mulder, F. M. (2024). 3D nickel electrodes for hybrid battery and electrolysis devices. *Cell Reports Physical Science*, 5(11).
<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.102286>
- NEN. (2025). *NTA 8221 - Procesveiligheid voor de productie van waterstof door elektrolyse voor industrieel gebruik*.
- Noe, M., Puig, T., Obradors, X., van der Laan, D. C., Dönges, S. A., Weiss, J. D., Radcliff, K., Cheetham, P., Pamidi, S., Nguyen, D. N., Nguyen, L. N., Bach, R., Mansheim, P., Prinz, R., Willen, D., Alekseev, A., McCullough, K., Hodge, E., Ishmael, S., ... Marian, A. (2026). Superconducting high-power cables and lines—development status and technology roadmap. *Superconductor Science and Technology*, 39(2), 023501.
<https://doi.org/10.1088/1361-6668/ae15c2>
- OCI. (2025). *Ammoniak, watervrij, bevat max. 0,5% water*. <https://documentation.oci-global.com/wp-content/uploads/2025/07/OCI-Ammonia-Distribution-Safety-Data-Sheet->

- Anhydrous-Ammonia-NL-BE.pdf
- Pach, J. (2022). Ammonia Cracking: Design and Safety Considerations. *Ammonia Energy Conference 2022, November*, 1–32. <https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2022/10/AEA-Presentation-FINAL-no-notes.pdf>
- Padamurthy, A., Gandla, P. K., Sheelwant, A., Vemanaboina, H., Paramasivam, P., & Ayanie, A. G. (2025). Emerging Trends and Future Prospects of Thermochemical Energy Storage Systems for Building Space and Water Heating Applications. *International Journal of Energy Research*, 2025(1), 16. <https://doi.org/10.1155/er/6685290>
- Perrow, C. (2011). *Normal Accidents*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctt7srgf>
- PGS. (2026a). *PGS 12 Ammoniak – Opslag en verlading*. <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/pgs12/>
- PGS. (2026b). *PGS 9 Cryogene gassen: opslag van 0.150 m3-100 m3*. <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/pgs9/>
- PGS 40. (2026). *Installaties voor de productie van waterstof door elektrolyse*. <https://publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/publicaties/pgs40/>
- Rabi, A. M., Radulovic, J., & Buick, J. M. (2023). Comprehensive Review of Liquid Air Energy Storage (LAES) Technologies. *Energies*, 16(17), 6216. <https://doi.org/10.3390/en16176216>
- RWE. (2023). *Eerste Battolyser® op industriële schaal geïnstalleerd bij de RWE Magnum energiecentrale*. <https://benelux.rwe.com/pers/2023-05-03-eerste-battolyser-op-industriële-schaal-geïnstalleerd-bij-de-rwe-magnum-energiecentrale/>
- SAE. (2016). *Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology*. https://www.sae.org/standards/j2954_201605-wireless-power-transfer-light-duty-plug-electric-vehicles-alignment-methodology?
- SafeworldHSE. (2024). *Refinery fires: Firefighting strategies and tactics*. <https://www.safeworldhse.com/2020/04/refinery-fires-firefighting-strategies-tactics.html>
- Scarlet. (2023). *Superconducting CAbles foR sustainabLe Energy Transition - Selection of electrical system architecture*. https://scarlet-project.eu/wp-content/uploads/2024/01/Deliverable_D51_final.pdf
- Scarlet. (2024). *Superconducting CAbles foR sustainabLe Energy Transition - Specifications of protection devices*. https://scarlet-project.eu/wp-content/uploads/2024/05/Deliverable_D52_final.pdf
- She, X., Wang, H., Zhang, T., Li, Y., Zhao, X., Ding, Y., & Wang, C. (2025). Liquid air energy storage – A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 208, 114986. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114986>
- Spatolisano, E., Pellegrini, L. A., Angelis, A. R. De, Cattaneo, S., & Roccaro, E. (2023). Ammonia as a Carbon-Free Energy Carrier : NH₃ Cracking to H₂. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(28), 10813–10827. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01419>
- Spoelstra, M. (2020). *Veiligheidsaspecten van waterstof in een besloten ruimte*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/06/20201014-IFV-Veiligheidsaspecten-van-waterstof-in-een-besloten-ruimte.pdf>
- Spoelstra, M. (2025). *Kennisbundel waterstof in de gebouwde omgeving*. NIPV. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/03/20250324-NIPV-Kennisbundel-waterstof-in-de-gebouwde-omgeving.pdf>
- Spoelstra, M. (2026). *Maatregelen bij transport van waterstof door aardgastransportleidingen*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2026/02/20260209-NIPV-Maatregelen-bij-transport-van-waterstof-door-aardgastransportleidingen.pdf>
- Stähler, C., & Spoelstra, M. (2025). *Ventilatie en detectie van waterstof*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/05/20250117-NIPV-Ventilatie-en-detectie-van-waterstof.pdf>
- Thomas, H., Marian, A., Chervyakov, A., Stückrad, S., Salmieri, D., & Rubbia, C. (2016). Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.041>
- TU Delft. (2024). *Vernieuwde Battolyser slaat vier keer zo snel stroom op als voorheen*. <https://www.tudelft.nl/2024/tnw/vernieuwde-battolyser-slaat-vier-keer-zo-snel-stroom->

op-als-voorheen

- Vyazmina, E., Chang, R., Truchot, B., Groth, K., Wismer, S., Quesnel, S., Torrado Beltran, D., Hart, N., Jordan, T., Ramsey-Idem, K., Houssin, D., Jallais, S., Bernard, C., Bouchet, L., Perez, R. A., Phillips, L., Runefors, M., Hocquet, J., & Tchouvelev, A. (2025). IEA TCP TASK 43 – Recommendations for Safety Distances Methodology for Alkaline and PEM Electrolyzers. *Hydrogen Safety*, 2(1), 47–67. <https://doi.org/10.58895/hysafe.18>
- Wagner, N. (2024). *PSA on PSA Reliability*. <https://e2g.com/industry-insights-ar/psa-on-psa-reliability/>
- WVIP. (2023). *Veiligheidsafstand overdruk waterstof*. <https://nlhydrogen.nl/wp-content/uploads/2023/12/WP4-Veiligheidsafstand-overdruk-waterstofexplosie.pdf>
- Xie, W., Wei, B., & Yao, Z. (2020). Introduction of 35 kV km Level Domestic Second Generation High Temperature Superconducting Power Cable Project in Shanghai, China. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 33(7), 1927–1931. <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05508-z>
- Yang, H., Wang, C., Tong, L., Yin, S., Wang, L., & Ding, Y. (2023). Salt Hydrate Adsorption Material-Based Thermochemical Energy Storage for Space Heating Application: A Review. *Energies*, 16(6), 2875. <https://doi.org/10.3390/en16062875>
- Zweverink, B., & Spoelstra, M. (2025). *Kennisbundel Ammoniak*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2025/12/20251215-NIPV-Kennisbundel-ammoniak.pdf>