



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

# Verkenning van **gevaarlijke stoffen** in de energietransitie



# **Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie**

RIVM-briefrapport 2023-0310

## Colofon

© RIVM 2024

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

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

DOI 10.21945/RIVM-2023-0310

F. Heens (auteur), RIVM  
L. de Boer (auteur), RIVM

Contact:  
Nicole Janssen  
Nicole.janssen02@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van het impulsprogramma Chemische Stoffen en Nationaal Stoffenbeleid

Dit is een uitgave van:  
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**  
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
Nederland  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

## Publiekssamenvatting

### **Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie**

Nederland wil de klimaatverandering beperken door minder CO<sub>2</sub> en andere broeikasgassen uit te stoten. Dit kan onder andere door 'hernieuwbare energie' op te wekken. Dit is energie uit wind, waterkracht, zon, bodem en buitenluchtwarmte. Maar in materialen en technologieën die hiervoor nodig zijn, kunnen chemische stoffen zitten die schadelijk zijn voor mens en milieu. Zo wordt lood gebruikt als soldeermateriaal in zonnepanelen en zware metalen in accu's en batterijen. Of deze stoffen schadelijk zijn, hangt af van de eigenschappen die ze hebben en of deze vrijkomen in het milieu.

Volgens het RIVM is meer kennis nodig over de mate waarin gevaarlijke stoffen, waaronder Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) worden gebruikt. Met die informatie kunnen mogelijke risico's van deze stoffen beter worden ingeschat. Bestaande energietechnologieën, als zon- en windenergie, zullen namelijk de komende jaren op steeds grotere schaal worden ingezet. Daarnaast worden veel nieuwe materialen en technologieën ontwikkeld, zoals het gebruik van waterstof en batterijen om energie op te slaan.

Het RIVM heeft een eerste inventarisatie gemaakt van energietechnologieën en materialen waar Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) in kunnen zitten. Bij een deel van de materialen en technologieën blijkt dat inderdaad zo te zijn, bij andere is er geen informatie over beschikbaar. Het is dus mogelijk dat er nog meer ZZS worden gebruikt maar nu nog niet in beeld zijn. Veel materialen en technologieën worden nu buiten Nederland gemaakt.

Het RIVM vindt het belangrijk dat mogelijke risico's van nieuwe materialen vroeg in beeld komen en niet pas nadat ze in gebruik zijn. Dat geldt bijvoorbeeld voor waterstofdragers en geavanceerde materialen. Ook is het belangrijk om materialen die niet meer kunnen worden gebruikt, veilig te kunnen verwerken of recyclen. Hiervoor is informatie over de samenstelling van materialen nodig. Voor overheden die beslissen over vergunningen is het bijvoorbeeld belangrijk te weten of er gevaarlijke stoffen, waaronder ZZS, in zitten.

Veel betrokken partijen hebben al initiatieven genomen om milieurisico's beter in kaart te brengen, bijvoorbeeld voor windturbines en zonnepanelen. Dit biedt kansen om ook meer aandacht te besteden aan het gebruik van ZZS in de hele keten en daar waar mogelijk veiligere alternatieven te gaan gebruiken.

Kernwoorden: ZZS, energietransitie, duurzame technologieën, recycling, circulaire economie



## Synopsis

### **Exploration of hazardous substances in the energy transition**

The Netherlands is aiming to mitigate climate change by reducing its emissions of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases. One way to do this is by generating 'renewable energy', i.e. wind energy, hydroelectric energy, solar energy, geothermal energy and air source energy. However, the necessary materials and technologies may contain chemicals that are harmful to human health and the environment. Lead used in solders for solar panels and heavy metals used in batteries are two examples of this. Whether these substances are harmful depends on their properties and whether they are released into the environment.

According to RIVM, more information is needed about the extent to which hazardous substances, including substances that fulfill the criteria of Substances of Very High Concern (SVHCs), are being used. This information will make it easier to assess the potential risks associated with these substances. The reason why this matters is that the use of existing renewable energy resources, such as solar and wind energy, will increase in the coming years. This will go hand in hand with the development of new materials and technologies, such as the use of hydrogen and batteries as a means to store energy.

That is why RIVM has conducted an exploratory study into the energy technologies and materials that might contain SVHCs. While this did indeed turn out to be the case for some materials and technologies, there was a lack of information about others. It is therefore possible that more SVHCs are being used, but this is currently unclear. At present, many materials and technologies come from outside of the Netherlands.

RIVM believes it is important to identify the potential risks of new materials at an early stage, before they are taken into use. Examples to which this applies include hydrogen carriers and advanced materials. It is equally important that materials that can no longer be used can be processed or recycled safely. To that end, information is needed about the composition of these materials. Competent authorities, for instance, will need to know whether they contain hazardous substances, including SVHCs.

Many parties involved have already taken steps to obtain a more complete overview of the environmental risks posed by such technologies as wind turbines and solar panels. This will create opportunities to devote more attention to the use of SVHCs throughout the chain and their replacement with safer alternatives where possible.

**Keywords:** SVHCs, energy transition, sustainable technologies, recycling, circular economy





## Inhoudsopgave

### **Samenvatting — 9**

#### **1 Inleiding — 13**

- 1.1 Onderzoeksvragen — 15
- 1.2 Afbakening — 15
- 1.3 ZZS en andere gevaarlijke stoffen — 16
- 1.4 Leeswijzer — 16

#### **2 Aanpak — 19**

- 2.1 Brede inventarisatie energietechnologieën en materialen — 19
- 2.2 Inventarisatie mogelijke ZZS-emissies bij de energietechnologieën — 19
- 2.3 Analyse resultaten en cases voor formuleren van kennishiaten en aanbevelingen — 20

#### **3 Resultaten — 23**

- 3.1 ZZS in energietechnologieën — 23
  - 3.1.1 Overzicht energietechnologieën — 23
  - 3.1.2 Overzicht resultaten mogelijke aanwezigheid gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) in energietechnologieën — 23
- 3.2 Gebruik en emissies van ZZS per ketenstap — 25
  - 3.2.1 Gebruik van ZZS bij productie — 25
  - 3.2.2 Gebruik en mogelijke emissies van ZZS tijdens de gebruiksfase — 29
  - 3.2.3 Gebruik en mogelijke emissies van ZZS bij afdanking, hergebruik en recycling — 30
  - 3.2.4 Incidentele emissies — 31
  - 3.2.5 Biomassa als energiebron — 31
  - 3.2.6 Opslag van CO<sub>2</sub> — 32
- 3.3 Overige aspecten — 34
  - 3.3.1 Geavanceerde materialen — 34
  - 3.3.2 PFAS — 35
  - 3.3.3 Kritieke materialen — 36
  - 3.3.4 Externe veiligheid — 37

#### **4 Illustratieve casussen- huidige energietechnologieën — 39**

- 4.1 Zonnepanelen — 39
  - 4.1.1 Algemeen — 39
  - 4.1.2 ZZS en gevaarlijke stoffen in zonnepanelen — 40
  - 4.1.3 Omschrijving van de keten en mogelijke emissies — 43
- 4.2 Windturbines — 46
  - 4.2.1 Algemeen — 46
  - 4.2.2 ZZS en andere gevaarlijke stoffen in windturbines — 47
  - 4.2.3 Omschrijving van de keten en mogelijke emissies — 47
- 4.3 Aandrijfacu's — 49
  - 4.3.1 Algemeen — 49
  - 4.3.2 ZZS en andere gevaarlijke stoffen in aandrijfacu's — 50
  - 4.3.3 Omschrijving van de keten en mogelijke emissies — 50

#### **5 Illustratieve casussen- Opkomende en nieuwe energietechnologieën — 53**

- 5.1 Elektrificatie — 53

5.2 Waterstofdragers — 55

5.3 Elektrolyzers — 57

## **6 Discussie — 59**

## **7 Conclusies en aanbevelingen — 63**

7.1 Meest relevante aspecten voor emissies van ZZS en andere gevaarlijke stoffen — 63

7.1.1 Huidige energietechnologieën — 63

7.1.2 Nieuwe ontwikkelingen — 64

7.2 Kennishiaten — 64

7.3 Aanbevelingen — 65

## **8 RIVM reflectie: Signalen, uitdagingen en oplossingsrichtingen rondom ZZS en de energietransitie — 67**

## **9 Referenties — 71**

**Bijlage 1 Toelichting Nationaal en Europees stoffenbeleid — 75**

**Bijlage 2 Resultaten verkenning — 77**

## Samenvatting

Nederland werkt aan een energiesysteem waarbij nauwelijks nog CO<sub>2</sub> vrij komt. In 2050 moet de energievoorziening bijna helemaal duurzaam en CO<sub>2</sub>-neutraal zijn. Het doel voor 2030 is de uitstoot van broeikasgassen in Nederland te reduceren met 55% (vergeleken met 1990). Het vervangen van fossiele brandstoffen door duurzame (hernieuwbare) energiebronnen draagt hier sterk aan bij. In Nederland wordt nu duurzame energie opgewekt door o.a. windturbines (op zee en op land) en zonnepanelen. In de toekomst zullen verschillende energietechnologieën een rol gaan spelen in de energietransitie, zoals aardwarmte, restwarmte en waterstof. Het RIVM en het Analistennetwerk Nationale Veiligheid, hebben de afgelopen jaren onderzoek verricht naar de veiligheids- en gezondheidsrisico's van fossiele en duurzame energie. Daaruit blijkt dat de energietransitie een positief effect heeft op de gezondheid en veiligheid in Nederland. Door het gebruik van deze energietechnologieën kunnen in de gehele keten ook mogelijk milieu- en gezondheidsrisico's ontstaan, bijvoorbeeld door het vrijkomen van gevaarlijke chemische stoffen bij de productie, bij transport, bij (her)gebruik (door slijtage en opslag) en/of de afvalfase. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft (in het kader van het Impulsprogramma Chemische Stoffen 2023-2026) het RIVM gevraagd een eerste verkenning uit te voeren om in kaart te brengen "welke kansen en risico's de grote maatschappelijke transitie bieden voor het verder realiseren van een reductie van risico's van chemische stoffen voor mens en milieu". De focus van deze eerste verkenning is een inventarisatie van huidige kennis over het gebruik en (mogelijke) emissies van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) en andere gevaarlijke stoffen in een aantal verschillende energietechnologieën in de gehele keten. Kennishiaten zijn in beeld gebracht en er worden aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan.

In deze inventarisatie onderscheidt het RIVM huidige, reeds toegepaste energietechnologieën (denk aan zonnepanelen, windturbines, aandrijfacu's voor elektrische auto's) en 'opkomende en nieuwe' energietechnologieën (zoals waterstofdragers, elektrolyzers, brandstofcellen, batterijen voor energieopslag).

### Resultaten inventarisatie ZZS en gevaarlijke stoffen

In verschillende energietechnologieën worden ZZS en gevaarlijke stoffen toegepast. Voorbeelden zijn:

- Gebruik van lood in zonnepanelen;
- Gebruik van nikkel en kobalt in aandrijfacu's;
- Nikkel en kobalt in elektrolyzers en brandstofcellen;
- De vorming van N-nitrosodiethanolamine (NDELA) bij CO<sub>2</sub> absorptie;
- Vorming van ZZS bij gebruik van 'liquid organic hydrogen carriers' (LOHC's) en aanwezigheid van ZZS. Bij vier (hetero)aromatische (LOHC's) heeft ten minste de waterstofarme drager ZZS eigenschappen (benzyltolueen, dibenzyltolueen, naftaleen, n-ethylcarbazon). Tijdens waterstofafgifte van de (circulaire) waterstofdragers methanol en mierenzuur is vorming

van koolmonoxide (ZZS) mogelijk. Bij de LOHC toluen kunnen drie ZZS gevormd worden, waaronder benzeen.

Voorbeelden van gevaarlijke stoffen (niet-ZZS) in energietechnologieën zijn:

- Koudemiddelen in warmtepompen;
- PVDF of PVF (PFAS) in het achterblad van zonnepanelen.

Het gebruik van ZZS en andere gevaarlijke stoffen in materialen voor energietechnologieën hoeft niet altijd te leiden tot emissies en/of risico's voor mens en milieu. De omvang van de emissie hangt mede af van de specifieke productie/technologie, de specifieke materialen, het type gebruik en wijze van productiemethode, de omstandigheden tijdens het gebruik en de verwerkingsfase (afdanking en recycling). Over emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) is erg weinig bekend voor energietechnologieën. Omdat weinig data beschikbaar is, zijn de belangrijkste bevindingen kwalitatief omschreven voor de productie-, gebruik- en afdankingsfase.

### **Emissies van gevaarlijke stoffen in productiefase**

De productie van grondstoffen en materialen voor de onderzochte energietechnologieën vindt, voor zover bekend, vooral buiten Nederland plaats. In Nederland worden wel assemblage stappen uitgevoerd. Er is geen informatie beschikbaar over emissies van gevaarlijke stoffen bij de productie van huidige energietechnologieën in Nederland (zonnepanelen, windturbines). Of er emissies zijn in het buitenland bij de productie van de materialen die geïmporteerd worden, is niet onderzocht. Het is bekend dat er problemen zijn in deze productieketens als het bijvoorbeeld gaat over mijnbouw. Voor de productie van zonnepanelen en windturbines worden metalen gebruikt die uit landen komen met hoog risico op misstanden voor mens en milieu.

Verschillende onderzoeksinstituten, universiteiten en kleine en middelgrote bedrijven in Nederland werken aan innovaties op gebied van batterijen voor energieopslag en elektrolyzers. Geavanceerde materialen worden genoemd als ontwikkelrichting. Deze materialen zijn meestal minder goed gekarakteriseerd als het gaat om gevaareigenschappen ten opzichte van stoffen die al langer op de markt zijn. Dit kan een zorg zijn wanneer deze geavanceerde materialen op de markt kunnen komen zonder dat de risico's van tevoren voldoende bekend zijn.

### **Emissies van gevaarlijke stoffen in gebruiksfase**

Naar verwachting kunnen er incidenteel en/of plaatselijk emissies van ZZS en gevaarlijke stoffen plaatsvinden bij het gebruik van materialen die relevant zijn voor de energietransitie. Hieronder worden een aantal voorbeelden genoemd.

Lokale emissies kunnen voorkomen bij beschadiging van zonnepanelen waardoor zware metalen kunnen uitloggen naar de bodem. Door slijtage kunnen gevaarlijke stoffen en microplastics vrijkomen uit de coatings van de mast en de bladen van windturbines. Het is echter nog niet bekend om welke stoffen het precies gaat bij windturbines in Nederland en hoeveel van elke stof vrij komt. Deze kennis is nodig om te kunnen

bepalen of de emissies van stoffen gebruikt bij windturbines daadwerkelijk schadelijk zijn voor mens en milieu.

Voor LOHC's, zijn er nog vele vragen. Zo is nog onbekend welk type van waterstofdrager en in welke mate deze toegepast zullen gaan worden bij waterstoftechnologie. Bij het grootschalig toepassen van LOHC's voor waterstoftransport, zal er ook grootschalige opslag van LOHC's nodig zijn. Het opslaan van LOHC zal waarschijnlijk op dezelfde manier gebeuren als het opslaan van fossiele brandstoffen, namelijk in opslagtanks. Emissies naar lucht, water of bodem kunnen mogelijk optreden bij lekkages tijdens transport of opslag en tijdens herhaaldelijke waterstofbinding en -afgifte.

### **Emissies van gevaarlijke stoffen in de hergebruik en afdankingsfase**

Het is de verwachting dat meer inzameling- en recyclinginfrastructuur zullen worden opgericht in Nederland voor o.a. zonnepanelen, windturbines en batterijen. In de toekomst zullen veel grotere volumes vrijkomen. Om de gebruikte materialen veilig en veelvuldig te kunnen hergebruiken en recyclen is het van groot belang dat er meer informatie over de samenstellingen van deze materialen beschikbaar komt. Ook is meer kennis nodig over recyclingtechnieken en de mogelijkheid om ZZS te verwijderen.

Als materialen verbrand worden (omdat recycling nog niet mogelijk is), is het van belang om mogelijke emissies van ZZS te monitoren. Omdat PFAS wordt gebruikt in verschillende energietechnologieën (bijvoorbeeld als achterblad in zonnepanelen), adviseren we de omvang en karakterisering van emissies in kaart te brengen (bijvoorbeeld bij verbranding van zonnepanelen om de zonnecellen beschikbaar te maken voor recycling).

### **Verbeteren en ontsluiten van kennis over het gebruik en emissies van gevaarlijke stoffen.**

In deze verkenning is een eerste grove inventarisatie gedaan naar gebruik en emissies van gevaarlijke stoffen (met een focus op ZZS) in materialen en energietechnologieën voor de energietransitie. Echter, gezien de beperkte informatie levert dit een nog verre van een compleet beeld op. Hoe de energietransitie er precies uit gaat zien, en welke materialen en energietechnologieën daaraan gaan bijdragen, blijft voor een deel onzeker. Er is een aantal redenen waarom het lastig is om zicht te krijgen op de ontwikkelingen binnen de energietransitie en de risico's van gevaarlijke stoffen die daarmee gemoeid zijn. Allereerst gaan de ontwikkelingen snel en worden er vele verschillende energietechnologieën ontwikkeld. Ten tweede is er slechts beperkte informatie beschikbaar over mogelijke gevaarlijke stoffen en ZZS die daarin een rol kunnen gaan spelen. Dit is ook intrinsiek verbonden met het feit dat in de ontwikkelingsfase van nieuwe energietechnologieën er nog maar beperkte informatie voorhanden is. Bovendien wordt het zicht krijgen bemoeilijkt doordat er weinig productie en verwerking in Nederland plaatsvindt. Daarnaast is de verwerking van veel energietechnologieën nog niet opgestart, omdat de einde levensduur nog niet bereikt is of de volumes van afgedankte materialen relatief klein zijn.

Zicht krijgen op de ontwikkelingen is nodig om de risico's te kunnen inschatten én vervolgens te duiden. Pas daarna kan ingeschat worden of aanvullend beleid of wijziging van beleid noodzakelijk is om eventuele problemen aan te pakken. Ook is het nodig dat ontwikkelaars en bedrijven aan het begin van het innovatieproces bewust zijn van veiligheidsaspecten door de gehele keten van productie, gebruik (inclusief beschadiging) en recycling.

Door de gevaren en risico's van energietechnologieën te onderzoeken kan hierdoor het beeld ontstaan dat deze onwenselijk zijn. Kennis van de aanwezigheid van gevaarlijke stoffen als ook kennis over (mogelijke) emissies en blootstelling kunnen bijdragen aan een beter beeld over de mogelijke risico's van energietechnologieën. Ook is het nodig dat de beschikbare kennis gebundeld wordt en vindbaar is voor relevante partijen. Zo kan het mogelijke risico goed in beeld worden gebracht en kan er een integrale afweging plaatsvinden van klimaatwinst versus andere aspecten zoals risico's van stoffen en andere veiligheids- en duurzaamheidsaspecten.

## 1 Inleiding

De overheid neemt maatregelen om Nederland te beschermen tegen de gevolgen van klimaatverandering. Daarnaast kan verdere opwarming van de aarde beperkt worden door de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. Hiervoor zijn nationale en internationale doelen afgesproken (Rijksoverheid, 2023). In 2050 moet de energievoorziening CO<sub>2</sub>-neutraal zijn (Rijksoverheid, 2023). Het vervangen van fossiele brandstoffen door duurzame energiebronnen draagt hier sterk aan bij. In Nederland wordt nu duurzame energie opgewekt door o.a. windturbines (op zee en op land) en zonnepanelen. In de toekomst zullen opkomende en nieuwe technologieën een rol spelen in de energietransitie, zoals aardwarmte, restwarmte en waterstofdragers.

In het Nederlandse Klimaatakkoord (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2019) is op hoofdlijnen beschreven hoe de reductie van broeikasgassen bereikt kan worden. Het doel is de uitstoot van broeikasgassen in Nederland in 2030 te reduceren met 55% (vergeleken met 1990). In het klimaatakkoord zijn voor vijf sectoren maatregelen en technologieën beschreven voor de komende tien jaar en de jaren daarna voor de opwekking van energie (inclusief biomassa), warmtevoorziening en energieopslag. Deze vijf sectoren zijn gebouwde omgeving, landbouw en landgebruik, elektriciteit, industrie, en mobiliteit.

Het RIVM heeft in 2021 verkend wat mogelijke effecten zijn op gezondheid en veiligheid van nieuwe energiebronnen (Gooijer & Mennen, 2021). Voor veiligheid is gekeken naar risico's zoals incidenten of (arbeids)ongevallen. Zo introduceren nieuwe energietechnologieën mogelijk weer nieuwe risico's. Bijvoorbeeld is er een risico op explosie en brand bij toepassing van de nieuwe energiedragers zoals waterstof. Het overall beeld is echter positief, omdat het afbouwen van het gebruik van fossiele brandstoffen zal leiden tot afname van gezondheid en veiligheidsrisico's, bijvoorbeeld door verbetering van de luchtkwaliteit.

Milieu- en gezondheidsrisico's kunnen ontstaan door het vrijkomen van chemische stoffen. Chemische stoffen kunnen vrijkomen bij de productie van (nieuwe) materialen en energietechnologieën, bij transport, bij gebruik (bijvoorbeeld door slijtage en opslag) en/of de afvalfase. Dit kan mogelijk zijn bij zowel het toepassen en opschalen van bestaande energietechnologieën (denk aan zonnepanelen, aandrijfacu's voor elektrische auto's) als het ontwikkelen en implementeren van opkomende en nieuwe energietechnologieën (zoals het proces van waterstofbinding en/of -afgifte). Hoe groot de risico's zijn, hangt af van de stoffen die gebruikt worden bij de productie van materialen en energietechnologieën en hoe vaak en met hoeveel van de stoffen mensen en het milieu in contact komen.

Aandacht voor een veilige en gezonde leefomgeving is belangrijk bij de ontwikkeling en implementatie van nieuwe energietechnologieën. Tijdens deze transitieperiode zullen we de risico's van de bestaande fossiel gebaseerde systemen moeten blijven beheersen en tegelijkertijd

de nieuwe risico's van duurzame technieken proberen te kennen en te voorkomen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022a).

### *Beleidscontext*

Het beleid betreffende de risico's van chemische stoffen (oftewel 'stoffenbeleid') is gericht op het realiseren en behouden van een gezonde en veilige leefomgeving en een schoon milieu (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022a). Het stoffenbeleid wordt vanuit verschillende invalshoeken benaderd en is vertaald en vastgelegd in diverse wettelijke kaders.

Ten eerste is er wetgeving gericht op productie, handel en gebruik van stoffen. Het doel is aan de bron zoveel mogelijk voorkomen en beperken van gebruik en risico's van stoffen. Voorbeelden daarvan zijn de REACH-verordening (omtrent de registratie, evaluatie, autorisatie en restrictie van chemische stoffen), de CLP-verordening (omtrent de indeling, etikettering en verpakking van stoffen) en de POP-verordening (omtrent restrictie van toxische, persistente en bioaccumulerende stoffen). Voorts is er wetgeving gericht op emissies van stoffen. Dit beleid krijgt onder andere vorm via het voorkomen en verder minimaliseren van emissies van 'Zeer Zorgwekkende Stoffen' (ZZS)<sup>1</sup> naar lucht en water. Tot slot is er wetgeving gericht op de kwaliteit van bodem, water en lucht. Dit heeft als doel vermindering van risico's als gevolg van in het milieu aanwezige stoffen. Dit gebeurt bijvoorbeeld door het stellen van grenzen aan de aanwezigheid van stoffen in het milieu (in bodem, water of lucht) (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022a).

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft eind 2022 het Impulsprogramma chemische stoffen 2023-2026 opgesteld (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022a). Het Impulsprogramma omvat bij aanvang 19 projecten, met name op die onderwerpen waar een impuls nodig is ter verbetering van de uitvoering van dat beleid. Eén van de thema's van het Impulsprogramma is het voorkómen van milieurisico's. Het ministerie stelt als doel dat de risico's van chemische stoffen voor mens en milieu verwaarloosbaar zijn. Er wordt van belang geacht bij de ontwikkeling van activiteiten, materialen en producten zo veel mogelijk de risico's in te schatten en deze al in een zo vroeg mogelijk stadium te voorkomen door te kiezen voor de meest veilige en duurzame opties of alternatieven (Safe-and Sustainable-by-Design). Zo kunnen voor de energietransitie (nieuwe) materialen of productieprocessen essentieel zijn die echter wel mogelijk (nieuwe) risico's voor mens en milieu met zich meebrengen, of het veilige hergebruik van de materialen in de weg zitten. In dat soort gevallen, staat in het Impulsprogramma omschreven dat "niet zozeer een afweging gezocht moet worden tussen ogenschijnlijk 'strijdige' doelen, maar de inzet vooral gericht moet zijn op het creëren van condities die én-én bewerkstelligen". Ook het zoeken van zogeheten 'meekoppelkansen' wordt daarbij genoemd, m.a.w. het verwezenlijken van duurzaamheids- en klimaatdoelen in combinatie met een gezonde en schone leefomgeving (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022a).

<sup>1</sup> Zie paragraaf 1.3 voor een toelichting op ZZS en de ZZS criteria



*Kennisvraag*

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft in het kader van het Impulsprogramma chemische stoffen het RIVM gevraagd een eerste verkenning uit te voeren "waarmee in kaart wordt gebracht welke kansen en risico's de grote maatschappelijke transities bieden voor het verder realiseren van een reductie van risico's van chemische stoffen voor mens en milieu" (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022a). De focus ligt op het veilig gebruik van chemische stoffen in nieuwe energiesystemen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022a).

**1.1 Onderzoeksvragen**

Om bovenstaande kennisvraag te beantwoorden zijn de volgende onderzoeksvragen gedefinieerd:

- 1a) Wat zijn belangrijke technologieën bij de energietransitie?
- 1b) Welke mogelijke emissies van ZZS en andere gevaarlijke stoffen kunnen ontstaan bij de implementatie van deze technologieën? Denk hierbij aan de hele keten: van winning, productie, gebruik en tot en met de verwerking van de materialen na gebruik (afdeling, verbranding, recycling).
- 2) Wat zijn de onzekerheden en technisch-wetenschappelijke kennislücken bij de beantwoording van vraag 1b?
- 3) Welke aanbevelingen volgen uit deze verkenning?

De verkenning bestaat uit een inventarisatie van (mogelijke) materialen en energietechnologieën als ook het verder inzoomen op een aantal casussen waar de brede inventarisatie heeft laten zien dat er ZZS worden gebruikt.

**1.2 Afbakening**

De focus van deze verkenning is gericht op het inzichtelijk maken van de mogelijke impact van de energietechnologieën en/of materialen die genoemd zijn bij de maatregelen in het klimaatakkoord op emissies van ZZS in Nederland. Omdat het Nationale stoffenbeleid gericht is op activiteiten van bedrijven, ligt de focus van deze verkenning op emissies van ZZS naar het milieu (lucht, water en bodem) bij (i) de productie en (ii) de verwerking van de materialen en energietechnologieën na gebruik, zoals afdanking, verbranding en recycling. Mogelijke emissies worden kwalitatief omschreven, het kwantificeren van effecten op de mens en het milieu valt buiten de scope van deze analyse. De mogelijke emissies van ZZS worden per energietechnologie afzonderlijk beschreven, eventuele gecombineerde effecten van het toepassen van meerdere energietechnologieën valt buiten de scope. Risico's van stoffen voor werknemers (arbeidsveiligheid) en consumenten is geen onderdeel van deze verkenning.

Waar bekend, zullen ook emissies tijdens de gebruiksfase (bijvoorbeeld door beschadiging en slijtage) benoemd worden. Risico's op verspreiding van stoffen bij brand wordt, waar relevant, benoemd. Hierbij wordt wel opgemerkt dat brand kan worden gezien als "incidenteel" en niet bij de risicobeoordeling van de gebruiksfase wordt meegenomen. Emissies gerelateerd aan het winnen van grondstoffen en productie van materialen buiten Nederland vallen buiten de scope van dit onderzoek.

### 1.3 ZZS en andere gevaarlijke stoffen

Er zijn verschillende internationale verdragen en wettelijke kaders die regels stellen voor stoffen waarvoor zorg bestaat over de risico's voor mens en milieu. Voor sommige gevaarlijke stoffen zijn door de Europese Unie (EU) autorisaties (verbod tenzij vrijstelling) of restricties (beperkingen) vastgelegd. Deze kunnen gelden voor productie, handel, verwerking, vervoer, opslag en gebruik. De stoffen en bijbehorende autorisaties en/of restricties zijn vastgelegd in de REACH-verordening. Stoffen waarvoor een autorisatie benodigd is of wordt voorgesteld, worden substances of very high concern (SVHC) genoemd.

Voor sommige persistente organische verontreinigende stoffen zijn ook verboden of beperkingen vastgelegd in het Verdrag van Stockholm, hetgeen geïmplementeerd is in de EU via de POP-verordening (EU) 2019/1021 (EU Regulation, 2019). Er zijn ruim 180 landen aangesloten bij dit verdrag.

Naast de REACH- en POP-verordening, zijn het internationale OSPAR verdrag en de Europese Kaderrichtlijn Water van kracht waarin lijsten van stoffen zijn opgenomen waarvan het gebruik en/of de uitstoot moet worden verminderd.

Een Zeer Zorgwekkende stof (ZZS) is een stof die voldoet aan een of meer van de criteria of voorwaarden, bedoeld in artikel 57 van de reach-verordening. Dit zijn stoffen die bijvoorbeeld kankerverwekkend zijn of zich ophopen in het milieu. Hier vallen ook de SVHC stoffen onder, maar ook andere stoffen die voldoen aan deze criteria (meer informatie in bijlage 1).

Onderdeel van het Nederlandse stoffenbeleid is het zoveel mogelijk weren van ZZS uit de leefomgeving. Ter ondersteuning van het Nederlandse ZZS-beleid heeft het RIVM de ZZS uit de hierboven genoemde verdragen gebundeld in één lijst. Het beleid voor ZZS kent geen limitatieve lijst, maar werkt met gevaarscriteria om te beoordelen of een stof als ZZS wordt aangemerkt. De criteria zijn ontleend aan de Europese of internationale beleidskaders voor prioritering van chemische stoffen, zoals hierboven besproken. Op dit moment zijn ruim 1600 stoffen of stofgroepen als ZZS geïdentificeerd, zie de website 'Risico's van Stoffen' ([www.rivm.nl/rvs](http://www.rivm.nl/rvs)). In bijlage 1 wordt verder ingegaan op ZZS binnen het spectrum van het totaal aan chemische stoffen.

De focus van deze verkenning ligt op emissies van ZZS, maar ook de emissies naar de leefomgeving van andere gevaarlijke stoffen krijgt aandacht: als informatie over gevaarlijke stoffen anders dan ZZS beschikbaar is, wordt dit ook meegenomen. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van CLP (Classification, Labelling and Packaging) om de groep van gevaarlijke stoffen te definiëren. CLP is de Europese verordening waarin is vastgelegd hoe het gevaar van chemische stoffen moet worden vertaald in classificaties en labels (EC 1272/2008, annex VI).

### 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt aangegeven hoe we de beantwoording van de onderzoeksvragen hebben aangepakt. In hoofdstuk 3 zijn de belangrijkste resultaten samengevat. In hoofdstuk 4 wordt dieper ingegaan op de drie illustratieve casussen van huidige technologieën:

zonnepanelen (paragraaf 4.1), windturbines (paragraaf 4.2) en aandrijfacu's (paragraaf 4.3). Hoofdstuk 5 beschrijft opkomende en nieuwe energietechnologieën, eveneens aan de hand van drie illustratieve casussen. In hoofdstuk 6 volgt een discussie over de resultaten. Tot slot zijn in hoofdstuk 7 conclusies getrokken en worden aanbevelingen gedaan. In hoofdstuk 8 is een RIVM reflectie omtrent het gebruik van gevaarlijke stoffen in de energietransitie opgenomen.



## 2 Aanpak

De verkenning bestaat uit verschillende stappen. Deze worden hieronder toegelicht.

### 2.1 Brede inventarisatie energietechnologieën en materialen

Onderzoeksvraag 1a: Wat zijn belangrijke technologieën en materialen bij de energietransitie?

In het klimaatakkoord staan afspraken met vijf sectoren over de maatregelen die deze sectoren gaan nemen om de klimaatdoelen te halen. Voor deze verkenning is aan de hand van het klimaatakkoord een brede inventarisatie gemaakt van de genoemde energietechnologieën (bijvoorbeeld elektrisch personenvervoer) en maatregelen (bijvoorbeeld elektrische auto's van de zaak). Vervolgens is op basis van grijze literatuur nagegaan welke energietechnologieën en materialen aan de orde zijn bij genoemde energiesystemen. De term energietechnologie wordt in dit rapport gebruikt om te duiden welke soort energiebron wordt gebruikt (zoals windtechnologie of zonnetechnologie), maar ook om het type van energietechnologie te omschrijven, bijvoorbeeld kristallijn siliciumtechnologie voor zonnepanelen.

De lijst van energietechnologieën is aangescherpt en aangevuld tijdens een workshopsessie met RIVM experts. In dit onderzoek wordt onderscheid gemaakt naar energietechnologieën die al veelvuldig worden toegepast ("huidige technologieën") en "opkomende en nieuwe" energietechnologieën. Dit onderscheid is gemaakt op basis van informatie beschikbaar in (grijze) literatuur.

Deze stap levert een overzicht van huidige en "opkomende en nieuwe" energietechnologieën en materialen die voortkomen uit het beleid rondom de energietransitie. Deze inventarisatie is nodig om in een tweede stap mogelijke ZZS-emissies in beeld te kunnen brengen (2.2.).

### 2.2 Inventarisatie mogelijke ZZS-emissies bij de energietechnologieën

Onderzoeksvraag 1b: Welke mogelijke emissies van ZZS en andere gevaarlijke stoffen kunnen ontstaan bij de implementatie van deze technologieën? Denk hierbij aan de hele keten: van winning, productie, gebruik en tot en met de verwerking van de materialen na gebruik (afdeling, verbranding, recycling).

Op basis van de inventarisatie uit de eerste stap (2.1) is gekeken naar de ZZS die aanwezig (kunnen) zijn, zowel in de energietechnologieën en materialen als bij de productie van de materialen. Ook is onderzocht welke mogelijke emissies van ZZS gedurende de gehele levensduur van de nieuwe technologieën en materialen bekend zijn of op basis van expert opinies te verwachten zijn. Hierbij is zowel gebruik gemaakt van wetenschappelijke literatuur als van overige bronnen, zoals de websites van producenten van de energietechnologieën of grijze literatuur. De

informatie is aangevuld door het raadplegen van experts vanuit het RIVM.

Vervolgens is voor zes casussen de keten (productie, gebruik en verwerking) beschreven. De casussen illustreren voor een bepaalde toepassing wat er bekend is over de aanwezigheid van ZZS in de productie, gebruik en verwerkingsfase. Deze casussen zijn gekozen omdat op basis van de verkenning in de eerste twee stappen is gebleken dat er ZZS in worden toegepast. Ook zijn deze casussen (naar verwachting) ondersteunend voor het formuleren van aanbevelingen (hoofdstuk 7) en illustratief voor RIVM reflectie (hoofdstuk 8).

Dit betreft zes casussen waarin zowel aandacht is voor huidige als nieuwe energietechnologieën:

Huidige:

- Zonnepanelen
- Windturbines
- Aandrijfacu's voor elektrische auto's

Opkomende en nieuwe:

- Elektrificatie
- Waterstofdragers
- Elektrolyzers.

## **2.3 Analyse resultaten en cases voor formuleren van kennishiaten en aanbevelingen**

### ***Onderzoeksvragen 2 en 3:***

- 2) Wat zijn de onzekerheden en technisch-wetenschappelijke kennishiaten bij de beantwoording van vraag 1b?
- 3) Welke aanbevelingen volgen uit deze verkenning?

De resultaten uit de eerdere twee stappen en de casussen worden geanalyseerd om:

1. te extraheren welke kennishiaten er zijn, en
2. om signalen over ZZS aangaande de energietransitie op te vangen en kansen te identificeren voor het veilig gebruik van chemische stoffen in energietechnologieën.

Geraadpleegde RIVM-experts met expertise op deze thema's:

- ZZS-emissies
- REACH en SVHC
- Safe-and-sustainable by Design
- Geavanceerde materialen
- Externe veiligheid
- Circulaire economie
- Waterstofdragers
- Batterijen en accu's
- Zonnepanelen
- Biotechnologie

Tijdens deze analysefase zijn tevens interviews gehouden met relevante partijen en inhoudelijk experts.

Gesprekken met:

- TNO (expert op vlak van zonnepanelen)
- MER-commissie
- Provincie Zuid-Holland
- Omgevingsdienst Groningen
- Omgevingsdienst DCMR (Rijnmond)





### 3 Resultaten

In paragraaf 3.1 zijn de resultaten van stap 1 en stap 2 (zie hoofdstuk 2) samengevat. In tabel 1 worden relevante energietechnologieën en het gebruik van ZZS weergegeven. De resultaten zijn uitgebreider beschreven in bijlage 2. In paragraaf 3.2 worden de belangrijkste inzichten rond emissies in de keten omschreven.

#### 3.1 ZZS in energietechnologieën

##### 3.1.1 Overzicht energietechnologieën

Vanuit de literatuurstudie zijn een groot aantal energietechnologieën naar voren gekomen. Het overzicht van energietechnologieën is opgenomen in bijlage 2.

##### 3.1.2 Overzicht resultaten mogelijke aanwezigheid gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) in energietechnologieën

De resultaten van de verkenning naar de (mogelijke) aanwezigheid van ZZS in energietechnologieën is samengevat in tabel 1. In bijlage 2 zijn de volledige resultaten van de inventarisatie opgenomen. Per energietechnologie en materiaal is omschreven of gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) kunnen worden toegepast en/of kunnen vrijkomen tijdens gebruik en/of verwerkingsfase (afdanking, verbranding en recycling) in Nederland.

In onderstaande tabel zijn enkel de ZZS opgenomen. Bij de inventarisatie is in sommige gevallen ook informatie over andere gevaarlijke stoffen gevonden. Als dit van toepassing is, is de informatie opgenomen in de bijlage 2 en bij de omschrijving van de casussen (hoofdstuk 4 en hoofdstuk 5).

Hierbij willen we benadrukken dat het gebruik van gevaarlijke stoffen niet per definitie tot risico's voor de gezondheid van mens en milieu hoeft te leiden. Hiervoor is, naast de gevaareigenschappen ook de mate van blootstelling aan deze stoffen bepalend.

*Tabel 1 Overzicht van (mogelijke) aanwezigheid ZZS in huidige en nieuwe energietechnologieën in de energietransitie. Dit betreft een eerste inventarisatie op basis van wetenschappelijke en grijze literatuur en biedt geen compleet overzicht.*

#### Huidige energietechnologieën

| Energieopwekking         | ZZS aanwezig   |
|--------------------------|--|
| Zonnepanelen             | <i>Ja:</i> afhankelijk van type zonnecel, o.a. <b>lood</b> , <b>cadmium</b> . <b>Nikkel</b> in elektroplating en metaal (RVS) onderdelen.  |
| Windturbines             | <i>Ja:</i> voornamelijk in corrosiebescherming. <b>Fenolen</b> in bepaalde type coatings, Metalen (o.a. <b>nikkel</b> )  |
| Biomassa als energiebron | <i>Mogelijk:</i> ZZS (o.a. metalen, in biociden, in gewasbeschermingsmiddelen) mogelijk aanwezig (afhankelijk van type en herkomst), en/of gevormd bij verhittingsprocessen zoals <b>PAK's</b> . <b>Formaldehyde</b> in lijmen (B-hout). |

| Energieopwekking  | ZZS aanwezig  |
|---|---|
| Vloeibare biomassa als energiebron (pyrolyseolie en dierlijke vetten) | <i>Mogelijk:</i> dioxines en <b>PAK's</b> mogelijk aanwezig in dierlijke vetten of oliën.<br><b>PAK's</b> en <b>fenolen</b> (bv. <b>catechol</b> ), afhankelijk van proces en grondstoffen voor pyrolyseproces. |

| Warmtevoorziening           | ZZS aanwezig   |
|-----------------------------|--|
| Warmtepompen en -wisselaars | <i>Mogelijk:</i> verschillende koudemiddelen in gebruik. Veel middelen nu brandbaar, giftig en/of hoge broeikaspotentie.<br><b>Nikkel</b> voor onderdelen van staal en printplaten |
| Geothermie en WKO-systemen  | <i>Mogelijk:</i> koelvloeistoffen, smeermiddelen, oppervlakte-actieve stoffen en corrosieremmers (gesloten systeem)  |

| Mobiliteit                       | ZZS aanwezig  |
|----------------------------------|---|
| Aandrijfacu's elektrisch vervoer | <i>Ja:</i> verschillende ZZS, o.a. <b>nikkel, kobalt, 1,2 dimethoxyethaan, N-methyl-2-pyrrolidone</b> |

### Opkomende en nieuwe energietechnologieën

| Energieopwekking                                | ZZS aanwezig   |
|---|--|
| Zonnepanelen, nieuwe types nog in ontwikkeling. | <i>Ja:</i> <b>DMAc, lood</b> in perovskiet panelen.<br><b>Cadmium</b> in CIGS panelen. |
| Getijden- en golfenergie                        | <i>Niet bekend:</i> wel mogelijk gebruik van anti-aangroei (biociden)                  |
| Blauwe energie                                  | <i>Niet bekend:</i> onderzoek naar gebruik geavanceerde materialen voor membranen      |

| Warmtevoorziening           | ZZS aanwezig   |
|-----------------------------|--|
| Warmtepompen en -wisselaars | <i>Mogelijk:</i> verschillende koudemiddelen in gebruik. Veel middelen brandbaar, giftig en/of hoge broeikaspotentie.<br><b>Nikkel</b> voor onderdelen van staal en printplaten. |
| Aquathermie                 | <i>Niet bekend</i>   |

| Energieopslag                                  | ZZS aanwezig  |
|--|---|
| Waterstof (productie), inclusief elektrolyzers | <i>Ja:</i> verschillende ZZS in de elektrolyzers, o.a. <b>nikkel, kobalt</b>  |
| Waterstofdragers (opslag en transport)         | <i>Ja:</i> gebruikt als Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC), o.a. <b>benzyltolueen, dibenzyltolueen, naftaleen, n-ethylcarbazoel</b> . ZZS bijproducten: <b>benzeen, fenantreen, naftaleen, methylfluoreen</b> |
| Batterijen en accu's voor energie-opslag       | <i>Ja:</i> <b>kobalt, nikkel</b>  |
| Brandstofcellen                                | <i>Ja:</i> <b>nikkel, kobalt</b>  |
| Power-to-X technieken                          | <i>Niet bekend</i>  |

| <b>Overige ontwikkelingen</b>            | <b>ZZS aanwezig</b>   |
|--|---|
| Slimme energiesystemen                   | <i>Ja</i> : ZZS in elektronica-producten (vergelijkbaar met huidige producten)  |
| Elektrificatie van industriële processen | <i>Ja</i> : ZZS in elektrische regelsystemen (vergelijkbaar met huidige producten) bijvoorbeeld brandvertragers, weekmakers |
| Biomassa als bouwstof                    | <i>Ja</i> : <b>formaldehyde</b> <sup>2</sup> (lijmen).  |

### 3.2 Gebruik en emissies van ZZS per ketenstap

In deze paragraaf is de informatie over het gebruik en (mogelijke) emissies van ZZS gerelateerd aan de energietransitie samengevat. Bij de omschrijving van casussen wordt deze informatie voor zes energietechnologieën nog verder verdiept (zie hoofdstuk 4 en 5).

#### 3.2.1 Gebruik van ZZS bij productie

In verschillende materialen en energietechnologieën die onderdeel zijn van deze verkenning worden ZZS toegepast (zie tabel 1). Voor zover bekend vindt de productie van de benodigde materialen vooral buiten Nederland plaats. Over emissies van ZZS is geen informatie bekend en daarom niet opgenomen.

#### **Huidige energietechnologieën**

Er is geen productie van **batterijcellen** in Nederland (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022b). Ook in Europa is de productiecapaciteit van batterijen zeer klein (in 2018 slechts ongeveer 3 % van de mondiale productiecapaciteit<sup>3</sup>).

Producenten van **windturbines** zijn eveneens in het buitenland gevestigd. Twee van de grootste windturbineproducenten ter wereld, namelijk Siemens Wind Power en Vestas Wind Systems, zijn in Denemarken gevestigd. Sommige grondstoffen voor windturbines zoals acrylonitril (ZZS) voor het maken van koolstofvezels in wieken, smeeroilolie en vermoeiingsresistente mortel worden in Nederland geproduceerd (bron: VNCI<sup>4</sup>).

Wat betreft de **zonnepanelen** vindt productie vooral in China plaats, maar zijn er ook een aantal producenten van zonnepanelen in Nederland. Nederlandse producenten maken gebruik van innovatieve ontwerp oplossingen waardoor (bepaalde) ZZS (zoals lood) en PFAS verbindingen bij de productie van zonnepanelen worden vervangen. Meer informatie hierover is opgenomen in paragraaf 4.1.

Voor sommige ZZS zijn internationale verdragen of wettelijke kaders (zoals REACH wetgeving) van toepassing. Maar dat geldt niet voor de ZZS die nog niet gereguleerd zijn onder deze internationale verdragen. Het is mogelijk dat in productielanden nog specifieke beperkingen of verboden gelden, maar dat valt buiten de scope van dit onderzoek.

<sup>2</sup> Formaldehyde zit in zeer kleine hoeveelheden in houtvezelplaten, zoals spaanplaat, High Density Fibreboard (HDF), Medium Density Fibreboard (MDF), triplex en multiplex en is gereguleerd t.b.v. consumentenveiligheid.

<sup>3</sup> [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/INAP22\\_02/INAP\\_Batteries\\_NL.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/INAP22_02/INAP_Batteries_NL.pdf)

<sup>4</sup> <https://www.vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel?newsitemid=4954226688>

Of er emissies zijn in het buitenland bij de productie van de materialen die geïmporteerd worden is niet onderzocht. Het is bekend dat er problemen zijn in deze productieketens als het bijvoorbeeld gaat om het winnen van grondstoffen voor deze materialen en lokale milieueffecten bij de productie van de materialen. Dat was ook de aanleiding voor het ondertekenen van het IMVO-convenant voor de Hernieuwbare Energiesector in maart 2023<sup>5</sup>. IMVO staat voor internationaal maatschappelijk verantwoord ondernemen. Een coalitie bestaande uit zonne- en windenergiebedrijven, brancheorganisaties, de Nederlandse overheid, kennisinstututen, ngo's en vakbonden heeft zich aangesloten. Het convenant is bedoeld om de risico's en effecten voor mens en milieu in de activiteiten en toeleveringsketens van de sector hernieuwbare energie te verkennen, te identificeren en aan te pakken.

Circulaire innovaties voor het huidige type van zonnepanelen (kristallijn silicium) zijn op dit moment al opgenomen in het MMIP (Meerjarig Missiegedreven Innovatie Programma) hernieuwbare elektriciteit op land. Daarbij is er ook aandacht voor het verminderen of elimineren van het gebruik van toxische stoffen (naast andere aspecten zoals design-for-recycling). Dit heeft tot nu toe geleid tot een aantal kansrijke innovatieprojecten, maar er is nog veel onderzoek en ontwikkeling nodig om tot grootschalige productie van circulaire zonnepanelen te komen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023).

In het Nationaal Programma Circulaire Economie (NPCE) is er ook aandacht voor toxische stoffen in zonnepanelen, en is als effectdoel (voor 2030) gesteld: "minder milieu-impact als vermindering van impact van (zeer) zorgwekkende stoffen (lood, PFAS) op de Nederlandse/Europese markt". Er zijn 17 maatregelen geformuleerd voor de productgroep zonnepanelen, vooral gericht op circulariteit. Wat betreft stoffen wordt het MMIP als instrument genoemd. Hoe de effectdoelen van het NPCE gemonitord zullen worden, wordt de komende jaren nog verder uitgewerkt door een samenwerking tussen verschillende kennisinstellingen, waaronder RIVM.

### ***Opkomende en nieuwe energietechnologieën*** **Waterstof en waterstofdragers**

Waterstof is een duurzame energiebron die in de toekomst steeds vaker gebruikt zal worden. In de afspraken van het Klimaatakkoord is voor waterstof een stevige ambitie opgenomen.

Het RIVM heeft onderzoek gedaan naar ZZS-eigenschappen van 8 verschillende LOHC's en twee LIHC's (Marinković & Ng-A-Tham, 2024). Het onderzoek wordt naar verwachting in het eerste kwartaal van 2024 gepubliceerd. Uit het onderzoek blijkt dat alle LOHC's één of meerdere stoffen hebben met ZZS-eigenschappen. Echter, de mate waarin ZZS aanwezig zijn of gevormd worden kan verschillen. Soms zijn het de waterstofdragers zelf, maar er kunnen ook bijproducten gevormd worden die ZZS eigenschappen hebben. Bij de twee onderzochte circulaire LOHC's methanol en mierenzuur (met koolstofdioxide als waterstofarme drager) zijn de dragers geen ZZS. Vorming van de ZZS

<sup>5</sup> <https://www.imvoconvenanten.nl/nl/hernieuwbare-energie>

koolstofmonoxide tijdens waterstofafgifte is mogelijk, deze kan echter tijdens hetzelfde proces weer met water reageren tot koolstofdioxide. De circulaire LIHC ammoniak bevat geen stoffen met ZZS-eigenschappen, maar is acuut zeer giftig wat vanuit omgevingsveiligheid een bron van zorg is.

Waar de productie van de (basis)chemicaliën plaats zal vinden voor de LOHC's is nog niet bekend. Gezien de omvang van de chemische industrie in Nederland is het niet ondenkbaar dat LOHC's ook in Nederland geproduceerd kunnen worden. Arcadis and Berenschot (2021) verwachten dat de LOHC-stoffen niet in Nederland geproduceerd worden, maar het is onbekend waarop dit gebaseerd is. Omdat in Nederland verschillende grote chemische bedrijven zijn gevestigd is het niet ondenkbaar dat deze bedrijven in de toekomst een rol kunnen spelen in de productie van grondstoffen voor waterstofdragers. Sommige LOHC stoffen worden nu al geproduceerd, maar dan voor andere functies. Kennis over ZZS emissies bij productie is mogelijk beschikbaar maar het is niet bekend of deze stoffen in Nederland geproduceerd worden en welke emissies kunnen plaatsvinden. Het dient opgemerkt te worden dat naast ZZS emissies er ook andere zorgen kunnen zijn. Zo wordt in het Arcadis en Berenschot rapport opgemerkt dat bij de productie van benzyltolueen chloor nodig is, wat tot risico's voor de omgevingsveiligheid kan leiden.

### **Elektrolyzers**

Voor het splitsen van water in waterstof en zuurstof via een elektrische stroom (elektrolyse) is een elektrolyser nodig. Er zijn verschillende soorten elektrolytische cellen: polymeer elektrolyt membraan elektrolytische cellen (PEM), alkalische water elektrolytische cellen (AEL<sup>6</sup>) en solid oxide elektrolyse cells (SOEC).

Alle huidige types van elektrolyzers vereisen kritische grondstoffen als katalysator voor het splitsen van het watermolecuul (TNO, 2020; Wieclawska & Gavrilova, 2021). Grondstoffen worden als "kritisch" of "essentieel" beschouwd als zij van essentieel belang zijn voor de economie van de EU en tegelijk een relatief hoog risico op onderbreking van de voorziening met zich meebrengen.<sup>6</sup> Voor het AEL-type zijn deze kritische grondstoffen ook ZZS. Of er emissies zijn van ZZS bij de productie van elektrolyzers is niet bekend. Naast ZZS worden ook PFAS gebruikt in de membranen van elektrolyzers.

Er liggen veel kansen voor de Nederlandse maakindustrie op het gebied van de productie van elektrolyzers (TNO, 2020). Nanomaterialen worden genoemd als potentiële ontwikkelrichting. In paragraaf 3.3.1 wordt verder ingegaan op het gebruik van nano- en geavanceerde materialen in de energietransitie. Ook wordt geïnnoveerd om kritische grondstoffen te vervangen, zoals kobalt en nikkel, die zowel ZZS als een kritische grondstof zijn.

<sup>6</sup> Definitie van "kritisch" zoals gebruikt door de Europese Commissie. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>

### **Batterijen voor energieopslag van hernieuwbare energie**

Binnen Europa is steeds meer inzet op de ontwikkeling en productie van batterijen. In 2019 gaf de Europese Commissie groen licht voor een omvangrijke financiering voor een batterijen-initiatief gericht op versterking van kennis en productie in de EU o.a. vanwege de dominantie van de markt door Aziatische spelers (Europese Commissie, 2019).

De markt voor energieopslag worden momenteel voornamelijk gevormd door lithium-ion batterijen. De naam lithium-ion wordt vaak gebruikt voor verschillende soorten chemische samenstellingen. Lithium-metaaloxiden of fosfaten zijn het meest voorkomende materiaal dat wordt gebruikt als aanwezig positief materiaal. Grafiet, maar ook een combinatie van grafiet en silicium of gelithieerde titanium-oxiden worden als negatieve materialen gebruikt.

Er zijn veel ontwikkelingen, zoals de volledige vaste stof batterijen waarbij het vloeibare elektrolyt vervangen wordt door een vaste stof die batterijen veiliger kunnen maken. Maar ook batterijen met andere ladingdragers, zoals natrium-ionbatterijen en ijzer-lucht batterijen. Dan zijn er ook nog de redox flow batterijen. Dit energie-opslagsysteem maakt gebruik van twee grote opslag tanks. Voorbeelden zijn vanadium-flowbatterijen en organische flowbatterijen.

In een review paper van het Horizon 2020 project SUNSHINE (Soeteman-Hernández et al., 2023) is een analyse opgenomen van 22 verschillende batterijen op basis van grondstoffenbeschikbaarheid, toxiciteit en veiligheid, milieu en sociale impact, circulariteit, functionaliteit en kosten (Soeteman-Hernández et al., 2023). Daarbij is gekeken naar de actieve componenten en de basischemie van deze batterijen en verschillende types van batterijen zoals vloeibare batterijen, vaste stof batterijen, redox flow en hybride batterijen. Daaruit blijkt dat naast stoffen met CMR (carcinogeen, mutageen of reproductief toxisch) eigenschappen, er ook veel batterij-ontwikkelingen zijn die geen gebruik maken van deze CMR stoffen. In de inventarisatie is er ook onderzocht welke van de andere toegepaste stoffen in batterijen toxisch zijn voor waterorganismen (zie tabel 1). Ook blijkt uit de review dat er stoffen zijn waarvoor de gevaareigenschappen nog niet volledig in kaart zijn gebracht. In de review zijn met name grondstoffen voor anode, kathode en de elektrolyten in kaart gebracht.

De Nederlandse overheid heeft de ambitie om haar bedrijven en kennisinstellingen, sterker te positioneren op het gebied van batterijsystemen en de bijbehorende waardeketen. In Nederland wordt er op verschillende universiteiten onderzoek gedaan naar nieuwe materialen, maar ook naar nieuwe celconcepten. Tegelijkertijd zijn er diverse kleine en middelgrote bedrijven, start-ups die werken aan apparatuur, maar ook aan nieuwe technieken om batterijmaterialen te maken. De activiteiten in Nederland zijn vooral gericht op batterijen voor 'stationary storage voor opslag in huizen, in buurten.'<sup>7</sup>

Er is een Actieagenda Batterijsystemen opgesteld door een expertgroep afkomstig uit het bedrijfsleven en kennisinstellingen (Ministerie van

<sup>7</sup> <https://www.rijksoverheid.nl/ministeries/ministerie-van-economische-zaken-en-klimaat/het-verhaal-van-ezk/weblogs/2023/de-duurzame-batterij-van-de-toekomst-wordt-in-nl-ontwikkeld>

Infrastructuur en Waterstaat, 2022b) om te inventariseren welke kansen er liggen en welke steun nodig is vanuit de topsectoren en de overheid. Hierin is echter niets opgenomen over de emissies van gevaarlijke stoffen bij de productie. Uit de actieagenda blijkt dat de expertise in Nederland voornamelijk ligt in de materiaalkunde, dunne filmtechnieken en nanotechnologie en focust zich op nieuwe materialen voor kathodes, elektrolyten, vaste stof elektrolyten en het gebruik van polymeren in batterijen (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022b). Daarnaast worden in de Nederlandse (chemische) industrie veel anorganische en katalytische materialen geproduceerd en ontwikkeld die gebruikt kunnen worden in batterijen.

In het kader van de Green Deal heeft de Europese Commissie een nieuwe verordening voorgesteld ter vervanging van de huidige batterijenrichtlijn. De verordening introduceert nieuwe verplichtingen waaraan batterijen moeten voldoen. Dit gaat ook over het gebruik van specifieke giftige stoffen zoals een verbod op kwikhoudende en cadmium houdende batterijen. Mogelijk worden ook beperkingen opgelegd voor andere ZZS (met name de SVHC). Er is betrokkenheid voorzien van de wetenschappelijke comités van ECHA, o.a. om relevante gevaarlijke stoffen voor batterijen te identificeren.

### **Andere materialen**

Uit de verkenning zijn vooral energietechnologieën voor de energietransitie naar voren gekomen zoals waterstofdragers en windturbines. Daarnaast zijn er natuurlijk nog materialen en producten nodig, bijvoorbeeld chemische producten als coatings, brandvertragers of membranen waarin ZZS kunnen worden toegepast. Dit kunnen specifieke en nieuwe materialen en producten zijn, maar ook materialen en producten die al toegepast worden maar door de energietransitie in nieuwe toepassingen of in grotere hoeveelheden zullen worden gebruikt. Denk bijvoorbeeld aan toenemende digitalisering en elektrificatie. Aangezien er geen gedetailleerd zicht is op de toegepaste materialen en producten en de chemische samenstelling hiervan, is het niet mogelijk een beschrijving te geven van de ZZS-emissies in de productiefase van deze materialen en producten.

#### **3.2.2**

**Gebruik en mogelijke emissies van ZZS tijdens de gebruiksfase**  
Naar verwachting kunnen er incidenteel en/of plaatselijk emissies van ZZS plaatsvinden bij het gebruik van materialen die relevant zijn voor de energietransitie. Hieronder worden een aantal voorbeelden genoemd.

Lokale emissies kunnen voorkomen bij beschadiging van zonnepanelen waardoor zware metalen kunnen uitloggen naar de bodem (Duyvis et al. 2021) Door slijtage kunnen gevaarlijke stoffen en microplastics vrijkomen uit de coatings van de mast en de bladen van windturbines (Hof, 2023). Er is echter nog weinig bekend over de stoffen waarover het precies gaat bij windturbines in Nederland en hoeveel van elke stof vrij komt (Hof, Bodar, & de Kort, 2023). Deze kennis is nodig om te kunnen bepalen of de emissies van stoffen gebruikt bij windturbines daadwerkelijk schadelijk zijn voor mens en milieu.

Als het gaat om LOHC's dan zijn er nog vele vragen. Zo is nog onbekend in welke mate deze toegepast zullen worden. Vooralsnog zijn er plannen

om in zeehavens LOHC's te importeren, maar ook vanuit het achterland (Chempark Dormagen in Duitsland). In ieder geval staat vast dat bij het grootschalig toepassen van LOHC's voor waterstoftransport, er ook grootschalige opslag van LOHC's nodig zal zijn. Het opslaan van LOHC's zal waarschijnlijk op dezelfde manier gebeuren als het opslaan van fossiele brandstoffen, namelijk in opslagtanks. Emissies naar water of bodem kunnen optreden bij lekkages tijdens transport of opslag en het (de)hydrogenatieproces.

De mate waarin emissies van ZZS naar lucht kunnen vrijkomen bij transport, opslag en het (de)hydrogenatieproces is o.a. afhankelijk van:

- fysisch-chemische eigenschappen van de LOHC zelf, zoals de dampspanning (speelt met name bij toluene een rol).
- Type van bijproducten die gevormd kunnen worden bij (herhaaldelijk) hydrogeneren en dehydrogeneren.
- De technieken en specifieke omstandigheden bij het transporteren, laden, lossen, de opslag en (de)hydrogenatieproces.

Bij de opslag van huidige fossiele brandstoffen kunnen diffuse en incidentele emissies naar lucht van vluchtige stoffen (o.a. VOS en ZZS) plaatsvinden. Om emissies te voorkomen zijn afzuiging- en dampverwerkingssystemen beschikbaar. Uit de interviews met omgevingsdiensten blijkt dat er zorgen zijn over de afdoende werking van deze systemen voor afvangen van emissies die ontstaan bij de opslag van huidige fossiele brandstoffen. Ook bij storingen van deze verwerkingssystemen kunnen dampen vrijkomen. Dezelfde problematiek speelt mogelijk ook voor LOHC opslag afhankelijk van dampspanning van de LOHC.

Ook bij aanleg en onderhoud kunnen emissies vrijkomen, bijvoorbeeld emissies van koudemiddelen bij warmtepompen, of bij het schuren en coaten van beschadigde delen van windturbinebladen. In deze verkenning is echter niet onderzocht welke ZZS en in welke hoeveelheden deze vrij kunnen komen bij onderhoud

### 3.2.3 *Gebruik en mogelijke emissies van ZZS bij afdanking, hergebruik en recycling*

Op dit moment zijn veel materialen die nodig zijn voor het produceren van energietechnologieën nog in gebruik. Afdanking van producten vindt nu nog in beperkte mate plaats, bijvoorbeeld voor zonnepanelen en aandrijfaccu's voor auto's. Op dit moment worden ingezamelde zonnepanelen in België verwerkt (Stichting Open, 2023). Wat betreft de ingezamelde aandrijfaccu's, worden batterijen die nog goed zijn, hergebruikt, en ander batterijen worden gerecycled. In Nederland zijn nog geen recyclers van batterijen (ARN, 2023). Voor de recycling van windturbinebladen zijn nieuwe recyclingtechnologieën ontwikkeld. De volgende stap is het opzetten van demo-locaties en het ontwikkelen van de business case.

Naar verwachting zal er meer inzameling- en recyclinginfrastructuur worden opgericht voor o.a. zonnepanelen, windturbines en batterijen. In de toekomst zullen veel grotere volumes van deze producten in de afdankingsfase komen. De verwachting is dat deze deels in Nederland verwerkt zullen worden.



Om emissies bij de verwerking van deze afvalstromen goed in te kunnen schatten is het nodig om een goed beeld te hebben van de samenstellingen van de materiaalstromen in het verwerkingsproces. Deze informatie is ook nodig voor het beoordelen van vergunningsaanvragen voor deze nieuwe verwerkingsprocessen. Echter, bij afvalstromen is de karakterisering van de materialen en de samenstelling een uitdaging (Beekman et al., 2020). Dat geldt ook voor materialen die nodig zijn voor de energietechnologie zoals batterijen waarvan heel veel verschillende types bestaan. Wat betreft de meest toegepaste zonnepanelen (type kristallijn silicium) is relatief veel data gevonden in de literatuur wat betreft de samenstelling. Voor andere materialen en energietechnologieën is dat niet altijd het geval, wat kan leiden tot vragen van omgevingsdiensten over ZZS. Het ontsluiten van kennis over ZZS in materiaal- en afvalstromen is belangrijk voor een transitie naar een veilige circulaire economie.

#### 3.2.4 *Incidentele emissies*

Incidentele emissies van gevaarlijke stoffen en de depositie daarvan (via roetdeeltjes) kunnen plaatsvinden als gevolg van brand van bijvoorbeeld zonnepanelen of lithiumbatterijen. Er zijn verschillende initiatieven om de normering en regelgeving aangaande brandveiligheid aan te passen waardoor ook het risico op brand en dus ook de incidentele verspreiding van stoffen naar de leefomgeving wordt verminderd.

#### 3.2.5 *Biomassa als energiebron*

Biomassa kan op verschillende manieren worden omgezet in bruikbare energie: verbranding, vergisting en vergassing (hoge temperatuur), torrefractie (relatief lage temperatuur) en pyrolyse.

Voorbeelden van ZZS die vrij kunnen komen bij het verwerken van biomassa zijn ZZS biociden, ZZS gewasbeschermingsmiddelen en PAK's, maar ook andere gevaarlijke stoffen zoals stikstofoxiden, ammoniak en koolstofmonoxide (CO). Het risico op emissie van ZZS is voor elke biomassa-techniek combinatie anders. Voor verbranding is dit mede afhankelijk van de leeftijd van de installatie, aanwezigheid rookgasreiniging, stookwijze en kwaliteit brandstof. Om de uitstoot van deze stoffen naar de lucht te beperken, zijn emissienormen vastgesteld.

Grote biomassacentrales, met een vermogen groter dan 15 MW, moeten aan strengere emissienormen voldoen dan kleinere centrales (vermogen tussen 1 en 15 MW) en warmteketels (vermogen kleiner dan 1 MW) (Gooijer & Mennen, 2021).

Ook zijn er regels over gebruik van biomassa. Houtafval dat ten gevolge van een behandeling met houtbeschermingsmiddelen of door het aanbrengen van een beschermingslaag gehalogeneerde organische verbindingen dan wel zware metalen kan bevatten is niet gedefinieerd als biomassa onder het activiteitenbesluit (Infomil, 2023). Voor het beheersen van ZZS-emissies, is het belangrijk dat biomassa verwerkt wordt volgens de methoden waarvoor een vergunning is afgegeven. Wanneer bijvoorbeeld vervuilde biomassa (C-hout) in een installatie wordt verwerkt die daar niet voor ontworpen is dan kan dit leiden tot schadelijke emissies.

Afhankelijk van het type en de herkomst kunnen residuen van gewasbeschermingsmiddelen en biociden in biomassa aanwezig zijn. Gegevens daarover zijn schaars (Ehlert et al., 2016). Bij vergisting kunnen mogelijk residuen van gewasbeschermingsmiddelen en biociden in het digestaat aanwezig zijn en is er een risico dat dit leidt tot ongewenst hoge contaminatie van de bodem. Daarom is er een protocol opgesteld voor de beoordeling van afval en bijproducten voor gebruik als meststof, secundaire grondstof voor meststofproductie of voor de productie van digestaat: "Protocol beoordeling stoffen Meststoffenwet". Het protocol beschrijft de systematiek gehanteerd bij het toetsen op landbouwkundige waarde en de risicobeoordeling op milieubezwaarlijkheid (Commissie Deskundigen Meststoffenwet, 2016). Bij de risicobeoordeling van covergistingmaterialen wordt rekening gehouden met de anaerobe afbraak van de microverontreiniging tijdens vergisting.

De behoefte aan en toepassing van biomassa in de toekomst is afhankelijk van veel factoren en ontwikkelingen op nationaal en internationaal niveau. Vooralsnog wordt in het Klimaatakkoord biomassa genoemd als een 'transitiebrandstof' die 'noodzakelijk is voor de verduurzaming van onze economie en het realiseren van de Klimaatopgave'. Er wordt overigens ook gewerkt aan nieuwe, milieuvriendelijkere energietechnologieën voor biomassa, zowel wat betreft nieuwe en verbeterde toepassingen als het verlagen van emissies van schadelijke stoffen. Een van de nieuwe ontwikkelingen, waar veel van wordt verwacht, is het gebruik van zeewier als biomassabron (Gooijer & Mennen, 2021).

Over de effecten van het (toenemend) gebruik van biomassaverbranding op emissies van ZZS en de luchtkwaliteit in Nederland is relatief weinig bekend (Gooijer & Mennen, 2021). Dit komt mede doordat in de landelijke emissieregistratie alleen de emissies van biomassacentrales met een vermogen groter dan 50 MW worden geregistreerd. Dit komt neer op een paar grote centrales. De emissies van het groeiend aantal kleine installaties (vermogen lager dan 50 MW) blijven op deze manier buiten beeld.

Door de maatschappelijke zorgen die er leven rondom luchtkwaliteit en biomassa gestookte ketels worden de emissiegrenswaarden voor luchtverontreinigende stoffen aangescherpt.<sup>8</sup> Ook blijkt uit een studie in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat dat emissies van biomassastook te reduceren zijn door moderne nageschakelde technieken (HaskoningDHV Nederland B.V., 2020). Daarbij zijn emissies van o.a. fijnstof en stikstofoxiden onderzocht en niet de emissies van ZZS.

### 3.2.6

#### *Opslag van CO<sub>2</sub>*

Afvang, transport en opslag van door de industrie geproduceerde CO<sub>2</sub> (CCS) wordt door de industrie en door de Rijksoverheid gezien als

<sup>8</sup> Per 1 januari 2027 moeten ketels van voor 2015 met een nominaal thermisch ingangsvermogen tot 1 MW voldoen aan emissiegrenswaarden zoals deze ook per 1 januari 2015 zijn gaan gelden voor nieuwe ketels met een nominaal thermisch ingangsvermogen onder 1 MW, namelijk 40 mg/Nm<sup>3</sup> voor stof, 300 mg/Nm<sup>3</sup> voor NO<sub>x</sub>, en 200 mg/Nm<sup>3</sup> voor SO<sub>2</sub>

noodzakelijke activiteit om de 2030-doelstelling te behalen. Afvang en transport kunnen bovendien dienen als opmaat naar hergebruik van koolstof (CCU). Op dit moment werken verschillende bedrijven aan de ontwikkeling van projecten om CO<sub>2</sub>-opslag in Nederland mogelijk te maken.

Afvalverbrander SUEZ wil de helft van de geproduceerde CO<sub>2</sub> afvangen. Deze kan weer worden gebruikt in de nabijgelegen glastuinbouw. De CO<sub>2</sub> zal worden afgevangen door een oplosmiddel via een proces van absorptie. Emissies bij gebruik van het oplosmiddel monoethanolamine (MEA) zijn nader onderzocht in het milieueffectrapport (Royal Haskoning DHV, 2021). MEA is het meest gebruikte oplosmiddel voor chemische absorptie maar er zijn ook andere oplosmiddelen mogelijk. Bij het gebruik van MEA als oplosmiddel tijdens het proces van CO<sub>2</sub>-afvang kunnen in een reactie de stoffen (nitrosoimino)bisethanol (NDELA) en nitroso-N-(2-hydroxyethyl)-glycine (NHEGly) ontstaan. NDELA is een ZZS en NHEGly kan mogelijk ook ZZS eigenschappen hebben.<sup>9</sup> In het MER rapport wordt aandacht besteed aan mogelijke emissies van NDELA en NHEGly. De emissies ontstaan door degradatie van het chemische absorptiemiddel bij de afvang van de CO<sub>2</sub> in de absorber, door chemische reacties met verontreinigingen in de rookgassen (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>) en door decompositie vanwege thermische belasting in het afvangproces. De gevormde verontreinigingen worden meegevoerd in de behandelde rookgassen, die in de regel op de buitenlucht worden geëmitteerd. Op basis van een emissietoets wordt geconcludeerd dat de emissies onder een drempelwaarde blijven waarboven de emissie relevant is (RoyalHaskoningDHV, 2021). Omdat NDELA als ZZS is geclassificeerd, blijft de minimalisatieverplichting van kracht. Tegelijkertijd wordt er ook aangegeven dat er nog leemten in kennis zijn als het gaat om werkelijke emissies en de typen en hoeveelheden afbraakproduct. Dit speelt nog meer bij andere oplosmiddelen dan voor het oplosmiddel MEA (Royal Haskoning DHV, 2021).

Porthos (Port of Rotterdam CO<sub>2</sub> Transport Hub & Offshore Storage) is een project van het Havenbedrijf Rotterdam, Energie Beheer Nederland en de Nederlandse Gasunie. Het Porthos-project focust op het aanleggen van de hoofdtransportleiding, een compressorstation en de opslag van CO<sub>2</sub> in lege gasvelden onder de Noordzee. De milieugevolgen zijn onderzocht in een milieueffectrapport (RoyalHaskoningDHV, 2020b). Het is nog niet bekend welke bedrijven en afvangtechnieken daadwerkelijk aan Porthos gaan leveren. In de MER worden verschillende afvangtechnieken genoemd, waaronder ook chemische absorptie met oplosmiddelen. Uit de MER voor dit project en de aanvulling blijkt ook het belang van aandacht voor de ZZS-emissies door afvangen van CO<sub>2</sub> bij de aanleverende industrie en zijn mitigerende maatregelen omschreven (RoyalHaskoningDHV, 2020a).

<sup>9</sup> Deze analyse is uitgevoerd ten behoeve van een vraag van bevoegd gezag volgens de werkwijze 'stofadviezen', zie de risico van stoffenwebsite van het RIVM, zie [Stofadviezen Zeer Zorgwekkende Stoffen | Risico's van stoffen \(rivm.nl\): NHEGly heeft een vergelijkbare zorg als een potentiële ZZS](#) o.a. vanwege sterke structuurgelijkenis met NDELA, [positieve resultaten uit in vitro testen voor genotoxiciteit en meerdere voor CMR-eigenschappen volgens de OECD-toolbox](#).

### 3.3 Overige aspecten

#### 3.3.1 Geavanceerde materialen

Geavanceerde materialen bieden allerlei technische mogelijkheden, en kunnen bijdragen aan het behalen van de klimaatdoelstellingen zoals verwoord door de Verenigde Naties, en in de Green Deal van de Europese Commissie (Europese Commissie, 2020).

Het is moeilijk om geavanceerde materialen onder een precieze omschrijving te vangen. Dit komt omdat geavanceerde materialen sterk verschillen in vorm en samenstelling. De OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) heeft een werkdefinitie opgesteld (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022), waarbij de belangrijkste kenmerken als volgt worden gedefinieerd:

- Nieuwe of verbeterde eigenschappen, en/of
- Gericht of verbeterde structureigenschappen met als doel specifieke of verbeterde functionaliteit te verkrijgen.

Vaak gaat het om materialen met een nano-structuur. Enkele voorbeelden van geavanceerde materialen zijn:

- Metaal-organische structuren (metal organic frameworks – MOFs). MOFs zijn een speciale vorm van poreuze hybride materialen. Metaalionen (of metaalcomplexen) worden in de MOFs bij elkaar gehouden met een organische stof. De poriegrootte is belangrijk voor de functie, bijvoorbeeld de opslag van CO<sub>2</sub>;
- Aerogel. Een lichtgewicht materiaal door de (nano)poriën. Aerogels zijn bijvoorbeeld geschikt als isolatiemateriaal met brandvertragende eigenschappen;
- Grafeen-gerelateerde materialen: een tweedimensionaal materiaal dat bestaat uit een enkele laag koolstofatomen gerangschikt op een rooster met een hexagonale structuur. Door elektronische, optische, thermische en mechanische eigenschappen van grafeen zijn verschillende toepassingen mogelijk, zoals in batterijen, zonnecellen en transistors.
- Perovskiet voor zonnecellen: een nanomateriaal met een perovskiet kristal structuur<sup>10</sup>, meestal een hybride organisch-inorganisch lood of tin halide-gebaseerd materiaal. Er zijn dunne film perovskiet panelen, of perovskiet kan gecombineerd worden met gangbare silicium zonnecellen (tandem).

Volgens het RIVM is het onzeker of de huidige wetgeving en bestaande testmethoden de ontwikkelingen in geavanceerde materialen voldoende afdekken (Peijnenburg et al., 2021). Zo kunnen de verschillende delen van de geavanceerde materialen samen mogelijk een groter effect veroorzaken dan ieder deel op zich. Of kan de nieuwe functionaliteit leiden tot risico's die nog niet bekend waren voor één van de onderdelen van het materiaal. Daarnaast kan het zijn dat geavanceerde materialen door hun vorm en samenstelling zich anders gedragen dan simpele nanomaterialen in bijvoorbeeld testmedia of het milieu.

<sup>10</sup> Perovskiet is een klasse van materialen die dezelfde kristalstructuur hebben als calcium-titanium-oxide (CaTiO<sub>3</sub>).

### 3.3.2 PFAS

Op 22 maart 2023 is het voorstel voor een Europees verbod op PFAS (Per- en polyfluoralkylstoffen) gepubliceerd door ECHA (European Chemicals Agency). Het restrictievoorstel en het bijbehorende dossier met de onderbouwing is opgesteld door Nederland samen met Duitsland, Denemarken, Zweden en Noorwegen. De landen concluderen dat er een onacceptabel risico is als gevolg van productie, handel en gebruik van een brede groep van PFAS (Per- en polyfluoralkylstoffen). Op basis hiervan wordt een verbod van PFAS voorgesteld. Het dossier wordt nu beoordeeld door ECHA's wetenschappelijke comités (RAC: risicobeoordeling en SEAC: socio-economische analyse) en daarna volgt de besluitvorming door de Europese Commissie. In de definitieve restrictie zal uiteindelijk helder worden wat de reikwijdte is en welke overgangstermijnen en uitzonderingen zijn overeengekomen op basis van wetenschappelijk advies en beleid. Merk op dat de meeste PFAS niet als ZZS zijn geïdentificeerd. Op dit moment staan er 95 PFAS en PFAS groepen op de ZZS-lijst.

De energiesector kent een hoog PFAS verbruik van naar schatting 3000 ton per jaar voor 2020 (ECHA, 2023b). PFAS (kunnen) onder andere worden gebruikt voor:

- Lithium-ion batterijen (o.a. als bindmiddel)
- PEM brandstofcellen (als membraan en sealing)
- Niet-PEM type van elektrolyser (als tubes and inliners)
- Zonnepanelen (voor- en achterblad)
- Windturbinebladen (in de coating)

Emissies van PFAS uit materialen gebruikt in de energiesector worden tijdens productie en gebruiksfase laag ingeschat (0%-5%) t.o.v. sommige andere toepassingen zoals cosmetica en ski wax (ECHA, 2023b).

Een open vraag betreft het lot van de fluoratomen van PFAS bij verbranding. Tijdens het verbrandingsproces worden PFAS deels vernietigd en kunnen mogelijk andere, bijvoorbeeld kortketenige PFAS verbindingen gevormd worden (ECHA, 2023a). Ook kunnen er zeer potente broeikasgassen gevormd worden tijdens verbranding (Bakker et al., 2021). De effecten van afvalverbranding op PFAS zijn een onzekere factor en het is duidelijk dat de verbrandingscondities een grote invloed hebben op de vernietiging van PFAS. Een massabalans zou meer duidelijkheid kunnen geven. Verder blijkt dat er nog geen gestandaardiseerde methoden beschikbaar zijn om de emissieconcentratie van PFAS in de rookgassen van afvalverbrandingsinstallaties te meten. Het zou echter technisch mogelijk moeten zijn om verschillende PFAS in de rookgassen te bemonsteren (Bakker et al., 2021).

Naast mogelijke aanwezigheid in rookgassen kunnen PFAS voorkomen in slakken en in bodem- en vliegassen, die als reststoffen overblijven na de verbranding van afval (Bakker et al., 2021). Afhankelijk van de wijze van opslag, alsmede de verwerking van deze bijproducten in nuttige toepassingen zoals de bouwmaterialen, bestaat er een risico op verspreiding van PFAS. Het is belangrijk om te weten in hoeverre PFAS te verwachten zijn in bodem- en vliegassen en of er een risico op verspreiding naar het milieu bestaat.

## 3.3.3

*Kritieke materialen*

Er wordt veel onderzoek gedaan naar de strategische en kritieke materialen, vooral metalen, die nodig zijn voor de energietransitie. Het JRC (Joint Research Centre) heeft recent een rapport uitgebracht over toeleveringsketens van grondstoffen in verschillende technologieën (Carrara et al., 2023). In de studie zijn 87 grondstoffen beoordeeld, op basis van recent onderzoek van de Europese Commissie gezien worden als strategische en/of kritieke grondstof.

Hieruit blijkt dat de ZZS nikkel, kobalt, lood, cadmium en arseen in verschillende technologieën worden gebruikt (zie onderstaande tabel). Ook in ondersteunende technologieën voor de energiesector worden deze stoffen toegepast.

*Tabel 2 gebruik van ZZS metalen in energietechnologieën en ondersteunende technologieën (schuingedrukt) (Carrara et al., 2023). PEMFC = Proton exchange membrane fuel cells, SOFC = solid oxide fuel cells.*

| <b>ZZS</b>    | <b>Technologieën</b>                   | <b>Functie</b>   |
|---------------|--|--|
| <b>Nikkel</b> | Accu's                                 | Hydroxide of intermetallische verbinding, in kathode                       |
|               | Brandstofcellen                        | In anode (SOFCs)   |
|               | Elektrolyzers                          | Elektrode/katalysator, <i>porous transport layer</i> , of bipolaire platen |
|               | Windturbines                           | In legeringen en rvs-onderdelen  |
|               | Zonnecellen                            | Bij galvaniseren, rvs-frames en verbindingen                               |
|               | Warmtepompen                           | In productie van onderdelen van staal, in printplaten                      |
|               | <i>Data netwerken</i>                  |  |
|               | <i>Dataopslag en servers</i>           |  |
|               | <i>Smartphones, tablets en laptops</i> |  |
|               | <i>Additive manufacturing Robotics</i> |  |
| <b>Kobalt</b> | Accu's                                 | In kathode   |
|               | Brandstofcellen                        | In kathode (SOFCs) of katalysator (vervanger van platina in PEMFC)         |
|               | Elektrolyzers                          | Elektrode/katalysator of bipolaire platen                                  |
|               | <i>Data netwerken</i>                  |  |
|               | <i>Smartphones, tablets en laptops</i> |  |
|               | <i>Additive manufacturing Robotics</i> |  |
| <b>Lood</b>   | Zonnecellen                            | In legeringen met tin voor elektrische systemen en interconnectors         |
|               | Windturbines                           |  |
|               | <i>Data netwerken</i>                  |  |
|               | <i>Smartphones, tablets en laptops</i> |  |

| <b>ZZS</b>     | <b>Technologieën</b>                   | <b>Functie</b>            |
|----------------|--|---------------------------|
|                | <i>Robotics</i>                        |                           |
| <b>Cadmium</b> | Zonnecellen                            | In dunne-film technologie |
|                | <i>Smartphones, tablets en laptops</i> |                           |
| <b>Arseen</b>  | Zonnecellen                            | -                         |
|                | <i>Data netwerken</i>                  |                           |
|                | <i>Dataopslag en servers</i>           |                           |
|                | <i>Smartphones, tablets en laptops</i> |                           |

Tevens heeft JRC gekeken naar de toeleveringsketen en het aandeel van de EU in de productievolumes van verschillende stappen in de keten. De EU is vooral actief hogerop in de keten, bij het assembleren van de uiteindelijke producten en systemen.

Het risico op emissies van ZZS is lager bij assemblageprocessen dan bij productieprocessen (bijv. productie van staal) of het delven van de grondstoffen (mijnbouw). De risico's van emissies van ZZS metalen zijn daarom meer relevant voor landen die actief zijn in deze stappen vooraan in de keten.

Naast dit JRC rapport zijn er verschillende onderzoeksrapporten die ingaan op beschikbaarheid van kritieke grondstoffen. Met de zogenoemde Critical Raw Materials Act (CRMA) is de Europese Unie (EU) van plan om voldoende beschikbaarheid van kritieke grondstoffen te gaan bereiken. Er is ook een nationale grondstoffenstrategie. Als onderdeel daarvan is het kabinet van plan om o.a. een Nederlands monitoringssysteem op te zetten en bedrijfsleven te informeren via onder andere een verrijkte Grondstoffenscanner. En om via programma's voor duurzame ketens meer onderzoek te doen naar milieurisico's. Deze twee punten van de nationale grondstoffenstrategie worden hier uitgelicht omdat ze mogelijk ook kansen biedt om aandacht te geven aan het gebruik van ZZS in ketens, naast het gebruik van kritieke grondstoffen.

#### 3.3.4 Externe veiligheid

Het effect van de energietransitie op de externe veiligheid kan zowel positief als negatief zijn. Externe veiligheid gaat over de risico's voor mens en milieu bij gebruik, opslag en vervoer van gevaarlijke stoffen (brandbare, explosieve, nucleair en giftige stoffen).

Het RIVM doet onderzoek naar de effecten van de energietransitie voor de externe veiligheid. Zo worden de nieuwe risico's verkend die gepaard gaan met energietransitie vanuit het perspectief van Nationale Veiligheid.

Door de uitfasering van het gebruik van fossiele energiebronnen zullen de risico's in de keten verminderen (van productie bij de raffinaderijen, grootschalige tankopslag, transport via buisleidingen, weg, water of spoor, tot aan de eindaflevering bij tankstations). Daar komen echter weer nieuwe risico's voor in de plaats. Zo is er grootschalige

energieopslag nodig in bijvoorbeeld batterijsystemen of in andere energiedragers, zoals waterstof, om te kunnen compenseren voor het verschil in vraag en aanbod van energie. Voor veel nieuwe energietechnologieën zijn de risico's vergelijkbaar met huidige (industriële) activiteiten. De risico's van een waterstoftankstation zijn (op hoofdlijnen) vergelijkbaar met die van een LPG-tankstation. Het gaat hierbij om de gevaren van bijvoorbeeld een brand of explosie bij het vrijkomen van de gevaarlijke stof. Bij energietechnologieën rondom de elektrificatie verschijnen er nieuwe uitdagingen, bijvoorbeeld voor de hulpdiensten bij brand door een buurtbatterij of accu's in voertuigen. Daarom is het nodig om de risico's van het gebruik van lithium-ion batterijen in kaart te brengen en eisen op te stellen voor gebruik en opslag. Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat stelt richtlijnen op over de opslag van lithium-ion batterijen.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Voor de opslag van lithiumhoudende batterijen is een PGS 37-richtlijn opgesteld. (PGS staat voor Publicatierreeks Gevaarlijke Stoffen)



## 4 Illustratieve casussen- huidige energietechnologieën

### 4.1 Zonnepanelen

#### 4.1.1 Algemeen

Naar verwachting groeit het gebruik van zonnepanelen de komende jaren enorm: in 2050 zal tot wel 100 keer meer zonne-energie worden opgewekt dan nu. Ook worden er veel nieuwe energietechnologieën en type zonnepanelen ontwikkeld (Quik, Hof, & Steenmeijer, 2022).

Rond 2010 werden in Nederland de eerste grootschalige installaties met zonnepanelen neergezet. Met een gemiddelde levensduur van zonnepanelen tussen 20 en 30 jaar zal dat leiden tot een sterk groeiende afvalstroom rond 2030 (M2I, 2021). Het installatietempo van zonnepanelen ligt in Nederland op dit moment op zo'n 10 miljoen stuks per jaar (M2I, 2021). Deze zullen ergens tussen 2040 en 2050 aan het einde van hun leven zijn. Voor nu is de jaarlijkse afvalstroom in Nederland nog beperkt, enkele tienduizenden zonnepanelen (red. het ingezamelde volume aan zonnepanelen groeide van 124 ton in 2019 naar 771 ton in 2020 (Solar Magazine, 2022)).

Op basis van de te verwachten groei heeft TNO de jaarlijkse volumes zonnepanelen die als afvalstroom vrijkomen berekend. De landelijke afvalstroom zal zo'n 50.000 ton/jaar bereiken in 2042, en vanaf dan sterk toenemen tot 230.000 ton/jaar in 2045 (Späth et al., 2022).

#### *Types zonnepanelen*

Zonnepanelen bestaan uit typisch 60 tot 70 zonnecellen die in serie zijn geschakeld. De cellen zijn gemaakt van verschillende (halfgeleidende) materialen. Onder belichting produceren de cellen een elektrische spanning en een stroom, het zogenoemde fotovoltaïsche (PV) effect. Er zijn verschillende soorten zonnepanelen:

- I. De meest toegepaste technologie voor zonnepanelen is kristallijn silicium.<sup>12</sup> Silicium wordt gewonnen van siliciumdioxide uit de grondstof kwarts of zand. De meest gebruikelijke methode is om het silicium uit het kwarts te extraheren om metallurgisch silicium te maken dat vervolgens wordt gezuiverd tot silicium van hoge kwaliteit die nodig is voor de productie van zonnecellen<sup>13</sup>.
- II. Minder dan 5% van de zonnepanelen in Nederland zijn dunne-film-zonnepanelen. Het aandeel dunne-film-zonnepanelen in de gebouwde omgeving neemt echter toe en zal naar verwachting blijven toenemen (van Sark, 2019; Milieucentraal, n.d.) (Duyvis et al. 2021). Dunne film zonnecellen bestaan uit een stapeling van dunne laagjes halfgeleiders, zoals cadmiumtelluride (CdTe) of koper-indium-galliumselenide (CIGS).
- III. Perovskieten zijn een relatief nieuwe klasse dunne film cellen die de afgelopen 10 jaar enorm veel aandacht hebben gekregen. Het gaat dan om zonnecellen waarin III-V metalen (arseen, gallium

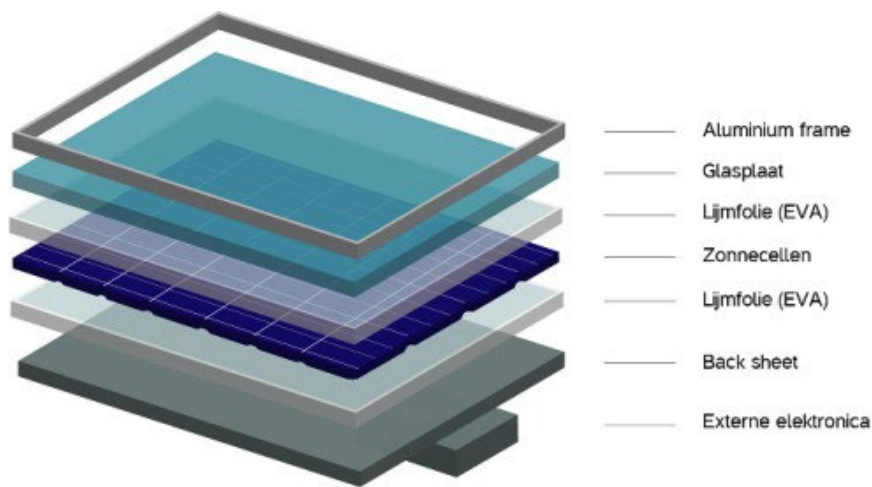
<sup>12</sup> <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnetechnologie/silicium-zonnecellen/>

<sup>13</sup> <https://www.alma-solarshop.nl/blog/van-silicium-tot-zonnepanelen-welk-transformatieproces#:~:text=Silicium%20komt%20van%20siliciumdioxide%2C%20dat,gezuiverd%20tot%20silicium%20van%20zonnekwaliteit.>

en indium) of lood zijn verwerkt. Zonnecellen van III-V metalen of lood-perovskiet zijn interessant omdat ze in het lab veel efficiënter bleken dan de veelgebruikte kristallijne silicium cellen. Deze nieuwe typen panelen zijn nog niet op de markt.

Bij het uitwerken van deze casus over zonnepanelen zijn de perovskiet panelen niet meegenomen, omdat we in dit hoofdstuk 4 illustratieve casussen uitwerken die gaan over de huidig toegepaste energietechnologieën.

#### 4.1.2 ZZS en gevaarlijke stoffen in zonnepanelen



*Figuur 2 De opbouw van een kristallijn silicium paneel. Bron: M2i, Provincie Zuid-Holland, Circulaire Maakindustrie (M2I, 2021).*

Tabel 3 Opbouw en aanwezigheid van ZZS en andere gevaarlijke stoffen in verschillende zonnepanelen (Bronnen (Duyvis et al., 2021; M2I, 2021; Solar Magazine, 2022; Späth et al., 2022))

| Materialen en onderdelen                         | ZZS  | Gevaarlijke en/of kritische stoffen (niet-ZZS)  |
|--|--|---|
| 1) Siliciumpanelen                               |  |   |
| Aluminium frame                                  | Niet verwacht, behalve lage concentraties van sporenelementen in de legering.  | Elementen als koper, chroom en zink kunnen voorkomen in metaallegeringen. Deze metalen zijn gebonden aan het metaal.  |
| Glasplaat  |  | Antimoon (Sb) (Zelfclassificatie als CMR categorie 1A of 1B)  |
| Lijmfolie (EVA) <sup>14</sup>                    |  |   |
| Zonnecellen                                      |  | Zilver  |
| Soldeermateriaal                                 | Lood (6,5-13 g/m <sup>2</sup> )  |   |
| Achterblad                                       |  | <p>Enkele voorbeelden van toegepaste materialen:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) <u>Tedlar®</u> op basis van Polyvinyl fluoride (PVF)<br/>Tedlar® PVF film-PET-Tedlar® PVF film of Tedlar® PVF film-PET- EVA<br/>Tedlar is is de goedkope standaardoplossing. Het biedt de gewenste stijfheid en is waterdicht door de verwerking van fluor. Tedlar is echter een PFAS en moeilijk recyclebaar.</li> <li>2) Kynar®, op basis van Polyvinylidene fluoride (PVDF).<br/>Kynar® -PET-EVA of Kynar® -PET- Kynar®</li> <li>3) Achterblad met gecoate backsheets op basis van fluorpolymeer<br/>EVA-PET-coatings met fluorpolymeer</li> <li>4) Er zijn ook achterbladen zonder fluorpolymeer, dat is ongeveer 20% van de markt_(Solar Magazine, 2022)</li> </ol> |
| Elektronica (connectoren, bedrading, bekabeling) | Lood<br>Mogelijke kunnen POP stoffen als brandvertragers of weekmakers in plastics van de kabels voorkomen in eerste zonnepanelen die op de markt zijn gebracht. <sup>15</sup> | Zilver, Tin, Bismut   |

<sup>14</sup> De thermoplast EVA is de goedkope standaardoplossing voor het verlijmen van panelen maar is nauwelijks te onthechten.

<sup>15</sup> Zonnepanelen zijn sinds 2010 op de markt, sindsdien stoffen gereguleerd zoals weekmakers en vlamvertragers. ROHS is niet van toepassing op zonnepanelen. Bron: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:02011L0065-20200301&from=EN>

| Materialen en onderdelen         | ZZS  | Gevaarlijke en/of kritische stoffen (niet-ZZS)                          |
|----------------------------------|--|---|
| 2a) Dunne film Cd Te zonnecellen |  |   |
| Glasplaat                        |  | Antimoon (Zelfclassificatie als CMR categorie 1A of 1B)                 |
| EVA                              |  |   |
| Zonnecel                         | Cadmium (6,6-66,4 g/m <sup>2</sup> )<br>Als cadmiumtelluur of cadmiumsulfide   |   |
|                                  |  | Tin, Koper  |
| 2b) Dunne film CIGS              |  |   |
| bovenlaag                        |  | ETFE (ethyleentetrafluorethyleen)<br>(Duyvis, Leene, & Spoelstra, 2021) |
| zonnecel                         | Cadmiumsulfide (0,2- 0,5 g/m <sup>2</sup> ), er zijn ook CIGS panelen zonder CdS<br>(Duyvis, Leene, & Spoelstra, 2021) | Koper, indium, gallium, seleen, molybdeen                               |

#### 4.1.3 *Omschrijving van de keten en mogelijke emissies*

##### **Productie**

De markt in zonne-energie wereldwijd is zeer concurrerend. Massaproductie van zonnepanelen vindt voornamelijk plaats in lagelonenlanden in Azië. Er zijn ook Nederlandse paneelproducenten die inzetten op de productie van innovatieve panelen (M2I, 2021):

- Exasun heeft het Tedlar vervangen door een glasplaat, dat weliswaar zwaarder en duurder is, maar de gewenste stijfheid en waterdichtheid biedt. In een consortium met o.a. TNO, DSM, Exasun is een 'release folie' ontwikkeld ter vervanging van EVA om cellen en glas zuiver van elkaar te kunnen scheiden op externe triggermechanismes. Het bedrijf Mat-Tech heeft recent een nieuw loodvrij soldeerproces ontwikkeld met o.a. Exasun en TNO.
- Solarge is gespecialiseerd in lichtgewicht panelen door gebruik te maken van vezelversterkt polymeren. Solarge heeft in samenwerking met Sabic polymeren voor de backsheet ontwikkeld die geen PFAS bevatten.
- Energyra® zonnepanelen hebben geen soldeerverbindingen (die lood bevatten) voor de cellen. De backsheet is fluor- en PFAS-vrij. De aansluitkabels zijn halogeenvrij. De inkapselingsfolie maakt geen gebruik van de gebruikelijke vinylverbindingen.

Er is maar één producent die CdTe-panelen produceert, genaamd First-Solar. First-Solar heeft een terugroep- en recyclingmethode voor zijn eigen panelen.

Nederland is onderscheidend door de slimme innovaties in de fase voor de productie zoals de ontwikkeling van energietechnologieën (dunnefilm en tandems: het stapelen van zonnecellen om zo de opbrengst te verhogen)<sup>16</sup>.

##### **Gebruik**

Emissies tijdens gebruik kunnen ontstaan doordat panelen beschadigd raken door fysieke invloeden zoals brand en weeromstandigheden (bijv. hagelstormen). De beschikbare literatuur over emissies van stoffen tijdens de gebruiksfase wordt hieronder samengevat.

##### *Uitloging*

De resultaten van verschillende uitlogingsexperimenten met kristallijne zonnepanelen laten zien dat uitloging van stoffen als lood en nikkel uit kristallijne zonnepanelen mogelijk is. De studies zijn echter niet eenduidig over de vraag hoe schadelijk dat kan zijn voor het milieu (Duyvis et al., 2021). Uit verschillende experimenten en een modelberekening blijkt dat er door uitloging uit beschadigde CdTe-zonnepanelen cadmium (en andere zware metalen) in het milieu terecht kan komen, maar dat dit waarschijnlijk geen ernstig risico voor gezondheid of milieu oplevert (Duyvis et al., 2021).

<sup>16</sup> <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnetechnologie/tandemtechnologie-hoger-pv-rendement/>

## **Brand**

Het RIVM heeft onderzoek gedaan naar de verspreiding van stoffen die vrijkomen bij branden van zonnepanelen (van Veen et al., 2022). Bij een aantal grote branden is gebleken dat deze verbrandingsproducten zich ver (tot enkele kilometers) in de omgeving kunnen verspreiden.

Een brand met zonnepanelen kenmerkt zich voornamelijk als een brand met kunststoffen, wat onder meer leidt tot de vorming van PAK's, CO en verschillende koolwaterstoffen. De metalen die in de panelen zijn verwerkt, zoals lood, tin en aluminium, worden ook in de rook teruggevonden. Specifiek Cd-Te dunne film panelen bleken niet bij te dragen aan verspreiding van de gevaarlijke stoffen cadmium en tellurium. Vanuit gezondheidskundig perspectief is lood het meest relevante toxische metaal dat in de rook van zonnepaneelbranden is aangetroffen. De hoeveelheden gevaarlijke stoffen die door branden met zonnepanelen vrijkomen, zijn uiteindelijk beperkt. Dit geldt ook voor lood. Individuele alarmeringsgrenswaarden in de omgeving zullen door een brand met uitsluitend zonnepanelen in de praktijk niet snel worden overschreden.

Branden met zonnepanelen kunnen leiden tot depositie van stofdeeltjes waarin PAK's, metalen en andere componenten voorkomen. In neergeslagen stofdeeltjes zijn dezelfde metalen waargenomen als in de rook, waarbij op toxicologisch vlak opnieuw lood het meest relevant is. Ook zijn verhoogde concentraties PAK's in de depositie aangetroffen. De gezondheidsrisico's door blootstelling aan PAK's en metalen via contact met vervuilde oppervlakken zijn bij eenmalige blootstelling niet noemenswaardig. Ook is het niet realistisch dat alleen depositie van lood vanwege brand van zonnepanelen leidt tot een overschrijding van normen ten aanzien van bodemkwaliteit.

## **Recycling**

De inzameling en verwerking van afgedankte panelen wordt geregeld door producentenorganisatie Stichting OPEN. Iedere producent of importeur van zonnepanelen betaalt hiervoor per paneel een vast bedrag. Momenteel kent Nederland geen eigen recyclingfaciliteit voor zonnepanelen en wordt al het ingezamelde materiaal naar installaties in België, Frankrijk en Duitsland gestuurd, waar grote recyclers PV-lijnen hebben opgezet als een investering t.a.v. de verwachte grote instroom rond 2030. Inzamelaars slaan afgedankte zonnepanelen op totdat de volumes economisch rendabel kunnen worden vervoerd naar een recyclingfaciliteit. De groeiende volumes in combinatie met het recent verplicht gestelde inzamelingsstelsel via de stichting OPEN, maken het in de nabije toekomst mogelijk om doelgericht gebruik te maken van de meest rendabele recyclingroute.

### *Huidige verwerkingsmethode*

De gangbare methode is om, na demontage van koperen kabels, externe elektronica en aluminium frame, de gehele gelamineerde panelen tot korrels te vermalen. Dit gebeurt in recycling faciliteiten voor andere afvalstromen, vaak gezamenlijk met elektronisch afval. Het eindproduct (vervuilde glasresten) wordt gebruikt als schuurmiddel en vervolgens toegevoegd bij het staalschroot (Eijsbouts, 2023). De

organische fractie (EVA lijmlaag en het achterblad) wordt verbrand en het glas eindigt samen met andere metaaloxides als een drijfslaag op het gesmolten staal en wordt afgeroomd en afgevoerd als slakken, zoals die typisch bij hoogoven processen gevormd worden. Deze slakken worden na reiniging o.a. weer ingezet voor de fundering van wegen of betontoeslagmiddel (Eijsbouts, 2023).

Gevaarlijke stoffen kunnen vrijkomen bij het bewerken van de materialen via stofvorming. De emissies zullen afhangen van de maatregelen die de recycler treft om verspreiding van stofdeeltjes tegen te gaan. De PFAS in het achterblad zullen bij hoge temperatuur in de staalrecycling (deels) afgebroken worden. Milieurisico's hiervan zijn niet bekend (3.3.2). Het gaat nog om relatief beperkte hoeveelheden afgedankte zonnepanelen die op deze manier verwerkt worden.

#### *Nieuwe recyclingmethodes*

Om zonnepanelen goed te kunnen recyclen, is het wat betreft het huidige ontwerp van de zonnepanelen noodzakelijk om de lijmlaag te verwijderen, m.a.w. te delamineren. Dit kan op verschillende manieren, inclusief mechanisch, thermisch (verbranding en pyrolyse) en chemisch. Daarna kunnen de materialen (glas, silicium, metalen) worden gescheiden en verwerkt:

- Glas kan gerecycled worden tot glasvezel, of nog hoogwaardiger tot glas voor nieuwe zonnepanelen. Door de aanwezigheid van antimoon kan het glas niet gebruikt worden als voedselverpakkingsmateriaal.
- Silicium kan gerecycled worden tot metallisch silicium, of silicium dat geschikt is voor de productie van nieuwe zonnecellen.
- Metalen zoals zilver, koper en lood kunnen d.m.v. elektrolyse teruggewonnen worden.

Omdat chemisch verwijderen een traag proces is lijkt deze techniek niet zo veel belovend (Späth et al., 2022).

Pyrolyse is technisch niet mogelijk voor de backsheets met fluoropolymeren omdat grote hoeveelheden waterstof fluoride (HF) worden geproduceerd in het proces in de gasfase, een corrosieve stof. De olie fase bevat ook fluorverbindingen en vormt dus een mogelijk milieurisico. De pyrolyse olie met hoge fluorgehaltes kan niet zomaar verbrand worden in verband met emissienormen voor halogeenverbindingen (Frauenhofer Institute, 2017).

Wanneer na inzameling en demontage van gebruikte zonnepanelen, de achterbladen met PFAS als aparte stroom of gemengde stroom worden verwerkt en verbrand, zijn er emissienormen van toepassing voor specifieke fluorverbindingen.

Ook in Nederland worden plannen gemaakt om een fabriek voor meer hoogwaardige recycling op te zetten. Het eerste Nederlandse initiatief recyclingfabriek zonnepanelen heeft het niet gehaald, een tweede initiatief staat in de startblokken. All4Solar en sociaal werkbedrijf Caparis hebben een pilotlijn voor het recyclen van zonnepanelen in gebruik genomen, waar ook bij wordt samengewerkt met WEEE Nederland (Solar Magazine, 2022).

### **Kennisontwikkeling en kennisdeling rond zonnepanelen.**

In het maatschappelijke debat krijgt de beperkte beschikbaarheid van kritieke grondstoffen en het risico van een toekomstige en groeiende afvalberg van zonnepanelen steeds meer aandacht. Volgens de provincie Zuid-Holland komen deze risico's nog onvoldoende terug in het huidige beleid rondom energietransitie en circulaire economie. Om hier verandering in te brengen heeft de provincie Zuid-Holland een aantal initiatieven ontplooid. Een eerste stap was het opbouwen van kennis door het uitvoeren van een verkennende studie met als doel om bestaande materiaal- en technologiekennis in kaart te brengen voor hergebruik en recycling van PV producten (M2I, 2021). Vervolgens is een netwerk gevormd met vernieuwers (Fair Solar Netwerk) en zijn er stappen gezet om circulaire zonne-energie op de agenda van de rijksoverheid en andere provincies te krijgen.

Via een brief aan Stichting OPEN (Interprovinciaal overleg, 2022) starten de verschillende provincies (op initiatief van de provincie Zuid-Holland) de dialoog over het circulair ontwerpen, verzamelen, verwerken en hoogwaardige recyclen van zonnepanelen. De ondersteuning die de provincies hierin kunnen bieden, kan een extra boost geven aan een circulaire markt voor zonnepanelen. De provincies benadrukken in de brief onder andere het hoogwaardig terugwinnen van grondstoffen uit panelen aan het einde van de levensduur. De provincies zien een rol voor zichzelf weggelegd in de ontwikkeling van infrastructuur voor hergebruik van zonnepanelen, maar ook in het bevorderen van circulaire (markt)ontwikkelingen rondom zonnepanelen.

## **4.2 Windturbines**

### **4.2.1**

#### *Algemeen*

Windenergie speelt een aanzienlijke rol in de lopende energietransitie. Het aantal windturbines op land en in binnenwateren is gestegen van 323 in 1990 tot 2403 eind 2021<sup>17</sup>. Na een stagnatie van de groei, nam het aantal in 2020 en 2021 op land met 372 turbines toe. Rond de plaatsing op land is veel maatschappelijke discussie over de inpassing in het landschap. Nederland heeft als doel gesteld om 6.000 MW aan windenergie op land te realiseren voor het einde van 2023. Eind 2022 is er in totaal 6.045 MW aan windvermogen op land. Hiervan is 759 MW in 2022 gerealiseerd. Met de projecten die nu in aanbouw zijn kan het totale windvermogen eind 2023 oplopen tot 6.880 MW.

Vanaf 2008 worden ook windparken op zee gebouwd, ver uit de kust, ook hier is sprake van een sterke groei. Op dit moment staan er 671 windturbines op zee. Door de gemiddeld grotere ashoogte is de capaciteit van windturbines op zee met een gemiddeld vermogen van 5 megawatt (MW) groter dan van die op land (2 MW).

Er is de ambitie om het aantal turbines op zee sterk uit te breiden en in 2030 21 GW op te wekken met windturbines op zee. De verwachting is dat ook na 2030 de hoeveelheid turbines op zee blijft groeien en dat er in 2050 voor 38 tot 72 GW aan turbines op zee zullen staan (RVO, bezocht op 21-03-2023).

<sup>17</sup> <https://klimaatweb.nl/nieuws/windturbines-op-land-en-op-zee-1990-2021/>



#### 4.2.2 ZZS en andere gevaarlijke stoffen in windturbines

##### *Windturbines op land*

Om het staal van de mast tegen corrosie te beschermen kan gebruik gemaakt worden van coatings op basis van kunststof harsen. Dit kunnen coatings zijn op basis van epoxy, polyacrylaat, polyurethaan of fluorpolymeren. Coatingsystemen bestaan vaak uit meerdere lagen, waarbij verschillende types coating gebruikt kunnen worden. Op de bladen worden veelal coatings van polyurethaan gebruikt. De bladen zelf zijn gemaakt van epoxyhars met glasvezel.

##### *Windturbines op zee*

In onderstaande tabel is weergegeven waar de meeste emissies verwacht worden per levensfase van een turbine op zee, inclusief het substation (de voet). Van de genoemde stoffen zijn BPA en 4-tBP een ZZS. Deze stoffen kunnen worden gebruikt bij de productie van epoxycoatings. Of de stoffen en epoxycoatings daadwerkelijk worden gebruikt en hoeveel van deze stoffen vrijkomen is nog niet goed bekend. Tijdens het productieproces reageert BPA vrijwel volledig weg, maar kan er een kleine hoeveelheid BPA in het uiteindelijke product achterblijven. Deze hoeveelheid verschilt per product (Hof, Bodar, & de Kort, 2023).

Tabel 4 Voorziene emissies van stoffen per levensfase windpark (RIVM, 2022).

| Onderdeel turbine | Installatie                         | Gebruik en onderhoud  | Ontmanteling                        | Recycling/afvalverwerking |
|-------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---------------------------|
| Bladen            | Geen significante emissies voorzien | PFAS<br>Microplastics   | Geen significante emissies voorzien | Onbekend                  |
| Binnenwerk        | Hydraulische olie                   | Hydraulische olie<br>SF6  | SF6                                 | Onbekend                  |
| Monopile          | Geen significante emissies voorzien | Fenolen (BPA, BPF, 4-tBP)<br>Microplastics<br>Metalen van kathodische bescherming | Geen significante emissies voorzien | Onbekend                  |
| Substation        | Cement                              | SF6<br>Metalen van kathodische bescherming  | Geen significante emissies voorzien | Onbekend                  |

#### 4.2.3 Omschrijving van de keten en mogelijke emissies

##### **Productie**

In Nederland worden geen windturbines gemaakt. Denemarken<sup>18</sup> beheerst de wereldmarkt van windturbinebouwers. Van alle windturbines die op zee zijn gebouwd, komt bijna 90 procent uit een Deense fabriek. De huidige bladen bestaan voor meer dan de helft uit glas- en koolstofvezel en voor 30 procent uit de kunststof epoxy of polyester. In Terneuzen worden benzeen (een ZZS) en propyleen omgezet in cumeen (een ZZS). Cumeen wordt vervolgens omgezet in fenol en aceton, om er

<sup>18</sup> <https://www.volkskrant.nl/economie/denemarken-gelooft-in-de-kracht-van-wind~b1af9474/?referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

uiteindelijk de basis voor epoxy van te maken. Deze vervolprocessen vinden niet in Nederland plaats<sup>19</sup>.

Sommige grondstoffen voor windturbines zoals acrylonitril (ZZS) voor het maken van koolstofvezels in wieken, zuivere smeerolie en vermoeiingsresistente mortel worden in Nederland geproduceerd (bron: VNCI<sup>20</sup>).

## **Gebruik**

### *Windturbines op land*

Wat betreft windturbines op land blijkt uit een eerste onderzoek van het RIVM dat het aannemelijk is dat er uitloging is van stoffen uit de coatings op de masten van turbines als deze worden blootgesteld aan water (Hof, Bodar, & de Kort, 2023). Uitgelogde stoffen kunnen hierdoor in de bodem, het grondwater, of (via grondwater) in het oppervlaktewater terecht komen. Het is nog onbekend welke stoffen dit precies betreft, tot welke concentraties in het milieu dit leidt en of er daardoor daadwerkelijk sprake is van risico's voor mens en milieu. Uit dit eerder uitgevoerde onderzoek blijkt dat dit sterk per coating kan verschillen en er is geconcludeerd dat vervolonderzoek nodig is om meer inzicht te verkrijgen.

### *Windturbines op zee*

In de eerder, door het RIVM, uitgevoerde quickscan naar emissies van stoffen bij windturbines op zee is de mogelijke aanwezigheid van ZZS in de epoxycoating geïdentificeerd (RIVM, 2021). Dit betrof bisfenol A (BPA) en 4-tert-butylfenol (4-tbp) die kunnen uitloggen. Coatings van epoxy kunnen gebruikt worden op de monopile (het deel van de turbine dat onder water staat) om het staal tegen corrosie te beschermen. Naast epoxy coatings kan er ook gebruik gemaakt worden van andere middelen om de monopile te beschermen, zoals opofferingsmetalen of "impressed current cathodic protection" (ICCP).

In vervolonderzoek is een risicobeoordeling uitgevoerd van de stoffen BPA, 4-tbp en Bisfenol A diglycidyl ether (BADGE). Er was echter geen specifieke informatie beschikbaar over de uitloging van deze stoffen voor coatings gebruikt bij windturbines op zee. Zowel vanuit SODM als RIVM is via Nederlandse Wind Energie Associatie (NWEA) getracht de samenstelling en informatie over de uitloging van stoffen van gebruikte coatings te achterhalen. Helaas heeft dit niet tot de gevraagde informatie geleid. Voor de risicobeoordeling is daarom gebruik gemaakt van worst-case data over uitloging van deze stoffen uit epoxy coatings op staal op basis van wetenschappelijke literatuur. Hieruit blijkt dat uitloging van BPA en 4-tbp uit epoxy coatings op monopiles van windturbines op zee kan leiden tot concentraties in het water waarbij respectievelijk risico's voor mens, via consumptie van vis ("Risk Characterisation Ratio (RCR)" van 18,4), of milieu niet kunnen worden uitgesloten (RCR van 16,1)<sup>21</sup>. Voor BPA betreft dit risico's voor de mens via consumptie van vis en voor 4-tbp risico's voor organismen in het milieu. Dit was het geval voor minstens 5% van de oppervlakte van het gebied van het windpark in het model.

<sup>19</sup> <https://www.vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel?newsitemid=5282267136>

<sup>20</sup> <https://www.vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel?newsitemid=4954226688>

<sup>21</sup> Als voor een stof geldt dat de RCR lager is dan 1 dan wordt er geen risico verwacht voor het milieu door die stof.

Omdat niet bekend is in welke mate er gebruik wordt gemaakt van epoxy coatings bij Nederlandse windparken op zee, de mate van uitloging van stoffen sterk per coating kan verschillen, en data over uitloging van stoffen uit coatings gebruikt bij wind op zee voornamelijk niet beschikbaar is, is het nog onduidelijk of de berekende risico's in de praktijk ook daadwerkelijk tot schadelijke effecten leiden (Hof, Bakker, & Spanbroek, 2023).

### **Afdanking en recycling**

Windturbines zijn voor 85-90 procent recyclebaar, waarbij turbinebladmateriaal het resterende percentage vormt dat nu nog niet kan worden gerecycled vanwege de aard van thermohardende composieten.

Aan het eind van hun levensduur worden de bladen van windturbines vaak gestort. Alleen al in Europa gaat het jaarlijks om zo'n 4 miljoen ton composiet bladafval. Er komt een stortverbod in de EU. Hierdoor blijft verbranding of recycling over als verwerkingstechniek.

TNO heeft samen met het Brightlands Materials Center in Geleen een nieuwe methode ontwikkeld om de vezels uit de turbinebladen terug te winnen en te hergebruiken via een thermochemisch proces met pyrolyse. Of ZZS kunnen ontstaan bij dit proces is niet bekend.

Een andere manier om het afvalprobleem van de turbinebladen aan te pakken, is door ze van ander materiaal te maken. Zo doen onderzoekers van Wageningen University & Research onderzoek aan het recyclebaar maken van de composieten door de chemische structuur te veranderen.

## **4.3 Aandrijfacu's**

### **4.3.1 Algemeen**

Hybride en vol-elektrische auto's hebben een aandrijfacu van het type lithiumbatterij of lithium-ion-accu (Li-ion). Lithiumbatterijen worden ook gebruikt in fietsen en scooters, telefoons, laptops en andere oplaadbare elektrische apparaten.

In 2010 kwamen de eerste elektrische auto's pas op de Nederlandse markt<sup>22</sup>. Naar verwachting bereiken steeds meer batterijen uit die eerste generatie de komende jaren het einde van hun levensduur. Ook wordt er een groei verwacht in het gebruik van lithiumbatterijen door elektrificatie van mobiliteit. In 2030 komt er in Nederland naar verwachting zo'n 7000 ton aan batterijen vrij uit zo'n 20.000 auto's. Richting 2040 zal dat nog minimaal met een factor 10 gaan groeien, waarbij dit met de batterijen uit bussen en vrachtwagen wellicht nog eens verdubbelt (Circulaire maakindustrie, 2020).

Ook het gebruik van elektrische fietsen groeit sterk. In Nederland zijn al meer dan 2 miljoen e-bikes. In 2018 werd ongeveer 227 ton aan batterijen uit fietsen ingezameld.

<sup>22</sup> <https://www.stibat.nl/kennisbank/recycling-accu-elektrische-auto-zo-werkt-het/#:~:text=Accu's%20van%20elektrische%20auto's%20gaan,meer%20bruikbaar%20in%20een%20auto>

#### 4.3.2 *ZZS en andere gevaarlijke stoffen in aandrijfacu's*

Lithiumbatterijen kunnen nikkel en kobalt bevatten (beide zijn ZZS). Er zijn ook lithiumbatterijen zonder kobalt en nikkel, namelijk LFP (lithium-ijzerfosfaat-accu).

Voor lithium (tenminste drie zouten daarvan) heeft het Risk Assessment Committee (RAC) van het Europese chemicaliën agentschap (ECHA) de classificatie Reproductief toxisch (categorie 1A) aangenomen. Een definitief besluit moet nog door de Europese Commissie worden genomen. Lithium kan tot die tijd beschouwd worden als ZZS volgens de methode van het stofadvies van het RIVM<sup>23</sup>.

De naam lithium-ion wordt vaak gebruikt voor verschillende soorten chemische samenstellingen. De grootste variatie in batterij eigenschappen ontstaat door variaties in de kathode, waar de lithium atomen naar toe bewegen in de batterij. De classificatie van lithium-ion batterijen is ook grotendeels op basis van het kathode materiaal gemaakt. Grafiet, maar ook een combinatie van grafiet en silicium of gelithieerde titanium-oxiden worden als anode materialen gebruikt (dat betreft geen ZZS).

De meest gebruikte soort is de nikkel-mangaan-kobalt- (NMC-accu). Modernere NMC-batterijen bevatten over het algemeen minder kobalt en lithium, maar meer nikkel in vergelijking met oudere types NMC batterijen (Circulaire maakindustrie, 2020). Tesla gebruikte auto's met lithium batterij van het type NCA (nikkel-kobalt-aluminium), maar is nu aan het overstappen op het type LFP. De LFP ofwel lithium-ijzerfosfaat-accu bevat geen kobalt en nikkel.

Naast genoemde zware metalen, kunnen lithiumbatterijen ook een ZZS als oplosmiddel bevatten: 1,2 dimethoxyethaan (EGDME) of N-methyl-2-pyrrolidone (NMP). Fluorpolymeren (FEP and PTFE) worden in batterijen gebruik in verschillende functies (beide geen ZZS).

#### 4.3.3 *Omschrijving van de keten en mogelijke emissies*

##### **Productie**

Er is geen productie van **batterijcellen** in Nederland (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2022b). Ook in Europa is de productiecapaciteit van batterijen zeer klein (in 2018 slechts ongeveer 3% van de mondiale productiecapaciteit<sup>24</sup>).

##### **Gebruik**

Tijdens normaal gebruik van aandrijfacu's en accu's voor elektrische fietsen worden geen emissies verwacht.

##### **Afdanking en recycling**

Bij een capaciteit rond de 75 procent is een accu meestal praktisch niet meer bruikbaar in een auto. Afdankte accu's van elektrische auto's zijn vaak nog wel geschikt voor de opslag van (duurzame) energie of recycling van waardevolle metalen (nikkel, kobalt, lithium, aluminium). Voor fabrikanten en importeurs gelden meerdere regels en richtlijnen voor de registratie, inzameling en recycling van accu's. Een fabrikant of

<sup>23</sup> [Stofadviezen Zeer Zorgwekkende Stoffen | Risico's van stoffen \(rivm.nl\)](https://www.rivm.nl/stofadvies/ZZS)

<sup>24</sup> [https://www.echa.europa.eu/Lists/ECADocuments/INAP22\\_02/INAP\\_Batteries\\_NL.pdf](https://www.echa.europa.eu/Lists/ECADocuments/INAP22_02/INAP_Batteries_NL.pdf)

importeur die een elektrische auto op de Nederlandse markt brengt, moet de batterijen of accu's uit die auto rapporteren aan de overheid. Fabrikanten en importeurs zijn wettelijk verplicht een batterij aan het einde van z'n levensduur terug te nemen voor hergebruik of recycling. Tenminste 50 procent van het gewicht van de accu moet gerecycled worden. In Nederland verzorgt Stichting Autobatterij Recycling (ARN) voor veel importeurs de inzameling van accu's van auto's. Stibat kan assisteren voor niet bij ARN aangesloten merken. ARN heeft de Europese richtlijnen uit het Besluit beheer batterijen en accu's 2008 (Bbb) vertaald naar een collectief systeem, het ARN Beheerplan. Voor het recyclen gaan de accu's op transport naar andere Europese landen, zoals Duitsland, Frankrijk en Zweden.

Met het ARN Beheerplan verzorgt ARN voor deelnemende automerken de inzameling en verwerking van lithiumbatterijen van auto's. Garagebedrijven en autodemontagebedrijven melden afgedankte aandrijfaccu's bij ARN aan voor een ophaalopdracht. Importeurs die zijn aangesloten bij het ARN Beheerplan betalen een beheerbijdrage. Deze is bedoeld voor het inzamelen en verwerken van afgedankte batterijen.

Fietsenwinkels de wettelijke plicht om hun verkochte fietsaccu's in te nemen. Stibat stimuleert en regelt de inzameling van afgedankte energiedragers in Nederland.

Een lithiumbatterij bestaat, net als alle andere batterijen, uit een anode, een kathode en een tussenliggend elektrolyt. Door variaties in alle 3 de onderdelen kunnen verschillende prestaties, met voordelen en nadelen worden verkregen. Lithiumbatterijen worden geclassificeerd aan de hand van de eigenschappen van de anode, de kathode en het elektrolyt, maar dat betekent niet dat in elke batterij met dezelfde classificatie ook exact dezelfde chemie wordt gebruikt.

Lithiumbatterijen zijn er niet op ontworpen om uit elkaar gehaald te worden. De verschillende materialen zijn dicht en veilig opeengepakt in een huls van plastic of aluminium. Batterijgroepen in elektrische auto's bevatten tot wel enkele duizenden cellen, gegroepeerd in modules. Die bevatten ook sensoren, beveiligingen en stroomdraden. Dit alles vergroot de complexiteit en de kosten van ontmanteling en recycling. Data over emissies van ZZS en andere gevaarlijke stoffen bij recycling van batterijen zijn in het kader van dit onderzoek niet uitgezocht, maar vormen wel een aandachtspunt als recycling van batterijen in Nederland gaat toenemen.

### **Brand**

Incidenteel kunnen emissies ontstaan bij brand. De kans op branden met Li-ion-batterijen neemt toe door de groei van het aantal toepassingen. Bij branden met Li-ion-batterijen komen gevaarlijke stoffen vrij waaronder fluorwaterstof. Een andere typerende eigenschap is de aanwezigheid van relatief hoge concentraties metalen of metaalverbindingen in de rook, zoals bijvoorbeeld lithium, nikkel, mangaan en kobalt. Ook het aantal afvalbranden in de afvalsector neemt toe, mede door de aanwezigheid van lithium-ion batterijen.



## 5 Illustratieve casussen- Opkomende en nieuwe energietechnologieën

De energietransitie zorgt voor grote veranderingen in het energiesysteem. Om een aantal voorbeelden te noemen:

- Elektrificatie van processen, m.a.w. elektriciteit neem een groter aandeel in de energiemix.
- Gebruik van waterstof als brandstof of als langdurige opslagoplossing via power-to-gas en gas-to-power.
- Synthetische brandstoffen voor bijvoorbeeld wegtransport, scheepvaart en luchtvaart.
- Import en export van synthetische energiedragers.
- De inpassing van grote hoeveelheden decentrale duurzame energieopwekking.
- Opslag met een verschillende tijdshorizon om periodes van tekorten en overschotten op te vangen.

De casussen die in dit hoofdstuk zijn uitgewerkt, dragen bij aan de ontwikkeling van een nieuw energiesysteem, en maken gebruik van ZZS bij de productie van de materialen. Het gaat om:

1. Elektrificatie
2. Waterstofdragers, specifiek de LOHC's
3. Elektrolyzers

De weg naar een volledig CO<sub>2</sub>-neutrale energievoorziening en bijbehorende infrastructuur moet in minder dan 30 jaar worden afgelegd. Ondanks deze "korte" tijd zijn er nog meerdere transitiepaden en toekomstbeelden mogelijk. Dergelijke toekomstbeelden, alle volledig CO<sub>2</sub>-neutraal, schetsen hoe energievraag en -aanbod er in 2050 uit kan gaan zien in Nederland. Op korte termijn zullen belangrijke keuzes gemaakt moeten worden voor de inrichting van het energiesysteem. Zoals welke energiedrager komt op welke locatie, op welk moment en voor wie.

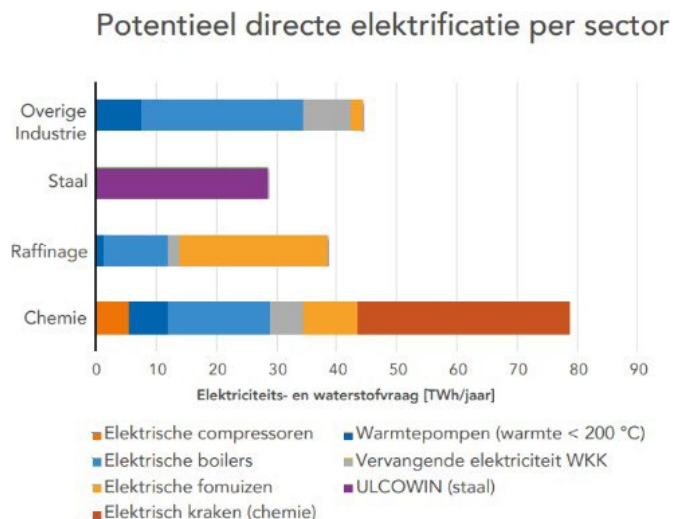
### 5.1 Elektrificatie

In de energietransitie is een grote rol weggelegd voor het elektrificeren van processen die nu op fossiele brandstoffen draaien, dit geldt zowel voor de industrie als voor andere processen.

Voor niet industriële processen zullen slimme energiesystemen steeds meer toegepast worden (NWO, 2021). Slimme energiesystemen worden ingezet om gebruik van energie af te stemmen op het aanbod van energie (in de tijd), black-outs te voorkomen en energieverbruik te verminderen. Een slim energiesysteem verbindt bijvoorbeeld PV-panelen, elektrische auto's, warmtepompen, huishoudelijke apparaten en opslagsystemen op intelligente wijze met elkaar (RvO, 2022). Dergelijke systemen vergen ook software en hardware en mogelijk gebruik van ZZS.

Slimme systemen kunnen op verschillende schalen worden ingezet, zoals grootschalige grid-toepassingen (bv steden of regio's) of in huis. De slimme systemen maken veel gebruik van ICT, elektronica en accu's.

In de industrie zal tevens elektrificatie plaatsvinden. De TopsectorEnergie (2021) heeft een roadmap opgesteld over elektrificatie in de industrie. Momenteel gebruikt de industrie circa 39 TWh elektriciteit en 155 TWh warmte, waarvan 40% onder de 200°C en 60% daarboven, bijvoorbeeld in de staalindustrie, ovens in glasindustrie en kraakfornuizen. Verdere elektrificatie heeft de potentie om de CO<sub>2</sub>-emissies door de industrie tussen de 20 en 45 megaton in 2050 te verlagen. Daarnaast kan de industrie uitstoot terugbrengen d.m.v. het gebruik van groen gas, geothermie en afvang en opslag van CO<sub>2</sub>. De industrie kan elektrificeren door directe inzet van hernieuwbare elektriciteit en indirect via conversie van hernieuwbare energie naar waterstof. In onderstaande figuur wordt het potentieel daarvan weergegeven. De elektrificatie vraagt onder andere om uitbreiding van transportinfrastructuur voor elektriciteit en waterstof.



Figuur 3 Potentieel directe elektrificatie per sector (bron: TopsectorEnergie (2021)).

In de systemen die gebruikt worden voor elektrificatie kunnen verschillende ZZZ aanwezig zijn, o.a. brandvertragers en weekmakers. De RoHS-richtlijn (Restriction of Hazardous Substances) betreft de beperking van het gebruik van tien gevaarlijke (ZZZ) stoffen/groepen in elektrische en elektronische apparatuur<sup>25</sup>:

- Cadmium (0.01 %)
- Lood (0.1 %)
- Kwik (0.1 %)
- Chroom-6 (0.1 %)
- Polybroombifenylen brominated biphenyls (PBB) (0.1 %)
- Polybroomdifenylethers ated diphenyl ethers (PBDE) (0.1 %)
- Bis(2-ethylhexyl)ftalaat (DEHP) (0.1 %)
- Butylbenzylftalaat (BBP) (0.1 %)
- Dibutylftalaat (DBP) (0.1 %)
- Di-isobutylftalaat (DIBP) (0.1 %)

<sup>25</sup> [RoHS Directive \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/nl/TXT/?uri=CELEX:32002/0006)



## 5.2 Waterstofdragers

Waterstof en waterstofdragers worden nu nog niet op grote schaal toegepast. Het gebruik van waterstof als energiedrager zal de komende jaren toenemen. Daarnaast kan waterstof ook gebruikt worden om (synthetische) brandstoffen of basischemicaliën te produceren.

De waterstofproductie in Nederland zal toenemen, maar er zal ook op grote schaal waterstof vervoerd worden. De vorm of manier waarop waterstof wordt opgeslagen of vervoerd bepaald in sterke mate de risico's die daarmee gemoeid zijn. Er zijn verschillende manieren om waterstof op te slaan en te kunnen transporteren, onder andere als gas of als vloeistof. Er zijn verschillende waterstoftransportketens mogelijk, waarbij factoren als omgevingsveiligheid, energieverbruik, haalbaarheid en kosten een rol spelen. Waarschijnlijk zullen meerdere vormen van transport en opslag van waterstof naast elkaar gaan bestaan, met verschillende ketens en verschillende vormen van infrastructuur. Hierbij is de verwachting dat intercontinentaal transport vooral via zeeschepen zal verlopen (Arcadis & Berenschot, 2021). Na eventuele opslag en bewerking van waterstof in zeehavens zal deze verder gedistribueerd worden naar gebruikers en/of opslaglocaties.

Om waterstof te transporteren kan het gebonden worden aan een zogenaamde waterstofdrager, bijvoorbeeld aan ammoniak (gas/vloeistof) of vloeibare organische waterstofdragers (LOHC's), silicium hydriden en metaalhydriden. In deze paragraaf focussen we op de LOHC's, over ammoniak is wat beperkte informatie opgenomen in onderstaande tekstbox. Het voordeel van het binden van waterstof aan LOHC's is dat waterstof gedurende een langere periode, efficiënt en goedkoop opgeslagen kan worden en dat het vervoer aansluit op bestaande infrastructuur. Naar verwachting zal dit vooral via water en spoor gaan. De volumes zullen waarschijnlijk te hoog zijn om uitsluitend over de weg te transporteren en een pijpleiding infrastructuur is nog niet aanwezig en zal dus aangelegd moeten worden<sup>26</sup>. (Arcadis & Berenschot, 2021). Transport van waterstof middels LOHC's - *liquid organic hydrogen carriers* - betreft altijd een cyclisch proces. Enerzijds het laden van de drager middels hydrogenering (de levering van de waterstofrijke drage) en anderzijds het ontladen van de drager middels dehydrogeneren (en vervolgens een retourtransport van de waterstofarme drager). De hoeveelheid waterstof die gebonden kan worden hangt af van de organische verbinding en de efficiëntie van de opname en afgifte is onder andere afhankelijk van de waterstofdruk, de temperatuur en het type katalysator.

### Ammoniak

Naast de LOHC's is ammoniak een veelbesproken waterstofdrager. Ammoniak is een waterstofdrager zonder koolstof in de structuur, welke ook wel LHC's (*Liquid Hydrogen Carriers*) worden genoemd. Bij ammoniak is stikstof de waterstofarme drager. Ammoniak is onder milieurelevante condities gasvormig, waardoor er vaak gewerkt wordt met vloeibaar ammoniak (onder druk of gekoeld). Ammoniak brengt echter ook gevaren met zich mee; het is acut toxisch, brandbaar en sterk geurend. Bij een incidentele uitstroming van een opslagtank kunnen de effecten enkele kilometers ver reiken.

<sup>26</sup> Mogelijkheid tot transport via buisleidingen hangt ook af van de viscositeit van de LOHC.

Vloeibare waterstofdragers kunnen chemische stoffen zijn met of zonder koolstof in hun moleculaire structuur. Met koolstof worden ze LOHC (*liquid organic hydrogen carriers*) genoemd. Zonder koolstof noemen we ze LIHC (*liquid inorganic hydrogen carriers*). Er is een groot en divers aanbod van stoffen die mogelijk als waterstofdrager kunnen worden ingezet. Er wordt veel onderzoek gedaan naar geschikte stoffen om als LOHC in te zetten en de ontwikkelstadia kunnen sterk verschillen (van lab tot commercieel). Belangrijke eisen voor een geschikte LOHC zijn dat een stof:

- Voldoende, snel en efficiënt waterstof kan binden;
- Alle waterstof weer vrij kan geven en de waterstof makkelijk te scheiden is van de waterstofarme LOHC;
- Vaak gebruikt kan worden (cycli) zonder dat de efficiëntie van het systeem afneemt;
- Onder milde of omgevingscondities goed te verwerken en op te slaan is.

Daarnaast is het natuurlijk van belang dat een LOHC geen onacceptabele milieu en gezondheidsrisico's met zich meebrengt. Het RIVM heeft onderzoek gedaan naar ZZS-eigenschappen van 8 verschillende LOHC's en twee LIHC's (Marinković & Ng-A-Tham, 2024). Uit het onderzoek blijkt dat alle LOHC's één of meerdere stoffen hebben met ZZS-eigenschappen. Echter, de mate waarin ZZS aanwezig zijn of gevormd worden kan verschillen. Soms zijn het de waterstofdragers zelf, maar er kunnen ook bijproducten gevormd worden die ZZS eigenschappen hebben. Bij de twee onderzochte circulaire LOHC's methanol en mierenzuur (met koolstofdioxide als waterstofarme drager) zijn de dragers geen ZZS. Vorming van de ZZS koolstofmonoxide tijdens waterstofafgifte is mogelijk, deze kan echter tijdens hetzelfde proces weer met water reageren tot koolstofdioxide. De circulaire LIHC ammoniak bevat geen stoffen met ZZS-eigenschappen, maar is acuut zeer giftig wat vanuit omgevingsveiligheid een bron van zorg is.

Twee LOHC's worden verder uitgelicht omdat ze het dichtstbij grootschalig gebruik zijn, namelijk benzyltolueen en methylcyclohexaan.

Het bedrijf Hydrogenious richt zich op benzyltolueen. Deze stof wordt al veel toegepast in de industrie als middel voor warmteoverdracht. Het is een vloeibare, brandvertragende en niet-explosieve drager die binnen de bestaande infrastructuur voor brandstof opslag en transport gebruikt kan worden. Er liggen plannen om grootschalige import- en opslagvoorzieningen voor waterstof op te zetten in de Amsterdamse haven, waarbij het streven is om dagelijks 100-150 ton waterstof afgifte te realiseren in 2028 (Marinković & Ng-A-Tham, 2024). Ook in Rotterdam zijn er plannen voor de opslag, transport en levering via waterstofdrager benzyltolueen (Marinković & Ng-A-Tham, 2024). Benzyltolueen kan mogelijk ZZS eigenschappen bezitten (er loopt een PBT beoordeling binnen REACH), de classificatie Reprotox 1B is voorgesteld in één van de REACH dossiers. Voor de waterstofrijke drager perhydrobenzyltolueen is een ZZS beoordeling niet mogelijk door gebrek aan gegevens. Het bijproduct methylfluoreen is een ZZS.

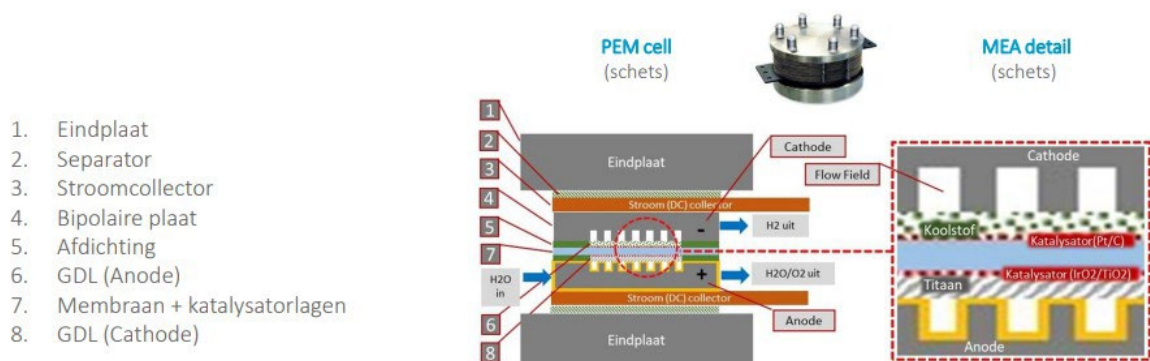
Methylcyclohexaan wordt door Chiyoda Corporation op de markt gebracht. De waterstofarme drager is toluen. Met name toluen wordt

op grote schaal gebruikt als oplosmiddel en grondstof. Ook hier kan bestaande infrastructuur voor brandstof opslag en transport gebruikt worden. In 2020 is een demonstratieproject succesvol uitgevoerd tussen Brunei en Japan. Eind 2022 hebben onder andere het Havenbedrijf Rotterdam, Koole Terminals, Chiyoda Corporation en de Schotse regering met Mitsubishi Corporation een overeenkomst getekend om waterstof uit Schotland naar Rotterdam te vervoeren met methylcyclohexaan. In het RIVM onderzoek zijn, volgens de stofadvies methodiek, geen aanwijzingen gevonden voor mogelijke ZZS eigenschappen voor zowel methylcyclohexaan als toluen. Tijdens herhaaldelijk hydrogenatie en dehydrogenatie kunnen verschillende bijproducten gevormd worden zoals de ZZS benzeen.

Zoals eerder benoemd, wordt er nog veel onderzoek gedaan naar LOHC's en is het nog onbekend of en in welke mate LOHC's in de toekomst daadwerkelijk op grote schaal toegepast zullen worden en waarvoor. Wel is de verwachting dat LOHC's in Nederland toegepast zullen gaan worden voor transport en opslag (waarschijnlijk vooral via de zeehavens), aangezien er al concrete ontwikkelingen en investeringen hiertoe zijn. Arcadis and Berenschot (2021) verwachten dat de LOHC-stoffen niet in Nederland geproduceerd worden, maar het is onbekend waarop dit gebaseerd is. Er is dus nog geen informatie over de emissies van gevaarlijke stoffen of ZZS bij de productie, het gebruik en verwerking van de LOHC's.

### 5.3 Elektrolyzers

Waterstof kan op verschillende manieren worden geproduceerd, maar het splitsen van water in waterstof en zuurstof via een elektrische stroom (elektrolyse) wordt beschouwd als de meest levensvatbare duurzame optie (Wieclawska & Gavrilova, 2021). Voor dit proces heeft men een elektrolyser nodig. Een elektrolyser bestaat uit een set gestapelde basiseenheden, zogenaamde cellen, die elk afzonderlijk de basisfunctie, de elektrolyse, kunnen uitvoeren. Het hart van de cel wordt gevormd door de membraan met daarop aangebrachte elektrodes, ingekapseld tussen twee metalen platen, waar water en reactiegassen langs gevoerd kunnen worden (TNO, 2020).



Figuur 4 Belangrijkste onderdelen van een elektrolyser, type PEM cel (TNO, 2020).

Er zijn verschillende soorten elektrolytische cellen: polymeer elektrolyt membraan elektrolytische cellen (PEM), alkalische water elektrolytische cellen (AEL) en solid oxide elektrolyse cells (SOEC). PEM- en AEL-elektrolytische cellen zijn momenteel in de handel verkrijgbaar. SOEC-elektrolytische cellen hebben een lager "technology readiness level" (TRL) en zijn nog in ontwikkeling. PEM-elektrolytische cellen maken gebruik van iridium en platina, terwijl AEL-elektrolytische cellen nikkel (ZNS), kobalt (ZNS) en platina bevatten (Wieclawska & Gavrilova, 2021).

Alle huidige types van **elektrolyzers** vereisen kritische grondstoffen als katalysator voor het splitsen van de watermolecuul (TNO, 2020; Wieclawska & Gavrilova, 2021). Voor het AEL-type zijn deze kritische grondstoffen ook ZNS. Of er emissies zijn van ZNS bij de productie van elektrolyzers is niet bekend. Het is zeer waarschijnlijk dat PEM- en AEL-elektrolytische cellen gelijktijdig zullen worden gebruikt in het toekomstige energiesysteem, vanwege hun afzonderlijke voor- en nadelen (Wieclawska & Gavrilova, 2021).

Verscheidende bedrijven in Nederland gebruiken op dit moment op pilotschaal al elektrolyzers voor de productie van waterstof, of zijn van plan dit op korte termijn te doen (TNO, 2020).

In een publicatie van TNO (TNO, 2020), wordt gesteld dat de kansen voor de Nederlandse maakindustrie onder andere liggen op het gebied van de productie van elektrolyzers. Veel innovatie vindt plaats, o.a. op het gebied van materiaaleigenschappen, levensduurverlenging, optimaliseren van (chemische en microkristallijne) structuur van materialen. Nanomaterialen worden genoemd als potentiële ontwikkelrichting. Ook wordt geïnnoveerd om kritische (zeldzame) grondstoffen te vervangen, zoals kobalt en nikkel, die zowel ZNS als een kritische grondstof zijn.

## 6 Discussie

In deze eerste inventarisatie ligt de focus op emissies van stoffen als gevolg van het toepassen van hernieuwbare en duurzame energie technologieën. De mogelijke winst voor gezondheid en milieu door het afbouwen van fossiele brandstoffen is geen onderdeel van dit onderzoek, maar is uiteraard belangrijk om rekening mee te houden voor het krijgen van een overall beeld.

ZZS en andere gevaarlijke stoffen zijn in veel materialen aanwezig die nodig zijn voor de energietransitie. We hebben zowel bestaande energietechnologieën als opkomende en nieuwe energietechnologieën verkend. De casussen laten zien dat een grote variëteit aan ZZS en gevaarlijke stoffen wordt gebruikt. Echter, een goed beeld van mogelijke ZZS emissies, die gepaard gaan met de productie als ook het gebruik van deze technologieën in Nederland, ontbreekt.

Als er wel informatie bekend is over ZZS, dan gaat het meestal over de aanwezigheid van (ZZS) zware metalen, zoals kobalt en nikkel. Dat komt omdat deze metalen kritieke grondstoffen zijn en dus belangrijk in het kader van de grondstoffenbeschikbaarheid. Voor de stoffen die ZZS zijn, maar geen SVHC is het moeilijker om informatie te vinden. Dat komt omdat er een informatieplicht is voor SVHC, maar niet specifiek voor de ZZS die geen SVHC zijn (zie bijlage 1).

Op dit moment vindt de productie van de materialen grotendeels buiten Nederland plaats, voor deze materialen en technologieën kunnen in Nederland echter wel ZZS emissies tijdens het gebruik en afvalverwerking/hergebruik plaatsvinden. Een deel van de grondstoffen en tussenproducten kunnen wel in Nederland worden geproduceerd, denk aan raffinage of processen voor de oppervlaktebehandeling van metalen (coaten) waar emissies van ZZS kunnen plaatsvinden. Echter, een goed beeld van huidige productieketens ontbreekt.

Mogelijke emissiebronnen die we in deze grove eerste verkenning hebben onderkend zijn bijvoorbeeld het uitloggen van ZZS, bij de erosie van materialen (o.a. verspreiding van microplastics), door stofvorming (bij recycling) en bij verbranding van materialen (aan het einde van keten). Emissies van stoffen bij branden kunnen incidenteel plaatsvinden, alhoewel brand niet wordt gezien als "voorzien gebruik" bij risicobeoordelingen. De arbeidsrisico's en consumentenrisico's als gevolg van blootstelling aan chemische stoffen zijn in deze verkenning niet in kaart gebracht.

Er zijn rekenmodellen beschikbaar om emissies van ZZS in bepaalde toepassingen te berekenen, denk aan emissies van ZZS uit coatings van windturbines naar de leefomgeving. Sommige rekenmodellen zijn recent ontwikkeld voor bijvoorbeeld het uitloggen van metalen uit zonnepanelen. Naast de rekenmodellen, is ook data over de samenstelling nodig om mogelijke emissies en effecten te beoordelen. Deze data ontbreken veelal, zoals ook blijkt uit eerder RIVM onderzoek naar emissies van ZZS bij windturbines op zee (Hof, Bakker, & Spanbroek, 2023). Gegevens

over de samenstelling van materialen zijn doorgaans enkel bekend bij de grondstoffenproducent en worden niet gecommuniceerd in de keten.

Een beperkte hoeveelheid materialen en energietechnologieën gerelateerd aan de energietransitie worden op dit moment afgedankt. Uit deze verkenning blijkt dat nu het meeste geëxporteerd wordt voor de verdere verwerking, bijvoorbeeld afgedankte zonnepanelen en batterijen en er dus mogelijk emissies op kunnen treden in het buitenland. Windturbinebladen worden in de praktijk gestort of verbrand. Bij de Europese Commissie is een verzoek ingediend voor een EU-breed stortverbod van windturbinebladen. Het is de verwachting dat meer inzameling- en recyclinginfrastructuur zullen worden opgericht in Nederland voor o.a. zonnepanelen, windturbines en batterijen. In de toekomst zullen veel grotere volumes vrijkomen. Omdat verschillende ZZS worden toegepast in de diverse energietechnologieën voor de energietransitie, is de verwachting dat bij het opzetten van recyclingfabrieken, meerdere bevoegde gezagen te maken zullen krijgen met vraagstukken over aanwezigheid en emissies van ZZS tijdens de verwerking (ontmanteling en recycling). Om de gebruikte materialen veilig en veelvuldig te kunnen hergebruiken en recyclen is het van groot belang dat er meer informatie over de samenstellingen beschikbaar komt. Ook is het noodzakelijk dat bij het ontwikkelen van een materiaal al wordt nagedacht over effecten van het gebruik van stoffen over de hele levenscyclus, inclusief de afvalfase. Het gebruik van ZZS in materialen voor energietechnologieën hoeft niet altijd te leiden tot emissies van ZZS en/of risico's van ZZS. De omvang van de emissie hangt af van de specifieke productie/technologie, de specifieke materialen, het type gebruik en wijze van productiemethode, de omstandigheden tijdens het gebruik en de verwerkingsfase (afdanke en recycling).

Omdat op termijn steeds meer PFAS houdende materialen (zoals zonnepanelen, batterijen) het einde van de levensduur zullen bereiken is dit potentieel een bron voor de emissie en verspreiding van PFAS. Het is daarom belangrijk om de mogelijke milieu en gezondheidsrisico's van verwerkingsmethodes van PFAS-houdende afvalstromen te kennen. Het is aan te raden een brede PFAS definitie te hanteren (vergelijkbaar met de aanpak in het REACH Restrictiedossier voor PFAS) omdat de zorg over PFAS emissies zich uitstrekt over deze groep zeer persistente chemische stoffen als geheel.

Op korte termijn zullen belangrijke keuzes gemaakt moeten worden voor de inrichting van het energiesysteem. Er is veel aandacht voor bijvoorbeeld het gebruik van kritische grondstoffen en het circulair ontwerpen binnen de energietransitie is in ontwikkeling (zonnepanelen, windturbines). Ook is veel kennis beschikbaar in Nederland als het gaat om materiaalinnovatie. Daarom lijkt er momentum om toxiciteit en het gebruik van ZZS ook mee te nemen als het gaat om verkenningen, risicoanalyses, en uiteindelijk de keuzes voor het energiesysteem.

Streven naar minimalisatie van ZZS emissies, kan onderzoek stimuleren naar het vervangen van het gebruik van ZZS bij de productie van de materialen die nodig zijn in de verschillende technologieën.

In Nederland vindt veel onderzoek plaats naar nieuwe energietechnologieën (o.a. batterijen), o.a. ook naar substitutie van ZZS (bijvoorbeeld het vervangen van lood in zonnepanelen). Het is zaak om in innovatietrajecten vroegtijdig en doelgericht aandacht te besteden aan de veiligheid en duurzaamheid van nieuwe materialen. Dit past ook bij de Safe-and-Sustainable-by-Design (SSbD)-strategie die deel uitmaakt van het EU streven naar *zero pollution*. De investeringen in innovaties op het gebied van geavanceerde materialen zijn groot, terwijl de aandacht voor de mogelijke risico's van deze materialen tijdens de hele levenscyclus vooralsnog te beperkt op de agenda staat.

Omdat het mogelijk is dat LOHC'S in de toekomst op grote schaal gebruikt gaan worden is het belangrijk om al rekening te houden met de gevaareigenschappen van de stoffen en producten. Door al in de ontwerp- en ontwikkelingsfase rekening te houden met duurzaamheid en de veiligheid van chemische stoffen, kan worden voorkomen dat ZZS in de leefomgeving terechtkomen.

Tot slot, de energietransitie zal leiden tot grote aanpassingen in het energiesysteem. Er zullen veranderingen zijn op het gebied van energieopwekking en gebruik maar ook in de daarvoor benodigde ruimtelijke inrichting. Men ziet bijvoorbeeld dat gebruik van windturbines zal leiden tot meer decentrale energiebronnen die vaak dicht bij de woonomgeving zullen worden geplaatst dan voorheen de grote op fossiele energie gebaseerde elektriciteitscentrales. Ook systemen voor energieopslag zoals buurtbatterijen en waterstofopslag worden mogelijk dicht bij de woonomgeving geplaatst. In het nieuwe energiesysteem kunnen functies ook gecombineerd worden (bijvoorbeeld mosselenkweek in de buurt van windparken op zee). Deze ruimtelijke component is in deze eerste verkenning maar heel beperkt meegenomen. Het is nu nog niet duidelijk of hierdoor meer risico's kunnen ontstaan voor mens en/of milieu.





## 7 Conclusies en aanbevelingen

De onderzoeksvragen die centraal staan in deze verkenning zijn:

- 1) Wat zijn belangrijke technologieën bij de energietransitie en welke mogelijke emissies van ZZS en andere gevaarlijke stoffen kunnen ontstaan in de keten?
- 2) Wat zijn de onzekerheden en technisch-wetenschappelijke kennishiaten bij de beantwoording van vraag 1?
- 3) Welke aanbevelingen volgen uit deze verkenning?

In paragraaf 7.1 wordt antwoord gegeven op de eerste onderzoeksvraag. Vervolgens wordt in paragraaf 7.2 de tweede onderzoeksvraag beantwoord. In paragraaf 7.3 zijn aanbevelingen opgenomen.

### 7.1 Meest relevante aspecten voor emissies van ZZS en andere gevaarlijke stoffen

#### 7.1.1 *Huidige energietechnologieën*

Een breed scala aan materialen en energietechnologieën zijn nodig voor de energietransitie. In deze inventarisatie is onderscheid gemaakt tussen huidige, reeds toegepaste technologieën en 'opkomende en nieuwe' en technologieën.

In de bestaande en reeds toegepaste technologieën, worden verschillende ZZS gebruikt.

Voorbeelden van ZZS zijn (zie paragraaf 3.1 voor een overzicht):

- Lood in kristallijne silicium zonnepanelen
- Cadmium in cadmiumtelluride zonnepanelen
- Kobalt in lithiumbatterijen (er zijn ook aandrijfaccu's zonder kobalt)
- 1,2 dimethoxyethaan en N-methyl-2-pyrrolidone in aandrijfaccu's
- Bisphenol A in epoxycoatings<sup>27</sup> van windturbines

Ook wordt PFAS in veel energie technologieën toegepast, maar in deze verkenning zijn niet alle specifieke PFAS geïdentificeerd.

In een aantal gevallen zijn er in de literatuur alternatieven bekend of wordt daar onderzoek naar gedaan, zoals voor lood in kristallijne silicium zonnepanelen. Er liggen dus kansen om materialen zonder het gebruik van ZZS te gaan produceren.

Emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) kunnen voorkomen bij productie, gebruik (inclusief onderhoud, opslag en transport) en afvalverwerking. Voor zover bekend vindt de productie van materialen vooral buiten Nederland plaats. Over emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) is erg weinig bekend.

<sup>27</sup> Epoxy coatings kunnen worden gebruikt om windturbines te beschermen tegen corrosie. Het is niet bekend of ze ook zijn toegepast voor windturbines in Nederland.

### 7.1.2 *Nieuwe ontwikkelingen*

De energietransitie is in volle gang. Technologische innovaties zijn nodig om energiedoelstellingen van de Nederlands overheid te halen. Veel nieuwe materialen en technieken worden op dit moment op laboratorium schaal ontwikkeld en de samenstelling of gebruikte grondstoffen zijn niet altijd (volledig) bekend. Dat geldt bijvoorbeeld voor de elektrolyzers, brandstofcellen en batterijen. Ook in Nederland vindt er onderzoek plaats naar nieuwe energietechnologieën voor de energietransitie, bijvoorbeeld op gebied van batterijen voor stationaire opslag, zonnepanelen en membraantechnologie.

Bij de nieuw ontwikkelde materialen kunnen ook zogenaamde geavanceerde materialen worden ontwikkeld en gebruikt. Deze materialen zijn meestal minder goed gekarakteriseerd als het gaat om gevaareigenschappen ten opzichte van stoffen die al langer op de markt zijn (zie paragraaf 3.3). Dit is een zorg aangezien deze geavanceerde materialen op de markt kunnen komen zonder dat de veiligheid afdoende is vastgesteld.

Ten aanzien van waterstofdragers is wel informatie bekend over een aantal LOHC systemen. Uit RIVM onderzoek (2022) blijkt dat er bij zes van de onderzochte reversibele (hetero)aromatische LOHC-systemen sprake is van gebruik van één of meerdere stoffen die ZZS zijn. Voor twee van deze LOHC systemen zijn er ver gevorderde planningen met betrekking tot transport en grootschalige opslag in havens in Nederland (Rotterdam en Amsterdam). Er is nog geen informatie over de emissies van gevaarlijke stoffen of ZZS bij de productie, transport, opslag van de LOHC, en het (de-)hydrogenatieproces.

## 7.2 **Kennishiaten**

Hoe de energietransitie er precies uit gaat zien, en welke materialen en energietechnologieën daaraan gaan bijdragen is voor een deel nog onzeker.

Voor veel energietechnologieën is het (nog) niet bekend of hierin gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) worden toegepast. Ook over de emissies in de gehele keten, d.w.z. van de productie van de materialen en energietechnologieën, tijdens het gebruik tot en met de recycle/afvalverwerking, is veel onbekend. Voor een aantal energietechnologieën is wel bekend dat er gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) in aanwezig kunnen zijn. Hieronder volgt een opsomming van een aantal kennishiaten die uit deze verkenning naar voren zijn gekomen:

- a. Samenstelling van coatings van windturbines en mogelijke emissies van ZZS;
- b. Emissies van stoffen naar water en bodem bij beschadiging van zonnepanelen;
- c. Emissies van ZZS bij pyrolyse van afgedankte windturbine bladen;
- d. Emissies van fluorverbindingen en metalen bij verwerking van afgedankte zonnepanelen;
- e. Overzicht ontbreekt van recyclingtechnieken en best beschikbare technieken voor het verwijderen van ZZS bij afvalverwerking van zonnepanelen, windturbines, batterijen;

- f. Waterstofdragers (LOHC's): Karakterisering van ZZS gevaareigenschappen van LOHC's en bijproducten, inclusief modellen en scenario's om de blootstelling van ZZS voor mens en milieu in te kunnen schatten;
- g. Afbraakproducten en emissies bij gebruik van verschillende type oplosmiddelen bij opslag van CO<sub>2</sub>;
- h. Emissies van ZZS bij verwerken van biomassa;
- i. Omvang en karakterisering van emissies van PFAS bij recycling en verbranding van materialen voor energietransitie;
- j. Gebruik en type van geavanceerde materialen en karakterisering van gevaareigenschappen;
- k. Gebruik van ZZS bij brandstofcellen en elektrolyzers;
- l. Gebruik van ZZS bij aandrijfacu's en batterijen voor energieopslag.

De algemene signalen en uitdagingen rondom gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) en de energietransitie worden in hoofdstuk 8 toegelicht.

### 7.3 Aanbevelingen

Deze paragraaf beoogt een aantal aanbevelingen te geven om stappen te zetten in het omgaan met de hierboven beschreven kennishiaten.

- I. Verbeter en ontsluit kennis over het gebruik en emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) in de gehele keten

In deze verkenning is een eerste grove inventarisatie gedaan naar gebruik en emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) in materialen en technologieën voor de energietransitie, maar het is nog lang geen compleet beeld. In beeld brengen van ZZS in producten en materiaalstromen geeft zicht op mogelijke ZZS(-emissies) bij gebruik en afvalverwerking. Deze data zijn ook relevant voor het Circulair Materialenplan.

Vanaf 5 januari 2021 dienen leveranciers van artikelen ('voorwerpen' genoemd onder REACH) waarin SVHC stoffen aanwezig zijn in een gehalte van meer dan 0,1% gemeld te worden. Deze informatie is publiek beschikbaar in de SCIP database. Echter veel ZZS zijn niet SVHC, dus dan blijft de grote groep van ZZS die niet SVHC zijn buiten beeld. Het goed in beeld krijgen van gebruik van ZZS en de emissies bij het aanvragen van een omgevingsvergunning is van belang.

Specifieke kennishiaten die uit deze verkenning naar voren kwamen zijn benoemd in paragraaf 7.2. Hierbij is nog niet concreet gemaakt welke partijen aan zet zijn als het gaat om de beantwoording en invulling ervan. De volgende aandachtspunten zijn van belang:

- a. Ontwikkelingen volgen van de productie van materialen en technologieën in Nederland wat betreft gebruik en emissies van ZZS. Neem hier de hele keten in beschouwing dus ook eindketen en hergebruik.
- b. Kwantificeren van emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief PFAS) bij verbranding van materialen voor energietransitie. Standaardisatie van de meetmethoden inclusief de bemonstering en de analysetechnieken is daarbij een van de te nemen stappen.

- c. Ontwikkeling of aanpassing van bestaande wettelijke kaders voor geavanceerde materialen gericht op identificatie, gevaar- en risicobeoordeling. Zo is het belangrijk om te werken aan de ontwikkeling van gestandaardiseerde testmethodes en systemen om vroegtijdig in het innovatieproces te signaleren of de toepassingen veilig zijn.
- II. Ontsluit kennis over het gebruik en emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) in de gehele keten

Haal vragen van bevoegde gezagen op zodat er ook behoefte gestuurde kennisontwikkeling kan plaatsvinden en ontsluit kennis op één toegankelijke plek. Voor sommige energietechnologieën en materialen is informatie beschikbaar omtrent aanwezigheid van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS) en mogelijke emissies van gevaarlijke stoffen (inclusief ZZS). Denk bijvoorbeeld aan het initiatief van de provincie Zuid-Holland omtrent zonnepanelen en de inventarisaties die zijn uitgevoerd door het RIVM naar emissies van gevaarlijke stoffen bij windturbines. Beide rapporten zijn publiek maar daarmee niet altijd of niet voldoende bekend onder relevante stakeholders.

## 8 RIVM reflectie: Signalen, uitdagingen en oplossingsrichtingen rondom ZZS en de energietransitie

Vanuit de verkenning naar emissie van ZZS en gevaarlijke stoffen in de energietransitie zijn vier belangrijke signalen, uitdagingen en kansen af te geven.

### **1 Onvoldoende zicht op invloed energietransitie op ZZS-emissie**

Hoe de energietransitie er precies uit gaat zien, en welke materialen en energietechnologieën daaraan gaan bijdragen blijft voor een deel onzeker. Er worden veel scenariostudies uitgevoerd naar bijvoorbeeld de energievoorziening en benodigde (kritieke) materialen. Maar het ontbreekt nog aan inzicht in de toegepaste gevaarlijke stoffen en emissies daarvan. Er is een aantal redenen waarom het lastig is om zicht te krijgen op de ontwikkelingen binnen de energietransitie en de risico's van stoffen die daarmee gemoeid zijn. Allereerst gaan de ontwikkelingen snel en worden er vele verschillende energietechnologieën ontwikkeld. Dit geldt bijvoorbeeld voor batterijen en accu's, waarvoor er met verschillende materialen en technieken wordt gezocht naar de beste opties voor allerlei toepassingen. Ook voor het opslaan van waterstof worden vele alternatieven onderzocht, waaronder de LOHC's. Ten tweede is er slechts beperkte informatie beschikbaar over mogelijke gevaarlijke stoffen en ZZS die daarin een rol kunnen gaan spelen. Dit is ook intrinsiek verbonden met het feit dat in de ontwikkelingsfase van nieuwe energietechnologieën nog niet alle relevante informatie voorhanden is. Bovendien wordt het zicht bemoeilijkt omdat productie en verwerking vaak buiten Nederland plaatsvindt. De verwerking van veel energietechnologieën is nog niet opgestart, omdat de einde levensduur nog niet bereikt is of de volumes van afgedankte materialen relatief klein zijn. Voor de eerste generaties zonnepanelen en windturbines is dit de laatste jaren relevant geworden en blijken er uitdagingen te zitten aan de verwerking, mede omdat hier tijdens de ontwikkeling geen rekening mee is gehouden.

Zicht krijgen op de ontwikkelingen is nodig om de risico's te kunnen inschatten én vervolgens te duiden. Pas daarna kan ingeschat worden of aanvullend beleid of wijziging van beleid noodzakelijk is om eventuele problemen aan te pakken. Ook is het van belang dat de beschikbare kennis over ZZS en andere gevaarlijke stoffen of geavanceerde materialen gebundeld wordt en vindbaar is voor relevante partijen. Denk bijvoorbeeld aan de studies die zijn gedaan rond zonnepanelen door verschillende kennisinstellingen. Tot slot is het nodig dat ontwikkelaars en bedrijven aan het begin van het innovatieproces bewust zijn van veiligheidsaspecten in de gehele keten van productie, gebruik (inclusief beschadiging) tot recycling.

### **2 Energietransitie is een kans voor veilig en duurzaam ontwerp**

Er komt meer aandacht voor andere duurzaamheidsaspecten binnen de energietransitie, zoals grondstoffen schaarste en omgevingsveiligheid. Dit leidt tot initiatieven rondom (kennisontwikkeling voor) het veilig en

duurzaam ontwerpen van energietechnologieën. Zo heeft de provincie Zuid-Holland het initiatief genomen om onderzoek te laten doen naar de veiligheid van zonnepanelen en de mogelijkheden voor de provincie om bij te dragen aan de ontwikkeling van veilige en circulaire panelen. De hernieuwbare energiesector heeft het IMVO-convenant ondertekend en afspraken gemaakt om milieurisico's in de toeleveringsketens te verkennen.

Ook zijn er acties geformuleerd in het kader van de nationale grondstoffenstrategie. Zo zijn er plannen om bedrijven te informeren (o.a. via grondstoffenscanner) over het gebruik van kritieke grondstoffen. En om via programma's voor duurzame ketens meer onderzoek te doen naar milieurisico's in grondstoffenketens. Sommige kritieke grondstoffen zijn ook ZZS (denk aan zware metalen). Deze acties en programma's bieden kansen om aandacht te geven aan het gebruik en mogelijke risico's van kritieke grondstoffen in ketens die ZZS zijn.

De ambitie van Europa om een gifvrije samenleving te realiseren geeft extra momentum om met de energietransitie ook doelen te realiseren met betrekking tot 'Safe and Sustainable by Design'. In het kader van het Europese onderzoeksprogramma Horizon 2020 SUNSHINE ([SUNSHINE \(h2020sunshine.eu\)](https://sunshine.h2020sunshine.eu)), heeft het RIVM onderzoek gedaan naar safe-and-sustainable accu's (Hernandez et al., 2023). De resultaten bieden handvatten voor batterij-ontwikkelaars en onderzoekers om safe-and-sustainable by design (SSbD) principes te implementeren. Naast verschillende duurzaamheidscriteria is ook gekeken naar kosten en functionaliteit. Voor beleidsmakers is de studie relevant omdat het laat zien hoe het levenscyclusdenken en SSbD principes kunnen helpen om richting te geven aan keuzes die gemaakt moeten worden voor de inrichting van het energiesysteem. Het geeft inzicht in het 'totaalplaatje' en geeft inzicht in mogelijke onbedoelde negatieve gevolgen. Alhoewel de studie gericht is op batterijen kunnen de SsbD principes ook toegepast worden op andere ontwikkelingen binnen de energietransitie.

Tot slot liggen er kansen als het gaat om de relatie tussen het gedrag van consumenten en professionals en emissies van ZZS (en andere gevaarlijke stoffen). Denk bijvoorbeeld aan het juist sorteren van afgedankte batterijen. En het onderhoud van zonnepanelen (tijdige vervanging bij schade) en voorkomen van lekkages van koelmiddelen uit warmtepompen en airco's). Dit aspect was nu geen onderdeel van de verkenning.

### **3 Aandacht voor veiligheid in perspectief plaatsen**

De specifieke aandacht voor chemische veiligheid binnen de energietransitie kan ook leiden tot onrust. Dit kan zeker spelen rondom energietechnologieën waarover al maatschappelijke onrust is, zoals biomassacentrales en windturbines. Door de gevaren en risico's van energietechnologieën te onderzoeken kan hierdoor het beeld ontstaan dat deze onwenselijk zijn.

Het in perspectief plaatsen van de resultaten is daarom van belang. Dit gaat zowel om de grootte van het risico zelf, als om het risico ten opzichte van alternatieven en andere (duurzaamheids)aspecten. Dit

rapport focust op de (mogelijke) aanwezigheid van ZZS. Blootstellingsaspecten zijn niet meegenomen in deze inventarisatie, wat maakt dat slechts één deelaspect van het risico is meegenomen en het geen volledig beeld geeft van de potentiële risico's. Er zijn verschillende bronnen die bij kunnen dragen aan emissies van bepaalde stoffen, waarbij het aandeel van een bepaalde bron beperkt kan zijn. Ook is het van belang om risico's van stoffen in de energietransitie in perspectief te plaatsen ten opzichte van de milieu- en gezondheidswinst die gerealiseerd wordt door het afbouwen van fossiele brandstoffen.

#### **4 Omgaan met ontwikkelingen en onzekerheden**

De energietransitie vindt plaats in een complex en dynamisch speelveld met nieuwe energietechnologieën en stoffen, verschuivende (grond)stoffenbehoefte, vele stakeholders en nieuwe beleidsintenties. Voortschrijdend inzicht kan leiden tot andere benodigde acties ten aanzien van ZZS. Terwijl de energietransitie nog volop in ontwikkeling is, wordt er al een beroep gedaan op beleidsmakers en bevoegde gezagen om deze in goede banen te leiden. Het inschatten van risico's van nieuwe ontwikkelingen is lastig en daarmee ook het beoordelen van initiatieven en vergunningaanvragen. Zo wordt bijvoorbeeld bij een MER-studie gekeken naar referentie-fabrieken. Maar voor nieuwe industrieën of energietechnologieën zijn die waarschijnlijk niet beschikbaar.

Bijkomend vragen maatschappelijke transitie om een meer integrale afweging. Het omgaan met de ontwikkelingen en de bijbehorende onzekerheden is daardoor een uitdaging in de uitvoeringspraktijk als ook voor beleidsmakers.

Voor de energietransitie zouden zowel het streven naar klimaatwinst als het beperken van risico's van stoffen (en andere duurzaamheidsaspecten) meegenomen moeten worden. De verschillende beleidsdoelen komen bijvoorbeeld naar voren bij de ontwikkelingen rond het opslaan van waterstof. Vanuit het milieubeleid kan het onwenselijk zijn dat ZZS als waterstofdrager worden ingezet, terwijl vanuit omgevingsveiligheid juist het gebruik van ammoniak tot risico's kan leiden. Daarnaast wordt vanuit de sector voornamelijk gekeken naar de efficiëntie van het opslaan van waterstof, zowel technisch als qua kosten. Wat hierbij vanuit maatschappelijk oogpunt het meest wenselijke scenario is, is lastig te bepalen. Een eerste stap is om de verschillende perspectieven en doelen goed in beeld te brengen.





## 9 Referenties

- Arcadis, & Berenschot. (2021). *Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers*. .  
<https://www.tweedekamer.nl/downloads/document?id=ab736bec-5fff-49c4-baf9-c5e456fb22e4&title=Ketenstudie%20omgevingsveiligheid%20van%20duurzame%20waterstofrijke%20energiedragers.pdf>
- ARN. (2023). Retrieved 1-05-2023 from <https://arn.nl/wat-gebeurt-er-met-afgedankte-batterijen/>
- Beekman, M., Bakker, J. C., Bodar, C. D. M., van Leeuwen, L. C., Waaijers-van der Loop, S. L., Zijp, M. C., & Verhoeven, J. C. (2020). *Omgaan met zeer zorgwekkende stoffen in een circulaire economie*.
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Alves Dias, P., Cavalli, A., Georgitzikis, K., Grohol, M., Itul, A., Kuzoy, T., Latunussa, C., Lyons, L., Malano, G., Maury, T., Arce, P., Á., S., J., Telsnig, T., Veeh, C., Wittmer, D., Black, C., Pennington, D., & Christou, M. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study*.  
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889>
- Circulaire maakindustrie. (2020). *Kennisdossier: Lithium-ion batterijen*.  
<https://circulairemaakindustrie.nl/kennisdossier-lithium-ion-batterijen/>
- Commissie Deskundigen Meststoffenwet. (2016). *Protocol beoordeling stoffen Meststoffenwet (versie 3.2, Issue*.
- Duyvis, M. G., Leene, M., & Spoelstra, M. B. (2021). *Depositie bij branden met zonnepanelen*.
- ECHA. (2023a). *ANNEX XV Restriction report. Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)*. .  
<https://echa.europa.eu/documents/10162/1c480180-ece9-1bdd-1eb8-0f3f8e7c0c49>
- ECHA. (2023b). *PFAS restriction proposal*.  
<https://echa.europa.eu/nl/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>
- Ehlert, P. A. I., van Wijnen, H. J., Struijs, J., van Dijk, T. A., van Schöll, L., & de Poorter, L. R. M. (2016). *Risicobeoordeling van contaminanten in afval- en reststoffen bestemd voor gebruik als covergistingmateriaal*. <http://dx.doi.org/10.18174/394875>
- Eijsbouts, R. (2023). Stichting Open. Persoonlijke communicatie.  
 2019/1021 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 20 June 2019 on persistent organic pollutants Official Journal of the European Union L 169/45: 33, (2019).
- Europese Commissie. (2019). *Europese Commissie geeft groen licht voor 3,2 miljard EUR overheidssteun van zeven lidstaten voor pan-Europees onderzoeks- en innovatieproject in alle segmenten waardeketen accu's*  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/nl/ip\\_19\\_6705](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/nl/ip_19_6705)

- Europese Commissie. (2020). *Chemical strategy for sustainability*. Retrieved from [https://environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy_en)
- Fraunhofer Institute. (2017). *End-of-Life pathways for photovoltaic backsheets* [https://www.coveme.com/files/immagini/green-solutions/Final\\_Report\\_End-of-Life\\_Pathways\\_For\\_Photovoltaic\\_Backsheets.pdf](https://www.coveme.com/files/immagini/green-solutions/Final_Report_End-of-Life_Pathways_For_Photovoltaic_Backsheets.pdf)
- Gooijer, L., & Mennen, M. G. (2021). *Klimaatakkoord: effecten van nieuwe energiebronnen op gezondheid en veiligheid in Nederland*. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0054.pdf>
- HaskoningDHV Nederland B.V. (2020). Warmte uit aardgas of uit biomassa? Klimaatimpact over de keten en effecten op luchtkwaliteit vergeleken voor warmtelevering aan industrie en bebouwde omgeving. [https://www.nvde.nl/wp-content/uploads/2020/03/BH1576-6-mei\\_def.pdf](https://www.nvde.nl/wp-content/uploads/2020/03/BH1576-6-mei_def.pdf)
- Hof, M., Bakker, J., & Spanbroek, N. (2023). *Beoordeling mogelijke risico's van chemische stoffen en plastic deeltjes van windturbines op zee*. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0241.pdf>
- Hof, M., Bodar, C., & de Kort, T. (2023). *Eerste inzicht in emissies van chemische stoffen bij windturbines op land. Resultaten quick scan*. <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0235.pdf>
- Infomil. (2023). Retrieved 1-05-2023 from <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/stookinstallaties/biomassa-0/biomassa-verstaan/>
- Interprovinciaal overleg. (2022). Brief aan Stichting Open.
- M2I. (2021). *Kansen en uitdagingen voor circulaire Zon PV met focus op materiaal en technologie*. I. o. v. d. p. Z.-H. (PZH).
- Marinković, M., & Ng-A-Tham, J. (2024). *Liquid hydrogen carriers: an overview of technical aspects and SVHC properties*
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2019). *Klimaatakkoord*. Retrieved from <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/documenten/rapporten/2019/06/28/klimaatakkoord>
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022a). *Impulsprogramma Chemische Stoffen*. Retrieved from <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/12/16/bijlage-programmaplan-impulsprogramma-chemische-stoffen-2023-2026>
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2022b). *Nationale Actieagenda Batterijsystemen*. Retrieved from <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/09/23/2022195013-1-nationale-actieagenda-batterijsystemen>
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2023). *Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030*. Retrieved from <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/beleidsnotas/2023/02/03/nationaal-programma-circulaire-economie-2023-2030>

- NWO. (2021). *Uncertainty Reduction in Smart Energy Systems (URSES)*.  
 Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022).  
*Publications in the Series on the Safety of Manufactured  
 Nanomaterials No. 104 - Advanced Materials: Working  
 Description*. .  
<https://www.oecd.org/env/ehs/nanosafety/publications-series-safety-manufactured-nanomaterials.html>.
- Peijnenburg, W., Oomen, A. G., Soeteman-Hernández, L. G.,  
 Groenewold, M., Sips, A. J. A. M., Noorlander, C. W., Kettelarij, J.  
 A. B., & Bleeker, E. A. J. (2021). Identification of emerging safety  
 and sustainability issues of advanced materials: Proposal for a  
 systematic approach. *NanoImpact*, Vol. 23, 100342.  
<https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100342>
- Quik, J., Hof, M., & Steenmeijer, M. (2022). Veilige en duurzame  
 zonnepanelen: tijdens ontwerp aandacht nodig voor milieu-  
 impact. *RIVM brochure*.  
<https://www.rivm.nl/documenten/veilige-en-duurzame-zonnepanelen-tijdens-ontwerp-aandacht-nodig-voor-milieu-impact>
- Rijksoverheid. (2023).  
<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/v-oortgang-klimaatdoelen>
- RIVM. (2021). Inzicht in emissies van chemische stoffen bij windturbines  
 op zee. Resultaten quickscan.  
[https://www.rivm.nl/sites/default/files/2022-06/Chemische stoffen bij windturbines op zee TG.pdf](https://www.rivm.nl/sites/default/files/2022-06/Chemische%20stoffen%20bij%20windturbines%20op%20zee%20TG.pdf)
- RIVM. (2022). *Inzicht in emissies van chemische stoffen bij windturbines  
 op zee*. <https://www.rivm.nl/documenten/inzicht-in-emissies-van-chemische-stoffen-bij-windturbines-op-zee>
- Royal Haskoning DHV. (2021). *MER CO2-afvang SUEZ ReEnergy  
 Roosendaal*.  
<https://www.commissiener.nl/projectdocumenten/00008015>.
- RoyalHaskoningDHV. (2020a). *Aanvulling naar aanleiding van het  
 voorlopig advies van de commissie voor de m.e.r. MER Porthos*.  
<https://commissiener.nl/projectdocumenten/00007756.pdf>
- RoyalHaskoningDHV. (2020b). *MER Porthos - CO2 transport en opslag.  
 Deelrapport Milieueffecten*.  
<https://commissiener.nl/projectdocumenten/00007532.pdf>
- RoyalHaskoningDHV. (2021). *Emissie- en ZZS-toets CO2-afvang SRE  
 Roosendaal*.  
<https://www.commissiener.nl/projectdocumenten/00008018>.
- RvO. (2022). *Slimme energiesystemen*.  
<https://www.rvo.nl/onderwerpen/slimme-energiesystemen>
- Soeteman-Hernández, L., Felipe Blanco, C., Koese, M., Sips, A.,  
 Noorlander, C. W., & Peijnenburg, W. (2023). Life cycle thinking  
 and safe-and-sustainable-by-design approaches for the battery  
 innovation landscape. *iScience* 26.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106060>
- Solar Magazine. (2022, Maart 2022). *Solar magazine*, 41-46.
- Späth, M., Wieclawska, S., Sommeling, P., & Lenzmann, F. (2022).  
*Balancing costs and revenues for recycling End-of-Life PV Panels  
 in the Netherlands*.

- Stichting Open. (2023). Persoonlijke communicatie.
- TNO. (2020). *Elektrolyzers: Kansen voor de Nederlandse Maakindustrie Regionale kansenkaart en aanbevelingen voor de ontwikkeling van een Nederlandse productieketen voor elektrolyzers.*
- TopsectorEnergie. (2021). *Elektrificatie: cruciaal voor een duurzame industrie. Routekaart Elektrificatie in de Industrie*  
<https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Energie%20%26%20Industrie/Documenten/Routekaart%20Elektrificatie%20in%20de%20Industrie.pdf>
- van Veen, N. W., Mennen, M. G., Bos, P. M. J., Engering, T. W. J. A., Gerssen, A., & Lasaroms, J. J. P. (2022). *Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen.*  
<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0103.pdf>
- Wieclawska, S., & Gavrilova, A. (2021). *Op weg naar een groene toekomst. Deel 1: Hoe grondstoffenschaarste onze ambities voor groene waterstof en de energietransitie als geheel kan belemmeren.*

## Bijlage 1 Toelichting Nationaal en Europees stoffenbeleid

Er zijn verschillende internationale verdragen en wettelijke kaders die regels stellen voor stoffen waarvoor zorg bestaat over de risico's voor mens en milieu. De REACH verordening bevat criteria waarmee de meest schadelijke stoffen worden gedefinieerd (Substances of Very High Concern (SVHC)). REACH bevat regels om SVHC's te vervangen door minder schadelijke alternatieven. En waar dat nog niet mogelijk is de risico's van het gebruik van de SVHC's te beheersen. SVHC stoffen worden op de kandidaatslijst geplaatst via een formele procedure. Direct na opname van een stof op de kandidaatslijst moeten de leveranciers van voorwerpen waarin die stof in een concentratie van meer dan 0,1 gewichtsprocent (g/g) aanwezig is, voldoende informatie aan de afnemers verstrekken om een veilig gebruik van dat voorwerp mogelijk te maken. Deze verplichting geldt als de totale hoeveelheid van de stof in die voorwerpen meer dan een ton per producent of importeur per jaar bedraagt.

Voor sommige SVHC zijn of worden door de Europese Unie (EU) autorisaties (verbod tenzij vrijstelling) of restricties (beperkingen) vastgelegd. Deze kunnen gelden voor productie, handel, verwerking, opslag en gebruik. De stoffen en bijbehorende autorisatieverplichting en/of restricties zijn vastgelegd in de REACH-verordening (EC) 1907/2006.

Voor sommige persistente organische verontreinigende stoffen zijn ook verboden of beperkingen vastgelegd in het Verdrag van Stockholm, hetgeen geïmplementeerd is in de EU via de POP-verordening (EU) 2019/1021 (EU Regulation, 2019). Naast de REACH- en POP-verordening, zijn het internationale OSPAR-verdrag en de Europese Kaderrichtlijn Water van kracht waarin lijsten van stoffen zijn opgenomen waarvan het gebruik en/of de uitstoot moet worden verminderd.

ZZS zijn stoffen die gevaarlijk zijn voor mens en milieu omdat ze bijvoorbeeld de voortplanting belemmeren, kankerverwekkend zijn of zich in de voedselketen ophopen. Het beleid voor ZZS kent geen limitatieve lijst, maar werkt met gevaarscriteria om te beoordelen of een stof als ZZS wordt aangemerkt (zie onderstaand tekstkader). De bronnen voor de identificatie van deze gevaarscriteria zijn bovenstaande wettelijke kaders en verdragen. De ZZS-lijst wordt minimaal twee keer per jaar bijgewerkt op grond van wijzigingen in bovenstaande wetgeving en verdragen. Het kan dus zijn dat een stof als ZZS is aangemerkt, maar nog niet op de gepubliceerde versie van de lijst staat. Dergelijke stoffen moeten al wel als ZZS meegenomen worden in de vergunningverlening.

## ZZS

De identificatie van ZZS volgt uit criteria die zijn vastgelegd in artikel 57 van de REACH Verordening (EG) 1907/2006. Stoffen met een of meer van de volgende eigenschappen voldoen aan deze criteria:

- kankerverwekkend (C (carcinogeen))
- mutageen (M (mutageen))
- giftig voor de voortplanting (R (reproductie toxisch))
- persistent, bioaccumulerend en giftig (PBT (Persistent, Bioaccumulerend én Toxisch))
- zeer persistent en zeer bioaccumulerend (vPvB (very persistent and very bioaccumulative))
- soortgelijke zorg (zoals hormoonverstorende stoffen)

### **Verschillen tussen gevaarlijke stoffen, ZZS en SVHC**

ZZS maken onderdeel uit van de groep gevaarlijke stoffen, die bijvoorbeeld brandbaar, explosief of giftig kunnen zijn. Alle SVHC zijn per definitie ZZS-stoffen. Alle stoffen die voldoen aan de criteria van REACH artikel 57 zijn aangemerkt als ZZS (maar hoeven niet SVHC te zijn). De groep van ZZS is dus groter dan de groep van SVHC. Dat komt voornamelijk omdat sommige stoffen geclassificeerd zijn als carcinogeen, mutageen of reprotoxisch en daarom als ZZS worden bestempeld, maar (nog) niet onder REACH als SVHC zijn geïdentificeerd.



*Figuur 1 Een overzicht van de verschillende groepen stoffen die onderdeel maken van het geheel aan chemische stoffen. SVHC (Substances of Very High Concern) zijn onderdeel van de groep ZZS (Zeer Zorgwekkende Stoffen). ZZS maken op hun beurt weer deel uit van de groep gevaarlijke stoffen.*

## Bijlage 2 Resultaten verkenning

| Energieopwekking | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS  | Emissies   | Overige opmerkingen  |
|------------------|--|---|--|--|
| Zonnepanelen     | Twee belangrijke soorten zonnecellen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kristallijne siliciumcellen (95%)</li> <li>• Dunne film zonnecellen (5%), laagjes halfgeleiders, zoals cadmium en telluride (CdTe) of koper, indium, gallium en selenide (CIGS).</li> <li>• Nieuwe ontwikkeling: dunne film-perovskiet panelen</li> </ul> | <b>Ja:</b> afhankelijk van type <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lood (soldeer in silicium panelen en in pervoskiet panelen)</li> <li>• Cadmium (in CdTe en mogelijk aanwezig in dunne film CIGS panelen)</li> <li>• (PFAS polymeren (in backsheet) zoals PVF en PVDF)</li> <li>• (nano carbon-tubes)</li> <li>• (antimoon) in het glas</li> <li>• Nikkel in elektroplating en RVS</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• In gebruiksfase door slijtage, beschadiging en weerseffecten<sup>1</sup> en incidenteel en lokaal bij brand.</li> <li>• Emissies bij productie niet verwacht. Productie op beperkte schaal in Nederland, alternatieve technieken worden toegepast.</li> <li>• Mogelijke emissies bij toepassing eindproduct huidige recycling niet bekend. Recycling van zonnepanelen nog niet in Nederland.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grote toename verwacht (20x vermogen), ook op land en water</li> <li>• Recycling infrastructuur moet nog opgebouwd worden.</li> </ul> |
| Windturbines     | Windturbineonderdelen uit verschillende materialen, oa: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metalen</li> <li>• Epoxy / polymeren</li> </ul>   | <b>Ja:</b> voornamelijk in corrosiebescherming <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fenolen mogelijk toegepast in bepaalde type coatings (bijvoorbeeld bisfenol A bij productie epoxy</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• In gebruiksfase door slijtage<sup>2</sup></li> <li>• Recycling bladen in ontwikkeling in NL</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toename verwacht</li> <li>• Maatschappelijke onrust bij wind op land n.a.v. geluidsoverlast en mogelijke</li> </ul>                   |

| Energieopwekking         | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS  | Emissies   | Overige opmerkingen  |
|--------------------------|--|---|--|--|
|                          |  | hars voor de bladen en epoxy coatings) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metalen, o.a. nikkel</li> <li>• (microplastics)</li> <li>• (PFAS mogelijk toegepast in coatings)</li> </ul> |  | verspreiding microplastics   |
| Getijden- en golfenergie | Systemen bestaan uit onderwaterdeel en generator. Turbinebladen en andere onderwaterdelen mogelijk gemaakt van composieten, al dan niet in combinatie met metalen zoals aluminium. Materialen verder onbekend.                 | <b>Niet bekend:</b> wel mogelijk gebruik van anti-aangroei (biociden, mogelijk ZZS)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Productie en verwerking nog onbekend</li> <li>• In gebruiksfase mogelijk slijtage anti-aangroei en lekkage hydraulische olie</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nog in ontwikkeling, eerste proefopstellingen</li> <li>• Zorgen om ecologische schade door fysieke aantasting omgeving<sup>3</sup></li> </ul> |
| Blauwe energie           | Twee soorten systemen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>pressure retarded osmosis</i> (PRO)</li> <li>• <i>reversed electro dialysis</i> (RED)</li> </ul> Gebruik van membranen en generatoren. Materialen onbekend. | <b>Niet bekend:</b> onderzoek naar gebruik nanomaterialen voor membranen, o.a. carbon nano-tubes, boron nitride nanotubes en grafeen (niet ZZS)   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Productie en verwerking nog onbekend</li> <li>• In gebruiksfase worden desinfectiemiddelen gebruikt voor verhelpen verstopping membranen, nog geen negatieve effecten gevonden<sup>4</sup></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nog in ontwikkeling, proefopstelling in Afsluitdijk</li> </ul>  |



| <b>Energieopwekking</b>  | <b>Energietechnologieën en materialen</b>   | <b>ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS</b>   | <b>Emissies</b>  | <b>Overige opmerkingen</b>   |
|--------------------------|---|---|--|--|
| Biomassa als energiebron | <p>Toepassen van biomassa is mogelijk op verschillende manieren, o.a.:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Verbranding</li> <li>2) Vergisting</li> <li>3) Vergassing</li> <li>4) Torrefractie</li> <li>5) Pyrolyse</li> </ol> | <p><b>Mogelijk:</b> ZZS mogelijk bij opname van verontreiniging uit omgeving (zware metalen. Of door gebruik van verduurzamingsmiddelen, biociden, gewasbeschermingsmiddelen.</p> <p>Voor de bestrijding van zwammen op hout en vezels in buitentoepassingen wordt sinds het verbod op creosoot (steenkoolteer) en Wolmanzouten (Arseen, Chroom VI) met name boorzuurhoudende oplossingen populair (geen ZZS).</p> <p>Afhankelijk van de grondstof en de omstandigheden kunnen bij verhitting nieuwe stoffen gevormd worden waaronder ook ZZS, zoals PAK.</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Per biomassa-techniek-combinatie kan vastgesteld worden welke ZZS relevant zijn.</li> <li>• Cruciaal voor het beheersen van ZZS-emissies is het verwerken van biomassa volgens randvoorwaarden/vergunning. Wanneer bijvoorbeeld vervuilde biomassa (B-hout, C-hout) in een installatie wordt verwerkt die daar niet voor ontworpen is, kunnen emissies van ZZS ontstaan.</li> </ul> | <p>Lange termijn (PBL, 2020)(SER, 2020) is er een afbouw van laagwaardige toepassingen (elektriciteit, licht transport en warmte) voor biologische reststromen. Opbouw van inzet van hoogwaardige toepassingen, materialen en chemicaliën.</p> |

| Energieopwekking   | Energietechnologieën en materialen | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS   | Emissies | Overige opmerkingen             |
|--|------------------------------------|--|----------|---------------------------------|
|  |                                    | Formaldehyde in lijmen (B-hout)  |          |                                 |
| Vloeibare biomassa als energiebron (pyrolyse-olie en dierlijke vetten) |                                    | Mogelijk: dioxines en PAK's mogelijk aanwezig in dierlijke vetten of oliën. PAK's en fenolen (bv. catechol), afhankelijk van proces en grondstoffen voor pyrolyseproces. | Onbekend | Nog niet grootschalig toegepast |

| Warmtevoorziening           | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS   | Emissies  | Overige opmerkingen  |
|-----------------------------|--|--|---|--|
| Warmtepompen en -wisselaars | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Warmtewisselaar</li> <li>• Warmtepompen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lucht-lucht</li> <li>• Lucht-water</li> <li>• Water-water (zie WKO)</li> </ul> </li> </ul> | <b>Mogelijk:</b> verschillende koudemiddelen in gebruik. O.a. de volgende stoffen of stoffengroepen, waarin ZZS aanwezig kunnen zijn: <ul style="list-style-type: none"> <li>• (Ammoniak)</li> <li>• (CO2)</li> <li>• (Koolwaterstoffen)</li> <li>• (Chloorfluorkoolstof (CFK en HCFK), sommige PFAS)</li> </ul> | Onbekend, mogelijk lekkage van koudemiddelen bij installatie, incidenten of verwijdering installatie. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toename verwacht door afbouw gas</li> </ul> |

| Warmtevoorziening          | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS   | Emissies  | Overige opmerkingen  |
|----------------------------|--|--|---|--|
|                            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• (Fluorkoolwaterstof (HFK))</li> <li>• (Hydrofluorolefine (HFO)), sommige PFAS)</li> </ul> <p>Onderzoek naar nieuwe koudemiddelen, veel middelen nu brandbaar, giftig en/of hoge broeikaspotentie; afbouw broeikasgassen en verbod op ozonlaagafbrekende stoffen<sup>5</sup>.</p> <p>Nikkel voor onderdelen staal en printplaten</p> |   |  |
| Aquathermie                | Thermische energie (warmte) gewonnen uit oppervlaktewater (TEO), uit afvalwater (TEA) en uit de productie van drinkwater (TED). Vooral i.c.m. een WKO-systeem. | <b>Niet bekend</b>   | Niet bekend   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toename verwacht voor verwarmen huizen</li> <li>• Mogelijk zijn er door het koelen van water effecten op de ecologie en op de nitrificatie in RWZI<sup>6</sup></li> </ul> |
| Geothermie en WKO-systemen | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bodemenergie: &lt;500m diep – inclusief WKO. Open systeem (vergunning) of</li> </ul>                                  | <b>Mogelijk:</b> in gesloten systemen koelvloeistoffen, smeermiddelen,   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Productie: bij aanleg gebruik boorvloeistoffen en</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toename verwacht, ISDE-regeling geldig.</li> <li>• Mogelijk nog diepere systemen (ultra-diep)</li> </ul>  |

| Warmtevoorziening | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS   | Emissies  | Overige opmerkingen   |
|-------------------|--|--|---|---|
|                   | gesloten systeem (melding) <ul style="list-style-type: none"> <li>Aardwarmte/geothermie: &gt;500m diep. Open systemen (vergunning bij SoDM)</li> </ul> | oppervlakte-actieve stoffen en corrosieremmers | mogelijk uitstroom olie en gas <ul style="list-style-type: none"> <li>In gebruiksfase mogelijk oppompen radioactieve deeltjes en zware metalen in geothermisch water</li> <li>Verwerking (verwijdering) nog nvt in NL, regels vanuit mijnbouw van toepassing</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Verspreiding en verdunning bestaande verontreinigingen, maar risico's beheersbaar<sup>7</sup></li> </ul> |

| Energieopslag                                  | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS   | Emissies   | Overige opmerkingen   |
|--|--|--|--|---|
| Waterstof (productie), inclusief elektrolyzers | Productie via: <ul style="list-style-type: none"> <li><i>Steam methane reforming</i>, waarbij stoom met aardgas reageert onder hoge druk (grijze of blauwe waterstof)</li> <li>Elektrolyse van water (groene waterstof wanneer met groene energie) dmv elektrolyzers. Veel ontwikkeling van elektrolyser-technieken</li> </ul> | <b>Ja:</b> In elektrolyser - in de meest voorkomende typen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Nikkel</li> <li>Kobalt</li> <li>(PFAS, o.a. PTFE en PFASs)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bij productie grijze waterstof zijn er emissies van verbranding fossiele brandstoffen (bij blauwe waterstof wordt de CO2 afgevangen)</li> <li>Verbranding van waterstof zelf schoon</li> <li>Technologische industrie in Nederland zet in op het</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wordt op ingezet in klimaatakkoord</li> <li>Toepassingsmogelijkheden zeer breed, maar vooral nuttig voor zwaar transport en hoge temperatuur processen in de industrie en in de luchtvaart. Voor andere toepassingen mogelijk duurzamere oplossingen.</li> </ul> |

| Energieopslag             | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS   | Emissies   | Overige opmerkingen   |
|---------------------------|--|--|--|---|
|                           |  |  | ontwikkelen van elektrolyzers <sup>8</sup>   |   |
| Waterstofdragers (opslag) | <p>Opslag tbv transport:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Onder druk of sterk gekoeld (vloeibaar)</li> <li>• Ammoniak</li> <li>• Vloeibare organische waterstofdragers (<i>liquid organic hydrogen carriers</i>; LOHC's)</li> <li>• Metaalhydriden</li> </ul> <p>Grootschalige opslag tbv opslag duurzame elektriciteit (o.a. in zoutcavernes)</p> | <p><b>Ja:</b> verschillende ZZS en schadelijk stoffen gebruikt als LOHC:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Naftaleen (PAK)</li> <li>• Benzyltolueen</li> <li>• Dibenzyltolueen</li> <li>• N-ethylcarbazool</li> <li>• (Tolueen)</li> <li>• (Chloor)</li> <li>• (Decahydronaftaleen)</li> <li>• (Mierenzuur)</li> <li>• (Methanol)</li> </ul> <p>Bijproducten bij LOHC-productie:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzeen</li> <li>• Fenantreen</li> <li>• Naftaleen</li> <li>• methylfluoreen</li> <li>• (Xyleen)</li> </ul> | Emissies bij gebruik nog onbekend, mogelijk emissies vanuit bij herhaaldelijke proces van waterstofafgifte en waterstofbinding.                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toename verwacht i.c.m. toename productie en gebruik</li> <li>• Aandacht voor externe veiligheid van opslag en infrastructuur</li> </ul> |
| Aandrijfacu's             | Er zijn veel verschillende soorten en typen batterijen en accu's, waaronder aandrijfacu's voor bijvoorbeeld auto's. Hierbij is de meest gebruikte soort de nikkel-   | <p><b>Ja:</b> verschillende ZZS.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nikkel</li> <li>• Kobalt</li> <li>• 1,2 dimethoxyethaan (EGDME) (oplosmiddel)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Productie aandrijfacu's niet in Nederland</li> <li>• Lokale emissies mogelijk door depositie bij</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veel aandacht voor kritieke grondstoffen in batterijen.</li> </ul>   |

| Energieopslag   | Energietechnologieën en materialen   | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS  | Emissies  | Overige opmerkingen  |
|---|--|---|---|--|
|   | mangaan-kobalt-accu (NMC-accu). Er zijn ook autobatterijen van het type NCA (nikkel-kobalt-aluminium) en LFP (lithium-ijzerfosfaat), deze laatste bevat geen kobalt en nikkel. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• N-methyl-2-pyrrolidone (oplosmiddel)</li> <li>• (Fluorpolymeren (FEP en PTFE))(verschillende functies)</li> </ul>  | lithiumbranden (gebruiksfase) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eerste aanvraag voor recyclingfabriek in Nederland. Emissies bij recycling niet bekend</li> </ul>  |  |
| Andere type batterijen dan aandrijfacu's (bijv. voor energieopslag) | Er worden verschillende types van batterijen ontwikkeld zoals vloeibare batterijen, vaste stof batterijen, redox flow en hybride batterijen.                                   | <b>Ja:</b><br>kobalt, nikkel<br><br>(PFAS (verschillende toepassingen) lithium carbon oxide, poreus carbon, koper, antimoon sulfide, zink, vanadium, FL (viologen (4,40 -bipyridine derivative N-methyl-bipyridinium iodide), 9-fluorenone), TEMPO (quinone-based (1,2-benzoquinone-3,5-disulfonic acid), chroom, (natrium polysulfide, cerium, koper, broom-, chloor- en jodiumverbindingen) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veel materiaalontwikkelingen in Nederland</li> <li>• Geen grootschalige productie in Nederland</li> <li>• Voor zover bekend nog geen recycling in Nederland</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nederlandse overheid heeft ambitie om haar bedrijven en kennisinstellingen, sterker te positioneren op het gebied van batterijsystemen</li> </ul> |

| Energieopslag         | Energietechnologieën en materialen  | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS  | Emissies  | Overige opmerkingen   |
|-----------------------|---|---|---|---|
|                       |   | (geavanceerde materialen)   |   |   |
| Brandstofcellen       | Er zijn twee belangrijke energietechnologieën binnen de brandstofcellen: <i>Proton exchange membrane FCs</i> (PEMFC) voor lage temperatuur toepassingen en <i>solid oxide FCs</i> (SOFC) voor hoge temperatuur toepassingen                           | <b>Ja:</b> afhankelijk van type <sup>9</sup><br>Bij PEMFC bv: <ul style="list-style-type: none"> <li>• (PFAS, oa PTFE en PFSAs)</li> <li>• (carbon nano-tubes)</li> <li>• (grafeen nano-sheets)</li> </ul> Bij SOFC bv: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nikkel (anoden)</li> <li>• Kobalt (kathode)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brandstofcellen worden in NL geproduceerd (oa Nedstack) en de overheid en EU stimuleren de waterstof-economie, waar brandstofcellen onderdeel van zijn. Dus productie zal toenemen<sup>10</sup>. Onbekend welke stoffen daarbij gebruikt en geëmitteerd worden</li> <li>• Over emissies bij gebruik en verwerking nog niks bekend</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vooral ingezet bij transport en energieopwekking, mobiele toepassingen wel onder ontwikkeling</li> </ul>   |
| Power-to-X technieken | Conversie van overtollige elektrische energie voor opslag of toepassing <ul style="list-style-type: none"> <li>• Naar gassen (power-to-gas)</li> <li>• Naar brandstoffen (power-to-fuels)</li> <li>• Naar chemicaliën (power-to-chemicals)</li> </ul> | <b>Niet bekend</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissies bij verbranding synthetische brandstoffen niet per se schoner dan fossiele brandstoffen (afhankelijk van brandstof,</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Er is nog veel ontwikkeling gaande.</li> <li>• Toename verwacht wanneer technieken rendabeler zijn en er meer overschot aan duurzame energie is</li> </ul> |

| <b>Energieopslag</b> | <b>Energietechnologieën en materialen</b>  | <b>ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS</b> | <b>Emissies</b>        | <b>Overige opmerkingen</b> |
|----------------------|--|---|------------------------|----------------------------|
|                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Naar warmte (power-to-heat)</li> <li>• Naar mobiliteit (power-to-mobility)</li> </ul> |   | verbrandingsmotor etc) |                            |

| <b>Overige ontwikkelingen</b>            | <b>Energietechnologieën en materialen</b>  | <b>ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS</b>                               | <b>Emissies</b>  | <b>Overige opmerkingen</b>  |
|--|--|---|--|---|
| Slimme energiesystemen                   | Ingezet om: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebruik van energie af te stemmen op het aanbod van energie (in de tijd) en black-outs voorkomen</li> <li>• Energieverbruik te verminderen</li> </ul> Vooral ICT, elektronica en accu's     | <b>Ja:</b> ZZS in elektronica producten (vergelijkbaar met huidige producten)     | Niet bekend  |   |
| Elektrificatie van industriële processen | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Directe inzet van hernieuwbare elektriciteit en indirect via conversie van energie naar waterstof</li> <li>• Uitstoot terugbrengen d.m.v. groen gas, geothermie en winning en opslag van CO2</li> </ul> | <b>Ja:</b> ZZS in elektrische regelsystemen (vergelijkbaar met huidige producten) | Mogelijk vaker stop-start van processen door energiebeschikbaarheid, met bijbehorende emissies <sup>11</sup> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toename verwacht, zie Roadmap 'Elektrificatie: cruciaal voor een duurzame industrie - Routekaart Elektrificatie in de Industrie'<sup>12</sup></li> </ul> |



| <b>Overige ontwikkelingen</b>                                     | <b>Energietechnologieën en materialen</b>   | <b>ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS</b>   | <b>Emissies</b>   | <b>Overige opmerkingen</b> |
|---|---|---|---|----------------------------|
| Winning en hergebruik van CO <sub>2</sub> uit huisvuilverbranding | <ul style="list-style-type: none"> <li>CO<sub>2</sub> kan gebruikt worden voor het stimuleren van de groei van gewassen in kassen. CO<sub>2</sub> uit huisvuilverbranding wordt onderzocht als alternatief voor aardgas.</li> </ul> | Mogelijk (PFAS)   | Uit literatuur-onderzoek blijkt dat de meeste PFAS'en tijdens het verbrandingsproces grotendeels worden afgebroken. Door reiniging van het rookgas worden nog aanwezige PFAS'en er grotendeels uit verwijderd. Toch is het niet uit te sluiten dat er toch nog PFAS'en in de rookgassen kunnen zitten. Het gaat om sterke broeikasgassen die bijdragen aan de opwarming van de aarde. |                            |
| Opslag van CO <sub>2</sub>  | Afvang, transport en opslag van door de industrie geproduceerde CO <sub>2</sub> (CCS) wordt door de industrie en door de Rijksoverheid gezien als noodzakelijke activiteit om de 2030-doelstelling te behalen.                      | <b>Mogelijk:</b> MEA is het meest gebruikte oplosmiddel voor chemische absorptie. Bij het gebruik van MEA als oplosmiddel tijdens het proces van CO <sub>2</sub> -afvang kan in een reactie de stof | Werkelijke emissies van afbraakproducten (type en hoeveelheid) nog onbekend.  |                            |

| Overige ontwikkelingen | Energietechnologieën en materialen  | ZZS ja/niet bekend – tussen haakjes geen ZZS  | Emissies  | Overige opmerkingen  |
|------------------------|---|---|---|--|
|                        |   | (nitrosoimino)bisethanol (NDELA), een ZZS, ontstaan.  |   |  |
| Biomassa als bouwstof  | In het coalitieakkoord is door het kabinet afgesproken dat er een verplicht percentage recycleat in bouwmaterialen komt. Daarnaast zet het kabinet in Europa in op ambitieuze percentages hernieuwbaar of gerecycled grondstofgebruik voor bepaalde productgroepen. | <p><b>Ja:</b><br/>Formaldehyde (in lijmen).</p> <p>Formaldehyde zit in zeer kleine hoeveelheden in houtvezelplaten, zoals spaanplaat, High Density Fibreboard (HDF), Medium Density Fibreboard (MDF), triplex en multiplex</p> <p>Mogelijk ook gewasbeschermingsmiddelen afhankelijk van type en herkomst biomassa.</p> | <p>Emissie formaldehyde tijdens gebruiksfase is gereguleerd t.b.v. consumentenveiligheid.</p> <p>Voor emissies bij verwerking, zie biomassa als energiebron</p> | Nieuwe materialen worden ontwikkeld (voorbeelden zijn materialen gemaakt van zeewier en schimmels) |

<sup>1</sup> <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0054.pdf>

<sup>2</sup> <https://www.rivm.nl/documenten/inzicht-in-emissies-van-chemische-stoffen-bij-windturbines-op-zee>

<sup>3</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121008170>

<sup>4</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037673881300865X>

<sup>5</sup> <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Urban%20energy/publicaties/Natuurlijke%20koudemiddelen%20in%20warmtepompen%20-%202018%20juni%202021.pdf>

<sup>6</sup> <https://www.aquathermie.nl/bibliotheek/HandlerDownloadFiles.ashx?idnv=2017669>

<sup>7</sup> [https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/DELTAFACTS/Deltafacts%20NL%20Waterkwaliteit%20PDF/Geothermie\\_update%20v2%2C%2020220425-converted.pdf](https://www.stowa.nl/sites/default/files/assets/DELTAFACTS/Deltafacts%20NL%20Waterkwaliteit%20PDF/Geothermie_update%20v2%2C%2020220425-converted.pdf)

<sup>8</sup> [https://www.fme.nl/system/files/publicaties/2020-11/FME-TNO%20Rapport%20elektrolyser%20productie%20in%20NL-DEF\\_0.pdf](https://www.fme.nl/system/files/publicaties/2020-11/FME-TNO%20Rapport%20elektrolyser%20productie%20in%20NL-DEF_0.pdf)

<sup>9</sup> <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132889>

<sup>10</sup> <https://opwegmetwaterstof.nl/europese-subsidie-voor-nederlandse-brandstofcelfabrikant/#:~:text=Kortweg%20gaat%20het%20om%20brandstofcellen,vermogen%20in%202026%20wordt%20beoogd.>

<sup>11</sup> [https://vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel/industriële-flexibilisering-kan-elektriciteitsnet-balanceren?utm\\_source=Spotler&utm\\_medium=nieuwsbrief\\_w48&utm\\_term=link\\_CM-elektriciteitsnet](https://vnci.nl/chemie-magazine/actueel/artikel/industriële-flexibilisering-kan-elektriciteitsnet-balanceren?utm_source=Spotler&utm_medium=nieuwsbrief_w48&utm_term=link_CM-elektriciteitsnet)

<sup>12</sup> <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Energie%20%26%20Industrie/Documenten/Routekaart%20Elektrificatie%20in%20de%20Industrie.pdf>

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
Nederland

[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

januari 2024

**De zorg voor morgen  
begint vandaag**