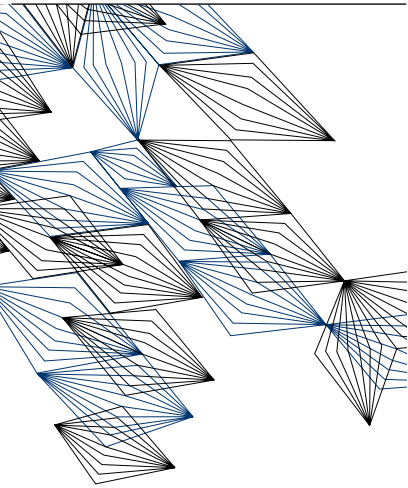


ORATIE  
21 MEI 2026



LEVEN TUSSEN HOOP EN  
VREES: OMGAAN MET  
VEILIGHEIDSRISICO'S EN  
ONZEKERHEDEN VAN DE  
ENERGIETRANSITIE

**PROF.DR.IR. NILS ROSMULLER**



---

PROF.DR.IR. NILS ROSMULLER

# LEVEN TUSSEN HOOP EN VREES: OMGAAN MET VEILIGHEIDSRISICO'S EN ONZEKERHEDEN VAN DE ENERGIETRANSITIE

**PROF.DR.IR. NILS ROSMULLER**

*What men really want is not knowledge, but certainty.*

Bertrand Russell (Engels filosoof, wiskundige en  
Nobelprijswinnaar literatuur (1950))\*

\*Ik kom op pagina 66 terug op zijn citaat, en herformuleer het  
in lijn met mijn eigen leeropdracht.

## **COLOPHON**

Prof.dr.ir. Nils Rosmuller

© Prof.dr.ir. Nils Rosmuller, 2026

All rights reserved. No parts of this publication may be reproduced by print, photocopy, stored in a retrieval system or transmitted by any means without the written permission of the author.

Mei 2026

# LEVEN TUSSEN HOOP EN VREES: OMGAAN MET VEILIGHEIDSRISICO'S EN ONZEKERHEDEN VAN DE ENERGIETRANSITIE

Geachte Rector Magnificus,

Geachte decaan,

Geachte toehoorders, collega's, vrienden en familie.

Vanaf 1 oktober 2024 bekleed ik met eer de leerstoel 'Veiligheidsaspecten van de energietransitie in de gebouwde omgeving' aan de Universiteit Twente.

'Leven tussen hoop en vrees' is meer dan ooit actueel in het huidige tijdsgewricht waarin we leven, hopen en vrezen. Oorlogen, klimaatverandering en natuurrampen jagen vrees en onzekerheid wereldwijd aan. Een stuk minder dramatisch, en zeker zo hoopvol is de verduurzaming die we als samenleving aan het doormaken zijn om de klimaatverandering en natuurrampen te beperken. En in verlengde ook oorlogen: fossiele brandstoffen (olie en gas) in Rusland en het Midden-Oosten vormen onderdeel van het strijdtoneel aldaar. Ontwikkelingen op het gebied van hernieuwbare energiebronnen en -dragers nemen een hoopvolle sleutelpositie in om genoemde rampspoed te beperken. Maar deze hoopvolle ontwikkelingen gaan op hun beurt gepaard met andersoortige veiligheidsrisico's en onzekerheden.

Ik richt me in mijn leerstoel op de omgang met de veiligheidsrisico's en onzekerheden van de energietransitie. In deze oratie zal ik inzicht geven in de veiligheidsrisico's en onzekerheden van de energietransitie, waar ik tekortkomingen in de huidige omgang hiermee zie, en schets ik de contouren van mijn onderzoek voor de komende jaren om beter met de veiligheidsrisico's en onzekerheden om te gaan.

# INHOUD

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Vooraf</b>   | <b>8</b>  |
| <b>1. Het Nederlandse energietransitiebeleid</b>                          | <b>10</b> |
| <b>2. Energieproductie</b>  | <b>23</b> |
| 2.1 Geothermie  | 23        |
| 2.2 Windturbines  | 25        |
| 2.3 Zonnepanelen  | 27        |
| 2.4 Biomassa  | 27        |
| 2.5 Small modular reactors  | 28        |
| <b>3. Energietransport en -opslag</b>                                     | <b>30</b> |
| 3.1 Koolstof vrije moleculen  | 32        |
| 3.2 Elektronen  | 34        |
| 3.3 Warmte  | 36        |
| <b>4. Energiegebruik</b>  | <b>38</b> |
| 4.1 De gebouwde omgeving  | 38        |
| 4.2 De industrie  | 39        |
| 4.3 De (land)bouw   | 40        |
| 4.4 De mobiliteit   | 41        |
| <b>5. Veiligheidsrisico's en onzekerheden: terechte vrees</b>             | <b>43</b> |
| 5.1 Mechanisme 1: Risico's dichterbij de burger                           | 44        |
| 5.2 Mechanisme 2: Allerlei onervaren partijen in de energieketens         | 45        |
| 5.3 Mechanisme 3: Versnippering in nieuwe energieketens                   | 46        |
| 5.4 Mechanisme 4: Onbekende risico's, weinig dataopbouw                   | 47        |
| 5.5 Mechanisme 5: Snelle ontwikkelingen,<br>ontbrekende veiligheidskaders | 47        |
| <b>6. Omgaan met onzekerheid en veiligheidsrisico's: er is hoop</b>       | <b>50</b> |
| 6.1 De wetenschappelijke inbedding  | 50        |
| 6.2 Safety by design  | 52        |
| 6.3 Ketenbenadering van veiligheid  | 57        |
| 6.4 Integrale veiligheidsbenadering                                       | 58        |
| 6.4 Omgaan met onzekerheden   | 60        |
| 6.5 Synthese  | 64        |
| <b>7. Samengevat</b>  | <b>67</b> |
| <b>8. Dankwoord</b>   | <b>68</b> |
| <b>Referenties</b>  | <b>69</b> |

## VOORAF

De titel vraagt direct al om iets van definiëring. Dat doe ik in deze paragraaf.

"**Leven tussen hoop en vrees**" betekent een staat van onzekerheid ervaren, waarbij je tegelijkertijd hoopt dat iets goeds gebeurt, maar ook vreest (angstig bent) dat het mis zal gaan. Het is een balans tussen verwachting en angst, vaak gebruikt in de context van ingrijpende gebeurtenissen, en onzekere toekomstige uitkomsten.

**Onzekerheid** is twijfel over een toestand of toekomst die wordt veroorzaakt door onvermijdelijke variatie of gebrek aan informatie.

Een **veiligheidsrisico** is de kans dat een potentieel gevaar resulteert in een daadwerkelijk incident (of schadelijk effect) en de ernst van het letsel of de schade die dit tot gevolg heeft. In mijn leerstoel 'Veiligheid van de energietransitie in de gebouwde omgeving' is risico altijd negatief, het betreft altijd vraagstukken over ongewenste gebeurtenissen.

In mijn leerstoel komen drie aspecten bij elkaar:

- De energietransitie: de overgang van fossiele brandstoffen en energiedragers naar hernieuwbare brandstoffen en energiedragers<sup>1</sup>. Ik gebruik in deze oratie hiervoor ook de term duurzame brandstoffen, waarmee ik hetzelfde bedoel.
- De veiligheid: veiligheid is de (ervaren) afwezigheid van dreiging, gevaar of onaanvaardbare risico's, en de aanwezigheid van beschermende maatregelen.
- De gebouwde omgeving: De gebouwde omgeving omvat alle door mensen gecreëerde fysieke structuren en ruimtes die de context vormen voor menselijke activiteiten. Dit strekt zich uit van individuele gebouwen tot volledige steden, industrieën en de bijbehorende infrastructuur.

---

<sup>1</sup> Een belangrijke bron van CO<sub>2</sub> uitstoot is ook de verbranding van afval dat is geproduceerd met fossiele grondstoffen. Denk aan plastics. Naast de energietransitie is de grondstoffentransitie ook een belangrijke manier om de CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen. De grondstoffentransitie laat ik hier buiten beschouwing. Hetzelfde geldt voor Carbon Capture Storage (and Usage) (CCS(U)). CCS(U) hoewel het zeker ook onderdeel is van de manieren om CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen.

De combinatie van de bovengenoemde drie aspecten in mijn leerstoel is in één zin samen te vatten:

De hernieuwbare/duurzame energie en energiedragers worden gebruikt in de gebouwde omgeving, mobiliteit, bouw en industrie voor verwarming van gebouwen, de energievoorziening van (industriële) productieprocessen, en transport en opslag van energie, en veroorzaken daar veiligheidsrisico's voor personeel, mensen in de omgeving en hulpverleners.

In deze oratie ga ik in op die veiligheidsrisico's en de hiermee gepaard gaande onzekerheden. Ik schets hiertoe ontwikkelingen binnen het Nederlandse energietransitiebeleid (hoofdstuk 1). In de daaropvolgende hoofdstukken zal ik ingaan op veiligheidsrisico's in elk van de schakels van energieketen: bij de duurzame energieproductie (hoofdstuk 2), bij het transport en de opslag van hernieuwbare brandstoffen en energiedragers (hoofdstuk 3) en bij het gebruik ervan (hoofdstuk 4)<sup>2</sup>

Dat er terecht reden is voor 'vrees' als het gaat om de veiligheidsrisico's van de energietransitie, verwoord ik in hoofdstuk 5. In hoofdstuk 6 kom ik dan tot het tweede kernelement van de titel van deze oratie, namelijk 'hoop'. Ik schets waar die hoop op is gevestigd, en hoe ik daar met mijn leerstoel invulling aan zal gaan geven.

---

<sup>2</sup> Tussen de verschillende schakels in de energieketen (productie, opslag, transport, en het gebruik) vinden veelal omzettingstappen (conversie) plaats: van gas naar vloeistof, van elektronen naar moleculen en vice versa. Die conversiestappen komen zijdelings aan de orde in deze oratie, maar niet als afzonderlijk schakel in de energieketen.

in deze oratie, maar niet als afzonderlijk schakel in de energieketen.

# 1. HET NEDERLANDSE ENERGIETRANSITIEBELEID

De atmosfeer van de aarde warmt op. Als gevolg hiervan verandert het klimaat. Intensere regenbuien, stormen, frequentere hittegolven, hogere temperaturen, verdroging, overstromingen en natuurbranden bedreigen onze veiligheid en welvaart.

De uitstoot van kooldioxide (CO<sub>2</sub>) (broeikasgas) draagt in belangrijke mate bij aan de opwarming van de aarde. We stoten CO<sub>2</sub> uit in het verkeer en vervoer, als gevolg van industriële productieprocessen en bij de verwarming van onze eigen gebouwen. Voor deze activiteiten verbranden we kolen en gas, en de energie gebruiken we voor voortbeweging, aandrijving van machines, opwekking van stroom en voor verwarming.

Om de CO<sub>2</sub> uitstoot te verminderen zullen we, naast energie besparen, dus andere energiebronnen moeten gaan gebruiken in de gebouwde omgeving, industrie, mobiliteit en de (land)bouw. Te denken valt aan wind- en zonne-energie en aan geothermische bronnen. Door van deze hernieuwbare en schonere bronnen gebruik te maken, wordt er minder CO<sub>2</sub> uitgestoten in de atmosfeer.

In dit kader spreken we van de energietransitie: de overgang van fossiele brandstoffen en energiedragers naar hernieuwbare brandstoffen en energiedragers. In Nederland gaat het om een fundamentele herstructurering van hoe energie wordt geproduceerd, getransporteerd, opgeslagen en wordt verbruikt. Het doel ervan is een klimaat-neutrale energievoorziening in Nederland in 2050.

### Intermezzo<sup>3</sup>

Overigens is de energietransitie niet overal op de wereld dezelfde. Zo houdt de energietransitie in diverse Aziatische landen in, dat men van de verbranding van kolen overgaat naar olie en gas. De periode van kolen als energiebron hebben we in Nederland ook gekend. En daarvoor maakten we gebruik van hout, gevolgd door de overgang naar turf om in onze energiebehoefte te voorzien (middeleeuwen). Turf werd vervangen door steenkool (1: rond 1820). Steenkool werd meer en meer 'ingeruild' voor aardolie (2: rond 1920). De olie-industrie groeide versneld vanaf midden jaren 50. In Nederland werd begin jaren 60 ingezet op olie en gas en zette versneld door vanaf midden jaren 60 als gevolg van de vondst en exploratie van de aardgasvoorraden in de provincie Groningen (3: jaren 65). En thans vervangen we olie- en gas door hernieuwbare energiebronnen (4: 2015). In wezen zijn we in Nederland met de vierde energietransitie bezig: die van olie en gas naar hernieuwbare en schone energiebronnen (in één woord 'duurzame' bronnen).

Echter, zo gestructureerd als hierboven in het intermezzo geschetst, verlopen de transitie van oudere naar nieuwere energiebronnen niet. Op de tijdlijn ontbreken enkele wezenlijke (onvoorspelbare) geopolitieke gebeurtenissen die (soms tijdelijk) zorgden voor de bloei van andere energiebronnen. De oliecrises in 1973 (de olieproducerende landen (OPEC) stelden een olieboycot in tegen landen die Israël steunden in de oorlog tegen Egypte en Syrië, oplopende inflatie en stagnerende economische groei in de VS) en in 1978 (regime-change in Iran), hadden als gevolg dat er meer steenkoolcentrales in gebruik werden genomen en het gebruik van olie afnam.

Maar ook heden ten dage zien we dat onvoorziene ontwikkelingen van grote invloed zijn op de (snelheid van de) energietransitie. De inval van Rusland in Oekraïne leidt tot het boycotten van Russisch olie en gas door

---

4 [KNMI - Aardbevingen door gaswinning.](#)

Nederland. En dichterbij huis hebben de aardbevingen in Groningen, die qua frequentie en intensiteit vanaf 2005 als maar toenemen<sup>4</sup>, ertoe geleid dat in 2018 is gestart met het versneld verminderen van de aardgaswinning (maart 2018, besluit Wiebes) tot uiteindelijk de volledige stop van de winning van Gronings aardgas per 1 oktober 2024. En recenter (maart 2026), de aanvallen van de Verenigde Staten en Israël op Iran, met als gevolg de afsluiting van de straat van Hormuz, leidt tot hoge diesel- en benzineprijzen aan de (Nederlandse) pomp, en voorzichtige pogingen in de (Haagse) politiek om de definitieve afsluiting van het Groningsaardgas te heroverwegen.

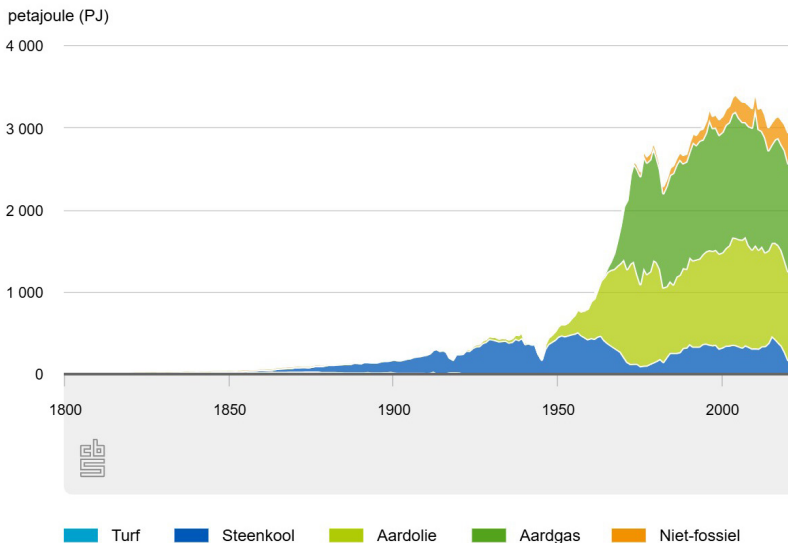
Dergelijke nationale en mondiale ontwikkelingen leiden op hun beurt weer tot aanpassingen in het rijksbeleid. Nog steeds staat Nederland een brede mix van energiebronnen voor<sup>5</sup>, maar ondertussen moet er dus versneld worden omgeschakeld naar meer duurzame bronnen<sup>6</sup>. Meer dan voorheen, en als reactie op dergelijke crises begonnen landen energiebeleid te voeren. Belangrijke uitgangspunten/wensen daarbij waren diversificatie van de energiemix, onafhankelijkheid van het buitenland en energiebesparing.

Ondertussen nam het energieverbruik in Nederland hard toe in de jaren 1980 tot 2010 waarbij het aandeel fossiele energie (olie, gas en steenkool) circa 95% van het verbruik besloeg (zie figuur 1). 2010 is het jaar waarin Nederland in haar historie de meeste energie verbruikt (3470 PJ) als gevolg van een koude winter, een lage energieprijs (door elektriciteitsproductie in gascentrales) en een sterke groei van de industriële productie in de petrochemische industrie.

---

5 Ondertussen maakt ook kernenergie deel uit van de energietransitie. In het coalitieakkoord 2026-2030 staat de versterking van het nucleaire cluster in Nederland benoemd, het versnellen van het SMR-programma en het ondersteunen maritieme nucleaire innovaties. Er wordt doorgewerkt aan de bouw van tenminste vier nieuwe kerncentrales. Dit kunnen conventionele en ook 'kleine' modulaire reactoren (SMRs) zijn. [Aan de slag - Coalitieakkoord 2026-2030 | Kabinetformatie](#).

6 [Nederland gaat stap voor stap over op duurzame energie | Duurzame energie | Rijksoverheid.nl](#).

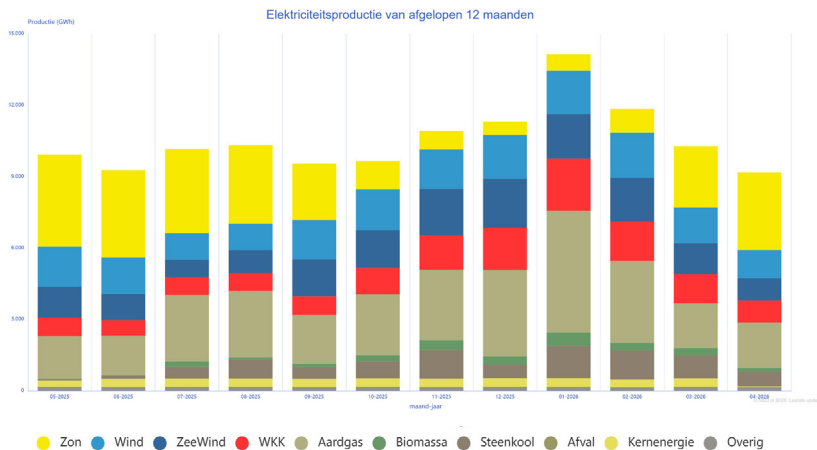


Figuur 1: Energieverbruik naar bron (CBS, 2023)<sup>7</sup>

Rond 2010 komt de huidige energietransitie in ons land op gang: die van de duurzame energieproductiebronnen. Zon- en windenergie, biomassa, geothermie en langzaam maar zeker ook kernenergie.

De elektriciteitsproductie bestaat uit een gevarieerde mix aan bronnen zoals steenkool en gas, zon en wind, biomassa en kernenergie (zie figuur 2, Nationaal Energie Dashboard).<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Ruim tweehonderd jaar energiegebruik in Nederland | CBS.



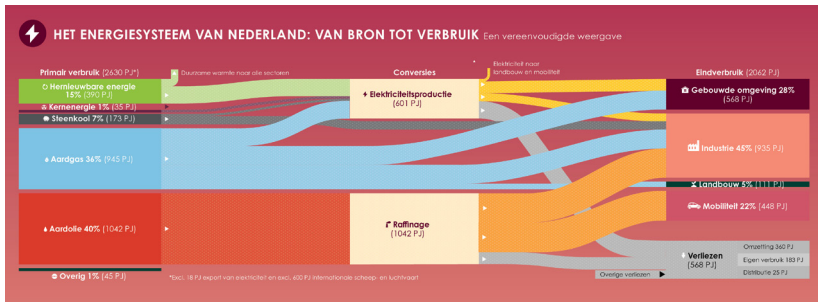
Figuur 2: Elektriciteitsproductie in Nederland per maand naar energiebron mei 2025-april 2026 (ned.nl)<sup>9</sup>

Energiebeheer Nederland heeft het energiesysteem van Nederland (van energiebron tot aan het eindverbruik) voor het jaar 2026 in kaart gebracht. Uit figuur 3 volgt dat aardgas, aardolie en steenkool nog een fors aandeel (83%) van de energiemix uitmaken. Voor hernieuwbare energiebronnen betreft het 15% en kernenergie 1%. De grootste verbruiker betreft de industrie (45%), gevolgd door de gebouwde omgeving met 28%, mobiliteit (22%) en landbouw (5%).

In 2023 presenteerde<sup>10</sup> het toenmalige kabinet haar visie op het Nederlandse energiesysteem van de toekomst (2050). Hierin staat dat de logistieke ketens die met energieproductie, -transport, -opslag en gebruik samenhangen drastisch zullen veranderen.

<sup>9</sup> Om [gigawattuur](#) (GWh) (figuur 2) om te rekenen naar [petajoule](#) (PJ) (figuur 1), moet het aantal GWh worden gedeeld door 277,78. 1GWh is ongeveer 0,0036PJ. Of andersom geldt, 1PJ is ongeveer 277,78 GWh. Ter indicatie, een gemiddeld Nederlands huishouden in 2025 gebruikt op jaarbasis circa 2.500kWh. 1GWh voorziet 400 huishoudens van hun jaarlijkse energiebehoefte. Met de productie van zonne-energie in ons land kunnen we, in theorie, alle huishoudens van hun jaarlijkse energiegebruik voorzien.

<sup>10</sup> [Kabinet presenteert strategie voor energiesysteem van de toekomst | Nieuwsbericht | Rijksoverheid.nl](#).



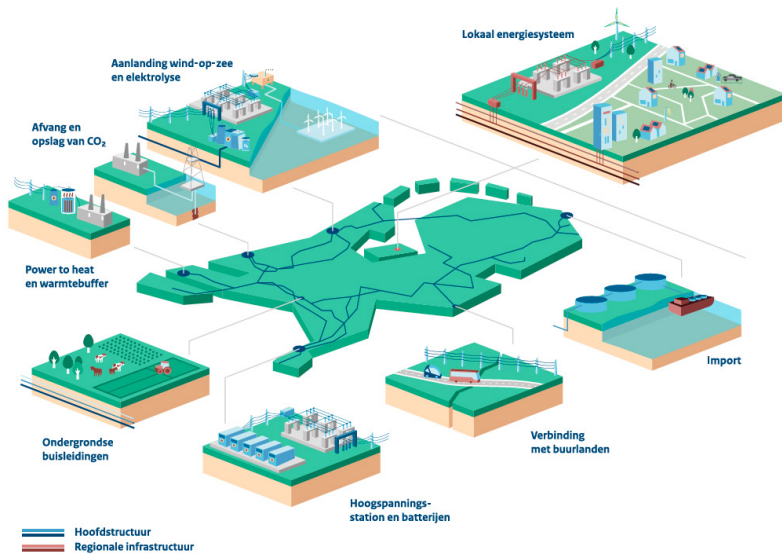
Figuur 3: Van energiebron tot energieverbruiker in Nederland in 2025.  
([EBN-Infographic-2025.pdf](#))

Nederland wil in 2050 klimaatneutraal zijn. Dat heeft grote gevolgen voor het toekomstige energiesysteem. Het verandert hoe we energie opwekken, transporteren, opslaan en gebruiken. Om in 2050 een duurzaam energiesysteem te hebben, moeten we daar nu al op gaan aansturen en ons voorbereiden. De keuzes die we de komende jaren maken zijn bepalend voor 2040 en daarna.

Met het oog op de gebouwde omgeving en ruimtelijke ordening is één van de 'richtinggevende' keuzes die in deze strategie gemaakt zijn het maximaal inzetten op aanbod van energie. Door het stimuleren van zoveel mogelijk binnenlandse productie, import, en zo snel mogelijk bouwen van de benodigde infrastructuur wordt beoogd een hoge leveringszekerheid van energie in de toekomst te faciliteren.

In het Programma Energiehoofdinfrastructuur: Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang<sup>11</sup> worden de grote lijnen van de toekomstige (2050) hoofdinfrastructuur van het Nederlandse energiesysteem geschetst (figuur 4).

<sup>11</sup> [Programma Energiehoofdinfrastructuur - Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang](#) | Rapport | [Rijksoverheid.nl](#).



Figuur 4: Toekomstige energiehoofdinfrastructuur in Nederland (Rijksoverheid, 2024).

De onderstaande paragraaf uit de publiekssamenvatting geeft weer welke kant het opgaat met de energie-infrastructuur van ons land.

We gaan meer elektriciteit gebruiken in plaats van aardgas uit Groningen of het buitenland. Groene waterstof wordt belangrijker. Energie uit wind en zon kan op veel verschillende plekken worden opgewekt. Hernieuwbare energie is afhankelijk van het weer. Bij veel energie uit de wind en zon zullen overschotten van de elektriciteitsproductie moeten worden opgeslagen, bijvoorbeeld in batterijen of omgezet worden naar waterstof. Als er te weinig elektriciteit uit wind en zon worden geproduceerd, zullen centrales op bijvoorbeeld groene waterstof bijspringen. Er is veel energie-infrastructuur nodig om deze verandering mogelijk te maken. Dit vraagt ruimte voor kabels en leidingen, maar ook voor batterijen, elektrolyzers en duurzame energiecentrales.

Het Programma Energiehoofdstructuur (PEH) streeft ernaar de energietransitie te versnellen door beter te anticiperen op ruimte die in de toekomst nodig is. Daarbij is er bij de beleidsmakers het bewustzijn dat de toekomst gepaard gaat met onzekerheden getuige onderstaande zinsnede (p.10):

*“Het is verleidelijk om het ruimtelijk beleid van het PEH vorm te geven in de vorm van een blauwdruk; dit biedt immers de meeste duidelijkheid voor belanghebbende partijen, burgers en bedrijven. Naast het gegeven dat de onzekerheden over de ontwikkeling van het energiesysteem daarvoor te groot zijn, vergen gedetailleerde keuzes over de locaties en realisatie van (energie)projecten een zeer zorgvuldig afstemmingsproces met omwonenden en andere belanghebbenden zoals bedrijven.”*

Ondertussen ligt er recentelijk het tweede programma energie hoofdstructuur (PEH II) en een bijbehorende conceptnotitie met daarin de specificatie van de reikwijdte en het detailniveau<sup>12</sup>. Beide dienen als opmaat voor de PEH II in 2028. In het PEH II verwacht het kabinet meer sturende keuzes te kunnen maken, gericht op scherpere locatiesturing van energieaanbod.

Voor het bepalen van de ruimtelijke varianten en het maken van locatiekeuzes, is inzicht nodig in de mogelijke effecten die energie-infrastructuur kan hebben op de omgeving. Dat geldt ook voor (omgevings)veiligheid (zo valt ook te lezen Tabel 4.3 van de notitie over de reikwijdte en het detailniveau). Bij omgevingsveiligheid gaat het erom om burgers in de omgeving van potentieel gevaarlijke activiteiten (veelal activiteiten met gevaarlijke stoffen) voldoende te beschermen tegen de mogelijk gevaren als gevolg van incidenten met die gevaarlijke stoffen. Gevaren zijn dan veelal het gevolg van het ongecontroleerd vrijkomen van energie (in het kader van de energietransitie veelal gevaarlijke stoffen). De fundamentele herinrichting van de Nederlandse energie-infrastructuur met hernieuwbare bronnen, andersoortige gevaarlijke stoffen voor energietransport – en opslag heeft per definitie grote gevolgen voor die omgevingsveiligheid (RIVM, 2023)<sup>13</sup>.

In de ‘reikwijdte en detailniveau notitie’ wordt geregeld de term ‘veiligheid’ gebezigd. Echter, zoals de Commissie MER, in mijn optiek terecht opmerkt over deze notitie, is het opvallend dat er verder geen criteria voor externe

---

<sup>12</sup> [Startnotitie Programma Energiehoofdstructuur II \(PEH II\) | Rapport | Rijksoverheid.nl](#).

<sup>13</sup> [Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie, blg-1129371.pdf](#) (RIVM, 2023a).

veiligheid zijn opgenomen, terwijl voor andere milieucriteria zoals geluid en geur die criteria wel zijn geëxpliciteerd. Dergelijke criteria bestaan wel degelijk ook voor omgevingsveiligheid (zoals het plaatsgebonden risico).

Op nationaal niveau stimuleert het Rijk de ontwikkeling van energie-infrastructuur in het meerjaren programma infrastructuur en klimaat (MIEK)<sup>14</sup> (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2022). Het meerjarenprogramma helpt om sneller en efficiënter tot een compleet en goed werkend energiesysteem te komen door energie-infrastructuurprojecten te benoemen die van nationaal belang zijn. Door de MIEK-status krijgt een project voorrang in de planning van netbeheerders (bijvoorbeeld voor elektriciteit) én extra hulp bij de uitvoering. Provincies doen iets soortgelijks voor provinciaal belangrijke energie infrastructuurprojecten. Ongeacht of het Rijks, provinciale, gemeentelijke of private energie-infrastructuurprojecten betreft, ze vragen allemaal om ruimte. Maar die ruimte is schaars in ons land. We wonen met bijna 18 miljoen landgenoten op slechts 42.000 km<sup>2</sup>. Elke vierkante (centi)meter is bestemd, dat wil zeggen: kent een functie die toegekend is aan die locatie. Duidelijk zal zijn dat allerlei (concurrerende) claims op de ruimte vragen om zorgvuldige afwegingen betreffende de aard, omvang en locatie van productie, opslag en transport en verbruik van energie.

In de Nota Ruimte<sup>15</sup> van het ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening benoemt het Rijk de vijf energie-intensieve industrieclusters als de 'knooppunten in een internationaal netwerk van corridors voor vervoer van energiedragers'. Het zijn de gebieden waar energiedragers aan land zullen worden gebracht, maar ook worden opgeslagen, geconverteerd en gebruikt. Dit vraagt om maatwerk per gebied én om overkoepelende keuzes op (inter)nationaal niveau. Het Rijk neemt hierin de regie. Grootchalige energiefuncties krijgen, net als haven- en industrie functies, waar mogelijk rond de vijf industrieclusters, voorrang boven andere functies. Op deze knooppunten streeft het Rijk naar het samenbrengen van energie intensieve activiteiten en 'energie-infrastructuren'. Door deze bundeling worden extra

---

14 [MIEK Overzicht 2022 - Meerjarenprogramma Infrastructuur Energie en Klimaat | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)

15 [Ontwerp-Nota Ruimte 2025.](#)

transportinfrastructuur en -bewegingen op nationaal niveau beperkt, maar op lokaal niveau geïntensiveerd. Hetzelfde geldt logischerwijs ook voor de omgevingsveiligheidsvraagstukken die ermee samenhangen.

Diezelfde (beperkte) ruimte is daarnaast ook een van de meest effectieve veiligheidsmaatregelen bij activiteiten (met gevaarlijke stoffen), zoals onderdelen van de energietransitie, die veiligheidsrisico's veroorzaken. Door het aanhouden van een zekere afstand tussen risicobron en risico-ontvanger wordt de veiligheid van de risico-ontvanger vergroot. In het algemeen wordt het veiligheidsrisico bepaald door de combinatie (veelal de vermenigvuldiging) van de kans op een ongewenste gebeurtenis en het effect van diezelfde ongewenste gebeurtenis. Zo wordt in Nederland de veiligheid van burgers nabij activiteiten met gevaarlijke stoffen, uitgedrukt in de overlijdenskans per jaar dat een burger komt te overlijden als rechtstreeks gevolg van een activiteit met die gevaarlijke stof/activiteit. Die overlijdenskans mag in Nederland niet groter zijn dan één miljoenste per jaar. Alle punten in de omgeving met diezelfde overlijdenskans vormen tezamen de plaatsgebonden risicocontour. Ten behoeve van die risicoberekening zijn er standaard rekenvoorschriften met incidentscenario's, faalfrequenties, effectmodellen (Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid<sup>16</sup> en bijbehorende software (Safeti-NL (stationaire installaties en transport, waarin ook het risicoberekeningspakket voor buisleidingen CAROLA opgenomen gaat worden). Afhankelijk van de set aan incidentscenario's (gevaarlijke stof, de aard van de effecten (brand, explosie, toxiciteit), hoeveelheden, procescondities, faalfrequenties, weersomstandigheden, ...) kunnen plaatsgebonden risicocontouren tientallen tot honderden meters ver in de omgeving reiken. En omdat er binnen de 1e-06 plaatsgebonden risicocontour beperkingen zijn gesteld aan de benutting van de ruimte legt dus ook de (omgevings) veiligheid een claim op de toch al schaarse ruimte.

Voor de energietransitie zijn in dit kader de volgende aspecten interessant. Ten eerste zijn niet alle incidentscenario's bekend, laat staan vastgesteld zoals in het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. Het gaat enerzijds om schaalvergroting en concentratie: De productiefaciliteit van een 200mW waterstofelectrolyzers of opslag van 60.000 ton ammoniak in één tank levert niet eerder vastgestelde incidenten scenario's op (faaloorzaken en

---

16 Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid | RIVM

effectgebieden). Anderzijds gaat het tegelijkertijd ook om schaalverkleining en spreiding: productie, opslag, transport van hernieuwbare bronnen en energiedragers in dichtbebouwde gebieden. Ten opzichte van de traditionele industrieën gaat het dan om andersoortige toepassingen met aan de ene kant kleinere hoeveelheden en minder extreme procescondities. Maar aan de andere kant betreft het ook toepassingen door minder professionele gebruikers en organisaties, tijdelijke situaties en met meer spreiding van risicobronnen in de omgeving. Het ontbreekt in dit geval aan (betrouwbare) faalfrequenties en effectmodellen en gaat dus gepaard met onzekerheden over de veiligheidsrisico's, en dat terwijl we de veiligheid van derden (burgers) voldoende willen garanderen.

Het ministerie van EZK<sup>17</sup> is de motor achter de Nederlandse energietransitie en heeft een aantal jaren geleden ingezien dat de veiligheidsrisico's van de energietransitie vragen om kaders/beleid. Daartoe heeft ministerie een aantal generieke uitgangspunten voor het risicobeleid van de energietransitie geformuleerd. Onderverdeeld in drie clusters zijn de uitgangspunten voor de omgang met de veiligheidsrisico's van de energietransitie:

#### **Verantwoord**

- › Minstens even veilig
- › Initiatieven toetsen m.b.v. realistische inzichten uit wetenschap en praktijk
- › Bij verdere risicoreductie staat proportionaliteit centraal
- › Voorzorgsmaatregelen, later opschalen of afschalen

#### **Voortvarend**

- › Waar nodig risicobeleid formuleren voorafgaand aan wetgeving
- › Ruimte voor gereguleerd experimenteren
- › Monitoren en leren van pilotprojecten en incidenten
- › Naar aanleiding van incidenten: leren en doorvoeren van structurele verbetering

---

17 [Kamerstuk 32813, nr. 1113](#) | [Overheid.nl](#) > [Officiële bekendmakingen](#)

**Verbonden:**

- › Uitbreiding kennis
- › Openhartige en eenduidige communicatie
- › Bij belemmeringen door wet- en regelgeving, helpt de overheid bij het zoeken naar een oplossing
- › Deze uitgangspunten worden gehanteerd door zoveel mogelijk overheidspartijen

Deze uitgangspunten bieden in eerste oogopslag een redelijke kijk op hoe er met veiligheidsrisico's van de energietransitie omgegaan moet worden. Er zijn echter ook enkele kanttekeningen te maken.

Ten eerste zijn de generieke beleidsuitgangspunten op abstract niveau te billijken, maar kunnen niet in plaats komen van specifieke wettelijke kaders waarmee op project- en gebiedsniveau veiligheidsrisico's kunnen worden beoordeeld. En juist die wet- en regelgeving loopt achter, waardoor initiatieven en projecten lokaal moeten worden beoordeeld, zonder vastgestelde beoordelingskaders, met onvoorspelbaarheid en onzekerheid over de uitkomst tot gevolg.

Ten tweede kennen we de risico's veelal onvoldoende en ontbreken betrouwbare datasets om te concluderen of het 'nieuwe' risico minstens zo veilig is als de fossiele variant.

En ten derde is er een kanttekening te maken bij het begrip 'proportionaliteit'. Proportionaliteit wordt door de minister uitgedrukt in *Disability Adjusted Life Years* (DALY's). DALY's drukken de langetermijn-gezondheidseffecten uit in verloren gezonde levensjaren ten opzichte van de levensverwachting, en kan ook de verloren levensjaren door ongevallen weergeven. Ook hier wreekt zich het probleem van de nieuwigheid van de ontwikkelingen in de energietransitie, en de daarmee gepaard gaande ontbrekende gegevens. Daarnaast werpt de vraag zich hier op of het centraal stellen van proportionaliteit wel goed samengaat met het tevens genoemde verzorgsbeginsel. De normatieve vraag hier is of proportionaliteit dé rechtvaardige maatstaf is voor de beoordeling van relatief onbekende risico's. De invulling

van het voorzorgsbeginsel, zoals het door de WRR (2008)<sup>18</sup> is verwoord in haar rapportage over de onzekerheid omtrent fysieke veiligheidsrisico's acht ik hier meer op zijn plaats: Het voorzorgsbeginsel vormt volgens de WRR *“het leidend beginsel zowel voor de fases waarin actief naar onzekerheden wordt gezocht en getracht wordt zulke onzekerheden te vertalen in termen van bespreekbare risico's, als voor de fases waarin afwegingen, onder wellicht resterende onzekerheid, moeten worden gemaakt en maatregelen moeten worden genomen. Het voorzorgsbeginsel houdt volgens de raad in dat onderkend wordt dat de kwetsbaarheid van mensen, samenleving en natuurlijke omgeving een pro-actieve omgang met onzekerheden eist.*

Conform de WRR zullen bedrijven en overheden maatregelen moeten treffen wanneer er gegronde redenen zijn om aan te nemen dat activiteiten negatieve gevolgen kunnen hebben voor het milieu, veiligheid of de gezondheid. Het gaat om activiteiten waarbij de beschikbare wetenschappelijke gegevens wel indicaties geven voor een risico, maar nog onvoldoende wetenschappelijk bewijs beschikbaar is over de aard of omvang van een risico. Exact hetgeen er aan de hand is in de energietransitie. Het voorzorgsbeginsel geeft met deze invulling richting aan een overheid die zijn burgers voldoende beschermt tegen gevaren door derden.

## **Conclusie**

Er is in Nederland dus sprake van een forse transitie op het gebied van de energievoorziening. Die transitie gaat gepaard met veiligheidsrisico's en onzekerheden. Er is risicobeleid in het algemeen en met betrekking tot de energietransitie in he bijzonder, om burgers tegen veiligheidsrisico's van de energietransitie te beschermen. Echter, de relatieve onbekendheid van die risico's als gevolg van andersoortige toepassingen en toepassingsdomeinen dan voorheen met fossiele brandstoffen legitimeren een verdere verdieping van die veiligheidsrisico's opdat burgers voldoende worden beschermd.

In de volgende hoofdstukken ga ik nader in op de veiligheidsrisico's en gevaren zoals die gepaard gaan met de energietransitie in ons land. Dat doe ik aan de hand van de energieketen: energieproductie (hoofdstuk 2), energietransport en -opslag (hoofdstuk 3) en energieverbruik (hoofdstuk 4).

---

18 [Onzekere veiligheid | WRR.](#)

## 2. ENERGIEPRODUCTIE

Nederland staat voor een van de grootste ‘verbouwingen’ in haar geschiedenis, namelijk die van de aanpassing van de energie-infrastructuur. Als we om ons heen kijken, dan zien we dat de verbouwing van Nederland om tot een duurzame en toekomstbestendige energie-infrastructuur te komen, volop gaande is. Hieronder zal ik een overzicht schetsen van hoe er nu al in praktijk invulling wordt gegeven aan de ontwikkeling van de duurzame energie-infrastructuur en de hiermee gepaarde gaande veiligheidsrisico’s. Ik put hierbij onder meer uit waardevolle rapportages van mijn collegae binnen het NIPV zoals het Informatieblad energietransitie<sup>19</sup> (2023) en de NIPV-kennisbundels (2025)<sup>20</sup> en de verkenning van de risico’s van de energietransitie door het Analisten Netwerk Veiligheid (2023).<sup>21</sup> Hierin worden de principes van energieproductie, maar ook energietransport – en opslag en gebruik alsook de veiligheidsrisico’s beschreven.

### 2.1 GEOTHERMIE

Geothermie (aardwarmte) is warmte die lokaal uit de ondergrond wordt gehaald (mijnbouw) door warm water te onttrekken uit watervoerende lagen. Dit gebeurt in een productieput. De warmte van het opgepompte water wordt met behulp van een warmtewisselaar overgebracht op een andere waterstroom. Dat warme water wordt gebruikt om kassen, industrie en huizen te verwarmen. Na het afgeven van de warmte in de warmtewisselaar wordt het afgekoelde water via een injectieput teruggepompt in het oorspronkelijke reservoir. Veel van de geothermie productielocaties zijn dan ook te vinden bij kassen van groente- en fruittelers. Naast dat zij de warmte oppompen voor eigen gebruik, leveren ze ook warmte aan woonwijken, bedrijfspanden, sportcentra et cetera.

De mogelijke veiligheidsrisico’s verschillen per geothermie project en locatie. Mogelijke veiligheidsrisico’s van de productie, transport en opslag en het gebruik van aardwarmte zijn:

- Vermenging en/of verontreiniging van zoete watervoerende lagen of oppervlaktewater met zout formatiewater of met afvalwater.

---

19 [20231214-NIPV-Informatieblad-energietransitie.pdf](#).

20 [Kennisbundels veilige energietransitie geactualiseerd - Nederlands Instituut Publieke Veiligheid](#).

21 [Verkenning risico’s van de energietransitie voor de nationale veiligheid \(ANV, 2019\)](#).

- Milieu- en letselschade tijdens boor- of putwerkzaamheden en productie bij een (ongecontroleerde) uitstroom van gas, olie of van heet en zout water.
- Milieu- en letselschade door een ongecontroleerde uitstroom van gevaarlijke stoffen uit opslaglocaties (bassins, tanks) met stoffen bedoeld voor schoonmaak of het opvangen van afvalwater.
- Trillingen en bodembeweging bij aanleg en productie met mogelijk schade aan gebouwen en infrastructuur of met mogelijk instabiliteit van dijken als gevolg.
- (Diep) boren in gebieden met een reeds verhoogd risico op aardbevingen kan de kans op aardbevingen vergroten.
- Radioactieve straling door verontreiniging van zoete watervoerende lagen, oppervlaktewater of zout formatiewater met een verhoogde aanwezigheid van natuurlijke radionucliden.

Het ministerie van EZK onderkent de veiligheidszorg bij overheden en omwonenden bij dergelijke mijnbouwprojecten en heeft hiertoe het Kennisprogramma Effecten Mijnbouw (KEM) ontwikkeld en in uitvoering<sup>22</sup>. Studies naar de veiligheid en risico-analyses beogen het inzicht in de directe, fysieke effecten van mijnbouwactiviteiten (sinds 2017), zoals seismiciteit, bodemdaling/stijging en vloeistoflekkage/migratie te vergroten. Ondertussen adviseert het SodM<sup>23</sup> (september 2025) vanwege onzekerheden en kennistekorten om het 'traffic light system' (TLS) voor seismische activiteit (minibevingen als gevolg van boringen) verder te verbeteren. De verbetering betreft meer voorzorg en de bijbehorende maatregelen met het oog op langetermijn-effecten, zoals hieronder verwoord door het SodM.

*Over het algemeen wordt aangenomen dat de kans op schadeveroorzakende aardbevingen als gevolg van geothermie klein is. Omdat geothermie nog niet lang genoeg toegepast wordt in Nederland en veel kennis hierover gestoeld is op informatie uit het buitenland, is er echter onzekerheid over de lange termijn impact van geothermie in de Nederlandse situatie. SodM vindt daarom dat in het TLS meer voorzorg moet worden opgenomen over mogelijke lange termijn-effecten en na-ijlende trillingen.*

<sup>22</sup> KEM Projecten | KEM programma.

<sup>23</sup> SodM: [Beleidsregels voor aardbevingsbeheersing bij geothermie moeten strenger. Staatstoezicht op de Mijnen.](#)

## 2.2 WINDTURBINES

Met behulp van windturbines kan windenergie worden omgezet in elektriciteit. Een windturbine heeft doorgaans vier hoofdonderdelen: een rotor, een gondel (versnellingsbak, naaf, generator en krui-installatie), een mast (inclusief kabels) en een netaansluiting. De generator zet de bewegingsenergie om naar laagspanning elektriciteit (ongeveer 650 volt). In Nederland zijn er ruim 3200 windturbines, waarvan 670 op zee. De windturbines zijn verspreid over heel Nederland, met zwaartepunten qua aantallen in de provincies rondom het IJsselmeer (> 350).

Er worden nog steeds windturbines bijgebouwd in ons land, maar onder tussen worden ook verouderde turbines uit gebruik genomen (in Nederland in de periode 2021-2024 betrof het 364 uit gebruik genomen windturbines)<sup>24</sup>. Dat laatste bijvoorbeeld vanwege veroudering of omdat moderne windturbines meer energie kunnen produceren dan de oude turbines. Uit gebruik genomen turbines worden ontmanteld en elders opgebouwd, onderdelen worden herbestemd (bijv. als elementen in de openbare ruimte), of gerecycled<sup>25</sup>.

Mogelijke veiligheidsrisico's<sup>26</sup> van windturbines zijn (RIVM, 2020):

- Breuk en val van (delen van) een gondel of een windturbineblad op gebouwen, personen of vitale infrastructuur als gevolg van overbelasting of externe omstandigheden zoals extreem weer.
- Omvallen van een staande windturbine op gebouwen, dijken, kunstwerken, personen of vitale infrastructuur door mastbreuk als gevolg van overbelasting of externe omstandigheden zoals extreem weer.
- IJsafwerping op gebouwen, personen en vitale infrastructuur.
- Brand in de turbine tijdens werkzaamheden en/of hulpverlening.

## 2.3 ZONNEPANELEN

Een zonnepaneel is een paneel dat zonlicht omzet in elektriciteit. Het is opgebouwd uit zonnecellen die meestal gemaakt zijn van silicium. Energie

<sup>24</sup> [StatLine - Windenergie op land; productie en capaciteit per provincie.](#)

<sup>25</sup> [20240912-NIPV-Risicos-Tweede-Leven-Energietechnologieen.pdf.](#)

<sup>26</sup> Met de komst van windturbines zijn er ook gezondheidsrisico's voor omwonenden als gevolg van de versterking van de (nacht)rust door trillingen, slagschaduw, het laag sonore geluid en de rode stroboscopische lichtpuntjes.

van de zon in de vorm van zonnestrallen maakt elektronen los in het silicium, waardoor een elektrische stroom gaat lopen. Deze stroom is nog niet geschikt om gebruikt te worden, omdat hij van gelijkstroom omgezet moet worden naar wisselstroom. Dat gebeurt met een omvormer. De verbindingen tussen zonnepanelen en kabels naar de omvormer worden connectoren genoemd. Het geheel van zonnepanelen, omvormer, connectoren en kabels wordt een PV-systeem genoemd ('photo voltaic').

Zonnepanelen zijn vooral te vinden op daken en gevels van woningen en bedrijfspanden (gebouw-gebonden) of in zonneparken (grondgebonden). Dat zijn percelen grond waar zonnepanelen op een grootschalige manier worden gebruikt om elektriciteit op te wekken. Daarnaast zijn er zonnepanelen die op water drijven, zonnewegen, wordt geëxperimenteerd met zonnepanelen tussen spoorstaven, zonnepanelen boven parkeerplaatsen, zonnepanelen op tuinbouwkassen en zonnepanelen op voertuigen. Nederland kent circa 3 miljoen zonnepanelen (met name zonnepanelen).

Mogelijke veiligheids- en gezondheidsrisico's van zonnepanelen zijn (NIPV, 2024):

- Het niet deskundig installeren van zonnepanelen kan kortsluiting geven, gevolgd door brand. Kortsluiting kan veroorzaakt worden door verkeerde aansluitingen, door falen van materiaal of door ontwerpfouten.
- Er bestaat een kans op een elektrische schok bij een storing doordat er – ook na het omzetten van de aardlekschakelaar – nog spanning op de zonnepanelen aanwezig kan zijn. Ook kan een elektrische schok veroorzaakt worden door het smelten van de bekabeling.
- Gehinderde brandweerinzet door gladde zonnepanelen, verschoven zonnepanelen, weggewaaide zonnepanelen, een te lage draagkracht van het dak of door een slechte bereikbaarheid van de brand door de aanwezigheid van zonnepanelen.
- Depositie van (on)verbrande zonnepaneeldeeltjes in de omgeving.
- Stroom door kabels van zonnepanelen die naast stalen buisleidingen in de grond liggen kunnen leiden tot aantasting van corrosiebeschermingsmaatregel (kathodische bescherming) van de buisleiding.

Branden door en met zonnepaneelsystemen komen geregeld voor in Nederland. TNO publiceerde in 2019 een rapport met woningbranden in

2018 die door zonnepaneelsystemen (ca 170.000 zonnepaneelsystemen in Nederland) zijn ontstaan.<sup>27</sup> Hieruit blijkt dat minimaal 1/3 van de woningbranden met zonnepalen plaatsvond met zogenaamde in-dak systemen. Ook blijkt dat de onzorgvuldige installatie van zonnepanelensystemen veelal de oorzaak vormt van de branden. Uit onderzoek<sup>28</sup> in 2024 door TNO, NIPV en de NEN blijkt dat er 152 gebouwbranden zijn geweest in de jaarperiode van 1 november 2022 t/m 31 oktober 2023. Diverse van dergelijke branden leveren uitdagingen op voor de omgeving (depositie<sup>29</sup>) en de incidentbestrijding (paraplu-werking: de panelen verhinderen dat het water bij de brandhaard komt doordat ze functioneren als een paraplu bij regen).

### **Zonnepanelen fungeren als paraplu bij woningbrand**

Op 13 mei 2025 brandden in Didam vier rijtjeshuizen af. De initiële woningbrand was moeilijk te blussen, mede doordat de zonnepanelen het bluswater belemmerden om bij de uitslaande vlammen op het dak te komen, en daarmee de brand te blussen (iets soortgelijks vond eerder ook plaats, in Arnhem (18 juni 2023), met als gevolg de verwoesting van acht woningen). Deze branden werden niet veroorzaakt door de zonnepaneelsystemen, maar de panelen speelden wel een negatieve rol bij de brandbestrijding (paraplu-werking).

## **2.4 Biomassa**

Biomassa kan op diverse manieren worden gebruikt om energie te winnen. Biomassa kan worden verbrand, zodat de warmte die hierbij vrijkomt, kan worden benut. Ook kan biomassa door middel van vergisting of vergassing worden omgezet in biogas, dat vervolgens ter plaatse of elders voor verwarming kan worden gebruikt. In totaal zijn er door Nederland verspreid, honderden vergistingsinstallaties, variërend van gespecialiseerde bedrijven met grote installaties, tot rioolwaterzuiveringsinstallaties tot boerenbedrijven.

---

27 [TNO-2019-R10287.pdf](#).

28 [20241014-NIPV-Gebouwbranden-met-zonnepanelen.pdf](#).

29 Ondertussen is er de handreiking hoe om te gaan met de depositie van deeltjes, [20250610-NIPV-Handreiking-depositie-zonnecelscherven.pdf](#).

Bij vergisting van biomassa treden de volgende veiligheidsrisico's op (NIPV, 2023 en NIPV, 2026):

- Broei, brand en vorming van stikstofdioxide bij opslag van grondstoffen.
- Storing in de vergistingsinstallatie met een ongewenste uitstroom van de inhoud tot gevolg.
- Brand-, explosie-, bedwelmings- en vergiftigingsgevaar ten gevolge van het vrijkomen van biogas, van pathogenen (bacteriën, virussen en parasieten) en/of van stoffen als waterstofsulfide, ammoniak en kooldioxide.
- Digestaat dat rechtstreeks uit de vergister komt is instabiel. Als een instabiel digestaat wordt getransporteerd in een vrachtwagen bestaat het risico op gasvorming (drukopbouw) en schuimvorming.
- Biovergisting vindt regelmatig plaats op agrarische bedrijven; in die gevallen moet de agrariër ook operator zijn, maar is dat niet, waardoor er bij storingen niet direct kan worden ingegrepen.

## 2.5 SMALL MODULAR REACTORS

*Small Modular Reactors* (SMR's) zijn kernreactoren<sup>30</sup> van een kleiner formaat dan de huidige kernreactoren. Het Internationaal Atoomgenootschap hanteert de term SMR's voor kernreactoren met een elektrisch vermogen tot 300 MWe. Wereldwijd zijn er een kleine honderd ontwerpen van meerdere fabrikanten in ontwikkeling voor SMR's. Hierin bestaat een grote variatie in vermogen en technologie. Een belangrijke innovatie richt zich erop om de bouwtijd van de reactor op locatie te verkorten door de kernreactor in modules in fabrieken te produceren en vervolgens op locatie 'in elkaar te zetten'.

De rijksoverheid heeft een programma gestart om de inzet van SMR's te verkennen, waarbij gekeken wordt naar de haalbaarheid, vergunningverlening en nucleaire veiligheid. Het is op dit moment nog niet definitief vastgesteld hoeveel SMR's er in Nederland komen. De ontwikkeling bevindt zich in een verkennende fase, waarbij de overheid en private partijen de mogelijkheden onderzoeken.

---

<sup>30</sup> Ik ga hier niet in op de discussie of kernenergie een duurzame energiebron is: het radioactieve afval kan langdurig voor stralingsrisico's voor mens en milieu zorgen. SMR's zullen met grote zekerheid onderdeel gaan uitmaken van de toekomstige energiemix van Nederland, en zijn omwille ook van de veiligheid, van belang om hier te benoemen.

Bij de eerste generaties SMR's zullen dezelfde incidentscenario's van toepassing zijn als bij de huidige kernreactoren. Het zijn immers in zekere zin kleinere varianten van huidige kerncentrales. Bij kernreactoren is het risico voor de omgeving het vrijkomen van radioactieve straling door beschadiging van splijtstofmateriaal door onvoldoende koeling. Afhankelijk van de weersomstandigheden kan vrijgekomen straling zich verspreiden. De omvang van de effecten hiervan zijn gekoppeld aan het vermogen; hierdoor zullen de gevolgen bij kleinere reactoren kleiner zijn dan bij conventionele, grotere reactoren. De gevolgen van blootstelling aan straling is afhankelijk van de concentratie en kan variëren van roodheid van de huid, brandblaren, het ontstaan van kanker tot aan de dood. Effecten als brand en explosies zijn voor de omgevingsveiligheid amper aan de orde bij kernreactoren. Brandscenario's zijn namelijk al standaard in het ontwerp van de kernreactoren meegenomen en de kernreactoren zijn er zo op ingericht dat ze voldoende barrières hebben om deze incidenten zonder ernstige gevolgen voor de omgeving te doorstaan. Verder moet de beheerder zelf in staat zijn met dergelijke incidenten om te kunnen gaan. Hiervoor bestaat een eigen bedrijfsbrandweer of zijn afspraken gemaakt met de regionale brandweer (NIPV, 2023). Incidenten met SMR's hebben zich in ons land (logischerwijs) nog niet voorgedaan. Logisch, want er zijn nog geen SMR's in Nederland.

## **CONCLUSIE**

Geothermie, zon- en windenergie, biomassa en kernenergie zijn energieproductiemethoden binnen de energietransitie. Ze kennen elk hun eigen productieprocessen en de hiermee gepaard gaande kenmerkende veiligheidsrisico's. Het betreft veiligheidsrisico's die we ten dele kennen, maar ten dele ook nieuw zijn. Veelal ontbreken betrouwbare datasets over kansen op incidenten als gevolg van het nieuwe karakter van de ontwikkeling.

### 3. ENERGIETRANSPORT EN -OPSLAG

De energie die (duurzaam) wordt opgewekt, wordt veelal niet direct ter plekke gebruikt. De energie wordt dient te worden verplaatst naar locaties waar die energie wordt opgeslagen en gebruikt (eventueel na conversie) voor bijvoorbeeld het verwarmen van gebouwen of aandrijven van machines.

Het transporteren van energie kan plaatsvinden via verschillende transportmodaliteiten: over de weg, het water, het spoor en door buisleidingen. Veiligheidsrisico's verschillen per transportmodaliteit. Die verschillen hangen onder meer samen met de ongevalsfrequentie van de verschillende modaliteiten (kansen), de hoeveelheden die vervoerd kunnen worden (effecten), en natuurlijk de omgeving die door het transport wordt doorkruist.

Voor het vervoer van gevaarlijke stoffen in Nederland bestaan wettelijke kaders. Zo zijn er de transportmodaliteit specifieke Europese transportregels voor het vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg (ADR), het spoor (RID) en de binnenvaart (ADN). In deze Europese regels staan onder meer de wijze waarop stoffen verpakt en vervoerd moeten worden, de etikettering en kenmerking van de producten, de correctie documentatie en opleidingseisen aan chauffeurs. Daarnaast kent Nederland het Basisnet voor het borgen van de veiligheid van omwonenden van transportassen (autosnelwegen, spoorwegen, binnenwateren en buisleidingen) waarover en waardoor gevaarlijke stoffen worden vervoerd. Als onderdeel van het Basisnet zijn maxima gesteld aan de risico's voor omwonenden, de risicoplafonds: de overlijdenskans van een omwonende mag niet groter zijn dan 1 miljoenste per jaar.

Thans is sprake van discussie tussen overheden over het Basisnet. Het ministerie van IenW (2024) stelt dat het transport van gevaarlijke stoffen 'veilig' is want het transport voldoet aan de internationale wet- en regelgeving cf ADR, RID en ADN. Derhalve wil het ministerie de risicoplafonds afschaffen<sup>31</sup>. Tegelijkertijd wil hetzelfde ministerie de aandachtsgebieden

---

31 <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2024/12/20/robuust-basisnet-en-veiligheid-spoorwegemplacementsen>.

rondom de transportassen aanhouden. Aandachtsgebieden zijn zones waarin lokale overheden aandacht moeten besteden aan de veiligheid van omwonenden van activiteiten met gevaarlijke stoffen.

Het zijn de lokale overheden die met de aandachtsgebieden moeten werken en eventueel met lokale veiligheidsmaatregelen aan gebouwen en in de omgeving kunnen komen. Het gevolg hiervan is dat beperkingen aan de inrichting van de omgeving en gebouwen kunnen ontstaan en er kostenverhogende maatregelen (moeten) worden getroffen, terwijl het ministerie zelf van mening is dat het vervoer van gevaarlijke stoffen 'veilig' is. Het voert hier te ver om diepgaand op deze lopende discussie in te gaan omdat deze discussie namelijk verder gaat dan enkele de energietransitie. Het gaat over al vervoer van gevaarlijke stoffen. Echter, er is wel degelijk een relatie met de energietransitie. Met name waar het koolstof-vrije moleculen (ammoniak en waterstofrijke energiedragers (LOHC's)) betreft voor het transport van energie (zie paragraaf 3.1). Er wordt voor deze energiedragers een (forse) transportgroei verwacht over delen van het spoor, met als gevolg dat de huidige risicoplafonds mogelijk worden overschreden met als gevolg beperkingen in de omvang van het vervoer, en daarmee beperkingen in de bereikbaarheid en/of beperkingen in de inrichting van de directe omgeving van de transportassen.

Om energie, geproduceerd door hernieuwbare bronnen, te transporteren en op te slaan wordt op hoofdlijnen gebruikt gemaakt van drie principes:

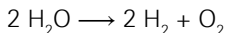
- moleculen, zoals bijvoorbeeld het geval is bij brandstoffen, waterstofrijke energiedragers en via warmte. Het verschil van de hernieuwbare brandstoffen met fossiele brandstoffen is dat er geen koolstofelementen in de moleculen zitten. De moleculen worden in tanks opgeslagen of vervoerd via het spoor, de weg, binnenvaart en buisleidingen.
- elektronen (zoals bij elektriciteit het geval is) waarbij de elektriciteit in (lithium) accu's wordt opgeslagen of wordt getransporteerd via stroomkabels.
- warmte, zoals bijvoorbeeld met restwarmte van de industrie of geo- en aquathermie waarbij heet water door een buisleiding van bron naar afnemer wordt getransporteerd.

### 3.1 KOOLSTOF VRIJE MOLECULEN

Geproduceerde energie kan in allerlei koolstof vrije moleculen worden opgeslagen<sup>32</sup>. In Nederland zien we dat in de vorm van waterstofrijke energiedragers. Moleculen als water en stikstof worden door middel van bijvoorbeeld electrolyse of steam methane reforming (met hernieuwbare energie (zonne- en windenergie)) omgezet in (het molecuul) waterstof of een waterstofrijke energiedrager. Deze hebben hun eigen kenmerkende veiligheidsrisico's. Hieronder bespreek ik de veiligheidsaspecten van waterstof, ammoniak en de groep van liquid organic hydrogen carriers (LOHC's).

#### Waterstof

De elektriciteit die door zonneparken en windparken wordt geproduceerd, wordt gebruikt bijvoorbeeld in electrolyzers om van zuiver water, waterstofgas te maken:



Waterstof heeft echter een zeer lage dichtheid waardoor er veel ruimte nodig is om energie op te slaan. Om de energie-inhoud te vergroten kan de druk van waterstof worden verhoogd of kan het sterk worden gekoeld tot in vloeibare vorm (bij -253°C). Waterstof heeft de volgende veiligheidsrisico's:

- Waterstof lekt relatief makkelijk.
- Waterstof wordt niet met blote oog waargenomen als het vrijkomt.
- Waterstof ontsteekt relatief makkelijk bij hoge concentraties.
- Waterstof heeft een breed ontvlambaarheidsgebied (explosiegrenzen: 4 - 75 vol.%).
- Waterstofvlammen zijn visueel nauwelijks waar te nemen.
- Waterstofvlammen zijn zeer heet, maar stralen relatief weinig warmte uit.
- Waterstof kan zich in besloten ruimtes of onder plafonds ophopen en daar hoge concentraties bereiken.
- Hoge concentraties waterstof kunnen in een besloten (slecht geventileerde) ruimte leiden tot zuurstoftekort.
- Ontsteking van een waterstofjet geeft een fakkel.

---

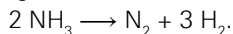
<sup>32</sup> Van groene methanol (CH<sub>3</sub>OH) wordt veel verwacht in het kader van de energietransitie. Groene methanol is afkomstig van biomassa of groene waterstof. Het wordt gesynthetiseerd samen met CO<sub>2</sub> met behulp van hernieuwbare elektriciteit. Het is dus niet geheel koolstof-vrij. (Groene) methanol is zeer giftig en brandbaar.

- Ontsteking van een waterstofwolk geeft bij concentraties hoger dan 10 vol.% een explosie (deflagratie) en bij concentraties hoger dan 18 vol.% een detonatie.
- Waterstof kan leiden tot verbrossing, dat wil zeggen: het broser worden van staal doordat waterstof het staal binnendringt.
- Vloeibare waterstof (LH<sub>2</sub>) is extreem brandbaar, explosief en cryogeen, wat leidt tot ernstige brand-, explosie- en bevroeringsrisico's. Bij lekkage verdampt het snel waarbij het koude gas aanvankelijk zwaarder is dan lucht en kan leiden tot verstikking of het condenseren van zuurstof (-183 °C).

### Ammoniak

De opslag en het transport van bulkhoeveelheden waterstof is duur omdat dat onder hoge druk of bij zeer lage temperaturen dient te geschieden. Vandaar dat ook andere opties worden ontwikkeld om waterstof efficiënter op te slaan en te vervoeren. Bijvoorbeeld door waterstof te binden aan andere moleculen zoals stikstof. Er ontstaat dan ammoniak (NH<sub>3</sub>):  $N_2 + 3 H_2 \rightarrow 2 NH_3$ .

Ammoniak is in dit geval de waterstof(rijke) energiedrager. Waterstof wordt in de vorm van vloeibare ammoniak opgeslagen en vervoerd omdat vloeibaar ammoniak een (veel) hogere energiedichtheid heeft. Ammoniak is makkelijker vloeibaar te maken dan waterstof, maakt gebruik van bestaande infrastructuur, waardoor het efficiënter is voor grootschalig, internationaal transport en opslag. Om de energie weer uit ammoniak te halen, wordt het 'gekraakt' (thermisch ontleed) in waterstof en stikstof:



Ammoniak kent de volgende veiligheidsrisico's:

- Ammoniak is giftig; bij inademing tast het de slijmvliezen van keel en luchtwegen aan en veroorzaakt sterke irritatie. Langdurige blootstelling of hoge concentraties kunnen levensbedreigend zijn.
- Wanneer ammoniak verdampt, onttrekt het warmte aan de omgeving, wat zorgt voor een sterk afkoelend effect. Direct contact met koud, verdampend ammoniak kan daardoor ernstige vrieswonden veroorzaken.
- Bij een brand van ammoniak is de warmtestraling naar de omgeving relatief laag, omdat ammoniak geen koolstof bevat. Een ammoniakbrand kan zichzelf niet in stand houden; alleen in slecht geventileerde ruimtes bestaat kans op brand en mogelijk zelfs een explosie.

## LOHC's

*Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC's) zijn organische vloeistoffen die waterstof chemisch binden en weer afgeven aan de waterstofdrager, vaak gebaseerd op onverzadigde koolwaterstoffen. LOHC's is een familienaam die bestaat uit diverse stoffen. LOHC's zijn vloeibaar, wat transport relatief eenvoudig maakt. De meest gebruikte en onderzochte LOHC's zijn dibenzyltolueen (vaak gebruikt vanwege goede stabiliteit) en methylcyclohexaan. LOHC's zijn brandbare vloeistoffen, al verschilt de mate van brandbaarheid. De meeste LOHC's branden zeer moeilijk, met uitzondering van methylcyclohexaan. Daarnaast kunnen er verschillen zijn in toxiciteit en zijn sommige waterstofrijke energiedragers carcinogeen, en staan daarom op de lijst van zeer zorgwekkende stoffen ZZS<sup>33</sup> (RIVM, 2023<sup>b</sup>).

Het gebruik van LOHC's is een cyclisch proces: na transport van het dragermateriaal wordt waterstof hieraan onttrokken. Daarna moet het dragermateriaal geretourneerd worden om te kunnen worden hergebruikt. Dit brengt extra transportbewegingen (retourstromen) van gevaarlijke met zich mee (en dus extra risico's). Ter illustratie: toluen is het dragermateriaal zonder waterstof. Als toluen het waterstofmolecuul heeft opgenomen, is het methylcyclohexaan geworden. De LOHC is dan methylcyclohexaan. Wanneer de waterstof van het methylcyclohexaan wordt verwijderd ontstaat weer toluen. Toluene is brandbaar en schadelijk voor de gezondheid.

## 3.2 ELEKTRONEN

Wind- en zonne-energie kunnen met behulp van elektronen worden opgeslagen (in accu's/batterijen) of worden getransporteerd (kabels). Een batterij slaat elektrische energie op als chemische energie via een omkeerbare elektrochemische reactie. Tijdens het opladen verplaatsen elektronen zich van de kathode (+) naar de anode (-) en worden daar vastgehouden. Bij ontlading stroomt deze energie via een extern circuit weer terug als elektriciteit van - naar +. Tussen de anode en kathode bevindt zich een elektrolyt, dat zorgt voor een chemische reactie en waardoor elektriciteit gaat stromen.

---

33 Vermijd Zeer Zorgwekkende Stoffen zoveel mogelijk in vloeibare waterstofdragers.

Windturbines en zonnepanelen produceren gelijkstroom (DC). Het elektriciteitsnet maakt gebruik van wisselstroom (AC/DC). Omvormers zorgen voor de conversie van gelijkstroom naar wisselstroom. De meeste apparaten in ons huis gebruiken gelijkstroom, en hebben een adapter/omvormer die de wisselstroom omzet in gelijk stroom (denk aan de televisie, keukenapparatuur en smartphone). Beide vormen van stroom veroorzaken elektrocutierisico's/ elektrische schokken. Het risico wordt niet zozeer bepaald door het feit of de stroom wisselstroom of gelijkstroom is, maar meer door de spanning en stroomsterkte, evenals de duur van blootstelling. Zowel wisselstroom als gelijkstroom kunnen gevaarlijk zijn bij voldoende hoge spanningen en stroomsterktes.

Energie wordt door kabels getransporteerd als elektrische wisselstroom (AC/DC), meestal via een hoogspanningsnet (110-380 kV) om energieverliezen, door weerstand, te minimaliseren. Transformatoren verhogen de spanning voor transport en verlagen deze in stappen via middenspanning (1-25 kV) naar laagspanning (230V) voor eindgebruikers. Dit transport vindt plaats via bovengrondse hoogspanningslijnen of ondergrondse stroomkabels.

Er zijn talrijke chemische samenstellingen van (oplaadbare) batterijen. Thans zijn met name de lithium-ion batterijen veel in gebruik. Lithium-ion batterijen hebben namelijk enkele gunstige eigenschappen. Ze hebben een relatief gunstige energie-inhoud/gewicht-verhouding, een geringe zelfontlading en kunnen in verschillende soorten en maten worden gemaakt. In vergelijking met traditionele loodzuur- of nikkel-cadmiumaccu's zijn lithium-ion batterijen lichter, efficiënter en kunnen ze meer energie opslaan in een compact formaat. Zo zien we ze uiterst klein toegepast worden in gehoorapparaten of afstandsbedieningen, wat groter in gereedschap, nog groter in personenauto's (100 kWh), bussen en trucks (500 kWh), en in stationaire situaties in zogenaamde energieopslagsystemen van enkele mWh, tot aan energieopslagterreinen die enkele hectares beslaan met honderden mWh aan opslagcapaciteit.

Het grote veiligheidsissue bij lithium-ion batterijen is de thermal runaway. Een thermal runaway is een ongewenst chemisch proces waarbij de temperatuur van een batterijcel flink stijgt. Dit kan gebeuren door een thermische, elektrische of mechanische storing in de batterijcel. Hierdoor worden naburige cellen ook warm, waardoor ook deze in thermal runaway raken.

De thermal runaway kan zich op deze manier uitbreiden door het gehele batterijpakket, dat bestaat uit tal van lithium ion batterijcellen.

Bij een thermal runaway komt als gevolg van dit chemische proces een brandbaar en toxisch gasmengsel vrij. Dit gasmengsel ontsteekt in de meeste gevallen direct, maar kan in bepaalde gevallen ook vertraagd ontsteken. Er zijn dus drie effecten mogelijk bij een thermal runaway:

- brand (waaronder steekvlammen en hittestraaling),
- een toxische wolk,
- een dampwolkexplosie wanneer de brandbare gassen zich ophopen en een vertraagde ontsteking plaatsvindt.

Omdat de (lithium-ion) batterijcellen veelal goed zijn afgeschermd van de buitenwereld door een stevige, dichte omkisting, is koeling van de thermal runaway van buitenaf lastig en vraagt om een langdurige inzet van koelmiddel, met, op zijn beurt, vervuild bluswater als milieurisico.

### 3.3 WARMTE

Wamtenetten, gevoed door industrieel afvalwarmte of geothermische bronnen worden ontwikkeld om woningen in straten en woonwijken te verwarmen, waardoor deze van het aardgas kunnen worden afgeschakeld. Met name in stedelijke gebieden, en dan vooral in oude wijken waar elektrificatie moeizaam is, wordt verwarming via deze netten gezien als een duurzaam alternatief voor verwarming via aardgas. De veiligheidsrisico's van het transport van warmte (met name warm water en stoom) zijn beperkt. De meest grote effecten bij een incident met warmtenetten zijn te verwachten bij een lekkage of breuk van de leiding. Veelvoorkomende oorzaken van lekkage of een leidingbreuk zijn graafwerkzaamheden, onderhoudswerkzaamheden, corrosie, en natuurlijke oorzaken zoals aardbevingen. De veiligheidsrisico's betreffen met name de uitstroom van heet water en de stoomwolk als gevolg van leidingfalen. De effectafstanden variëren met de druk in de leiding en temperatuur. Bij hoge temperatuur warmtenetten gaat het om enkele tientallen bar druk en een aangevoerde temperatuur hoger dan 75 °C. Een leidingbreuk zou kunnen leiden tot dodelijke slachtoffers tot op ca 10 meter.

## **CONCLUSIE**

Het transport van energie vindt plaats door kabels en leidingen, over de weg, het spoor en het water. Koolstofvrije moleculen, elektronen en warmte worden in het kader van de energietransitie gebruikt voor het transport en opslag van energie. Als gevolg hiervan ontstaan er andersoortige risico's voor degene die ermee werken en omwonenden. Ook voor hulpdiensten zijn er uitdagingen om incidenten veilig en effectief te bestrijden.

## 4. ENERGIEGEBRUIK

Na energieproductie, -opslag en -transport komt energie aan bij de gebruiker. Het scala aan gebruikers in onze maatschappij is groot. Om toch inzicht te creëren in de relevante veiligheidsaspecten van het energiegebruik, is enige vorm van ordening van nut. Ik deel de samenleving hiertoe (cf. de Topsector Energie) op in de gebouwde omgeving, industrie, landbouw en mobiliteit. Binnen elk van deze sectoren worden hieronder kort, van enkele toepassingen, relevante veiligheidsaspecten gepresenteerd.

### 4.1 DE GEBOUWDE OMGEVING

De gebouwde omgeving omvat alle door mensen gecreëerde fysieke structuren en ruimtes die de context vormen voor menselijke activiteiten. Dit strekt zich uit van individuele gebouwen tot volledige steden en de bijbehorende infrastructuur. De duurzame energie wordt gebruikt voor verwarming van panden en woonhuizen en elektriciteit voor apparaten.

Woningen in steden, dorpen en wijken 'moeten' van het aardgas af. Dat betekent dat huizen op andere manieren moeten worden verwarmd. In 2030 wil het Rijk dat 1,5 miljoen woningen aardgasvrij zijn gemaakt, en dat 500.000 woningen extra zijn aangesloten op warmtenetten. Gemeentes maken plannen voor de warmtetransitie waarbij warmtenetten en warmtepompen onderdeel uitmaken van de plannen. Warmtenetten worden gevoed door aardwarmte en/of industriële restwarmte in de vorm van warm water door leidingen te vervoeren naar de woonomgeving. Als warmtenetten geen optie zijn, bijv. vanwege afgelegen woningen, dan kunnen warmtepompen, aangedreven door zonne-/windenergie zorgen voor verwarming van de woning.

Daarnaast zien we ook (proef)projecten waarin waterstof wordt gebruikt om woningen van energie te voorzien. De waterstoftechnologie is nog volop in ontwikkeling waardoor er beperkt zicht is op de veiligheidsconsequenties van aanpassing van bestaande infrastructuren voor waterstof en de veroudering van materialen. Ondertussen zijn de veiligheidsrisico's voor monteurs in kaart gebracht en in opleidingen verwerkt.

In de gebouwde omgeving zien we daarnaast tal van batterij-toepassingen hun intrede doen. Grotendeels komt het erop neer dat huishoudens,

bedrijven en bedrijfsterreinen zelf energie opwekken (wind/zon) en die ter plekke gebruiken of opslaan in veelal lithium-ion batterijen. Als gevolg hiervan zijn gebruikers minder afhankelijk van stroomlevering door het energienetwerk, en besparen zij energiekosten. Mogelijk verdienen ze nog aan de teruglevering van energie. De keerzijde van deze ontwikkeling is dat er op tal van locaties energie-opslagsystemen worden neergezet. Van containergrootte energieopslagsystemen met een capaciteit van enkele MWh tot de thuisbatterijen van enkele tot tientallen kWh). En de meest recente trend in deze betreft de plug-in thuisbatterijen, modulair uitbreidbaar en in de supermarkt te verkrijgen. De consument zal veelal niet beseffen dat hij/zij een risicobron in huis heeft gehaald. Te zware belasting van de groepen in de meterkast, montagefouten en productgebreken kunnen leiden tot (zelf)ontbranding en explosies. Daar komt bij dat het voor de incidentbestrijders onbekend is of, en waar deze batterijen in de woning zijn gemonteerd/aangesloten, met gezondheids- en veiligheidsrisico's voor het repressief personeel tot gevolg.

## 4.2 DE INDUSTRIE

De Nederlandse industrie is qua energiegebruik de grootste sector. De industriële clusters in Nederland hebben ambitieuze plannen te vergroenen. In hun beleidsdocumenten presenteren zij hun energiestrategieën met daarin de toekomstplannen waarbij elektrificatie van de bedrijfsprocessen en waterstof een voorname plaats innemen. Langdurige vergunningsleningsprocedures, onzekerheid, kosten en netcongestie spelen de industrie parten om (snel) van fossiele brandstoffen over te gaan op elektriciteit. Voor industriële waterstoftoepassingen in de industriële clusters wordt de 'waterstof backbone' ontwikkeld: een buisleidingnetwerk door Nederland, gebaseerd op het oorspronkelijke hogedruk aardgastransportleidingnetwerk.

Het gaat in het industriële domein om grootschalige ombouw van bestaande infrastructuren en productieprocessen. Hiermee gaan mechanismen gepaard die de veiligheid beïnvloeden:

- Eindgebruikers stappen over op technologieën en apparaten die werken op elektriciteit of op duurzame brandstoffen en energiedragers. Er ontstaan andersoortige productieprocessen, met nieuwe meet- en regelsystemen en opleidingseisen aan personeel.
- De vraag naar elektriciteit stijgt (door toenemende elektrificatie van apparaten en processen) en ondertussen staat de leveringszekerheid in

ons land onder druk.

- Gebruikers krijgen te maken met nieuwe (toe)leveranciers en nieuwe energieketens.
- Andersoortige en mogelijk onbekende incidentscenario's bij ontwerpers, vergunningverleners, en hulpdiensten. Vanwege de grootschaligheid zoals de opslag van ammoniak (tien)duizenden tonnen)) zullen op dezelfde locaties andersoortige incidentscenario's mogelijk zijn, waardoor ook de incidentbestrijding mee zal moeten evolueren.

### 4.3 DE (LAND)BOUW

Ook in de landbouw en bouw wordt ingezet op gebruik van hernieuwbare energiebronnen om bij te dragen aan de beperking van de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Landbouwers zien in de energietransitie een nieuw verdienmodel ontstaan. Eerder noemde ik al de geothermische energieproductie bij de tuinders. Maar ook de plaatsing van windturbines en zonnepanelen levert hetzelfde stroom, maar wordt ondertussen ook getransporteerd, opgeslagen en verhandeld.

In de bouw zien we het gebruik van waterstof en met name elektriciteit sterk groeien. Bouwprojecten mogen nog maar een zeer beperkte hoeveelheid stikstofneerslag (depositie) veroorzaken op Natura-2000 gebieden. In (binnen)steden stellen gemeentes, vanwege milieukwaliteit, ook steeds strengere (milieu-)eisen aan de toeleveranciers van bouw materiaal (elektrische/waterstof aangedreven vrachtwagens) en aan het bouw materieel zelf. Het gevolg hiervan is dat op bouwplaatsen steeds meer energie-opslag systemen en schone mobiele energiegeneratoren (in plaats van diesellaggregaten) komen te staan. Het materieel op de bouwplaats wordt geëlektrificeerd, en zwaarder materieel kan aangedreven worden met waterstof. Op bouwplaatsen en festivalterreinen komen tijdelijk grote hoeveelheden waterstof en batterijen te staan ten behoeve van de aandrijving van apparaten, installaties en machines. Daar is nu, voor wat betreft veiligheid, niets geregeld in de wet (omdat, vanwege de tijdelijkheid, er geen risico's hoeven te worden berekend).

Ook hier zien we de inherente veiligheidsrisico's van waterstof en energie-opslag systemen terug. Daarbij kent de bouwplaats zelf enkele specifieke omstandigheden die bijdragen aan de risico's:

- Opladen van batterijen vindt geregeld plaats op de bouwplaats buiten werkuren, wanneer er niemand aanwezig is en dus geen toezicht.

- De inrichting van bouwplaatsen wijzigt nogal eens gedurende de realisatie van een bouwwerk, met minder bekende terreinindelingen bij bouwvakkers tot gevolg.
- Veel verplaatsingen van materieel en zware materialen veroorzaken een verhoogde kans op beschadigingen. Hetzelfde geldt ook verplaatsingen van energie-opslagsystemen (batterij, waterstofcilinders en ook de aggregaten zelf).
- Tot slot vormen ook de bouwvakkers zelf een risico als gevolg van de geringe ervaring met EOS- en waterstoftoepassingen op de bouwplaats.

#### 4.4 DE MOBILITEIT

De toepassing van hernieuwbare energiebronnen vindt in de mobiliteitssector op tal van plekken plaats. Van trucks, bussen, schepen en treinen op waterstof en elektriciteit, tot personenwagens en micro mobiliteit (e-steps, e-scooters, e-bikes en fatbikes). Naast deze toepassingen zelf ontwikkelt zich ook de bijbehorende infrastructuur. Denk hierbij aan multi-energie hubs en laadpleinen voor elektrische trucks, waterstoftankstations, laadpalen in straten en bij woningen en laadkluisjes en -punten op scholen en in parkeer-garages en fietsenstallingen.

Een van veiligheidsrisico's als gevolg van de elektrificatie in de transportsector is de thermal runaway. De oorzaken van een thermal runaway is een mechanische impact. Juist in het verkeer is de kans op die impact aanwezig (het product van massa en snelheid). Een impact op een batterij hoeft echter niet direct tot een thermal runaway te leiden, maar kan ook vertraagd tot ontwikkeling komen. Eigenaren hebben de afwijking in de batterij als gevolg van botsing niet door (de auto/fiets rijdt nog steeds) terwijl ondertussen het gevaar zich onopgemerkt kan ontwikkelen. Dagen na de impact kan de thermal runaway tot volledige ontwikkeling komen. Het risico daarvan is dat het vervoermiddel ergens gestald staat of opgeladen wordt, veelal zonder toezicht. De batterij ontgast, vliegt in brand of explodeert. En ondertussen zijn het diezelfde eigenaren die met hun gedrag ook de bron van gevaar kunnen zijn. Het opladen van mobieltjes, e-bike accu's op stoffige en warme plekken, zonder de originele randapparatuur, in vluchtwegen en zonder toezicht vergroot de risico's in de privé-omgeving.

De energietransitie in de mobiliteitssector gaat tegelijkertijd gepaard met

andere trends die de risico's vergroten: deel-mobiliteit en circulariteit zijn mooie duurzaamheidsontwikkelingen, maar kennen hun rafelrandjes op het gebied van veiligheid. Deel e-scooters liggen verspreid in het publieke domein zonder dat een volgende gebruiker weet wat er mee is gebeurd. Lithium-ion batterijen die voor tweede- en derde-levenstoepassingen worden gedemonteerd en hergebruikt veroorzaken risico's als gevolg van aanpassingen van de oorspronkelijke ontwerpeisen en onwetendheid verderop in de gebruikers/verwerkingsketen. Tot slot vormen de batterijen bij het einde van de technische levensduur een afval(brand)risico: zowel bij de inzameling als bij de recycling (zowel demontage als afvalverwerking).

### **Conclusie**

De toepassing van hernieuwbare energiebronnen en energiedragers kent vele variaties in de sectoren gebouwde omgeving, industrie, landbouw en mobiliteit. Over de algemene veiligheidsrisico's van de hernieuwbare bronnen is in het algemeen wel kennis beschikbaar. Echter, juist de toepassing in specifieke domeinen en omstandigheden zorgen voor nieuwe situaties waardoor er over de specifieke veiligheidsrisico's een stuk minder bekend is.

## 5. VEILIGHEIDSRISICO'S EN ONZEKERHEDEN: TERECHTE VREES

In hoofdstuk 1 heb ik laten zien dat de energietransitie een claim legt op de toch al beperkt beschikbare ruimte in ons land en de inrichting van de gebouwde omgeving. De claim op de ruimte wordt nog groter als gevolg van de risicocontouren van de gevaarlijke stoffen die gebruikt worden als onderdeel van de energietransitie. Beide ruimteclaims zijn op de (midden) lange termijn zeker niet eenvoudig vast te stellen. Die claim gaat namelijk gepaard met technologische ontwikkelingen en innovaties waar lang niet altijd zicht op is, laat staan op de hiermee gepaard gaande veiligheidsrisico's. Er wordt in Nederland veel (ruimtelijk) beleid gemaakt om daarmee sturing te geven aan de invulling van de ruimte met activiteiten, zoals energieproductie, -transport, -opslag en gebruik. Echter, de doorvertaling ervan naar (ruimtelijk) veiligheidsbeleid en veiligheidskaders loopt achter op de ontwikkelingen van de energietransitie.

In de hoofdstukken 2, 3 en 4 heb ik aan de hand van de energieketen duidelijk gemaakt dat de verduurzaming van de energieproductie, de opslag, het transport en het verbruik andersoortige veiligheidsrisico's toevoegen aan de reeds bestaande risico's als gevolg van de fossiele energiebronnen. Energie wordt enerzijds meer en meer opgeslagen en getransporteerd in de vorm van allerlei koolstof-vrije moleculen. Afhankelijke van de molecuul-samenstelling gaan hiermee andersoortige incidenteffecten gepaard (toxiciteit) dan met fossiele brandstoffen (brand en explosie). Anderzijds vindt steeds meer elektrificatie plaats met als gevolg de groei van allerlei vormen van energietransport- en opslag in (lithium-ion) batterijen op allerlei plekken in de samenleving.

De nieuwe energie-ketens hebben hun veiligheidsrisico's waarvan we de oorzaken deels kennen, maar kansen op en faalfrequenties van die oorzaken ontbreken veelal nog voor specifieke situaties. Ook zijn de incidenteffecten ten dele bekend, maar stellen andersoortige incidenten en gevolgen van incidenten hulpdiensten tegelijkertijd voor nieuwe opgaven. Denk hierbij aan de thermal runaway bij lithium-ion batterijen, de depositie van silicium deeltjes bij branden met zonnepanelen, biologische gevaren bij biomassa-incidenten, de parapluwerking bij branden met zonnepanelen en onblusbare branden op grote hoogte in gondels van windturbines.

Er is een aantal onderliggende gemeenschappelijkheden als gevolg van de energietransitie aan te wijzen die duidelijk maken dat de veiligheid van de energietransitie zeker geen sinecure is. Sterker, wanneer met enige distantie en door een veiligheidsbril ernaar gekeken wordt, dan vallen mij een vijftal mechanismen op die maken dat de veiligheid van de energietransitie speciale aandacht verdient. Hieronder presenteer ik deze vijf mechanismen.

## **5.1 MECHANISME 1: RISICO'S DICHTER BIJ DE BURGER**

Zowel in het verleden als vandaag de dag vindt de opslag en productie van grote hoeveelheden energie plaats op afstand van woonkernen. Energiecentrales aan randen van steden leveren warmte en elektriciteit die vervolgens de woonkernen, wijken en huizen binnen worden gebracht. Met de energietransitie zien we enerzijds dat wijken van het gas afgaan, hetgeen gunstig is voor de veiligheid (geen gasexplosies, CO-vergiftiging). Anderzijds zien we dat grote hoeveelheden energie, en de hiermee gepaard gaande risico's in de gebouwde omgeving zelf worden opgewekt, bijvoorbeeld met geothermie en zonnepanelen. In woonwijken, bij bedrijventerreinen, kantoren, stadions, bij evenementen en boerenbedrijven verschijnen grote energieopslagsystemen in de vorm van buurtbatterijen. Waterstof wordt in de gebouwde omgeving gebruikt als bron voor warmte en energie voor woningen, aandrijving van bouw materieel en als energiebron op evenemententerreinen. We kennen de waterstofrisico's vanuit de industrie maar in de context van de gebouwde omgeving is die kennis een stuk geringer.

In de gebouwde omgeving zijn de effectgebieden van incidenten qua omvang misschien niet zo groot als in de industrie. Tegelijkertijd zijn er wel meer risicobronnen, meer verspreid, in de gebouwde omgeving en met burgers zeer nabij deze bronnen. Daarnaast beperken zich de veiligheidsrisico's in de gebouwde omgeving niet enkel tot productie, maar vindt in de gebouwde omgeving ook transport, opslag, en gebruik van hernieuwbare bronnen plaats. De energietransitie maakt toepassingen in de gebouwde omgeving decentraler, veelzijdiger en complexer.

De conclusie is dan ook dat als gevolg van de energietransitie veiligheidsrisico's dichterbij de burgers komen.

## 5.2 MECHANISME 2: ALLERLEI ONERVAREN PARTIJEN IN DE ENERGIEKETENS

Het tweede mechanisme betreft de ontwikkeling dat allerlei ‘nieuwe’ partijen (individuele burgers, buurtcollectieven, *start-ups*, *infraproviders*, voertuigfabrikanten) een rol spelen in energieketens. Ze nemen niet alleen energie af van het netwerk, maar gaan steeds meer zelf produceren en verhandelen. Tuinders en boerenbedrijven wekken energie op met biomassa of door middel van geothermie en aquathermie.

Hetzelfde geldt voor burgers. De warmtepomp en zonnepanelen zijn voorbeelden van energieproductie door relatief onervaren producenten in de woonwijken. De opgewekte energie wordt gebruikt voor de verwarming van woningen<sup>34</sup> of het voeden van elektrische apparatuur. De elektrische auto wordt opgeladen aan de eigen laadpaal, met energie die wordt opgewekt door de eigen zonnepanelen, en leveren energie terug aan de woning. En als er een overschot aan energie is opgewekt, wordt die teruggevoerd in het net, verhandeld met de burens, of opgeslagen in thuisaccu's.

Eenzijds is het gevolg hiervan dat risico's dichter bij de (weinig ervaren) producenten komen (zie mechanisme 1). Anderzijds introduceert deze trend ook additionele risico's als gevolg van onervarenheid. Zo wordt de meterkast in woningen en gebouwen alsmäär zwaarder belast, met brandrisico's als gevolg. Burgers die zelf apparatuur bestellen en installeren<sup>35</sup> met allerlei installatierisico's (verkeerde randapparatuur, inferieure producten, installatiefouten, ...) van dien. Die onervarenheid is een extra risico in het geval er storingen of incidenten optreden omdat als gevolg van gebrek aan kennis en ervaring over hoe te handelen.

De conclusie is dan ook dat tal van onervaren partijen energieproductie en -opslagactiviteiten uitvoeren, zonder daarin geschoold te zijn.

---

34 Een veiligheidswinst die hiermee samenhangt betreft koolmonoxidevergiftiging in woningen. Die zullen niet meer optreden als woningen verwarmd worden door stadsverwarming of een warmtepomp in plaats van aardgas.

35 De plug-and-play thuisbatterij is in de supermarkt te kopen, modulaair uitbreidbaar en worden aangesloten met een stekker in het bestaande stopcontact op de bestaande elektrische installatie. Plugandplay thuisbatterijen zijn relatief nieuw. Dat brengt risico's met zich mee die door Brandweer Nederland op een rij zijn gezet. Tevens heeft Brandweer Nederland in april 2026 een aantal tips gepubliceerd om brandgevaar te voorkomen/beperken [Thuisbatterij met stekker? Zo voorkom je brandgevaar - Brandweer](#)

### 5.3 MECHANISME 3: VERSNIPPERING IN NIEUWE ENERGIEKETENS

De fossiele energieketens (energieproductie, -opslag, -transport en -gebruik) zijn in decennialange samenwerking tussen partijen ontwikkeld en steeds verder verbeterd. Partijen hebben jarenlange ervaringen met hun eigen processen en producten. Ze werken al voor lange periodes samen met voor hen bekende partijen, kennen de veiligheidsstandaarden en procedures over en weer, en verantwoordelijkheden zijn veelal eenduidig belegd. Met de energietransitie ontstaan nieuwe energieketens met nieuwe samenwerkingsverbanden en met nieuwe producten en technologieën. Zo verhuren gebouwegenaren hun daken aan bedrijven, die op hun beurt die vierkante meters verhuren aan energiecorporaties, die deze daken volleggen met zonnepanelen, en de energie afleveren aan gebruikers, terugleveren aan het net, of ter plekke opslaan in een energieopslagsysteem. De eigenaar van het energieopslagsysteem kan een andere persoon/instantie zijn dan de gebouwegenaar of de exploitant. Soortgelijke versnippering over partijen zien we terug bij windturbines, waarbij de eigenaar van de turbine kan verschillen van de exploitant, en beheer en onderhoud op hun beurt weer zijn uitbesteed aan een andere partij. Het gevolg hiervan is dat het onduidelijk is wie nog weet heeft van de werking van het geheel van de turbine, wie waarvoor verantwoordelijk is en wie de brandweer bij calamiteiten kan raadplegen voor systeeminformatie ten behoeve van de incidentbestrijding.

Daarbij komt dat de nieuwe energieketens zich ook uit strekken tot na de primaire toepassing. Denk hierbij aan de retourstromen bij LOHC's of de gebruikte batterijen van bijvoorbeeld elektrische voertuigen. Batterijen die voor (elektrische) auto's niet meer voldoen omdat de verhouding tussen energie-inhoud en gewicht (te veel) is afgenomen, kunnen in stationaire toepassingen nog goed dienstdoen en zo in tweedehandscircuits terecht komen. Bij verongelukte elektrische auto's zien we dat de veiligheidszorgen omtrent de stabiliteit van het batterijpakket zich in de gehele autorecyclingketen voordoen: van de berger, de autohandelaar, het schadeherstelbedrijf, tot aan het autodemontagebedrijf aan toe. Zij allen spelen een rol bij de verwerking van de elektrische schadeauto, terwijl de veiligheidsrisico's van de gebruikte, en mogelijk beschadigde, batterij op voorhand lastig zijn in te schatten.

De conclusie is dan ook dat nieuwe energieketens zich ontwikkelen, waarbij activiteiten zijn versnipperd over tal van (nieuwe) spelers en waarbij (te) weinig (keten)regie plaatsvindt.

#### **5.4 MECHANISME 4: ONBEKENDE RISICO'S, WEINIG DATAOPBOUW**

Het zal duidelijk zijn. De energietransitie voltrekt zich op tal van aspecten (zie de hoofdstukken 2, 3 en 4). Risico's worden voor een groot deel ook bepaald door de omgeving waarin de risicovolle activiteiten zich voordoen. Door de energietransitie zien we in de gebouwde omgeving ten opzichte van de industrie kleinere en decentrale activiteiten. We kennen de risico's van die activiteiten wel in een industriële context, maar het is juist de combinatie van die activiteiten in een andere omgeving waardoor er specifieke risico's ontstaan, die we op voorhand niet zien of niet (her)kennen. Dit heeft tot gevolg dat de opbouw van kennis en ervaring, datasets over het functioneren van deze technologieën en over hun faalscenario's en -frequenties, lastig (snel) zijn te verkrijgen. Daar komt bij dat er over de energietransitie in de gebouwde omgeving nog weinig ervaringen en cijfers zijn omtrent het functioneren van relatief onervaren organisaties en het menselijk gedrag.

De conclusie is dan ook de dat energietransitie gepaard gaat met een gebrek aan datasets waarmee de oorzaken en gevolgen van veiligheidsrisico's relatief beperkt onderbouwd en gekwantificeerd zijn.

#### **5.5 MECHANISME 5: SNELLE ONTWIKKELINGEN, ONTBREKENDE VEILIGHEIDSKADERS**

Wettelijke veiligheidskaders ijlen per definitie na op maatschappelijke en technologische ontwikkelingen. Echter, zeker ten behoeve van de veiligheid van burgers, dient die veiligheid tijdig en goed te zijn geborgd. Wettelijke kaders vormen hiertoe een belangrijk sturingsinstrument voor de overheid.

De ontwikkelingen en toepassing in het kader van de verduurzaming zijn veelzijdig en gaan razendsnel. We zien dat batterijtechnologie zich snel ontwikkelt: van loodaccu's naar lithium ion, met honderden subvarianten, naar sodiumbatterijen en vaste stof en gesmolten zout batterijen. Windturbines zijn in enkele jaren in omvang qua hoogte en capaciteit verdubbeld, in 10 jaar tijd zijn de daken van Nederlandse huishoudens

behoorlijk vol gelegd met zonnepanelen, en het aandeel elektrische auto's neemt gestaag toe. Energieopslag vindt plaats in grote energieopslagsystemen in woonwijken (buurtbatterijen), bouw- en festivalterreinen, fietsenhandelaren en -stallingen zijn (onbewust) verworpen tot grote opslagen van energie en meer en meer woningen hebben thuisbatterijen.

Al deze ontwikkelingen zijn logischerwijs niet bij te benen door de wet- en regelgeving. Zo zagen we dat sommige lokale overheden het parkeren en opladen van elektrische auto's in parkeergarages verboden, terwijl andere gemeentes hier geen belemmeringen oplegden. Sommige overheden (omgevingsdiensten mede op advies van veiligheidsregio's) stelden extra eisen aan de plaatsing van buurtbatterijen, terwijl andere deze aanvankelijk vrijlieten. In de Verenigde Staten en Australië zijn er forse eisenpakketten aan de plaatsing van thuisbatterijen (over de plaatsing in garage of op afstand van deuren/ramen, afwerking met brandvertragende materialen, bescherming tegen aanrijdgevaar, verplichte rook- of hitemelders, en uitgebreide installatievoorschriften (met eisen over onder meer de locatie, ventilatie en bekabeling), terwijl in Nederland hier (nog) geen eisen aan zijn gesteld (en er ondertussen al tienduizenden woningen met dit soort energieopslagsystemen in Nederland zijn uitgerust).

En in de industrie zien we soortgelijke hiaten. Bijvoorbeeld met betrekking tot veiligheid bij de opslag van waterstof. Wettelijk is nu alleen iets geregeld voor de opslag van meer dan 5.000 kg waterstof. Opslag van gasvormig waterstof is niet aangewezen als een milieubelastende activiteit waardoor bevoegd gezagen een wettelijke basis ontberen om daar op gebied van veiligheid iets van te vinden. De overheid heeft wel zogenaamde 'richtsnoeren' opgesteld, maar die zijn niet juridisch bindend, en vormen daarmee geen basis en garantie voor veiligheid.

De conclusie is dat wet- en regelgeving voor tal van ontwikkelingen binnen de energietransitie ontbreekt of fors na-ijlt.

### **Terechte vrees**

Veiligheidsrisico's komen dichterbij de burger, en de burger zelf is tegelijkertijd ook medeveroorzaker van zijn eigen veiligheidsrisico'. Wettelijke kaders om veiligheid te borgen ontbreken, het geen juist ook (onervaren) nieuwkomers relatief eenvoudig de kans biedt tot toetreding op een ontluikende markt. Versnippering van activiteiten en verantwoordelijkheden door

nieuwe energieketens vergroten de kwetsbaarheid van schakels in die ketens. Als gevolg van nieuwe technologieën, toegepast in een andere context, met nieuwe spelers en ontbrekende wettelijke kaders, zullen (onzekerheden over) de veiligheidsrisico's van de energietransitie noemenswaardig zijn. Die onzekerheden betreft ook het beleid. Beleidsmakers zijn niet in the lead bij die ontwikkelingen, zijn volgend, en verkeren daarmee in onzekerheid over welke kant de ontwikkelingen op gaan. Zij kunnen derhalve ook moeilijk invulling geven aan veiligheidsbeleid omdat de technologie nog niet bekend is, laat staan is uitgewerkt.

Het zal duidelijk zijn dat de vijf hierboven genoemde mechanismen risico's en onzekerheden binnen de energietransitie introduceren die aanleiding geven voor vrees. Om de energietransitie te faciliteren en de vrees weg te nemen zullen de onzekerheden en veiligheidsrisico's expliciet moet worden verkend, herkend, en erkend, om ze vervolgens te begrijpen en er prudent mee om te gaan. Het volgende hoofdstuk doe ik hiertoe een eerste (hoopgevende) aanzet.

## 6. OMGAAN MET ONZEKERHEID EN VEILIGHEIDSRISICO'S: ER IS HOOP

Uit bovenstaand wordt duidelijk dat met de ontwikkelingen in de energietransitie een scala aan veiligheidsrisico's en bijbehorende onzekerheden gepaard gaat. Alle risico's uitsluiten/voorkomen is onmogelijk en ook niet wenselijk: Nederland zou stil komen te staan. De vraag is veel meer hoe met de risico's en de onzekerheden hieromtrent om te gaan. Ik zoek het antwoord in mijn leerstoel voor een behoorlijk deel in kennisopbouw via de wetenschap. Vanuit de wetenschap zie ik denkrichtingen over veiligheid die voor wat betreft hun kern, wat mij betreft goed passen op de energietransitie. Het betreft de standaardwerken van Kaplan and Garrick (1981) over de kwantificering van risico's, de Normal Accident Theory van Perrow (1984), en de Black Swan Theory van Taleb (2007). Ik presenteer ze kort in paragraaf 6.1. Op basis van deze wetenschappelijke theorieën en de kennis van de veiligheidsrisico's van de energietransitie kom ik tot een viertal richtingen (paragrafen 6.2 t/m 6.5), die elk afzonderlijk en in combinatie met elkaar bijdragen aan het verantwoord en veilig verder brengen van de energietransitie.

### 6.1 DE WETENSCHAPPELIJKE INBEDDING

Kaplan en Garrick (1981) definiëren risico niet als één getal, maar als een set van scenario's, elk beschreven door drie vragen:

- Wat kan er misgaan?
- Hoe waarschijnlijk is dat?
- Wat zijn de gevolgen?

In hun ogen is risico geen kans, geen schade en geen norm, maar het geheel van mogelijke toekomstige ontwikkelingen die ontwerpers, beleidsmakers, risico-analisten bereid zijn serieus te nemen. Risico is dus niet een enkel getal, maar een gestructureerd verhaal, aan de hand van scenario's, over wat er zoal mis kan gaan. Het vormt dan ook geen waarheidsclaim, maar veel meer een besluitvormingskader waarin aannames, scenario's, kansschattingen en verdeling van gevolgen en de hiermee gepaard gaande onzekerheden worden geëxpliciteerd en gekwantificeerd. De toegevoegde waarde van de kwantificering is niet zozeer het berekende risico. Veel meer vormt het risico de gestructureerde basis voor het goede

gesprek. Daarmee wordt veiligheid transparant, uitlegbaar en bespreekbaar.

En dat is exact wat er nodig is om de energietransitie te faciliteren. We kennen namelijk niet alle faalmechanismen en incidentscenario's: nieuwe technologieën komen in een andere context dan voorheen, en vragen om een gestructureerde benadering.

Er is ook een schaduwzijde aan deze benadering. Schijnzekerheden als gevolg van berekeningen liggen op de loer, en maatschappelijke waarden raken ondergesneeuwd als gevolg van het rekenwerk met behulp van risicomodellen. Data is schaars en systemen zijn verweven waardoor kwantificeringen van risico's lastig zijn. Het probleem van risicomodellen is niet dat ze rekenen, maar dat ze soms verhullen waarover niet gerekend kán worden.

Perrow (1984) gaat in zijn standaardwerk over *Normal Accidents* ook in op de beperkte kenbaarheid van risico's. Als gevolg van onverwachte interacties en verwevenheid tussen (sub)systemen zijn oorzaak en gevolgrelaties niet lineair of voorspelbaar. De strakke verwevenheid van systemen veroorzaakt dat er weinig tijd, ruimte of buffer is om fouten te absorberen, met als gevolg dat ongevallen geen uitzondering zijn, maar eerder structurele mogelijkheden van het systeemontwerp zijn. Zoals gemeld, de energietransitie leidt tot een toenemende complexiteit (versnippering, decentralisatie, variëteit) en de onderlinge verwevenheid van duurzame activiteiten neemt toe. Perrow's Normal Accident Theory dwingt ons om eerlijk te zijn over de grenzen van de beheersbaarheid van risico's, en geeft tegelijkertijd de prikkel om hier verantwoordelijk mee om te gaan. En dat past goed bij de kenmerken van de energietransitie. In een duurzaam energiesysteem zullen niet per definitie meer of minder fouten/incidenten optreden – maar andere, en met andere gevolgen. Onverwachte interacties en onvoorziene verwevenheden liggen hieraan ten grondslag. De schaduwzijde van Perrow's benadering is dat het het lerende vermogen en adaptiviteit van organisaties en systemen onderschat. Voor veerkracht is geen plek in Normal Accident Theory.

Taleb (2007) adresseert die adaptiviteit en veerkracht juist wel. In het kader van zeldzame, onverwachte gebeurtenissen met grote (negatieve) impact

introduceert Taleb het begrip 'black swan' (zwarte zwaan). Een *black swan* kenmerkt zich door:

- Een zeldzame/buiten verwachting zijnde gebeurtenis
- Met grote impact
- Die achteraf verklaard logisch is (*hindsight bias*)

In Taleb's visie is niet het onverwachte zelf het probleem, maar hoe systemen ermee omgaan. De energietransitie kenmerkt zich door nieuwe en onderling verbonden technologieën, nieuwe spelers en onderlinge relaties, nieuwe ruimtelijke configuraties en bestuurlijke haast. Het zijn de complexiteit en de snelheid van de energietransitie die, in termen van Taleb, de oorzaak zijn van fragiliteit. Hoe complexer en meer onderling verbonden een systeem, des te kwetsbaarder het is voor extreme gebeurtenissen. Taleb bekritiseert dan ook a) benaderingswijzen die modelleren op basis van gemiddelden, b) de inschatting van risico's op basis van historische data en c) de focus op waarschijnlijkheden in plaats van impact. In zijn optiek dient de aandacht meer te liggen op veerkracht, adaptiviteit en herstelvermogen. Voor de energietransitie zou dit neerkomen op een verschuiving van de preventie van bekende risico's naar ontwerpen voor het onbekende.

Met de denkrichtingen van Kaplan en Garrick, Perrow en Taleb als basis kom ik tot vier aanzetten waarmee de veiligheidsanalyses van de energietransitie kunnen worden verbeterd, te weten safety by design (paragraaf 6.2), ketenbenadering van veiligheid (paragraaf 6.3) en integrale veiligheidsanalyse (paragraaf 6.4). Omdat elk van deze aanzetten gepaard gaat met onzekerheden is mijn vierde aanzet gericht op de omgang met die onzekerheden.

## 6.2 SAFETY BY DESIGN

In de hoofdstukken 2 tot en met 4 heb ik tal van (oorzaken van) incidenten geschetst die met de energietransitie samenhangen. Veiligheid kan op diverse manieren gestuurd worden.

Op het gebied van *safety by design* (SbD) zijn de afgelopen jaren enkele nuttige handvatten gepubliceerd die deze aanpak ook inhoudelijk richting geven (TUDelft (2025); JRC, (2025)). Aspecten die onderdeel uitmaken van de SbD-aanpak zijn:

- Een brede veiligheidsanalyse: het betreft een analyse die ook gericht is op de lange termijn, in plaats van enkel de acute en korte termijn risico's te bestuderen. Het gaat daarbij ook om milieu- en gezondheidsaspecten van ontwikkelingen/innovaties,
- Een beschouwing door de gehele levenscyclus: beschouw alle levensfasen van de ontwikkeling of het product: van de productie zelf, het gebruik tot en met het einde van de levenscyclus (2e levensfase, ontmanteling of sloop),
- Hanteer het voorzorgsprincipe: De invulling daarbij is dat men in situaties van onzekerheid aanneemt dat er wel een ernstig gevaar zou kunnen zijn en worden de scenario's derhalve daarop afgestemd en verder onderzocht (in plaats van aannemen dat iets veilig is, als er geen bewijs van gevaar is).
- Systeemdenken: waarbij verder wordt gekeken dan de grenzen van de het eigen product, ontwerp of installatie en anticipeert op kettingreacties en wisselwerkingen binnen het grotere systeem.

En ook in het ruimtelijke domein (omgevingsveiligheid) zijn SbD-handvatten voor handen. Zo zijn er de zeven ontwerpprincipes voor een veilige omgeving (OVO, 2017):

- Vluchtroutes: om zelfredzaamheid van personen in geval van incidenten te faciliteren, door vluchtroutes weg van de risicobron
- Bereikbaarheid voor hulpverleningsdiensten: aanrijdroutes richting de risicobron die geschikt en bij incidenten vrij zijn voor hulpverleningsvoertuigen
- Populatie-dichtheid: hoe minder personen nabij de risicobron, des te gering het (groeps)risico
- Maatregelen aan het gebouw: door maatregelen te treffen waardoor gebouwen beter bestand zijn tegen brand of explosies, en installaties aan te brengen die giftige stoffen in gebouwen beperken, kunnen gebouwen bescherming bieden aan personen
- Risicocommunicatie: het vooraf verstrekken van handelingsperspectieven aan omwonenden in geval van incidenten
- Kwetsbare groepen: het betreft groepen mensen die door omstandigheden minder mogelijkheden hebben om zichzelf in veiligheid te brengen. Deze groepen dienen buiten het invloedsgebied van met name brand en explosie van risicobronnen te worden gesitueerd.
- Afstand tot de risicobron: hoe groter de afstand tussen de risicobron en -ontvanger, des beter het is voor de veiligheid.

De hierboven beschreven SbD-aanpak is voor een belangrijk deel een technische benadering. De principes uit de *High Reliability Organisations (HRO) theory* hebben in deze toegevoegde waarde. HRO-theory benadert veiligheid niet als een technisch eindpunt maar als een continue, organisatorische prestatie. De vijf HRO-principes zijn dan ook relevant bij het organiseren van veiligheid (Weick en Sutcliffe, 2007):

- Wees alert op onverwachte gebeurtenissen: Niet: “het gaat meestal goed”, maar: “*wat zien we mogelijk over het hoofd?*”,
- Niet over simplificeren en versimpeling in redeneringen,
- Stel de operatie centraal: Aandacht voor wat er *hier en nu* gebeurt in installaties, transportketens en gebruik,
- Organiseer veerkracht: Niet alleen preventie, maar zeker ook herstelvermogen
- Respect voor expertise: Autoriteit verschuift naar degene met de meeste situatiekennis.

Uit bovenstaande handvatten volgt dat de samenhang tussen techniek, organisatie en gedrag in belangrijke mate bepalend is voor de veiligheid van een systeem, product of proces. Cruciaal daarbij is, dat bij het ontwerp van systemen, het menselijk gedrag als uitgangspunt wordt genomen. Daarbij maakt het niet uit of dit het gedrag van de werknemer, de burger of de incidentbestrijder is. Zijn/haar gedrag dient in het ontwerp van systemen, procedures en de organisatie expliciet te worden meegenomen. In dit geval spreek ik van multidisciplinair ontwerpen: specialisten vanuit verschillende vakgebieden werken samen aan de veiligheid van gehele ontwerp.

*Safety by design* in het kader van de energietransitie is dan ook sterk gebaat bij een transdisciplinaire aanpak: wetenschappelijke disciplines en praktijkkennis (overheden, private partijen, kennisinstellingen burgers) komen bij elkaar om vraagstukken uit te werken.

Tot slot betekent *safety by design* dat bij het ontwerp niet alleen wordt gestreefd naar het verkleinen van de kans op een incident, maar dat ook expliciet wordt meegenomen of en hoe een eventueel incident (door de hulpverlening/brandweer) beheerst kan worden. Het is namelijk belangrijk dat restrisico's niet impliciet worden afgewenteld op de brandweer, maar dat het ontwerp zodanig is dat een eventueel optreden door de brandweer realistisch, veilig en effectief kan plaatsvinden. Belangrijk bij dat laatste is

dat de repressie in het ontwerp van bouwwerken, installaties en organisaties en de inrichting van ruimte beschouwd moet worden. En dat, zonder de veiligheidsrisico's simpelweg op de repressie af te schuiven.

Vanuit een veiligheidspiramide-gedachte (zie figuur 5) zal duidelijk zijn dat de basis voor veiligheid in het ontwerp, en derhalve in de preventie (risicobeheersing), gerealiseerd moet worden. In de risicobeheersing kunnen incidenten voorkomen worden, kan de kans erop worden verkleind en ook omgevingseffecten worden beperkt. Toch zal het een keer misgaan, en zullen effecten zich in de omgeving kunnen manifesteren. De veiligheid van personen in de omgeving kan even zozeer 'ontworpen' worden, en vormt de middenlaag in de veiligheidspiramide. Allereerst kan een risicobebanding bijdragen aan een bepaalde minimale mate van omgevingsveiligheid (kans op overlijden van persoon in de omgeving van een potentieel gevaarlijke activiteit). Daarnaast kan gedacht worden aan technische omgevings- en bouwmaatregelen, maar ook aan voorlichting voor omwonenden over wat te doen bij bepaalde effecten van incidenten. Het bruggetje naar de incidentbestrijding is 'snel' gemaakt. In de omgeving kunnen voorzieningen ontworpen worden die de incidentbestrijding faciliteren zoals het garanderen van bereikbaarheid door hulpdiensten en beschikbaarheid van bluswater. De incidentbestrijding zelf, het topje van de piramide, vraagt ook om speciale aandacht. We zagen al dat er als gevolg van de energietransitie andersoortige incidenten ontstaan, met andersoortige effecten. Die vragen soms ook om andersoortige handelingsperspectieven voor hulpverleners, en soms ook ander materieel, persoonlijke beschermingsmiddelen en materialen. Aandacht hiervoor dient al vroegtijdig in het ontwerp aan bod te komen. In het ontwerp wordt namelijk ook de basis gelegd voor het veilig en effectief op kunnen treden door de brandweer.



Figuur 5: De veiligheidspiramide.

Deze safety by design aanpak vraagt enerzijds van systeem-ontwerpers, projectontwikkelaars en beleidsmakers een open houding naar risicobeheersing, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding. Anderzijds vraagt dit van professionals bij de veiligheidsregio's een constructieve en meedenkende houding over veiligheid, zonder daarmee de verantwoordelijkheid voor de veiligheid van het ontwerp over te nemen. Die verantwoordelijkheid is en blijft van de initiatiefnemer/eigenaar/beheerder.

Veiligheidsregio's lijken wat minder dan vroeger (begin jaren 2000) te denken vanuit het concept van de veiligheidsketen (proactie<sup>36</sup>, preventie, preparatie, repressie en nazorg). Dit concept acht ik echter nog altijd van grote waarde om vanuit veiligheidsregio's bij te dragen aan de veiligheid van de energietransitie. Duidelijk zal zijn dat juist door een goed doordacht ontwerp, kansen op incidenten en de effecten ervan beperkt kunnen worden. Dat het merendeel van de ontwerpinspanning gericht zal (moeten) zijn op het verkleinen van de ongevalskans is mijns inziens logisch (hoewel Taleb hier wat anders tegenaan kijkt). Daarnaast kunnen juist ook met slimme ontwerpprincipes (decompositie, kleinere volumes, onderlinge afstanden, *fail safe* principes) effecten van incidenten worden beperkt. Maar omdat dergelijke ontwerpprincipes tegelijkertijd kunnen leiden tot hogere ongevalskansen (met kleinere effecten), vraagt dit om een goed samenspel bij het doordenken, en waar mogelijk kwantificeren van de risico's door ontwerpers, veiligheidsadviseurs en incidentbestrijders (Kaplan en Garrick).

Traditionele methoden zoals foutenbomen (linkerdeel van de vlinderdas (zie figuur 6 hieronder), gebeurtenissenbomen (rechterdeel van de vlinderdas) niet altijd meer voor 'nieuwe', niet eerder ontworpen, systemen zoals die binnen de energietransitie. Ze gaan uit van de kenbaarheid van de risico's en zijn grotendeels gericht op technische aspecten. De werkelijkheid van de energietransitie is complexer, minder lineair, uiterst dynamisch en met sterke onderlinge verwevenheid en strakke koppelingen. De uitdaging is om aanpakken, methoden en technieken te ontwikkelen die gebruikt kunnen worden om veiligheid goed in het ontwerp verankerd te krijgen, daarbij rekening houdend met genoemde complexiteiten.

---

36 Waarbij proactie refereert aan intrinsiek veilig ontwerpen (safety by design) om (kansen op) ongevallen zoveel mogelijk te voorkomen, dan wel te verkleinen.

### 6.3 KETENBENADERING VAN VEILIGHEID

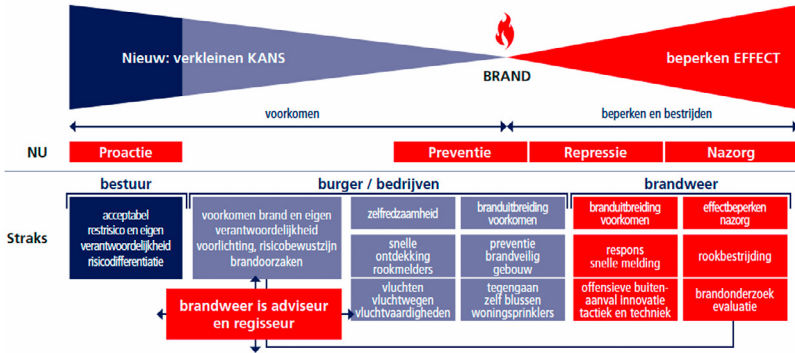
De energieketen met de schakels productie, opslag, transport, gebruik kennen allen hun specifieke hernieuwbare energietoepassingen met 'eigen' risico's. (Ontwerp)keuzes in de ene schakel beïnvloeden niet alleen de veiligheid in diezelfde schakel, maar ook in de voorliggende en volgende schakels. Er worden afzonderlijke veiligheidsstudies uitgevoerd voor de productie van hernieuwbare energie, afzonderlijke risicoanalyses voor het transport en opslag en veiligheidsbeschouwingen over het gebruik van hernieuwbare energiebronnen en - dragers. Tot op heden is er weinig oog voor de veiligheidsrisico's voor het totaal van de gehele keten. Het probleem daarmee is dat de veiligheid binnen één schakel uit de keten wordt 'beschouwd' in plaats van over de gehele keten: keuzes en maatregelen in een van de schakels in de energieketen zijn ook verderop in de keten van invloed op de veiligheid. Het maakt bijvoorbeeld nogal uit voor de opslag van energie, of je energie vervoert in de vorm van ammoniak (toxisch gas) of waterstof (brandbaar en explosief gas). Een beschouwing van de veiligheid door de gehele energieketen (en daarmee het volgen van de moleculen en elektronen door de keten) en ook de overgangen tussen schakels in de keten, is van grote waarde voor het maken van veiligheidsbeleidskeuzes met betrekking tot de energievoorziening van de toekomst en de hiermee samenhangende ruimtelijke ordening en omgevingsveiligheid. Zonder die beschouwingen en ketenanalyses zelf uit te gaan voeren, zou dit, zoals in de vlinderdas hieronder geëxpliciteerd, wel degelijk passen bij de brandweer in de rol van adviseur en regisseur.

Vanuit de veiligheidsregio's is het streven naar het voorkomen van incidenten/verkleinen van de kans op incidenten mooi gevisualiseerd voor brandveiligheid door Brandweer Nederland (2022)<sup>37</sup> in de onderstaande 'vlinderdas' (zie figuur 6). De linkerkant van de vlinderdas is gericht op het verkleinen van de kans op incidenten. Dit vraagt ook vanuit de veiligheidsregio's om inbreng te leveren al in het ontwerp. Dat is relatief nieuw, en ook lastig omdat veiligheidsregio's een generieke (uitvoerings)dienst zijn en niet van elk ruimtelijk of technisch ontwerp in detail alle *ins and outs* kunnen weten, laat staan er voor verantwoordelijk zijn. Maar in samenspraak met ontwerpers burgers en bedrijven valt hier zeker winst te halen voor wat

---

37 [Nieuwsbrief\\_sjabloon.indd](#)

betreft adviseren over en regisseren van veiligheid, en daarbij het meenemen van effecten en mogelijkheden voor effectbeperking in het ontwerp (de linkerzijde van de vlinderdas). Voor de structurering van de eigen inbreng van de veiligheidsregio's kan de veiligheidsketen houvast bieden.



Figuur 6: De vlinderdas.

## 6.4 INTEGRALE VEILIGHEIDSBENADERING

Duidelijk zal zijn de energietransitie tot andersoortige veiligheidsrisico's zal leiden dan de traditionele fossiele risico's. Het betreft andersoortige risico's voor diverse risico-ontvangers:

- Werknemers: degenen die professioneel binnen de energietransitie aan het werk zijn, zoals een chauffeur van een waterstof of elektrisch aangedreven bus, de operator van een ammoniakopslagfaciliteit (arbeidsveiligheid) of onderhoudsmedewerker van windturbines<sup>38</sup>
- Burgers: degenen die zelf verduurzamen met bijvoorbeeld zonnepanelen, thuisbatterijen of e-mobiliteit of vanwege het feit dat ze in de nabijheid

<sup>38</sup> In Nederland wordt de basis voor de veiligheid van de werknemers geborgd door de Arbeidsomstandighedenwet. Werkgevers zijn verplicht ervoor te zorgen dat hun werknemers veilig en gezond kunnen werken. Wat dit precies betekent, staat in de Arboret, het Arbobesluit en de Arboregeling. De Arbeidsinspectie houdt toezicht op de naleving van de regelgeving door werkgevers. Daar waar de regels worden geschonden is de Arbeidsinspectie bevoegd te sanctioneren, door werkgevers te waarschuwen, te beboeten of het werk stil te leggen.

van een energietransitie-activiteit wonen, werken, recreëren zoals nabij een buurtbatterij of vervoer van koolstof-vrije moleculen (omgevingsveiligheid).

- Hulpverleners: degenen die bij incidenten de gevolgen ervan bestrijden/proberen te reduceren (incidentbestrijding).

Arbeidsveiligheid en omgevingsveiligheid zijn in risicoanalyses gescheiden werelden. In arbeidsveiligheid gaat het over de gezondheid van werknemers. Bij omgevingsveiligheid staat de kans op overlijden van omwonenden centraal. De veiligheidsrisico's voor incidentbestrijders (ongeacht de gezondheid of kans op overlijden) komen in risicoanalyses en vroegtijdige ontwerpfasen in zijn geheel niet aan bod. Gezondheidsrisico's zijn voor werknemers, omwonenden én incidentbestrijders van belang. Gezondheidsrisico's risico's duiden op een verhoogd gevaar voor het ontstaan van ziektes, aandoeningen of verminderd functioneren. Zij onderscheiden zich daarmee gevoelsmatig van veiligheidsrisico's als gevolg van brand, explosie en (acute) vergiftiging door enerzijds de ogenschijnlijk meer focus op de langere termijneffecten. Anderzijds kunnen het ook negatieve effecten betreffen die niet alleen de fysieke gezondheid treffen, maar ook de psychische of sociale gezondheid aantasten.

Het kernpunt is dat mensen voldoende beschermd moeten worden tegen veiligheidsrisico's door derden. Ieder mens is gelijk, maar tegelijkertijd maakt de wetgever onderscheid in die bescherming als gevolg van verschillen in functie van een persoon en de locatie waar die zich bevindt. Mensen binnenshuis worden beschermd met de Omgevingswet. De gezondheid en veiligheid van werknemers op de locatie worden beschermd door de Arbowet. De Arbowet kan niet voorkomen dat de brandweer risico's loopt. De brandweer is de *final line of defence*. Restrisico's als gevolg van de energietransitie mogen wat mij betreft niet op de brandweer afgewenteld worden en dienen derhalve zorgvuldig en vroegtijdig in de besluitvorming meegewogen te worden.

Het zou daarom goed zijn om de werelden van gezondheid en veiligheid en de werelden van arbeidsveiligheid, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding nadrukkelijker met elkaar in de analyses van de (nieuwe) risico's met elkaar te verbinden. Ik spreek in dit kader van een meer integrale benadering. De verbindende schakel tussen de verschillende risico-ontvangers en effecten kan gevormd worden door incidentscenario's (cf

Kaplan en Garrick). In dit geval is dan niet zozeer het berekende risicogetal de kern, maar vormen de scenario's de gestructureerde basis voor het goede gesprek.

Tot slot, hoort bij een integrale benadering ook het in beeld brengen van 'veiligheidswinst' als gevolg van nieuwe ontwikkelingen. Bepaalde fossiel gerelateerde veiligheidsrisico's zullen verdwijnen als gevolg van de introductie van hernieuwbare bronnen. Ter illustratie: gasexplosies in woningen treden, *ceteris paribus*, niet meer op als woningen verwarmd worden met behulp van warmtepompen geothermie of airco's en er niet meer op gas gekookt wordt.

## 6.4 OMGAAN MET ONZEKERHEDEN

Hierboven heb ik de richtingen geschetst waarin ik denk dat er met veiligheid binnen de energietransitie kan worden omgegaan. Het betreft voor een behoorlijk deel analytische uitwerkingen van risico's waar (uiteindelijk) besluiten over genomen moeten worden door ontwerpers, ruimtelijke planners en beleidsmakers. Voor een deel betreft het risico's waarvan we de kans en de mogelijke effecten ten dele kunnen inschatten en dus kunnen berekenen. Voor een deel ook niet. In beide gevallen is er sprake van een bepaalde mate van onzekerheid. De omgang met die onzekerheid is een cruciaal aspect van de veiligheid van de energietransitie in de gebouwde omgeving.

Op deze plek is het daarom belangrijk het verschil tussen risico en onzekerheid nog eens expliciet te duiden. Knight (1921) duidt met de term risico op het berekenbare (de waarschijnlijkheid van een gebeurtenis vermenigvuldigd met het verlies als de gebeurtenis zich voordoet) en dus beheersbare deel van alles dat onbekend is. Het resterende deel is onzeker—onberekenbaar en onbeheersbaar. Risico kan daarom worden beschouwd als een vorm van onzekerheid. Risico betreft een relatief laag niveau van onzekerheid dat redelijk kan worden gekwantificeerd met behulp van schades en waarschijnlijkheden.

Bij de energietransitie gaat het per definitie om ontwerpvragestukken, beleid en besluitvorming onder onzekerheid: systemen zijn onderling sterk verweven, zijn relatief nieuw, met deels onbekende interacties en incidentscenario's en waarvoor wettelijke kaders nogal eens niet bestaan.

Met dat laatste ontstaat er ook een bepaalde mate van beleidsonzekerheid, met als gevolg dat bedrijven ook hun gedrag aanpassen. Burgers en bedrijven stellen investeringen in duurzame projecten uit of bedrijven vertragen onderhoud aan fossiele installaties. Ook besluiten niet nemen, geen beleid maken of activiteiten niet uit te voeren, zijn 'acties' die de veiligheid beïnvloeden.

Besluitvorming onder onzekerheid verwijst naar de onzekere toekomstige toestand die zich kan uitstrekken van geringe onzekerheid tot zeer grote onzekerheid. Marchau et al (2019) onderscheiden vier niveaus van onzekerheid binnen het onzekerheidsspectrum variërend van 'alles exact weten' tot 'totale onwetendheid':

**Niveau 1 onzekerheid:** Onzekerheid verwijst naar situaties waarin men erkent dat men niet absoluut zeker is, maar men ziet geen noodzaak voor, of is niet in staat om de mate van onzekerheid op een expliciete manier te meten. Door gebruik van 'eenvoudige' gevoeligheidsanalyse met kleine variatie in modelparameters kan met deze onzekerheden worden omgegaan.


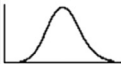



**Niveau 2 onzekerheid:** hierbij wordt aangenomen dat het systeemmodel of de invoer ervan probabilistisch kan worden beschreven, of dat er een paar alternatieve scenario's zijn die voldoende nauwkeurig kunnen worden voorspeld (en waaraan waarschijnlijkheden kunnen worden toegekend). De instrumenten van waarschijnlijkheid en statistiek kunnen worden gebruikt om problemen op te lossen die betrekking hebben op deze onzekerheden.

**Niveau 3 onzekerheid:** het betreft situaties waarin er een beperkte set van plausibele toekomst, systeemmodellen, uitkomsten of weegfactoren is, en daaraan geen waarschijnlijkheden kunnen worden toegekend. In deze gevallen wordt doorgaans gebruik gemaakt van 'traditionele' scenarioanalyses.

**Niveau 4 onzekerheid:** Dit niveau vertegenwoordigt het diepste niveau van erkende onzekerheid. Er kan een onderscheid worden gemaakt tussen situaties waarin we nog steeds in staat zijn (of aannemen) om de toekomst te begrenzen aan de hand van vele plausibele toekomst (4a) en situaties waarin we alleen weten dat we het niet weten (4b). Dit vacuüm kan te wijten zijn aan een gebrek aan kennis of gegevens over het mechanisme of

de functionele relaties die worden bestudeerd (4a), maar het kan ook voortkomen uit de mogelijkheid van onvoorspelbare, verrassende gebeurtenissen (4b) (Taleb (2007)).

Marchau et al (2019) hebben de niveaus van onzekerheid in de onderstaande matrix gevisualiseerd (zie figuur 7). Van links naar rechts valt de toename van de mate van onzekerheid te lezen. Van boven naar beneden zijn systeem-onderdelen/conceptualisaties ten behoeve van de besluitvorming en veiligheidsanalyses, gegeven. In de cellen van de matrix staan de karakteristieke kenmerken voor de besluitvorming en veiligheidsanalyses per onzekerheidsniveau.

|                     | Complete determinism | Level 1   | Level 2   | Level 3   | Level 4 (deep uncertainty)  |   | Total ignorance |
|---------------------|----------------------|---|---|---|---|---|-----------------|
|                     |                      | A clear enough future   | Alternate futures (with probabilities)  | A few plausible futures   | Level 4a  | Level 4b  |                 |
| Context (X)         |                      |  |  |  |  |  |                 |
| System model (R)    |                      | A single (deterministic) system model   | A single (stochastic) system model  | A few alternative system models   | Many alternative system models  | Unknown system model; know we don't know  |                 |
| System outcomes (O) |                      | A point estimate for each outcome   | A confidence interval for each outcome  | A limited range of outcomes   | A wide range of outcomes  | Unknown outcomes; know we don't know  |                 |
| Weights (W)         |                      | A single set of weights   | Several sets of weights, with a probability attached to each set                  | A limited range of weights  | A wide range of weights   | Unknown weights; know we don't know   |                 |

Figuur 7: Niveaus van onzekerheid (Marchau et al, 2019).

Beleid maken ten behoeve van de energietransitie is op zichzelf al niet gemakkelijk. Het betreft een uiterst dynamisch domein dat gepaard gaat met tal van onzekerheden. Van geopolitieke dreigingen tot nooit eerder ontworpen systemen, van strategieën van *multinationals* tot ideeën van start-ups, en van ontbrekende regelgeving tot aan maatschappelijke voor- en tegenstand. Daar komen andersoortige veiligheidsrisico's van hernieuwbare bronnen nog eens bovenop. En risico's waarover weinig tot geen data beschikbaar is en modellen ontbreken. Een klassieke aanpak vanuit de wereld van de veiligheids- en risicoanalyses is gericht analyse en handelen (plan and act). Voor nieuwe risico's en onzekerheden ligt een aanpak van *'monitor and adapt'* soms meer voor de hand. Kortom, de onzekerheden omtrent de veiligheidsrisico's van de energietransitie zijn divers van aard en verschillen qua niveau van onzekerheid. Met deze

onzekerheden dient rekening te worden gehouden in beleidsanalyses, bij ontwerpvragestukken, ruimtelijke ontwikkelingen en in de besluitvorming.

De Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid heeft juist om die redenen van onzekerheid in haar rapport *Onzekere veiligheid* reeds in 2008 gepleit voor een ruimere dan enkel de klassieke risicobenadering (WRR, 2008) in het fysieke veiligheidsbeleid (niveau 1 onzekerheid). De WRR maakt, vergelijkbaar met Marchau et al (2019) onderscheid tussen vier risicoproblemen: eenvoudige, complexe, onzekere en ambigue risicoproblemen, die om verschillende beleidsstrategieën vragen. Die risicoproblemen verschillen in de mate waarin onzekerheid bestaat over de aan de orde zijnde (fysieke) risico's. De WRR voegt daarnaast, in termen van het voorzorgsbeginsel, het normatieve aspect toe aan de beschouwing van de toekomstige risico's. Het voorzorgsbeginsel vormt volgens de Raad:

*“Het normatieve beginsel dat leidend is voor die nieuwe risicobenadering. Het heeft dan ook een aanzienlijk ruimere strekking dan alleen de oproep om maatregelen te nemen als er vermoedens bestaan dat aanzienlijke schade kan optreden, ook als daarover nog geen wetenschappelijke zekerheid bestaat”. (pg. 146)*

en

*“Het voorzorgsbeginsel vraagt naar het oordeel van de raad dan ook om een ruimere uitleg dan alleen de aanwijzing dat onzekerheden geen reden mogen zijn om maatregelen te nemen die vermoede, aanzienlijke schade kunnen voorkomen. Het vormt het leidend beginsel zowel voor de fases waarin actief naar onzekerheden wordt gezocht en getracht wordt zulke onzekerheden te vertalen in termen van bespreekbare risico's, als voor de fases waarin afwegingen, onder wellicht resterende onzekerheid, moeten worden gemaakt en maatregelen moeten worden genomen. Het voorzorgsbeginsel houdt volgens de raad in dat onderkend wordt dat de kwetsbaarheid van mensen, samenleving en natuurlijke omgeving een pro-actieve omgang met onzekerheden eist”. (pg 146)*

Omdat elk mens recht heeft op bescherming, en baten en lasten van de energietransitie nogal eens scheef zijn verdeeld, dient in mijn optiek bovenstaand invulling van het voorzorgsbeginsel bij veiligheidsbeschouwingen rondom de energietransitie in het afwegingskader ten behoeve van besluitvorming over de energietransitie te worden betrokken.

## 6.5 SYNTHESE

Om verantwoord en robuust met de veiligheidsrisico's van de energietransitie om te gaan, zal ik deze in mijn leeropdracht in een bredere context dan gebruikelijk, uitwerken. Door middel van 1) *safety by design* principes, 2) een ketenbenadering en 3) integrale analyses kan een meer samenhangende en omvattende beschouwing van de veiligheidsrisico's worden gerealiseerd. De beschouwing van de onzekerheden (niveau 1 t/m 4) geeft richting aan de wijze van het omgaan met onzekerheden bij de uitbreidingen van bestaande analyse door toepassing van *safety by design* principes, de ketenbenadering en de integrale analyse. De onzekerheidsniveaus kunnen verschillen in het ontwerp (*safety by design*), door de gehele energieketen (ketenbenadering) en over verschillende onderdelen van de integrale analyse. Dat betekent dat er een ring van vier niveaus van onzekerheid zit, om de drie uitbreidingen van de bestaande veiligheidsanalyses.

Die ring met de vier niveaus van onzekerheid kan 'draaien', immers de onzekerheden verschillen afhankelijk van de aard van de vraagstukken/ systeemkenmerken (zie figuur 7, Marchau et al), zodat het passende niveau bij de betreffende veiligheidsbeschouwing komt te staan. De drie uitbreidingen in combinatie met de vier onzekerheidsniveaus vormt voor mij het conceptuele model voor het omgaan met veiligheidsrisico's en onzekerheden bij de energietransitie (zie figuur 8). Deze (systeem)benadering geeft houvast en hoop voor hert op een passende wijze omgaan met onzekerheden bij de beschouwing van de veiligheidsrisico's van de energietransitie.



Figuur 8: Systeembenadering veiligheidsrisico's en onzekerheden als gevolg van de energietransitie.

Bertrand Russell (1950) sprak de woorden, *“What men really want is not knowledge, but certainty.”*

Voor mij en mijn leerstoel zit in zijn uitspraak een te beperkte rol voor de kenniscomponent (*knowledge*). Kennis over veiligheidsmechanismen (vanuit meerdere disciplines) is onontbeerlijk om goed met de veiligheidsrisico's en onzekerheden om te kunnen gaan. In het tijdsgewricht van *Artificial Intelligence* lijkt het verkrijgen van kennis makkelijker en vluchtiger dan ooit: 'Chat GPT' levert binnen de kortste keren een behoorlijke samenvatting van tientallen rapport en artikelen, waar onderzoekers voorheen maanden over deden. Het onderzoek in mijn leerstoel zal zich dan ook met name richten op het daadwerkelijk zelf opleveren van datasets en kennis. Voor een deel gebeurt dit al binnen mijn lectoraat met databases zoals die met incidenten met alternatief aangedreven voertuigen en over branden met zonnepanelen. Maar ook onderzoek door middel van veldexperimenten zoals we die de afgelopen jaren ook al hebben uitgevoerd. Voorbeelden hiervan zijn de brandexperimenten ten behoeve van kennisopbouw over het brandverloop en de branduitbreiding van e-bikes, fatbikes, en scooters in fietsenstallingen (cruciale kennis voor risicobeheersing) of de incidentbestrijdingstechnieken ten behoeve van het stoppen van de thermal runaway in elektrische personenvoertuigen en e-trucks (relevant voor de incidentbestrijding).

Daarnaast zal het onderzoek binnen de leerstoel invulling gaan geven aan het beperken van de gevaren voor hulpverleners bij incidenten in de energietransitie door middel van robotondersteuning (robots, sensoren, drones) bij brandweerinzetten. Juist de energietransitie ligt voor deze robotisering voor de hand vanwege het andersoortige karakter van incidenten, onbekendheden en complexiteiten die leiden toch risico's voor de hulpverleners. En omdat mijn leerstoel, in de basis, een samenwerking is tussen de Universiteit Twente (wetenschap) en het NIPV (praktijk-gericht), en de ontwikkelingen in de energietransitie razendsnel gaan, zal er in het onderzoek structureel aandacht besteed worden aan de wijze waarop opgedane kennis snel aan de veiligheidsprofessionals beschikbaar kan worden gesteld. Het is dit soort kennis en praktische behoeftes die door de samenwerking tussen het NIPV en de UT, en met name de ontwerpers binnen Civiele Techniek en Construction Management en Engineering maximaal kan worden ontwikkeld en benut.

Van de uitspraak van Bertrand Russel maak ik dan ook graag mijn eigen variant:

*“What men really need is knowledge and certainty.”*

## 7. SAMENGEVAT

Deze oratie laat zich op hoofdlijnen samenvatten in vijf kernpunten:

1. De energietransitie gaat gepaard met duurzame(re) vormen van energieproductie, -transport, -opslag en -gebruik, die elk hun eigen gevaren, veiligheidsrisico's en onzekerheden kennen.
2. Het is niet gezegd dat de energietransitie de samenleving onveiliger maakt. Wel zijn er, ten opzichte van de fossiele energiebronnen, andersoortige incidentscenario's, kansen en effecten als gevolg van incidenten met hernieuwbare energiebronnen en -dragere.
3. De energietransitie betreft een scala aan onderliggende risico inducerende mechanismen (nieuwe technologie nabij burgers, veranderende energieketens, onervaren partijen, beperkt datasets, na-ijlende wet- en regelgeving) die allen de veiligheidsrisico's beïnvloeden en die gepaard gaan met verschillende soorten onzekerheden.
4. Met een bredere aanpak (*safety by design*, ketenbenadering en een integrale veiligheidsanalyse), en de expliciete beschouwing van onzekerheden, wordt meer recht gedaan aan de dynamische en onvoorspelbare aard van de veiligheidsrisico's als gevolg van de energietransitie.
5. De veiligheid van de energietransitie vraagt als normatief leidend beginsel ook expliciete aandacht voor het voorzorgsbeginsel door actief op zoek te gaan naar onzekerheden en te trachten zulke onzekerheden te vertalen in termen van bespreekbare risico's.

Het zal duidelijk zijn dat de benadering die ik voorsta en de eerste conceptuele aanzet hiertoe in deze oratie, ambitieus is. Hier past dan ook bescheidenheid en een uitgestoken hand. Bescheidenheid omdat ik niet alle kennis en kunde bezit om het brede scala aan vraagstukken en benodigde disciplines beheers, vrees ik. Een uitgestoken hand, omdat ik met kennisinstellingen, overheden en bedrijfsleven de veilige energietransitie wil faciliteren en tot een succes ga maken, hoop ik. Het is daarom goed dat hieraan gewerkt wordt. Vanuit de Universiteit Twente, de faculteit Engineering Technology en zijn focus op ontwerpinterventies en vanuit het NIPV met de focus op risicobeheersing, omgevingsveiligheid en incidentbestrijding zijn de eerste stappen hiertoe gezet. Het zal duidelijk zijn dat voor echte 'hoop' in dit kader ook de samenwerking met overheden en het bedrijfsleven cruciaal zijn voor de veilige energietransitie.

## 8. DANKWOORD

Allereerst wil ik het college van Bestuur van de Universiteit Twente en de directie van het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid bedanken voor het instellen van mijn leerstoel, en het vertrouwen in mij om deze leeropdracht te gaan uitvoeren. Vrees niet. Ik hoop jullie, en mijn eigen verwachting, waar te gaan maken. André Doree en Bart Koopman, het is een voorrecht om binnen jullie faculteit en cluster mijn professionele passie uit te mogen voeren: onderzoeken, doceren en presenteren op het gebied van veiligheid. In 1990 kwam ik naar Enschede om Technische Bestuurskunde te studeren. Dat ik, bijna 25 jaar later, zelf onderzoek doe en onderwijs geef op UT, vind ik een groot voorrecht en heb ik mede aan jullie te danken. Mede, want even zozeer hebben vanuit het NIPV, IJle Stelstra, Coby Flier en Charlotte van Deursen bijgedragen aan realisatie van deze stap in mijn werkzame leven. Dank ook voor jullie vertrouwen in mij.

Ook dank aan mijn collegae onderzoekers binnen mijn lectoraat. Met zijn tien hebben we vanuit de Arnhemse bossen de afgelopen jaren nationaal en internationaal een prachtige positie verworven op het gebied van de veiligheid van de energietransitie. Door jullie toewijding en kwaliteit kan ik de dinsdagen en woensdagen zonder vrees naar Enschede afreizen.

En die rit naar Enschede kent vaak een heel fijne tussenstop. Pa, ma, thuiskomen in Wehl en met jullie samen avondeten, snooker kijken zijn voor mij heel fijne zekerheden op de maandagavond.

En dan, tot slot, mijn eigen meiden: Marèse, Fyrenne en Nancy, jullie zijn er, ondanks mijn eigen frequente fysieke afwezigheid en afstand. Met jullie in mijn leven, en mentaal zeer nabij, kan ik niet anders dan de toekomst hoopvol tegemoet zien.

Ik heb gezegd.

## REFERENTIES

- Brandweer Nederland (2022), *Doctrine brandbestrijding*. [Nieuwsbrief\\_sjabloon.indd](#).
- CBS (2023), *Ruim tweehonderd jaar energieverbruik in Nederland: Transities, afhankelijkheid en besparing van 1800 tot 2023*, O. Swetz, [Ruim tweehonderd jaar energieverbruik in Nederland | CBS](#).
- CBS (2024), *Energietransities in Nederland door twee eeuwen heen*, O. Swetz, [Energietransities in Nederland door twee eeuwen heen | CBS](#).
- Energiebeheer Nederland (2025), *Het energiesysteem van Nederland: van bron tot verbruik*, [EBN-Infographic-2025.pdf](#)
- JRC, (2025), *Safe and Sustainable by Design Chemicals and Materials. Revised framework (2025)*, Bracalente, G., Abbate, E. and Garmendia Aguirre, I. (editors), Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/5103785>, JRC143022
- Kaplan S. en B.J. Garrick (1981), *On The Quantitative Definition of Risk*, Risk Analysis, vol. 1, issue 1, pp. 11-27.
- KEM (z.d.), *Kennisprogramma Effecten Mijnbouw*, [KEM Projecten | KEM programma](#).
- Knight, F. H. (1921). *Risk, uncertainty and profit*. New York: Houghton Mifflin Company (republished in 2006 by Dover Publications, Inc., Mineola, N.Y.).
- KNMI (2026), *Aardbevingen door gaswinning*, [KNMI - Aardbevingen door gaswinning](#).
- Marchau, V.A.W.J., et al. (2019), *Decision Making under Deep Uncertainty From Theory to Practice*, [Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice | Springer Nature Link](#), Springer (open access).
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2022), *MIEK Overzicht 2022, Meerjarenprogramma Infrastructuur Energie en Klimaat*, [MIEK Overzicht 2022](#).
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2024), *Kamerbrief over Robuust Basisnet en veiligheid spoorwegemplacements*, [Kamerbrief over Robuust Basisnet en veiligheid spoorwegemplacements | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#)
- Minister van Klimaat en Energie (2022), *Kabinetsaanpak Klimaatbeleid, Stimulering duurzame energieproductie*, [Kamerstuk 32813, nr. 1113 | Overheid.nl > Officiële bekendmakingen](#).
- Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (2025), *Ontwerp Nota Ruimte*, [Ontwerp-Nota Ruimte 2025](#).
- Nationaal Energie Dashboard (z.d.), *Samenstelling van de productie van elektriciteit in Nederland*, [Totale elektriciteitsproductie | Nationaal Energie Dashboard](#).

- Nederlandse regering (2026), *Aan de slag, Bouwen aan een beter Nederland*, Coalitie akkoord 2026-2030, D66, VVD en CDA, [Aan de slag - Coalitieakkoord 2026-2030 | Kabinetsformatie](#).
- NIPV (2023), *Informatieblad Energietransitie*, Spoelstra M., et al, [20231214-NIPV-Informatieblad-energietransitie.pdf](#).
- NIPV (2024), *Gebouwbranden met zonnepanelen*, [20241014-NIPV-Gebouwbranden-met-zonnepanelen.pdf](#)
- NIPV (2025), *Kennisbundels veilige energietransitie*, [Kennisbundels veilige energietransitie geactualiseerd - Nederlands Instituut Publieke Veiligheid](#)
- NIPV (2026), *Veiligheidsrisico's van biogas*, M. Duyvis en B. Riemersma, [20260413-NIPV-Veiligheidsrisicos-van-biogas.pdf](#)
- OVO (2017), *De iconen: de zeven principes van ontwerp veilige omgeving*. [De zeven principes van Ontwerp Veilige Omgeving - Relevant – Netwerk Externe Veiligheid](#).
- Perrow, Ch. (1984), *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*, Basic Books.
- Rijksoverheid (z.d.), *Nederland gaat stap voor stap over op duurzame energie*, [Nederland gaat stap voor stap over op duurzame energie | Duurzame energie | Rijksoverheid.nl](#)
- Rijksoverheid (2023), *Nationaal plan energiesysteem 2050*, [Kabinet presenteert strategie voor energiesysteem van de toekomst | Nieuwsbericht | Rijksoverheid.nl](#)
- Rijksoverheid (2024), *Programma Energiehoofdstructuur - Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang*, [Programma Energiehoofdstructuur - Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)
- Rijksoverheid (2025), *Startnotitie Programma Energiehoofdstructuur II (PEH II)*, [Startnotitie Programma Energiehoofdstructuur II \(PEH II\) | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)
- RIVM, (z.d.) *Handboek Omgevingsveiligheid*, [Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid | RIVM](#).
- RIVM (2019), *Verkenning risico's van de energietransitie voor de nationale veiligheid*, Analistennetwerk Nationale Veiligheid (ANV), [Verkenning risico's van de energietransitie voor de nationale veiligheid](#)
- RIVM (2020), *Handleiding Omgevingsveiligheid, Module IV: Specifieke rekenvoorschriften voor activiteiten D.1 en E.1.*, [Windturbines en gezondheid | RIVM](#).
- RIVM (2023\*), *Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie*, F. Heens en L. de Boer, [blg-1129371.pdf](#).

- RIVM (2023<sup>b</sup>), *Vermijd Zeer Zorgwekkende Stoffen zoveel mogelijk in vloeibare waterstofdragers*, M. Marinković en J. Ng-A-Tham, [Vermijd Zeer Zorgwekkende Stoffen zoveel mogelijk in vloeibare waterstofdragers](#)
- SodM (2025), *Beleidsregels voor aardbevingsbeheersing bij geothermie moeten strenger*, [SodM: Beleidsregels voor aardbevingsbeheersing bij geothermie moeten strenger | Staatstoezicht op de Mijnen](#)
- Taleb, N.N. (2007), *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*, Random House.
- TNO (2019), *Brandincidenten met fotovoltaïsche (PV) systemen in Nederland: een inventarisatie*, E. Bende en N. Dekker, TNO 2019 P10287, [TNO-2019-R10287.pdf](#).
- TU Delft, (2025), *Safe-by-Design: Een innovatieve aanpak voor omgevingsveiligheid*. R. Yarveisy, K.L.L. van Nunen en B.F.H.J. Bouchaut, [Safety and Security Science. Safy-by-Design: Een innovatieve aanpak voor omgevingsveiligheid - TU Delft Research Portal](#)
- Weick, K.E. en Sutcliffe, K.M., (2007), *Managing the Unexpected: Resilient Performance in an Age of Uncertainty*, John Wiley & Sons, San Francisco.
- WRR (2008), *Onzekere veiligheid: verantwoordelijkheden rond fysieke veiligheid*, rapport aan de regering nr. 82, Amsterdam University Press, Den Haag/ Amsterdam 2008.





