



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

Kennisoverzicht over **gezondheids- en veiligheidsrisico's** van negen technieken in de **energietransitie**

Kennisoverzicht over gezondheids- en veiligheidsrisico's van negen technieken in de energietransitie

RIVM-rapport 2025-0164

Colofon

© RIVM 2026

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

DOI 10.21945/RIVM-2025-0164

I.L.C. Buurmans (auteur), RIVM
C.L.G. Stähler (auteur), RIVM
M.P.N. Spruijt (auteur), RIVM
S.D. Wiersma (auteur), RIVM
I.C. Kroon (auteur), TNO

Contact:

Inge Buurmans
Omgevingsveiligheid
inge.buurmans@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, directie Warmte en Ondergrond in het kader van het project: M/460103/01/BB 'Veiligheids- en gezondheidseffecten van de energietransitie.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland

www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Kennisoverzicht over gezondheids- en veiligheidsrisico's van negen technieken in de energietransitie

In Nederland wordt met steeds meer technieken energie opgewekt, denk aan windmolens, zonnepanelen of aardwarmte (geothermie). Deze technieken helpen om schoner en duurzamer te leven. Deze 'energietransitie' is volop gaande. De overheid wil weten welke risico's deze technieken kunnen hebben voor gezondheid en veiligheid.

Het RIVM heeft daarom samen met TNO de belangrijkste ontwikkelingen op een rij gezet en beschreven wat wel en niet bekend is over de gezondheids- en veiligheidsrisico's. Dat deed het voor negen technieken: windenergie, zonne-energie, waterstof, geothermie, CO₂-opslag, kernenergie, biomassa en technieken voor een gezond binnenmilieu. Het RIVM vroeg ook beleidsmedewerkers van verschillende organisaties en ministeries wat ze nodig hebben om rekening te houden met gezondheids- en veiligheidsrisico's.

Het overzicht laat zien dat er al veel bekend is over gezondheids- en veiligheidsrisico's. Maar ook dat de energietransitie snel gaat en kennis zich blijft ontwikkelen. Het is dan ook belangrijk dat de overheid goed daarop is aangesloten. Het RIVM en TNO geven acht aanbevelingen. Zij adviseren onder andere dat alle betrokken partijen hun kennis delen en elkaar op de hoogte houden. Zo kunnen ze samen bespreken welke informatie nodig is en hoe ze die kunnen verzamelen. Dit voorkomt ook dat partijen langs elkaar heen werken.

Andere aanbevelingen zijn bijvoorbeeld dat er aandacht moet zijn voor perceptie en gedrag van inwoners: hoe denken zij over nieuwe technieken en wat willen ze ermee? En aandacht te hebben voor mogelijke risico's voor het milieu, omdat dat raakt aan gezondheid en veiligheid. Verder is het belangrijk om al in de ontwerpfase van nieuwe technieken rekening te houden met veiligheid en gezondheid (*safe-and-sustainable-by-design*). En om bij keuzes over energie niet alleen naar de techniek te kijken maar ook naar de samenleving als geheel. Onder andere door na te denken wat die keuzes betekenen voor landbouw, vervoer en de zorg.

Kernwoorden: energietransitie, windenergie, zonne-energie, waterstof, geothermie, CO₂-opslag, kernenergie, biomassa, gezond binnenmilieu

Synopsis

Knowledge overview on the health and safety risks of nine techniques in the energy transition

In the Netherlands, energy is generated in a growing number of ways, including wind turbines, solar panels and geothermal methods. These techniques can help make life cleaner and more sustainable. This 'energy transition' is fully underway. The government wants to know which risks these techniques might have for health and safety.

With that in mind, together with TNO, RIVM has drawn up a list of the most important developments and has described what is and what is not known about their risks for health and safety. This work was conducted for nine techniques: wind energy, solar energy, hydrogen, geothermal energy, CO₂ storage, nuclear energy, biomass and techniques for a healthy indoor environment. RIVM also consulted policy staff at various organisations and ministries about what they need in order to be able to take these health and safety risks into account.

The overview reveals that a great deal is already known about health and safety risks. However, it also reveals that the energy transition is moving quickly and knowledge continues to develop. It is therefore important that the government stays closely aligned with these developments. RIVM and TNO have issued eight recommendations. Among others, they advise that all stakeholders share their knowledge and keep each other informed. In this way, they can discuss what information is needed, and how that information can be collected. This will help prevent the various parties from working at cross purposes.

Other recommendations include paying attention to the perception and behaviour of the public: how do people view new techniques and how do they want to use them? And to pay attention to potential risks for the environment, as these impact health and safety. In addition, it is important to take health and safety into account in the design phase of new techniques (safe and sustainable by design). And when it comes to choices on energy, not only considering the technology, but also society as a whole. For example by thinking about the consequences of choices for agriculture, transport and the health care system.

Key words: energy transition, wind energy, solar energy, hydrogen, geothermal energy, CO₂ storage, nuclear energy, biomass, healthy indoor environment.

Inhoudsopgave

Samenvatting — 11

1 Bevindingen en aanbevelingen — 13

2 Inleiding — 17

- 2.1 Aanleiding — 17
- 2.2 Doel- en vraagstelling — 17
- 2.3 Reikwijdte — 17
- 2.4 Terminologie — 18
- 2.5 Aanpak — 19
- 2.5.1 Ophalen beleidsvragen — 19
- 2.5.2 Ophalen kennisvragen — 21
- 2.6 Referenties — 21

3 Leeswijzer — 23

4 Windenergie – Cosima Stähler, RIVM — 25

- 4.1 Inleiding — 25
- 4.2 Gezondheid — 26
 - 4.2.1 Geluid — 26
 - 4.2.2 Slagschaduw — 28
 - 4.2.3 Verspreiding van chemicaliën — 29
- 4.3 Veiligheid — 30
 - 4.3.1 Breuk van windturbines en vallende onderdelen — 30
 - 4.3.2 Afvallend ijs — 31
- 4.4 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 31
- 4.5 Referenties — 33

5 Zonne-energie – Cosima Stähler en Jasmijn Otte, RIVM — 35

- 5.1 Inleiding — 35
- 5.2 Gezondheid — 36
 - 5.2.1 Elektromagnetische velden en laagfrequent geluid van omvormers — 36
 - 5.2.2 Hitte-eiland effect — 36
 - 5.2.3 Emissies — 37
- 5.3 Veiligheid — 37
 - 5.3.1 Brand en vrijkomende stoffen bij branden — 37
 - 5.3.2 Verblinding — 38
- 5.4 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 39
- 5.5 Referenties — 40

6 Kernenergie – Lars Roobol, RIVM — 43

- 6.1 Inleiding — 43
- 6.2 Lopende en geplande onderzoeken — 43
- 6.3 Gezondheid — 44
 - 6.3.1 Radioactiviteit, verval en straling — 44
 - 6.3.2 Externe straling — 44
 - 6.3.3 Lozing van radioactieve stoffen — 45
 - 6.3.4 Radioactief afval — 45
 - 6.3.5 Dosis-effectrelatie — 46
 - 6.3.6 Kernongevallen — 47

6.4	Veiligheid — 47
6.5	Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk — 48
6.6	Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 49
6.7	Referenties — 50
7	Geothermie – Harmen Mijndieff, TNO — 53
7.1	Inleiding — 53
7.1.1	Huidige status aardwarmtewinning in Nederland — 54
7.1.2	Geothermiesystemen in Nederland — 55
7.2	Gezondheid — 56
7.2.1	Blootstelling aan 'Naturally Occurring Radioactive Material' (NORM) — 56
7.2.2	Luchtverontreiniging — 57
7.2.3	Geluidshinder — 58
7.2.4	Trillingshinder — 59
7.3	Veiligheid — 60
7.3.1	Geïnduceerde seismiteit — 60
7.3.2	Chemische explosie als gevolg van blow-out bij boorwerkzaamheden — 63
7.3.3	Fysische explosie door overdruk in de bovengrondse procesinstallatie — 63
7.3.4	Explosie- en brandgevaar vanwege in opgepompte water opgeloste gassen die ontvlambaar zijn — 64
7.3.5	Explosie-, brand- of verstikkingsgevaar, omdat de werkvloeistof van closed-loopsystemen bestaat uit ontvlambare stoffen of CO ₂ — 64
7.4	Andere domeinen — 65
7.4.1	Vervuiling van grondwater — 65
7.5	Lopend onderzoek — 71
7.6	Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 72
8	Biomassa – Mariusz Cieplik, TNO — 75
8.1	Inleiding — 75
8.2	Inventarisatie van factoren met potentiële impact op veiligheid en gezondheid bij bio-energie — 75
8.3	Veiligheids- en gezondheidsrisico's verbonden aan de biomassa hoofdconversieprocessen — 77
8.4	Gezondheid — 83
8.4.1	Luchtemissies op leefniveau — 83
8.4.2	Organische bijproducten bij pyrolytische biomassa (voor)behandeling — 85
8.4.3	Chemicaliënverspreiding en geuremissies — 86
8.5	Veiligheid — 86
8.5.1	Incidenten veroorzaakt door stofvorming, broei en ongecontroleerde opwarming van biomassa — 86
8.6	Overig — 87
8.7	Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk — 87
8.8	Voorstellen: onderzoeksprojecten — 88
8.9	Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 88
8.10	Referenties — 90
9	Elektrificatie: energieopslag/buffering – Jochem Wijten, RIVM — 93
9.1	Inleiding — 93
9.2	Gezondheid — 93
9.2.1	Elektromagnetische velden — 93
9.2.2	Laagfrequent geluid — 94
9.2.3	Vrijkomen (gevaarlijke) stoffen uit batterijen — 95
9.3	Veiligheid bij EOS'en met batterijen — 96
9.3.1	Ongecontroleerd vrijkomen van energie — 96

9.3.2	Bestrijding bij incidenten met batterijen — 97
9.4	Lopend en gepland onderzoek — 98
9.5	Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk — 99
9.6	Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 99
9.7	Referenties — 101
10	Waterstof en waterstofdragers – Johan van Middelaar, TNO — 103
10.1	Inleiding — 103
10.1.1	Vormen van waterstof en waterstofdragers — 103
10.1.2	Overzicht veiligheids- en gezondheidsrisico's — 107
10.2	Veiligheidsrisico's van waterstof en waterstofdragers — 108
10.2.1	Brandgevaar — 108
10.2.2	Explosiegevaar — 110
10.2.3	Cavernestabiliteit — 112
10.3	Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk — 113
10.3.1	Nationale en internationale ontwikkelingen — 113
10.3.2	Marktontwikkelingen — 114
10.4	Overige aandachtsgebieden — 115
10.4.1	Ontwikkelen van standaarden, normen en (reken)voorschriften — 115
10.4.2	Incidentmanagement — 116
10.4.3	Safe-and-Sustainable-by-Design (SSbD) — 116
10.5	Mogelijke onderzoeksprojecten — 117
10.5.1	Een holistische, proactieve en integrale risicobenadering — 117
10.5.2	Identificeren van waterstofinnovaties en regelgevingsbehoeften — 117
10.5.3	Ontwikkelen van standaarden, normen en (reken)voorschriften — 117
10.5.4	Ketenstudies voor veiligheid en gezondheid — 118
10.5.5	Handelingsperspectief voor incidentbestrijding — 118
10.6	Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 118
10.7	Referenties — 120
11	CO₂-afvang, -transport en -opslag – Mark Spruijt, RIVM — 121
11.1	Inleiding - klimaatverandering en koolstofdioxide (CO ₂) — 121
11.1.1	Huidige status van CCU(S) – Carbon Capture, Utilisation and Storage — 121
11.1.2	Aanloop naar CCTS – Carbon Capture, Transport and Storage – in Nederland — 122
11.1.3	Huidige en toekomstige CCTS-projecten in Nederland — 123
11.2	Gezondheidsrisico's van CO ₂ — 124
11.2.1	Effecten op de mens bij een buisleidingbreuk — 124
11.2.2	Voorbeelden van incidenten met CO ₂ — 125
11.3	Veiligheid CO ₂ -capture, -transport en -opslag in de industriële en in bebouwde omgeving — 126
11.3.1	CO ₂ door de transportleiding — 126
11.3.2	Overzicht van onderzoeksprojecten naar de veiligheid CO ₂ -transportleidingen — 127
11.4	Veiligheid van de gehele CCTS-keten, mens én het milieu — 131
11.4.1	Capture-strategieën en chemische stoffen — 132
11.4.2	CO ₂ -opslag in geologische formaties — 134
11.5	Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies — 135
11.6	Referenties — 137
12	Binnenmilieu en isolatie – Piet Jacobs, TNO — 145
12.1	Inleiding — 145
12.2	Gezondheid — 145
12.2.1	Oververhitting door toename isolatiegraad en klimaatverandering — 145

12.2.2	Reduceren natuurlijke ventilatie in luchtdichte woningen —	147
12.2.3	Onvoldoende capaciteit voor kookafzuiging in appartementen —	148
12.2.4	Onduidelijke user interfaces voor gebouwinstallaties —	150
12.2.5	Biobased bouwen en vocht —	150
12.3	Veiligheid —	152
12.3.1	Koolmonoxidevergiftiging —	152
12.3.2	Biobased materialen en brandveiligheid —	152
12.4	Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies —	153
12.5	Referenties —	155

Dankbetuiging — 157

Literatuur — 159

Bijlage 1 volledige beleidsmatrices — 175

Samenvatting

Dit rapport beschrijft kennis- en beleidsvragen voor negen technieken die in de energietransitie belangrijk zijn of worden. Dat zijn: windenergie, zonne-energie, elektrificatie, waterstof en waterstofdragers, geothermie, CO₂-afvang en -opslag, kernenergie, biomassa en binnenmilieu. De hoofdvraag is welke kennis- en beleidsvragen er zijn over de veiligheids- en gezondheidsrisico's van de negen technieken. Deze kennis stelt de departementen in staat om (1) hun beleidskeuzes te baseren op actuele kennis, (2) richting te geven aan hun eigen kennisprogrammering met het oog op toekomstige beleidskeuzes. En wel zodanig dat deze (3) zijn af te stemmen met de kennisprogrammering bij andere ministeries.

De technische hoofdstukken met kennisvragen zijn geschreven door of een expert van TNO, of een expert van het RIVM. Iedere expert heeft in het desbetreffende hoofdstuk de belangrijkste ontwikkelingen, vraagstukken en kennisvragen, samengevat. De onderzoekers hebben vooral de belangrijkste vraagstukken in kaart gebracht en een aantal relevante kennisvragen verzameld.

De beleidsvragen zijn verzameld in zogenoemde beleidssessies. Als voorbereiding van de beleidssessies is een beleidsmedewerker van BZK, EZK, IenW, JenV, SZW en VWS geïnterviewd. Voor elk technisch onderwerp is vervolgens één beleidssessie georganiseerd. De resultaten van de interviews en de beleidssessies zijn uitgewerkt tot matrices met beleidsvragen, die als paragraaf zijn toegevoegd aan de technische hoofdstukken.

Het kennisoverzicht laat zien dat er al veel bekend is over gezondheids- en veiligheidsrisico's. Maar ook dat de energietransitie snel gaat en kennis zich blijft ontwikkelen. Het is dan ook belangrijk dat de overheid goed daarop is aangesloten. Het RIVM en TNO geven acht aanbevelingen. Zij adviseren onder andere dat alle betrokken partijen hun kennis delen en elkaar op de hoogte houden. Zo kunnen ze samen bespreken welke informatie nodig is en hoe ze die kunnen verzamelen. Dit voorkomt ook dat partijen langs elkaar heen werken.

Andere aanbevelingen zijn bijvoorbeeld dat er aandacht moet zijn voor perceptie en gedrag van inwoners: hoe denken zij over nieuwe technieken en wat willen ze ermee? En aandacht te hebben voor mogelijke risico's voor het milieu, omdat dat raakt aan gezondheid en veiligheid. Verder is het belangrijk om al in de ontwerpfase van nieuwe technieken rekening te houden met veiligheid en gezondheid (*safe-and-sustainable-by-design*). En om bij keuzes over energie niet alleen naar de techniek te kijken maar ook naar de samenleving als geheel. Onder andere door na te denken wat die keuzes betekenen voor landbouw, vervoer en de zorg.

Samenvattend zijn uit de hoofdstukken en interviews en beleidsessies, de volgende bevindingen en aanbevelingen naar voren gekomen:

- Inventariseer bestaande kennisnetwerken en sluit hierop aan.
- Voer met enige regelmaat het gesprek over de scope.
- Betrek ook andere aspecten die de veiligheids- en gezondheidsrisico's beïnvloeden.
- Neem in kennisprogrammering mee hoe afwegingen op systeemniveau gemaakt kunnen worden
- Investeer in de toepassing van *safe-and-sustainable-by-design*-kaders en-instrumenten.
- Blijf investeren in beheer en actualisatie van instrumenten.
- Verken de mogelijkheden voor structurele monitoring.
- Investeer in lerend vermogen.

In het volgende hoofdstuk zijn deze bevindingen en aanbevelingen verder uitgewerkt.

1 Bevindingen en aanbevelingen

De energietransitie heeft invloed op de gezondheid en veiligheid in onze leefomgeving. Momenteel worden verschillende technologieën uitgerold voor duurzame energieproductie en emissieëmitigatie. Deze ontwikkelingen maken deel uit van een bredere transformatie van het energiesysteem. Dit vraagt om opschaling en zorgvuldige ruimtelijke inpassing, waarbij de afzonderlijke technologieën worden geïntegreerd tot een duurzame en toekomstbestendige energievoorziening.

Hierbinnen spelen negen technologieën een sleutelrol, elk met eigen implicaties voor gezondheid en veiligheid. Deze negen zijn: windenergie, zonne-energie, elektrificatie, waterstof en waterstofdragers, geothermie, CO₂-afvang en -opslag, kernenergie, biomassa en binnenmilieu. Dit document brengt de bijbehorende beleids- en kennisvragen in kaart. De focus ligt daarbij op mogelijke gezondheidseffecten en veiligheidsrisico's bij de ontwikkeling en toepassing van deze technologieën.

Door deze kennisvragen tijdig te herkennen en aan te pakken, zijn ze in de ontwerpkeuzes van het energiesysteem mee te nemen. Dit is vooral nuttig in de fase waarin de verduurzaming van het energiesysteem conceptueel en ruimtelijk wordt vormgegeven, inclusief locatiekeuzes, technische configuraties, maatschappelijke randvoorwaarden en de integratie van technologieën. Als kennisvragen (te) laat worden opgepakt, kan dat ertoe leiden dat ontwerpkeuzes moeten worden bijgesteld. Dit leidt tot hogere maatschappelijke kosten en verlies aan draagvlak. Om dit te voorkomen, is een goede wisselwerking nodig tussen kennisinstellingen, beleidsmakers, beleidsuitvoerders en ontwerpers van het energiesysteem.

De volgende algemene bevindingen en aanbevelingen kunnen gedaan worden wat betreft het document en het eventuele vervolg, bijvoorbeeld via kennisprogrammering:

Aanbeveling 1: Inventariseer bestaande kennisnetwerken en sluit hier op aan

Goede kennisprogrammering is belangrijk om veiligheids- en gezondheidsrisico's op tijd in beeld te hebben, zodat hiermee in de energietransitie rekening kan worden gehouden. Een analyse van kennisbehoefte is geen statisch of vaststaand resultaat. Het is een momentopname van de beschikbare kennis. De technische ontwikkelingen in de energietransitie gaan op dit moment zeer snel. Voortschrijdend inzicht leidt dan ook steeds tot bijstellingen en aanvullingen. Vanwege de veelheid van onderwerpen en de snelheid waarmee technieken in de energietransitie zich ontwikkelen, is het dan ook van belang dat er platforms zijn waar het goede gesprek kan worden gevoerd over nieuwe kennisvragen en hoe deze zijn te adresseren en te prioriteren. Hiervoor zijn de juiste overlegstructuren/beslisgremia nodig. In dit project is niet onderzocht in hoeverre dit al georganiseerd is. Dit kennisoverzicht kan een goed vertrekpunt zijn om met betrokken organisaties te onderzoeken waar de kennis- en beleidsvragen belegd zijn, of dat zouden kunnen worden. Daarom is de eerste aanbeveling om te inventariseren of er bestaande kennisnetwerken en gremia zijn, waarin over de behoeften aan deze

kennis gesproken kan worden. Naast de sectorale platforms valt daarbij ook te denken aan een landelijk energietransitieplatform, waarin beleidsmakers, vergunningverleners, kennisinstellingen en sectorpartijen periodiek ontwikkelingen bespreken.

Aanbeveling 2: Voer met enige regelmaat het gesprek over de scope

Dit kennisoverzicht betreft de veiligheids- en gezondheidsrisico's in relatie tot de negen hierboven genoemde technieken. Hiermee zijn veel, maar niet alle ontwikkelingen in de energietransitie aan bod gekomen. Voor het houden van goed overzicht over kennisbehoeften in de energietransitie, is het zinvol om met enige regelmaat met de relevante ministeries en andere overheden te reflecteren op mogelijke aanvullingen op deze scope.

Aanbeveling 3: Betrek ook andere aspecten die de veiligheids- en gezondheidsrisico's beïnvloeden

Het kennisoverzicht is in scope afgebakend tot fysieke veiligheidsrisico's en gezondheidsrisico's. Uit de beleidssessies blijkt dat, om goed hiermee in de energietransitie rekening te kunnen houden, er ook kennis gevraagd wordt op sociaalwetenschappelijk gebied (zoals gedrag en perceptie, risicocommunicatie), bestuurlijk-juridisch gebied en praktische toepassing/handelingsopties. Daarnaast zijn milieurisico's, arbeidsrisico's en consumentenrisico's buiten de scope van het kennisoverzicht gehouden, maar zijn bij de energietechnieken hierover ook kennisvragen genoemd. Een derde aanbeveling is dan ook om het gesprek over kennisprogrammering te verbreden, zodat alle vragen, zorgen en kennisbehoeften aan bod komen vanuit zowel de kennisvragende kant (met name overheden), als de kennisleverende kant (met name kennisinstututen, maar ook private kennispartners).

Aanbeveling 4: Neem in kennisprogrammering mee hoe afwegingen op systeemniveau gemaakt kunnen worden

Het kennisoverzicht gaat per energietechniek in op de beleidsvragen. Bij de realisatie van de energietransitie is daarnaast sprake van keuzes en afwegingen op het niveau van het energiesysteem als geheel. Juist op dat niveau kan goed de wisselwerking met andere beleidsterreinen een plek krijgen, zoals defensie, ruimtelijke ordening, natuurbeleid, landbouwbeleid, mobiliteitsbeleid, klimaatadaptatie, zorgbeleid en sociaaleconomische ontwikkeling. Door deze beleidsvragen op systeemniveau te verbinden, wordt inzichtelijk hoe de energietransitie en de omgang met gezondheid en veiligheid een plek krijgen in de samenleving vanuit ruimtelijk en maatschappelijk perspectief. Dit kan ondersteuning bieden bij het maken van keuzes over te nemen maatregelen en de te verwachten effectiviteit. Voor de kennisprogrammering is het daarom belangrijk om te kijken hoe zowel lokaal, regionaal als nationaal afwegingen op systeemniveau zijn te maken, met ruimte voor regionale differentiatie.

Aanbeveling 5: Investeer in de toepassing van safe-and-sustainable-by-design-kaders en -instrumenten

Een veilige en gezonde energietransitie vereist dat energietechnieken zelf veilig, duurzaam en gezond zijn ontworpen en dat bij de inrichting van de leefomgeving rekening wordt gehouden met restrisico's. Voor het ontwerp van de energietechnieken zijn ook private partijen/de industrie nodig. Deze partijen kunnen in een vroeg stadium rekening houden met gezondheids- en veiligheidsrisico's. Bijvoorbeeld door een safe-and-sustainable-innovation-approach toe te passen op het ontwikkelen en gebruiken van nieuwe producten. Het verdient aanbeveling om in de kennisprogrammering ook te investeren in de toepassing van safe-and-sustainable-by-design-kaders en -instrumenten. Een koppeling aan bestaande innovatieprogramma's (zoals MOOI, HER+, IPCEI) en Europese SSbD-initiatieven kan bijdragen aan internationale verankering. Dat vergroot de kans op opschaling.

Aanbeveling 6: Blijf investeren in beheer en actualisatie van instrumenten

Het is belangrijk om instrumenten, zoals modellen voor het berekenen van gezondheids- en veiligheidsrisico's up-to-date te houden en aan te passen aan voortschrijdende wetenschappelijke inzichten, beleidsmatige uitgangspunten en technologische ontwikkelingen. Door de komst van nieuwe energietechnieken en nieuwe kennis over bestaande technieken blijven beheer en actualisatie nodig.

Aanbeveling 7: Verken de mogelijkheden voor structurele monitoring

De verantwoordelijkheden voor de gezondheids- en veiligheidsrisico's zijn verdeeld over meerdere ministeries. Daardoor is er niet vanzelf een overzicht over de ontwikkeling van de risico's in Nederland en de ruimtelijke en sociaal-maatschappelijke verdeling van die risico's. De aanbeveling is daarom om periodiek, bijvoorbeeld gekoppeld aan de cyclus van de KEV of het klimaatplan, inzicht te geven in de ontwikkeling van gezondheids-, milieu- en veiligheidsrisico's van de energietransitie in Nederland.

Aanbeveling 8: Investeer in lerend vermogen

Naast tools en kennis, dragen ook netwerken bij aan een goede kennisinfrastructuur. Om het leren in de energietransitie te vergroten, kan binnen de bestaande kennisstructuren een multidisciplinaire kennisuitwisseling worden ingericht. Dat kan bijvoorbeeld in de vorm van communities of practice of praktijkgemeenschappen 'Veilige en gezonde energietransitie'. Dergelijke leerstructuren zijn effectief, als ze gericht zijn op concrete leerdoelen, goed gefaciliteerd en procesmatig geborgd zijn, en hun opbrengsten aantoonbaar terugvloeien naar beleid en uitvoering.

2 Inleiding

2.1 Aanleiding

De energietransitie in Nederland beslaat het grootste deel van de klimaatmaatregelen waarmee Nederland invulling geeft aan de internationale afspraken om wereldwijde klimaatverandering tegen te gaan (IPCC, 2023) en aan het Nederlandse klimaatakkoord (2019). Grootschalige veranderingen in het energiesysteem hebben gevolgen voor meerdere beleidsterreinen, waaronder nationale veiligheid, energie, economie, infrastructuur, milieu, et cetera. (ANV, 2019, 2022). Dit leidt tot een nieuwe realiteit met nieuwe kansen en bedreigingen.

De (zes) betrokken departementen willen bijdragen aan een gezonde en veilige energietransitie, onder andere met kennisontwikkeling. Het streven is om beleidskeuzes te baseren op actuele kennis. Om die reden is het belangrijk om overzicht te verkrijgen van de kennis- en beleidsvragen die op dit moment spelen over de veiligheids- en gezondheidsrisico's binnen de energietransitie.

Het voorliggende document is het resultaat van een eerste inventarisatie. Het is in overleg met de opdrachtgever tot een kennisoverzicht geworden.

2.2 Doel- en vraagstelling

Voorliggend kennisoverzicht wil een beeld te geven van de gezondheids- en veiligheidsvraagstukken in de energietransitie en welke vragen daarbij vanuit experts en beleidsmakers naar boven komen. Deze kennis is bedoeld om de departementen in staat te stellen (1) hun beleidskeuzes te baseren op actuele kennis, (2) richting te geven aan hun eigen kennisprogrammering met het oog op toekomstige beleidskeuzes, en wel zodanig dat deze (3) zijn af te stemmen met de kennisprogrammering bij andere ministeries.

De hoofdvraag van dit kennisoverzicht is de volgende: welke kennis- en beleidsvragen zijn er te benoemen op het gebied van de veiligheids- en gezondheidsrisico's voor de negen geselecteerde technieken?

(Windenergie, zonne-energie, elektrificatie, waterstof en waterstofdragers, geothermie, CO₂-afvang en -opslag, kernenergie, biomassa en binnenmilieu.)

2.3 Reikwijdte

Dit kennisoverzicht betreft de veiligheids- en gezondheidsrisico's in relatie tot de navolgende technieken van duurzame opwekking, transport en buffering van energie: windenergie, zonne-energie, elektrificatie (onder andere EOS, batterijen), waterstof en waterstofdragers, geothermie, CO₂-afvang en opslag, kernenergie en biomassa. Daarnaast gaat dit kennisoverzicht in op de veiligheids- en gezondheidsrisico's van verduurzaming van het energiesysteem binnen de gebouwde omgeving (in het bijzonder de gebouwen). De opdrachtgever koos de scope en de technieken. Omdat dit een eerste inventarisatie betreft, was niet alles mee te nemen. Daarom koos de opdrachtgever ervoor om in dit kennisoverzicht de negen belangrijkste/grootste onderwerpen voor de energietransitie mee te nemen.

Dit rapport bedoelt met fysieke veiligheid, de bescherming tegen leed door ongevallen of door incidenten van natuurlijke en technologische oorsprong, zoals brand en overstroming. Bij omgevingsveiligheid gaat het om de risico's van het gebruik, de productie, opslag en transport van gevaarlijke stoffen en windturbines voor omwonenden.

Gezondheidsrisico's zijn risico's die een nadelige invloed kunnen hebben op de gezondheid van omwonenden. Daarbij is niet alleen gekeken naar de risico's van stoffen, maar ook naar andere stressoren die hinder kunnen veroorzaken, bijvoorbeeld geluid, geur en licht. Hierbij is aangesloten bij de definitie die in een recent RIVM-rapport over gezondheid en leefomgeving rond Chemelot wordt gehanteerd [1].

Aanpalende veiligheids- of gezondheidsonderwerpen (denk aan milieu-, arbeids- of consumentenrisico's) worden soms aangestipt, maar zijn op verzoek van de opdrachtgever buiten deze opdracht gelaten. Om dezelfde reden vallen ook risicopercepties, risicocommunicatie, maatschappelijke ontwrichting en organisatorische of juridisch getinte kennis-/beleidsvragen buiten de scope van dit kennisoverzicht, maar worden ze soms wel aangestipt. Hiermee sluit dit document aan bij de kamerbrief 'Verantwoord omgaan met veiligheid en gezondheid in de energietransitie' (DGKE - DSE/ 22517363).

De onderzoeksvraag betreft de risico's tijdens de energietransitie tot 2050 en legt de nadruk op gebruik en ontwikkeling van toegepaste kennis op het gebied van de (fysieke) veiligheid. In het bijzonder de omgevingsveiligheid, en de directe gezondheidsrisico's, voor zover gerelateerd aan de energietransitie.

Ook het consolideren of kennis vergroten over het huidige (fossiel gedomineerde) energiesysteem en de afbouw is geen onderdeel van dit kennisoverzicht. Tenzij informatie hierover direct bijdraagt aan het zichtbaar maken van de gerealiseerde transitiebatens.

Qua gebied beperkt dit kennisoverzicht zich tot het Nederlandse grondgebied in Europa: Caribisch Nederland is hierin niet meegenomen. Daarnaast zijn de in dit kennisoverzicht beschreven vraagstukken dynamisch van aard: zowel de vraagstukken zelf als de prioritering kunnen veranderen in de tijd. Voor prioritering is het onder andere van belang op welke termijn een beleidsvraag met de bijbehorende kennisvragen relevant is, of gaat worden. Gedurende de looptijd van de transitie zijn binnen de betrokken departementen (en binnen de daaraan ondersteunende kennisprogrammering) andere accenten te leggen. Ook zijn op basis van voortschrijdend inzicht nieuwe onderwerpen toe te voegen.

2.4 Terminologie

Dit document gebruikt vaak de term 'risico'. Een risico is in dit rapport opgevat als 'de berekende combinatie van een bepaald ongewenst effect en de kans dat zo'n effect zich voordoet'. $\text{Risico} = \text{kans} \times \text{effect}$.

Naast de term risico, wordt er soms gesproken over gevaar. Een gevaar is iets wat schade kan berokkenen. Het rapport beschrijft niet hoe groot de kans is op een ongewenst effect door dit gevaar en hoe groot in dat geval het ongewenste effect is. Een gevaar is ook niet zomaar weg te nemen (tenzij de bron van het gevaar wordt weggenomen). Vaak zijn enkel de risico's van een gevaar te bestrijden.

2.5 Aanpak

Om dit document te kunnen samenstellen, zijn zowel beleidsvragen als technisch-inhoudelijke kennisvragen (hierna te noemen: kennisvragen) opgehaald. Om tot een kennisoverzicht te komen, zijn drie fasen doorlopen. In de inventarisatiefase is informatie opgehaald (zowel beleidsmatig als technisch-inhoudelijk). In de analysefase is deze informatie samengevat en in de duidingsfase zijn bevindingen en aanbevelingen opgesteld. Hieronder lichten we zowel de werkwijze voor het ophalen van de beleidsvragen als die van de kennisvragen toe.

2.5.1 *Ophalen beleidsvragen*

Het ophalen van de beleidsvragen bestond uit een inventarisatie- en een analysefase.

Inventarisatiefase

Bij het ophalen van de beleidsvragen is een inventarisatie gemaakt van de beleidsvragen (inclusief vragen over instrumentarium), die leefden bij de betrokken departementen. Hiervoor zijn allereerst interviews (februari 2024) gehouden met beleidsmedewerkers van de betrokken departementen (breedte). Van de volgende ministeries is een beleidsmedewerker geïnterviewd: BZK, EZK, IenW, JenV, SZW en VWS. In deze interviews is een eerste inventarisatie gemaakt van de onderwerpen die voor de verschillende ministeries belangrijk zijn. Daarnaast zijn de raakvlakken met andere (onderzoeks)programma's besproken. Verder konden de beleidsmedewerkers aangeven waar voor hun ministerie belangrijke beleidsvragen liggen. Vervolgens is er per techniek een beleidssessie gehouden (april 2024), waarbij ook andere overheidsorganisaties zijn bevraagd (verbreding). Hierin is de inventarisatie van de interviews gebruikt om tot een gespreksstructuur te komen en om de deelnemers te vragen hun kennis en uitdagingen op vier gebieden te delen.

De vier in de beleidssessies gebruikte hoofdvragen zijn:

1. Wat is nodig om vanuit beleid op veranderende risico's (**preventie**) te kunnen inspelen?
2. Wat is nodig om de ontwikkelingen rondom techniek x (per beleidssessie werd een van de negen technieken behandeld) mee te nemen in de **gezondheidsbescherming** en **crisisbeheersing**?
3. Wat is nodig om te komen tot (meer) eenduidige **normen** om het beleid mee vorm te geven?
4. Wat is nodig om het risicoverloop tijdens de energietransitie (tot 2050) goed te **monitoren**?

De volgende organisaties waren uitgenodigd om voor iedere beleidssessie een deelnemer af te vaardigen: ANVS; GGD; ILT; ministerie van BZK; ministerie van EZK; ministerie van IenW; ministerie van JenV; ministerie van VWS; Rijkswaterstaat; SodM; veiligheidsregio; TNO en werkgroep BOVEN. Iedere organisatie kon zelf besluiten om al dan niet aan de sessies deel te nemen. Hierdoor verschilde het aantal deelnemers per beleidssessie.

Analysefase

In de analysefase is de opgehaalde informatie samengevat, geanonimiseerd en geordend in een matrix per techniek. Deze matrix is in overleg met de opdrachtgever ontworpen. Voor iedere techniek staat in de bijlage een ingevulde/uitgewerkte matrix. Dit brengt op een goed bij het beleidsdenken aansluitende manier in beeld welke vraagstukken er per techniek spelen. Verder maakt de matrix inzichtelijk welk deel van de opgehaalde informatie binnen de scope van dit kennisoverzicht past en welk deel buiten de reikwijdte moet worden geplaatst. De beleidsvragen uit de eerste twee kolommen (kennisvraagstukken en praktische vraagstukken) passen binnen de scope van dit kennisoverzicht. Daarom zijn ze in de technische hoofdstukken opgenomen. Bij deze paragrafen (titel: 'Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies') staat telkens expliciet vermeld dat ze niet door de technisch auteurs zijn geschreven, maar voortkomen uit de beleidssessies over de betreffende technieken. De genoemde organisatievraagstukken en juridische vraagstukken zijn wel degelijk interessant voor de voortgang van de energietransitie, maar passen niet in de scope van dit kennisoverzicht. De volledige matrices, inclusief de laatste twee kolommen, staan in Bijlage 1.

Tabel 2.1 Matrix om de vraagstukken per techniek te ordenen. Verticaal is elke regel een stap in de beleidscyclus, staat de beleidscyclus weergegeven, met voorbeelden (zonder strakke definities). Horizontaal is elke kolom een verschillend type vraagstuk.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
		Is dat zo?	En hoe werkt dat in de praktijk?	Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden	Formeel vastgelegd?
Beleid en regelgeving	Normen				
Doorwerking en instrumenten	Rekenmethodiek, handreiking, et cetera				
Uitvoering	Inclusief toezicht en handhaving				
Evaluatie	Monitoring				

Voor het indelen/verwerken van de tijdens de interviews en beleidssessies genoemde beleidsvragen, is de volgende werkwijze gebruikt:

Het doel was om zicht te krijgen op de verschillende kanten van de energietransitie en de daarbij betrokken technieken. Daartoe zijn in principe alle beleidsvragen die tijdens de interviews en beleidssessies geuit zijn in het overzicht meegenomen. Ongeacht de vraag in hoeverre beleidsvragen werden gedeeld/herkend/ondersteund door andere belanghebbenden. Specifieke zorgen, voorgestelde oplossingen of

concrete voorbeelden zijn waar mogelijk vertaald naar de onderliggende beleidsvraag.

Om te voorkomen dat de interpretatie van de auteurs de doorslag geeft, zijn de resultaten bij de betrokken ministeries getoetst.

De opgehaalde beleidsvragen per techniek staan in Tabel 1.1. Waar relevant, zijn ze aangevuld met specifieke zorgen, voorgestelde oplossingen of concrete voorbeelden uit de interviews en beleidssessies. In de interviews en beleidssessies zijn zaken naar voren gekomen die voor de aanwezigen belangrijk waren. Om die reden spreekt dit document consequent over 'opgehaalde beleidsvragen'. Het is niet mogelijk om alle beleidsvragen die wellicht bij beleidsmakers leven op te halen. Ook zal niet iedere beleidsmaker/organisatie met alle vraagstukken te maken hebben, of zich in ieder vraagstuk herkennen. De opgehaalde beleidsvragen kunnen aanleiding zijn om in bestaande of nog op te richten platforms verder te praten over wat nodig is op het gebied van beleid om de energietransitie in Nederland verder te faciliteren. Hierbij moeten afhankelijk van het onderwerp ook verschillende partijen en organisaties worden betrokken.

2.5.2 *Ophalen kennisvragen*

De technische hoofdstukken met kennisvragen zijn of door een expert van TNO, of door een expert van het RIVM geschreven. Iedere expert is gevraagd om de belangrijkste ontwikkelingen, vraagstukken en kennisvragen in het desbetreffende hoofdstuk samen te vatten. Het ging vooral om het ophalen van de belangrijkste vraagstukken en minder om het verzamelen van alle kennisvragen. De genoemde kennisvragen geven een beeld van welke kennisvragen er zoal bij de verschillende technieken spelen.

De kennisvragen zijn uitgesplitst in vragen die relevant zijn voor de veiligheid en vraagstukken die relevant zijn voor de gezondheid. Door deze kennisvragen in beeld te brengen, is in de toekomst een prioritering voor het oppakken van de vraagstukken te maken.

2.6 Referenties

- [1] J.M.M. Neuvel *et al.*, Gezondheid en leefomgeving rond Chemelot, RIVM-rapport 2025-0030.
(<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2025-0030.pdf>)

3 Leeswijzer

Nederland maakt bij beleidskeuzes zo goed mogelijk gebruik van relevante kennis. In het beleidskompas heet dit kennisgedreven of 'evidence-informed' beleid. Doordat er altijd sprake is van nieuwe/voorschrijdende inzichten en nieuwe ontwikkelingen, is kennis (het weten en niet-weten) continu in beweging. Er is daarom een constante wisselwerking tussen kennis en beleid, waarbij nieuwe inzichten worden verwerkt. Kennisorganisaties dragen hieraan bij door wetenschappelijke kennis en onderzoek te verbinden aan praktijk en beleid. In dit kennisoverzicht geven het RIVM en TNO inzicht in de kennis over risico's voor de veiligheid en gezondheid van mensen in het kader van energie.

Het kennisoverzicht is opgebouwd uit de bevindingen en aanbevelingen (hoofdstuk 1), de inleiding (hoofdstuk 2). Hoofdstuk 3 met uitleg over hoe het document gelezen moet worden, gevolgd door een hoofdstuk per techniek met daarin een overzicht van de vraagstukken, kennis- en beleidsvragen (hoofdstukken 4 t/m 12). In deze hoofdstukken zijn ook twee paragrafen gereserveerd voor de beleidsvragen. De eerste bevat eventuele beleidsvragen waarvan de TNO/RIVM-auteurs van de verschillende hoofdstukken aangeven dat ze belangrijk kunnen zijn of dat in de toekomst kunnen worden. De paragraaf met beleidsvragen van de TNO/RIVM-auteur is niet in ieder hoofdstuk aanwezig. Niet alle auteurs noemden namelijk beleidsvragen. De tweede bevat de beleidsvragen die in de interviews en beleidssessies naar voren zijn gekomen. Deze staan in de matrixvorm die in paragraaf 2.5.1 wordt besproken. Bij de paragrafen met beleidsvragen staat duidelijk aangegeven wat de bron is (auteur hoofdstuk of interviews/beleidsessies).

Hoe moet dit document gelezen worden?

Dit document is geen statisch of vaststaand resultaat. Het is een momentopname van de beschikbare kennis. Voortschrijdend inzicht leidt tot bijstellingen en aanvullingen. De technische ontwikkelingen in de energietransitie gaan sneller, dan rapporten zijn op te stellen. Dit doet natuurlijk niks af aan de relevantie van de betreffende informatie.

Hoe kan dit document worden gebruikt?

Dit document kan een startpunt vormen voor verdiepende gesprekken tussen verschillende organisaties over de ontwikkeling van bepaalde kennis en (wetenschappelijk) onderzoek. Voor sommige technieken bestaan er al platforms en gremia om kennis te delen en vraagstukken te bespreken. Verder geeft het document een goed overzicht, maar is het niet in alle details volledig. Per techniek is het nodig om nog een slag dieper te gaan, om in de toekomst tot daadwerkelijke keuzes en prioriteiten te komen voor bijvoorbeeld een kennisprogrammering. Ook hierin speelt tijd weer een rol. Om de laatste ontwikkelingen en inzichten in de besluitvorming te kunnen meenemen, is het nodig om te blijven overleggen over de actuele situatie.

Hoe moeten de kennisvragen worden gelezen?

Het feit dat er kennisvragen zijn, betekent niet dat er onvoldoende kennis is om beleid te voeren, of dat alle kennisvragen direct opgelost moeten worden. Daarin moeten keuzes worden gemaakt. Op basis van bijvoorbeeld technische argumenten, of vanwege draagvlak vanuit de samenleving, kan besloten worden om een bepaalde kennis- of beleidsvraag op te pakken. Daarnaast is niet elke kennisvraag even relevant voor het beheersen van gezondheids- en veiligheidsrisico's. In sommige gevallen gaat het meer om het verkrijgen van aanvullend inzicht.

Hoe moeten de beleidsvragen worden gelezen?

Voor de beleidsvragen geldt iets soortgelijks: in de interviews en beleidssessies kwamen zaken naar voren, die voor de aanwezigen belangrijk waren. In hoofdstuk 1 is de aanpak van de interviews en beleidssessies in april 2024 uitvoerig beschreven. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Waarom verschillen hoofdstukken van elkaar?

Het verschilt per hoofdstuk hoe uitgebreid de beschrijving is. Onderling, en ook binnen de technieken, bestaat er een grote variatie aan risico's en de mate waarin al is voorzien in de ontwikkeling van kennis, gereedschap/modellen en praktische of juridische uitwerking (in de vorm van bijvoorbeeld handreikingen of protocollen). Dit hangt voor een deel samen met de technische volwassenheid (Technology Readiness Level) van de verschillende technieken.

Hoe uitgebreid de beschrijving is, heeft daarnaast te maken met verschillende auteurs. TNO en RIVM hebben ieder een aantal hoofdstukken uitgewerkt, waarbij zichtbaar is dat beide instituten vanuit verschillende invalshoeken naar kennisvragen hebben gekeken. Waar het RIVM meer vanuit risico's voor de leefomgeving kijkt, zoomt TNO dieper in op de elementen in de techniek die bijdragen aan die risico's. Dit maakt de lengte van de hoofdstukken verschillend. Niettemin bieden beide invalshoeken een goede basis voor de bestaande kennis en kennisvragen.

4 Windenergie – Cosima Stähler, RIVM

Dankwoord

De auteur dankt het Expertisepunt Windenergie, Sylvia Versluis-Verhagen en Matthias Hof voor waardevolle input bij het schrijven van dit hoofdstuk.

4.1 Inleiding

Windturbines zetten windenergie om in elektriciteit op een duurzame manier zonder CO₂-uitstoot [1]. Ze worden zowel op zee, als op het land geplaatst. Daarbij is de impact van turbines op het land op de gezondheid en veiligheid van mensen groter vanwege de relatieve nabijheid. Hoewel er van windturbines op zee risico's uitgaan voor de natuur [2], zijn de risico's voor de gezondheid en veiligheid van de leefomgeving beperkt. De toepassing van windturbines op zee valt daarom buiten de scope van dit rapport. Ook valt de arbeidsveiligheid van werknemers die bij de bouw van de turbines zijn betrokken buiten de scope van dit rapport.

Windturbines dragen aanzienlijk bij aan het opwekken van duurzame elektriciteit en spelen een belangrijke rol in het behalen van de klimaatdoelen voor 2030 en 2050. In de afgelopen tien jaar is het aantal windturbines op land in Nederland meer dan verdubbeld [1]. Het gezamenlijke vermogen van de turbines is in die tijd zelfs verviervoudigd door de installatie van steeds grotere windturbines. In de basis geldt: hoe groter een windturbine is, des te groter is het vermogen om energie op te wekken. Eind 2024 stonden in Nederland windturbines op land met een gezamenlijk vermogen van 6.943 MW [3].

De doorlooptijd van het eerste initiatief in planvorming tot het daadwerkelijk plaatsen van een windturbine bedraagt gemiddeld 3 tot 4 jaar [1]. De doorlooptijd van aanvraagprocedures kan een aanzienlijke vertraging oplopen. Bijvoorbeeld vanwege het ontbreken van (lokale) maatschappelijke draagvlak, netcongestie of de doorlooptijd van vergunningverlening [1].

In 2021 oordeelde de Raad van State over een uitbreiding van een windpark in Delfzijl-Zuid (Nevele arrest). In de periode voorafgaand aan het Nevele-arrest werden windparken aan de hand van landelijk vastgestelde milieuregels geëvalueerd. Op basis van Europees recht had een plan-m.e.r.-onderzoek voor deze landelijke normen moeten plaatsvinden. De landelijke regels zijn sindsdien buiten werking gesteld. Naar aanleiding van het oordeel is er sinds juli 2022 voor bestaande windparken van drie of meer windturbines een overbruggingsregeling van kracht [4]. Provincies en gemeenten moeten voor nieuwe windparken eigen afwegingen maken over het vergunnen en welk milieubeschermingsniveau lokaal aanvaardbaar is [5]. De nieuwe landelijke conceptmilieunormen zijn als uitgangspunt te gebruiken voor het opstellen van lokale normen. Verleende vergunningen blijven geldig en bestaande windparken mogen dus blijven draaien [6].

4.2 Gezondheid

4.2.1 Geluid

Windturbines produceren twee soorten geluid: het mechanisch geluid van de apparatuur en het geluid van door de lucht draaiende wieken. Het geluidsniveau¹ wordt vooral bepaald door de snelheid waarmee de wieken draaien. De weersomstandigheden hebben een grote invloed op het geluidsniveau. Bij toenemende windkracht gaan windturbines sneller draaien en neemt het geluid toe tot een maximumniveau. De factsheet Gezondheidseffecten van windturbines [8] vermeldt: "In vergelijking met andere bronnen, wordt windturbinegeluid bij een gelijke geluidbelasting (evenveel dB's) als hinderlijker ervaren dan geluid van industrie, weg- of railverkeer.² Ook treedt hinder van windturbinegeluid bij lagere geluidsniveaus op in vergelijking met andere bronnen. Factoren die mogelijk bepalen waarom windturbinegeluid bij lagere niveaus als hinderlijker wordt ervaren, zijn het specifieke ritmische karakter van windturbinegeluid (amplitudemodulatie), en factoren zoals slagschaduw, knipperende lichten, houding ten aanzien van het beleid en geluidgevoeligheid, en de betere hoorbaarheid van windturbines 's avonds en 's nachts, doordat het overige geluid afneemt en windturbinegeluid dan gelijk blijft of juist toeneemt" [8].

Het geluid van windturbines kan verschillende effecten hebben op de gezondheid. Hinder is een van de meest onderzochte effecten [7, 8]. Er bestaat een duidelijke samenhang tussen het geluidsniveau van windturbines en de ervaren hinder. Uit een overzicht van de wetenschappelijke literatuur blijkt: Hoe harder het geluid, hoe meer mensen hinder ervaren.

Uit onderzoek blijkt dat de mate van hinder die mensen ondervinden, niet alleen bepaald wordt door blootstelling aan geluid of andere fysieke aspecten van windturbines. Naast andere aspecten blijkt dit onder andere afhankelijk te zijn van de houding van mensen ten opzichte van windturbines [9, 10]. De houding is wederom afhankelijk van verschillende factoren. Zo zijn bijvoorbeeld mensen die zich veel zorgen maken over het klimaat positiever ingesteld tegenover windturbines. Mensen met een positievere houding ten opzichte van de overheid en de initiatiefnemers ervaren over het algemeen minder hinder. Wanneer mensen actief betrokken worden bij het plaatsen van windturbines, blijkt dat ze ook minder hinder ervaren. Daarbij is van belang dat mensen zich in het proces niet persoonlijk benadeeld voelen. Evenzo kunnen financiële gevolgen van de plaatsing van windturbines voor bewoners, zoals een mogelijke daling van de waarde van huizen en appartementen, tot een toename van ervaren hinder leiden [11].

¹ Er zijn tijdelijk geen wettelijke landelijke normen voor windturbinegeluid. Tot juni 2021 hanteerde Nederland de wettelijke geluidnormen van 47 dB Lden (dag en avond en nacht) en 41 dB Lnight(nacht) [3]. De Wereldgezondheidsorganisatie heeft in haar richtlijn Omgevingsgeluid uit 2018 een, voorwaardelijke, gezondheidkundige advieswaarde voorgesteld voor windturbines van 45 dB (decibel) Lden (Level day-evening-night). De aanbeveling is voorwaardelijke vanwege onder andere het beperkt aantal studies, de kwaliteit van het bewijs, de andere factoren die een rol spelen en de blootstellingsmaat. Er is geen advieswaarde voorgesteld voor de nacht omdat er geen eenduidig bewijs is voor een relatie met slaapverstoring.

² Janssen, S.A., Vos, H., Eisses, A.R., Pedersen, E. (2011). A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources J. Acoust. Soc. Am. 130 (6), 3746–3753; Houthuijs, D.J.M., van Wiechen C.M.A.G. (2006). Monitoring van gezondheid en beleving rondom de luchthaven Schiphol, RIVM Rapport 630100003; Welkers, D., Van Kempen, E., Helder, R., Verheijen, E., Van Poll, R. (2020) Motie Schonis en de WHO-richtlijnen voor omgevingsgeluid (2018). RIVM-rapport 2019-0227.

De relatie met slaapverstoring is niet eenduidig. Sommige studies tonen een verband aan, terwijl andere studies geen effect vinden. Voor andere gezondheidseffecten is onvoldoende bewijs gevonden voor een direct effect van het wonen in de nabijheid van een windturbine of het geluid ervan. Denk hierbij aan hart- en vaatziekten, stofwisselingsstoornissen, cognitieve effecten en effecten op de mentale gezondheid. Dit kan betekenen dat er geen verband bestaat, dat er nog onvoldoende onderzoek is gedaan, dat de kwaliteit van het onderzoek te laag is, of dat de resultaten tegenstrijdig zijn. Wel zijn er indirect gezondheidseffecten aangetoond, namelijk tussen hinder van geluid, slagschaduw en knipperende lichten en gezondheidsklachten als chronische pijn, migraine/hoofdpijn, tinnitus, duizeligheid en misselijkheid [7, 8].

Lopend en gepland onderzoek:

In opdracht van ministerie van Klimaat en Groene Groei werken het RIVM en de GGD'en samen in het Expertisepunt Windenergie en Gezondheid. Het doel is om de meest actuele inzichten over de gezondheidseffecten beschikbaar te maken en te verspreiden. Het Expertisepunt Windenergie en Gezondheid publiceert elke drie maanden een overzicht van nieuwgevonden wetenschappelijke artikelen en grijze literatuur over windturbines en gezondheid op de [webpagina](#). Hierbij worden niet alleen effecten van geluid beschouwd, maar ook andere effecten, zoals slagschaduw en visuele aspecten. Het RIVM voert periodiek een literatuurreview uit [7].

In 2021 heeft het RIVM in opdracht van het ministerie van EZK (Economische Zaken en Klimaat) in kaart gebracht welke onderzoeksvragen er leven bij bewoners, de lokale en regionale overheden en bij de betrokken ministeries. De resultaten van deze opdracht zijn beschreven in het RIVM-briefrapport 'Verkenning van opties voor gezondheidsonderzoek rond windturbines' [13]. Daarin is op een rij gezet welke soort onderzoek je kan inzetten om de belangrijkste onderzoeksvragen die leven rond het onderwerp Windturbine en gezondheid te kunnen beantwoorden. Momenteel voert het RIVM in opdracht van ministerie van KGG en IenW een van de voorgestelde onderzoeken uit de verkenning uit. Het RIVM doet onderzoek naar de relatie tussen geluid door windturbines en de mate van hinder of slaapverstoring [14]. Het doel van het blootstelling-responsonderzoek is in te schatten hoe veel effect het geluid van windturbines heeft op hinder en slaapverstoring. Dit wordt ook blootstelling-responsrelatie (BR-relatie) genoemd. De onderzoeksresultaten worden eind 2026 verwacht.

Anteagroup voert momenteel een meerjarige gezondheidsmonitor uit in de omgeving van Windpark Nij Hiddum-Houw in Friesland [15]. Met vragenlijsten, een meldpunt en persoonlijk contact met de omwonenden wordt onderzocht welke hinder- en gezondheidsklachten omwonenden ervaren en in hoeverre deze te beperken zijn.

Arcadis heeft de app Geluidsverwachting.nl ontwikkeld [16]. De app biedt omwonenden van windparken een 48 uren-verwachting voor het geluidsniveau en slagschaduw van windturbines. Het laat ook de actuele weersverwachting zien en hoe zich het windturbinegeluid verhoudt tot het omgevingsgeluid. De omwonenden kunnen via de app doorgeven hoe zij het geluid beleven. Op deze manier wordt de impact van het geluid op bewoners gemonitord en is er een verband te leggen tussen

het omgevingsgeluid, de weersomstandigheden en de beleving van windturbines.

Kennisvragen en aanvullende onderzoeksvorstellen:

- Er zijn steeds nieuwe typen windturbines in ontwikkeling. Hoe hoog is de geluidsbelasting van deze nieuwe typen? Waarbij specifiek aandacht is voor onder andere laagfrequent geluid en hoe mensen deze nieuwe type windturbine ervaren?
- Gerichter onderzoek naar hinder op verschillende momenten van de dag en bij verschillende weersomstandigheden, in het bijzonder naar momentane kortetermijnhinder via een panelonderzoek en/of 'citizen science'-aanpak. Een voorbeeld hiervan staat in: 'Devilee, J., et al. (2024). Samen meten aan geluid en beleving rond de luchthaven Schiphol. Een verkennend citizen science-onderzoek naar kortetermijnhinder in het kader van de Programmatische Aanpak Meten Vliegtuiggeluid, RIVM.'
- Gerichter (literatuur)onderzoek naar verschillende aspecten van geluid van windturbines (bijvoorbeeld: amplitude modulatie (AM), infrasoen en laagfrequent geluid, tonaal geluid en geluid door turbulenties).
- Cohort-/longitudinaal-onderzoek: onderzoek in de tijd (verleden, toekomst) waarbij verschillende onderzoeksvormen denkbaar zijn. Een voorbeeld van een retrospectief cohortonderzoek is Baliatsas, C., et al. (2025). 'Health problems near wind turbines: A nationwide epidemiological study based on primary healthcare data.' *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **216**: 115642. Kanttekening bij dit onderzoek is dat de blootstellingskarakterisering zeer grofmazig was. Dit was ook één van de aanbevelingen uit de verkenning [13].
- Gerichter (literatuur)onderzoek naar invloed van windturbinegeluid naar slaapverstoring/slaapkwaliteit (korte, lange termijn, polysomniografie).
- Invloed van windturbines op gezondheidsklachten. Dit komt ook terug in het blootstelling-responsonderzoek [14].
- Gerichter (literatuur)onderzoek naar andere aspecten van windturbines (licht, slagschaduw, externe veiligheid, esthetische aspecten).
- Gerichter (literatuur)onderzoek naar proces van plaatsing van windturbines (planning, uitvoering, bedrijfsvoering en nazorg).

Omdat het aantal mensen dat in Nederland relatief dicht bij een windturbine woont beperkt is, is het voor bepaalde gezondheidseindpunten die minder frequent voorkomen goed om internationale samenwerking te zoeken.

4.2.2

Slagschaduw

Windturbines kunnen onder bepaalde omstandigheden schaduwen werpen op woongebouwen en stroboscopische effecten creëren in appartementen en huizen wanneer de wieken draaien [17]. Daardoor kunnen omwonenden van windturbines hinder ervaren. De mate van hinder hangt af van de blootstellingsduur, de frequentie van het passeren van de wieken en de intensiteit van de wisselende lichtsterkte. De effecten van een slagschaduw kunnen optreden op een afstand die tot tien keer de rotordiameter bedraagt. Om negatieve

gezondheidseffecten door slagschaduw te voorkomen, is naast de locatiekeuze voor de windturbine ook een stilstandsregeling vast te stellen. In vergunningen wordt verplicht geregeld dat windturbines worden uitgeschakeld op momenten dat er een kans bestaat van optreden van slagschaduw in woningen [18]. De nieuwe landelijke conceptmilieunormen houden een streefwaarde van maximaal zes uur slagschaduw per jaar en maximaal 20 minuten per dag aan [4].

4.2.3 *Verspreiding van chemicaliën*

Windturbines, die vaak uit metalen en kunststof componenten bestaan, zijn voorzien van een beschermende verflaag (coating) op de mast en wieken, en op zee ook op de monopile. Deze coating bevat chemische stoffen die, volgens de Europese wetgeving, als gevaarlijk voor mens en milieu worden beschouwd. Gedurende de levensduur van de turbine kunnen, door slijtage, deze stoffen, maar ook microplastics, vrijkomen [19]. Het is onbekend hoeveel schadelijke stoffen en microplastics in de omgeving van windturbines terecht komen. Tot nu toe zijn nog geen uitloogtesten van coatings bij windturbines uitgevoerd. Ook is er geen onderzoek gedaan naar de erosie van de coatings in de omgeving. In de generatoren van windturbines zit het isolatiegas zwavelhexafluoride (SF₆) om stroomvonken tegen te gaan. Het vrijkomen van het gas vormt vanuit toxicologisch opzicht waarschijnlijk geen risico voor mens en milieu. SF₆ is echter een sterk broeikasgas met een 'global warming potential' (GWP) van 22.800 keer zo groot als CO₂ over een periode van 100 jaar. Daarnaast heeft het gas een atmosferische levensduur van 3.000 jaar. Volgens een schatting van het RIVM [19] is het negatieve effect veroorzaakt door het vrijkomen van SF₆ heel klein (<0,01%) in vergelijking met het positieve effect de besparing van CO₂ door inzet van windturbines. Niettemin is het wenselijk de lekkage van SF₆ zo klein mogelijk te houden vanwege de lage afbreeksnelheid van het stof, waardoor de concentratie in de atmosfeer kan ophopen. Het is onbekend hoeveel SF₆-gas daadwerkelijk in Nederland weglekt uit windturbines op zee en op land (inclusief tijdens de ontmanteling van oude windturbines). Er wordt gewerkt aan alternatieven voor het gebruik van SF₆ als isolatiegas. Het is echter onduidelijk op welke termijn deze alternatieven beschikbaar zijn, en of daarbij andere risico's voor mens of milieu horen.

Kennisvragen:

De specifieke samenstelling en hoeveelheid van vrijkomende stoffen en microplastics hangen af van het type coating en turbine. De samenstelling van deze coatings is op dit moment niet in detail bekend. Daarnaast bestaat er geen precieze inschatting van welke stoffen vrijkomen en in welke hoeveelheden deze het milieu bereiken. Het vrijkomen van deze stoffen is mogelijk te beperken door het gebruik van bepaalde technieken die slijtage voorkomen. Momenteel ontbreekt informatie over de mate waarin deze technieken daadwerkelijk in de praktijk worden toegepast [11]. Dit maakt het op dit moment onduidelijk of deze emissies schadelijk zijn voor mens en milieu. Daarom is een kennisvraag om te onderzoeken wat de samenstelling van deze stoffen is, hoeveel hiervan in welke vorm vrijkomt, en in welke mate dit een risico vormt voor de leefomgeving.

4.3 Veiligheid

4.3.1 *Breuk van windturbines en vallende onderdelen*

Bij windturbines is er kans op breuk, waarbij de mast kan breken en de gehele turbine omvalt. Of waarbij een deel van de windturbine, zoals de wieken, de gondel of de rotor, geheel of gedeeltelijk kan afvallen. Hoewel deze incidenten buitengewoon zeldzaam zijn, kunnen de gevolgen van een dergelijk incident aanzienlijk zijn. Afhankelijk van de omstandigheden kunnen delen van windturbines worden weggeslingerd. Dat kan schade aan personen, infrastructuur, buisleidingen, hoogspanningskabels, dijken, gebouwen of industriële installaties veroorzaken [20, 21].

De risico's voor de omgeving worden met een rekenmethode ingeschat. Het is verplicht om risicocontouren rondom windturbines te berekenen. Het RIVM beheert de rekenmethode voor de externe veiligheid van windturbines. In september 2024 is de methode geactualiseerd om beter bij de technische vooruitgang aan te sluiten. De kans op een ongeval met een windturbine wordt steeds kleiner door technologische ontwikkelingen. Er worden bijvoorbeeld steeds meer veiligheidssystemen toegevoegd. Doordat steeds grotere windturbines met langere wieken worden geplaatst, kunnen de gevolgen van een ongeval echter groter zijn.

Volgens de oude regels (die tot het Nevele-arrest geldig waren) waren geen beperkt kwetsbare objecten binnen de PR 10^{-5} -contour van de windturbine en geen zeer kwetsbare en kwetsbare objecten binnen de PR 10^{-6} -contour toegestaan. De nieuwe concept milieunormen benoemen de PR 10^{-6} -contour als grenswaarde voor kwetsbare en zeer kwetsbare gebouwen en als standaardwaarde voor beperkt kwetsbare gebouwen. Het lokaal bevoegd gezag mag van deze normen (de grenswaarde en de standaardwaarde) afwijken als zij dit goed kunnen onderbouwen [4].

Lopend en gepland onderzoek:

Antea Group voert momenteel een consequentieonderzoek uit. Daarin wordt getoetst welke gevolgen het toepassen van de nieuwe rekenmethodiek kan hebben. Omdat de nieuwe berekende contouren groter kunnen zijn, kan dat tot knelpunten in de ruimtelijke ordening leiden. Dit onderzoek is een voorwaarde voor de aanwijzing van de nieuwe rekenmethode in de regelgeving door het ministerie van infrastructuur en waterstaat.

Kennisvragen:

- De faalfrequenties en de berekende effecten van windturbine-incidenten komen voort uit data over praktijkincidenten [22]. Om een betere nauwkeurigheid van de rekenmethode te waarborgen, is het noodzakelijk de methoden met data over incidenten en bijna-incidenten te onderbouwen. Aangezien dat ongevallen met windturbines zeldzaam zijn, zijn de beschikbare gegevens beperkt. Het registreren en beschikbaar stellen van data over windturbine-incidenten zou de doorontwikkeling van de rekenmethodiek ondersteunen. Experimenten met schaalmodellen van windturbines zijn ook te gebruiken om de rekenmodellen te valideren.

- Er is nader onderzoek nodig om de impact te kunnen berekenen van vallende onderdelen van windturbines op de omvang van de risicocontouren van windturbines. De huidige rekenmethode-analyse om de impact op ondergrondse buisleidingen te bepalen, leverde onvoldoende valide, betrouwbare en toepasbare gegevens op om de rekenmethode te kunnen aanpassen.

4.3.2 *Afvallend ijs*

Afhankelijk van de weersomstandigheden kan zich ijs vormen op de wieken van windturbines, dat door de draaibeweging van de turbine kan vallen. Als het ijs ver weg wordt geslingerd, kan dit mogelijk leiden tot ongevallen, zoals op industrieterreinen of snelwegen. Er is beperkte kennis beschikbaar over incidenten die door afvallend ijs zijn veroorzaakt. Er bestaat daardoor geen duidelijk beeld van de reikwijdte waarbinnen ijs kan worden afgeworpen. Dit soort ongevallen wordt vaak niet opgemerkt, doordat het afgeworpen ijs niet opvalt of kan smelten na afworp. Dit kan betekenen dat incidenten door ijsafworp niet gerapporteerd worden en dus mogelijk vaker plaatsvinden dan in de gebruikte database staat. Daarom is er geen faalfrequentie voor ijsafworp afgeleid en wordt het scenario alleen kwalitatief beoordeeld als het gaat om de omgevingsveiligheid rondom windturbines [20].

Om incidenten door ijsafwerping te voorkomen, worden windturbines uit bedrijf genomen zodra ijsvorming gedetecteerd wordt. Dit veronderstelt dat de windturbines met een detectiesysteem zijn uitgerust. Ook kan de windturbine bij potentiële ijsvorming in de meest veilige positie van de gondel en rotor worden gebracht. Dat is de positie die het minste risico oplevert. Per locatie verschilt het welke stand het meest veilig is en moet die van tevoren door de exploitant bepaald worden, indien van toepassing met het bevoegd gezag en eventuele derde partijen met rechten op gebruik van de grond rondom de windturbines [23]. Aangezien er verschillende maatregelen zijn genomen om de gevolgen van ijsval te beperken, is de verwachting dat de risico's van ijsval voor de omgeving beperkt zijn.

4.4 **Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies**

Hieronder staan de beleidsvragen die tijdens de interviews en de in april 2024 gehouden beleidssessies naar voren kwamen (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 4.1 Opgehaalde beleidsvragen over windenergie uit de interviews en beleidssessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennisvraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Windenergie			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	- Continue behoefte aan nieuwe kennis vanwege ontwikkeling van nieuwe niche-technieken. Ook kijken naar ontwikkelingen	- Windturbines in elkaars nabijheid kunnen de luchtcirculatie beïnvloeden,

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennisvraagstuk	Praktisch vraagstuk
Windenergie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
		<p>in het buitenland en naar andere technieken (is een radarsysteem even veilig als knipperlichten?)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Is in normen opgenomen binnen hoeveel tijd een turbine stilgelegd moet kunnen worden? Zo nee: zou dat wenselijk zijn? - De huidige geluidsnormen zijn jaargemiddeld. Moet er een mogelijkheid komen om piekniveaus mee te nemen? - Effecten van turbinecoatings: de verwachting is dat ze geen gevaar vormen, maar in het kader van het voorzorgprincipe verwijzen actiegroepen vaak hiernaar. - De samenstelling van coatings is niet bekend. 	<p>regelgeving daarover ontbreekt.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hoe om te gaan met circulariteit en hergebruik? Daarvoor is nu niks vastgelegd.**
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Veranderingen in de windverdeling in de loop der jaren (klimaatverandering?) kunnen leiden tot veranderingen in de modellering. 	<ul style="list-style-type: none"> - Er is behoefte aan duidelijkheid ten aanzien van lokaal/regionaal versus landelijk: landelijke regels en dan regionaal handelingsperspectief bieden?
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Behoeft aan inzicht in benuttingsmogelijkheden ruimte: mag je in de contour rondom een windturbine (waar niet gebouwd mag worden) andere installaties of functies neerzetten? 	<ul style="list-style-type: none"> - Hoe kan een turbine veilig uitgeschakeld worden? (algemeen probleem bij onbemande installaties) Stillere windturbines stimuleren. - Bij ijsafzetting in de winter zou je turbines kunnen stopzetten als er gevaar is voor afvallend ijs, of parkeren/aanwezigheid in de buurt van windturbines kunnen verbieden.
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Hoeveel gezondheidswinst leveren windturbines op? Bijvoorbeeld in luchtkwaliteit (door minder fossiele/andere energieopwekking met navenante uitstoot). - Wens voor slimme monitoring: kan dit leiden tot vroegtijdig 	<ul style="list-style-type: none"> - Het is niet mogelijk om hinder vast te leggen in normen, doordat het zo subjectief is.*** Wel komt hinder tot uiting in vragenlijsten, dus wens tot monitoring.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennisvraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Windenergie			
		signaleren van materiaalfalen of suboptimaal presteren? - Gemiddeld genomen gezondheidswinst, maar lokaal wellicht niet (vanwege hinder)? - Toetsen door ervaringen van huidige windparken te verzamelen en te analyseren, inclusief klachten.	

* Perceptie is een belangrijk onderwerp en dan met name:

onrust rondom gezondheidseffecten. Als experiment is genoemd dat het interessant zou zijn als je mensen de mogelijkheid zou geven om een knop in te drukken als ze overlast ervaren. Als dat mensen het gevoel geeft dat ze grip hebben, wat doet dat met ervaren hinder?

dat het lijkt alsof we ook de keuze hebben om per techniek te bepalen: het is vervelend, dus we doen het maar niet. Maar die houding heeft ook risico's, want als we niks doen is het alternatief voortschrijdende klimaatverandering. Het Rijk moet de bevolking voorlichten en ook aangeven dat we als samenleving bepaalde keuzes moeten maken.

** In de gondel zitten kritieke grondstoffen/materialen. Op dit moment worden alle kleine turbines vervangen door grotere. De kleinere gaan allemaal naar het buitenland. Daarmee raakt Nederland veel materiaal kwijt.

*** hinder: licht, geluid, inbreuk leefomgeving, aanblik in het landschap.

4.5 Referenties

- [1] Nationaal Programma Regionale Energie Strategie (RES), [Factsheet Elektriciteit](#). 2023.
- [2] van Duren, L. A. *et al.*, [Ecosystem effects of large upsclaing of offshore wind on the North Sea – synthesis report](#), Deltares, 22 april 2021.
- [3] RVO, [Monitor Wind op Land 2024](#), mei 2025.
- [4] Helpdesk Wind op Land, [Landelijke milieunormen - inhoud | Helpdesk Wind op Land](#), geraadpleegd op 25 juni 2025.
- [5] Helpdesk Wind op Land, [Praktijkverhalen lokale milieunormen | Helpdesk Wind op Land](#), geraadpleegd 20 juni 2025.
- [6] Helpdesk Wind op Land, [Nevele-arrest en de gevolgen voor windparken | Helpdesk Wind op Land](#), geraadpleegd op 20 juni 2025.
- [7] Van Kamp, I. and G. van den Berg, *Gezondheidseffecten van windturbinegeluid*, in *Health effects related to wind turbine sound*. 2020, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- [8] RIVM, [Factsheet gezondheidseffecten van windturbinegeluid](#), 2021.
- [9] Ruben Peuchen, Esther Kox, Melanie Klösters, Koen Straver, [Beleving windenergie op land](#); inzichten uit vier windparken, TNO, 30 maart 2022.
- [10] GGD, *Klimaatmitigatie en negatieve gezondheidseffecten- Huidige stand van kennis en advies GGD, 10 december 2020*, GGD.
- [11] Peter Mulder, Hettie Boonman, Reinier Sterkenburg, [De verwachte impact van windturbines op huizenprijzen in Nederland. Een ruimtelijke analyse voor de periode 2020-2030](#), TNO, 3 maart 2022.

- [12] R. van Poll, S. Simon, [Ernstige hinder en slaapverstoring in Nederland - Onderzoek Beleving Woonomgeving \(OBW\) 2020.](#), RIVM 2022.
- [13] Zock, J., M. Reedijk, E. van Kempen, and J. Devilee, *Verkenning van opties voor gezondheidsonderzoek rond windturbines*, in *Health research options around wind turbines explored*. 2022, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- [14] [Onderzoek naar de blootstelling-responsrelatie windturbinegeluid en hinder en slaapverstoring | RIVM](#), geraadpleegd op 15 september 2025.
- [15] [Gezondheidsmonitoring nabij windparken: een praktijkvoorbeeld | Antea Group](#), geraadpleegd op 15 september 2025.
- [16] <https://www.arcadis.com/nl/projects/europe/netherlands/geluidsverwachting,-d-,nl-geeft-inzicht-in-geluid-en-slagschaduw-windturbines#:~:text=Arcadis%20maakte%20de%20app%20Geluidsverwachting.nl%2C%20die%20inzicht%20biedt,verwachting%20van%20het%20windturbinegeluid%2C%20tot%2048%20uur%20vooruit>, geraadpleegd op 15 september 2025.
- [17] Gooijer, L. and M. Mennen, *Klimaatakkoord: effecten van nieuwe energiebronnen op gezondheid en veiligheid in Nederland*. 2021, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- [18] [Slagschaduw en lichtschildering door windturbineparken | Informatiepunt Leefomgeving](#), geraadpleegd op 20 mei 2025.
- [19] Hof, M., C. Bodar, and T. de Kort, *Eerste inzicht in emissies van chemische stoffen bij wind op land. Resultaten quickscan*, in *First insight into emissions of chemical substances by wind turbines on land. Results quickscan*. 2023, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- [20] S. Versluis, J.H.J. Wijten, H.J. Manuel, Actualisatie rekenmethode omgevingsveiligheid windturbines, RIVM, 2024.
- [21] M. Spoelstra, Kennisbundel Windturbines, NIPV, 17 februari 2025.
- [22] [WindAction](#), geraadpleegd op 10 juni 2025.
- [23] <https://www.nedzero.nl/media/site/3f61c87d0c-1721391666/handleiding-ijsprotocol-nedzero.pdf>, geraadpleegd op 20 juni 2025.

5 Zonne-energie – Cosima Stähler en Jasmijn Otte, RIVM

Dankwoord

De auteurs danken Niels van Veen (RIVM) voor zijn waardevolle inbreng in dit hoofdstuk.

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bespreekt de toepassing van zonne-energie, waarbij de energie uit zonlicht wordt omgezet in elektriciteit. Dit gebeurt met zonnepanelen voorzien van fotonvoltaïsche (PV)-cellen. PV-cellen bevatten een dunne plaat silicium waarin de energie van de zon een elektrische stroom opwekt. Wanneer zonnestralen de zonnecellen raken, zorgen ze ervoor dat elektronen in het silicium loskomen. Hierdoor ontstaat een elektrische stroom. Deze stroom is niet direct bruikbaar: de opgewekte gelijkstroom moet eerst omgezet worden naar wisselstroom. Dit gebeurt met een omvormer [1]. Het PV-systeem is het geheel, wat bestaat uit zonnepanelen, omvormer, connectoren en kabels.

De meest toegepaste zonnepanelen zijn mono- en polykristallijne zonnepanelen (95%). Daarnaast worden dunne-film-zonnepanelen (5%) gebruikt [2,1]. Richting 2050 worden er naar verwachting ook andere typen panelen toegepast, zoals perovskietpanelen, heterojunction, tandempanelen (silicone en perovskieten) [3,4,5,6]. Deze zonnecellen gedragen zich in het laboratorium veel efficiënter dan de kristallijne siliciumcellen. Ze kunnen dus in een doorontwikkeltraject potentieel leiden tot efficiëntere zonnecellen voor de commerciële markt. [7,4]. Wel bevatten zonnepanelen met perovskieten kleine hoeveelheden arseen, gallium, indium of lood. In Nederland regelt Stichting OPEN de inzameling en verwerking van afgedankte zonnepanelen. Nederland heeft geen eigen recyclingfaciliteit. Daarom worden panelen momenteel naar het buitenland gestuurd [7].

Zonnepanelen worden zowel in de gebouwde omgeving gebruikt, als in zonneparken/zonneweides van verschillende groottes op land en op het water. Zonneparken kunnen meerdere hectares groot zijn. Daarom liggen ze vaak op bedrijventerreinen of in het buitengebied.

Zonnepanelen zijn ook te vinden op daken van woningen, tuinbouwkassen, bedrijfspanden en boven parkeerplaatsen. In het Klimaatakkoord is afgesproken dat er een voorkeursvolgorde is voor het plaatsen van zonnepanelen: de zonneladder. Zonnepanelen worden bij voorkeur eerst geplaatst op daken en gevels van gebouwen, vervolgens op onbenutte terreinen in stedelijk gebied of infrastructuurzones, en pas als laatste in het open buitengebied [8]. Dit om te voorkomen dat zonnepanelen onnodig op landbouw- en natuurgrond worden gelegd [2].

Eind 2022 was het opgesteld vermogen aan zonne-energie 19,1 GWp (piekvermogen) met een jaarproductie van 16,8 TWh. Tegen 2030 wordt verwacht dat deze jaarproductie zal groeien tot 43 TWh. Tegen 2050 kan de zonne-energiecapaciteit oplopen tot 135 TWh [9,10].

5.2 Gezondheid

5.2.1

Elektromagnetische velden en laagfrequent geluid van omvormers

De omvormers, die noodzakelijk zijn voor het omvormen van de door de zonnepanelen opgeleverde gelijkstroom in wisselstroom, genereren elektromagnetische velden [2]. De veldsterke is ligt onder de blootstellingslimiet [11]. Omvormers kunnen ook laagfrequent geluid produceren en moeten dus in een ruimte geplaatst worden waar mensen niet vaak verblijven, zoals een garage of zolderruimte. Mensen verblijven gewoonlijk niet langdurig in de buurt van een omvormer. Hierdoor is de feitelijke blootstelling zeer laag [2].

5.2.2

Hitte-eiland effect

Het hitte-eiland effect komt voornamelijk voor in stedelijke gebieden, waar het aanzienlijk warmer kan zijn dan in omliggend landelijke gebieden. Er zijn zorgen dat zonneweides een vergelijkbaar hitte-eiland effect kunnen hebben op de omgeving. Dit kan effect hebben op de gezondheid van de mens, habitatten en het functioneren van een ecosysteem. Er zijn verschillende klachten die door hitte kunnen ontstaan. Kwetsbare groepen kunnen klachten krijgen van vermoeidheid, hoofdpijn en concentratieproblemen, uitdroging en hitteberoerte. In ernstige gevallen kan blootstelling aan hitte zelfs leiden tot overlijden. Bij enkele dagen boven de 30 graden kan iedereen last krijgen van de warmte. Veel voorkomende klachten zijn onder andere vermoeidheid, hoofdpijn, verstoorde slaap en concentratieverlies [12, 13]. PV-platen kunnen de albedo (lichtweerskaatsingsvermogen), vegetatie en de inrichting van het terrein veranderen. Dat kan ervoor zorgen dat zonne-energie op een andere manier wordt teruggekaatst naar de atmosfeer of geabsorbeerd, opgeslagen en opnieuw wordt uitgestraald. Het hitte-eilandeffect van zonnepanelen zou de temperatuur boven een weide in vergelijking met natuurgebieden 's nachts 3-4 graden verhogen [14].

Zonnepanelen kunnen niet alleen de temperatuur veranderen in zonneweides, maar ook in een stedelijke omgeving. Volgens een onderzoek van Khan (2024) in Kolkata kan de dagtemperatuur maximaal 1,5 °C verhogen en de nachttemperatuur 0,6 °C verlagen [15].

Studies laten zien dat er warmteoverdracht is tussen PV-panelen en de omgeving, maar dat de gevolgen voor de temperatuur afhankelijk zijn van het type installatie en de locatie. Verschillende studies geven tegenstrijdige resultaten, zelfs bij vergelijkbare locatie en opzet van zonnepanelen. Dit komt onder andere door de verschillende methodes die in de studies gebruikt worden [16].

De meeste onderzoeken zijn theoretisch of gebaseerd op simulatiemodellen en er worden verschillende methodes gebruikt. Er zijn ook onderzoeken die laten zien dat PV-platen een verkoelend effect kunnen hebben op de omgeving, afhankelijk van de plaatsing en efficiëntie van de zonnepanelen.

Kennisvragen:

Verkennen in hoeverre er meer onderzoek nodig is naar het effect van PV-platen op de omgevingstemperatuur in zonneweides en de stedelijke omgeving en hoe dit onderzoek eruit moet zien.

5.2.3 *Emissies*

Emissies bij het gebruik van zonnepanelen kunnen ontstaan door schade door weeromstandigheden of brand. Uitlogingsexperimenten met kristallijne zonnepanelen tonen aan dat stoffen zoals lood en nikkel uit kristallijne zonnepanelen kunnen lekken. De exacte omvang en dus de eventuele effecten op de bodem wanneer dit gebeurt, zijn nog niet voldoende onderzocht. Bij de huidige verwerking van afgedankte zonnepanelen kunnen tijdens het vermalen van de gelamineerde panelen gevaarlijke stoffen, zoals zware metalen, antimoon en PFAS, vrijkomen in de vorm van stofdeeltjes. Er zijn zorgen over de blootstelling aan zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) en andere schadelijke stoffen bij het recyclen van zonnepanelen. Mocht recycling in de toekomst gaan plaatsvinden in Nederland, dan is het belangrijk om deze mogelijke blootstelling verder te onderzoeken. De eventuele verspreiding van ZZS hangt af van de maatregelen die de recycler treft om stof- en emissievorming tegen te gaan, zoals afzuiging en filtratie [7,17].

Kennisvragen:

Voordat in Nederland recycling van zonnepanelen opgezet gaan worden, zou het nuttig zijn om te verkennen in hoeverre er meer onderzoek nodig is naar de risico's bij hergebruik van materialen en de mogelijke PFAS- emissies bij het recyclingproces.

5.3 **Veiligheid**

5.3.1 *Brand en vrijkomende stoffen bij branden*

Een veiligheidsrisico bij zonnepanelen is de mogelijkheid van brand. Een consortium van TNO, NEN en NIPV hebben branden met PV-installaties gedurende een jaar (van november 2022 tot oktober 2023) gemonitord en geanalyseerd [18]. Bij ongeveer 1 procent van het totale aantal gebouwbranden was een PV-installatie betrokken. Ongeveer 0,005 procent van alle PV-installaties op/aan gebouwen waren bij een brand betrokken.

Branden kunnen ontstaan door kortsluiting, of door defecten in de panelen zelf. Vaak zijn deze incidenten terug te voeren op materiaalfalen of ontwerp- of installatiefouten. Het voorkomen van ongevallen en branden wordt daarom vooral bereikt door kwaliteitsborging van de componenten van het PV-systeem en installatie door een professional [1].

In-gevel-PV-panelen maken deel uit van de constructie en worden dicht tegen de gevel geplaatst [19]. Vanwege de smalle spouw is er bij dit soort zonnepanelen weinig ruimte voor ventilatie achter het paneel. Met perovskiet-zonnecellen komt de markt dichterbij voor zonnepanelen die rechtstreeks op een gevel of object worden geplakt [4]. De temperaturen achter het paneel kunnen hierdoor hoog oplopen. Daarnaast wordt voor het isoleren van het gebouw vaak brandbaar isolatiemateriaal gebruikt, dat de brand kan versterken [20]. Bij een vonk door een defect paneel of een defecte connector is er weinig energie nodig om een brand te veroorzaken. De structurele sterkte van aluminium ophangsystemen van de panelen kan door de brand verloren gaan. Hierdoor kunnen PV-panelen en brandende onderdelen van het gebouw vallen.

Bij een grootschalige brand waarbij zonnepanelen betrokken zijn, kunnen verbrandingsproducten en resten van zonnepanelen in de omgeving worden verspreid. Bij een gebouwbrand met zonnepanelen komen ongeveer dezelfde gevaarlijke stoffen vrij als bij een gemiddelde gebouwbrand, omdat er ook elektronica en kunststoffen verbranden. Als een gebouw met zonnepanelen op het dak brandt, zijn de zonnepanelen maar een klein onderdeel van de brand. Daardoor is de rook van een gebouwbrand met zonnepanelen niet gevaarlijker dan die van een brand zonder zonnepanelen. Bij verbranding geeft glas geen verbrandingsproducten, maar de polymere tussenlaag wel, voornamelijk koolstofmonoxide en koolstofdioxide. Gevaarlijke stoffen die vrijkomen, zijn onder andere polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) en kleine hoeveelheden van verschillende metalen, zoals lood, koper, cadmium, arseen, selenium en zink [3, 20].

Tijdens een brand kan een zonnecel breken. Hierbij kunnen grotere en kleinere fragmenten ontstaan, die in de omgeving worden verspreid. De lichte, dunne scherven kunnen door de rook een heel eind worden meegevoerd[3]. PAK's en metalen hechten zich ook aan het oppervlak van de scherven, wat mogelijk een gezondheidsrisico met zich meebrengt, mede als het in de voedselketen terecht komt via onder andere gewassen. Als de scherven op een weide terechtkomen, kunnen ze door grazende dieren worden ingeslikt, waardoor schade aan het maag-darmkanaal ontstaat. Afhankelijk van de locatie, omvang van de brand (bijvoorbeeld in de buurt van weilanden of speeltuinen) en de weersomstandigheden tijdens de brand, is het raadzaam de omgeving te reinigen om contact met scherven en schadelijke stoffen te voorkomen [3, 21].

Recent heeft het NIPV ook een onderzoek uitgevoerd naar zonneparken en natuurbranden. Bij branden in zonneparken vindt geen depositie van glas in de omgeving plaats. Daarvoor is de warmteontwikkeling niet groot genoeg [22].

Kennisvraag:

Verkennen in hoeverre er meer onderzoek nodig is naar de invloed van de ondergrond (dak of muur) waaraan het paneel is vastgemaakt op het verloop van een eventuele brand en hoe dit onderzoek eruit moet zien.

5.3.2

Verblinding

Verkeersdeelnemers, piloten of omwonenden kunnen tijdelijk verblind worden door het reflecterende zonlicht van zonnepanelen. Bij het opstellen van zonnepanelen moet hiermee rekening worden gehouden. Verblinding zorgt voor een witte waas voor de ogen en kan na de verblinding zorgen voor een nabeeld. Bij oude zonnepanelen kan er extra schittering ontstaan wegens het ontbreken van een antireflectiecoating [23].

Voor PV-systemen op daken in woonwijken is er een grotere kans dat de zonnereflectie naar boven gaat. Daarnaast is er een grote kans dat omwonenden dit niet waarnemen door de hoogte van het gebouw. Op een luchthaven kan dit anders zijn in verband met hoge controletorens en vliegroutes [24].

De initiatiefnemer voor zonnepanelen kan een aantal maatregelen treffen, mocht er hinder ervaren worden. Te denken valt aan additionele

afscherming zoals groenafscherming, getextureerd glas, het aanpassen van de oriëntatie en hellingshoek van de zonnepanelen [23,24].

5.4 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren zijn gekomen tijdens de interviews en de in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 5.1 Opgehaalde beleidsvragen over zonne-energie uit de interviews en beleidssessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Zonne-energie			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Regelgeving mist voor het gebruiken van zonnepanelen als dakbekleding, op gevels; bepalen van afstandsnormen voor panelen op daken. - Toepassing van zonnepanelen in industriële omgeving: wens om integraal te kijken, dus in relatie tot andere risicobronnen. - Ontwikkeling van nieuwe typen PV-systemen volgen. Bijvoorbeeld perovskiet (loodhoudend, punt van aandacht), CdTe en CIGS. - Natuurbrandrisico's in zonne-weides? 	<ul style="list-style-type: none"> - Wens voor periodieke keuring en vergunningverlening voor PV-systemen (kabels en stekkers verouderen sneller bij grote hitte onder de panelen en aan de buitenlucht). - Regelgeving moet worden aangepast: niet meer enkele grote leveranciers van elektriciteit, maar vele kleinere spelers. - Regelgeving is nu gedecentraliseerd. Er is behoefte aan duidelijke, landelijke regels. Hoe om te gaan met circulariteit en hergebruik? Nu alleen downcycling en eventueel export (voor hergebruik of afvalverwerking).
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Wens om keten als geheel te bekijken: ook EOS of waterstofopslag, waarin de energie wordt opgeslagen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Wens: safe- (and-sustainable-) by-design-principes stimuleren.
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Wens om meer internationaal samen te Werken (bijvoorbeeld Vanuit het Renewable Energy Directive). Veel beleidsvragen zijn 	<ul style="list-style-type: none"> -Brandcompartimentering (bouwbesluit) wordt voor Zonnepanelen niet altijd gevolgd (panelen over meerdere compartimenten heen).

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Zonne-energie		namelijk niet-specifiek voor Nederland.	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	- Wens om bij incidenten opgedane kennis te gebruiken. Daarom niet alleen registreren, maar ook analyseren. Hele levenscyclus van een zonnepaneel volgen. Op dit moment geen traceerbaar kenmerk op panelen.	

5.5 Referenties

- [1] Spoelstra M.B. Kennisbundel-zonnepanelen. IFV; 2021.
- [2] Gooijer L., Mennen M.G. Klimaatakkoord: effecten van nieuwe energiebronnen op gezondheid en veiligheid in Nederland. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM; 2021. Accessed September 3, 2024. <https://rivm.openrepository.com/handle/10029/624994>
- [3] Veen N. van, Mennen M.G., Bos P.M.J., Engering T., Gerssen A., Lasaroms J.J.P. Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM; 2022. Accessed September 3, 2024. <https://rivm.openrepository.com/handle/10029/625893>
- [4] Perovskietzonnecellen | TNO. tno.nl/nl. September 9, 2024. Accessed September 3, 2024. <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnetechnologie/perovskietzonnecellen/>
- [5] Rendement zonnepanelen stijgt | TNO. tno.nl/nl. September 9, 2024. Accessed September 3, 2024. <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnemodules-massamaatwerk/rendement-zonnepanelen-stijgt/>
- [6] Tandem technology for higher PV performance | TNO. tno.nl/en. September 9, 2024. Accessed September 3, 2024. <https://www.tno.nl/en/sustainable/renewable-electricity/advanced-solar-technologies/tandem-technology-higher-pv-performance/>
- [7] Heens F., De Boer L. Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie. RIVM; 2024. 10.21945/RIVM-2023-0310
- [8] Beleid zonne-energie | RVO. Accessed May 23, 2025. Beleid zonne-energie | RVO.nl
- [9] Monitoring zonne-energie | RVO. Accessed May 23, 2025. Monitoring zonne-energie | RVO.nl
- [10] Nationaal plan energiesysteem: Verdiepingsdocument B – Ontwikkelpaden ketens van het energiesysteem. Ministerie van Economische Zaken. 2023

- [11] Dusseldorp A., Pruppers M.J.M., Van Putten E.M. Verkenning van Extreem-Laagfrequente (ELF) Magneetvelden Bij Verschillende Bronnen. RIVM; 2018. doi:10.21945/RIVM-2018-0015
- [12] Gezondheidsklachten door hitte | RIVM. Accessed September 3, 2024. <https://www.rivm.nl/hitte/gezondheidsklachten-door-hitte>
- [13] Gevolgen voor de gezondheid - Kennisportaal klimaatadaptatie. Accessed May 23, 2025. Gevolgen voor de gezondheid - Klimaatadaptatie
- [14] Barron-Gafford G.A., Minor R.L., Allen N.A., Cronin A.D., Brooks A.E., Pavao-Zuckerman M.A. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. Sci Rep. 2016;6(1):35070. doi:10.1038/srep35070
- [15] Khan, A., Anand, P., Garshasbi, S. et al. Rooftop photovoltaic solar panels warm up and cool down cities. Nat Cities 1, 780–790 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00137-2>
- [16] He Y., Hii D.J.C, Wong N.H. Solar photovoltaics deployment impact on urban temperature: Review and assessment recommendations. Build Environ. 2024;264:111920. doi:10.1016/j.buildenv.2024.111920
- [17] Lijzen J.P.A., Heens F., Dekker E., Van Bodegraven M., Hof M. Recycling of solar panels. Comparison of scenarios for a more circular and safe product chain. RIVM; 2024.
- [18] R. van den Dikkenberg, M. Duyvis, V. Jansen, M. Leene en J. Veeneklaas, [20241014-NIPV-Gebouwbranden-met-zonnepanelen.pdf](#), TNO, NEN en NIPV, 12 juli 2024.
- [19] Kort A. De. Brandrisico van in-gevel PV-panelen. Brandveilig. September 25, 2023. Accessed September 3, 2024. <https://www.brandveilig.com/artikel/brandrisico-van-in-gevel-pv-panelen-73251>
- [20] D. van der Meij, X. Rekkers en J. Keyser [20250501-VRU-NIPV-Kennisdocument-zonnepanelen.pdf](#), Veiligheidsregio Utrecht, 1 mei 2025.
- [21] Duyvis M.G., Leene M., Spoelstra M.B. Depositie bij branden met zonnepanelen. IFV; July 15, 2021.
- [22] M. Duyvis, M. Rovers, C. Stähler, I. Tanck, B. Verhoeven en J. Vos, [20241219-NIPV-Zonneparken-en-natuurbranden.pdf](#), NIPV, 19 december 2024.
- [23] Pessenha T.M.F., Haaren J.F., Van. Zonneveld Almere Buiten A6 Reflectieonderzoek. Rijksvastgoedbedrijf. July 27, 2018.
- [24] Sreenath S., Sudhakar K., Yusop A.F., Cuce E., Solomin E. Analysis of solar PV glare in airport environment: Potential solutions. Results Eng. 2020;5:100079. doi:10.1016/j.rineng.2019.100079

6 Kernenergie – Lars Roobol, RIVM

6.1 Inleiding

Kerncentrales zetten splijtstof (zoals uranium) om in warmte en elektriciteit, zonder CO₂-uitstoot. Nederland heeft op dit moment één centrale, in de gemeente Borsele, met een (elektrisch) vermogen van 482 MW. Doordat kerncentrales bijna gedurende het hele jaar operationeel zijn, levert de centrale in Borsele, ondanks een kerncentrale bescheiden vermogen, toch een aanzienlijke hoeveelheid elektriciteit. In 2023 was dat 3,8 TWh. Dat betekent dat de centrale gemiddeld 90 procent van het jaar vol vermogen heeft geleverd [1]. Kerncentrales zijn regelbaar en in staat om het dag-en-nacht-ritme en het seizoensritme in de vraag naar warmte en elektriciteit te volgen [2]. Daarmee zorgen zij voor minder behoefte aan opslagsystemen in het CO₂-vrije energiesysteem van de toekomst.

Het kabinet Schoof zette wat kernenergie betreft het beleid van het kabinet Rutte IV voort. Dat wil zeggen: (1) het langer openhouden van de kerncentrale Borssele; en: (2) het bouwen van twee nieuwe kerncentrales van 1.000+ MW. Daarnaast wordt de mogelijkheid van het plaatsen van twee extra kerncentrales (ook 1.000+ MW) onderzocht. Tot slot wordt bekeken of het ook mogelijk is om meerdere centrales van minder vermogen (zogenoemde SMR's) in het energiesysteem te plaatsen [3].

Wat SMR's betreft, steunt de Nederlandse overheid ook innovatie: InvestNL en de provincie Noord-Brabant hebben miljoenen geïnvesteerd in het bedrijf Thorizon, met hun gesmoltenzoutreactor van de vierde generatie.³

De mediane bouwtijd⁴ van alle gerealiseerde kerncentrales in de wereld bedraagt 6,4 jaar. Dat betekent dat de helft van de centrales in langere tijd is gerealiseerd en de andere helft in kortere tijd. De paar bouwprojecten die sinds het jaar 2000 in West-Europa zijn uitgevoerd, kenden aanzienlijk langere bouw tijden [1].

Naast het opwekken van kernenergie, wordt er ook in ons land uranium verrijkt, opgeslagen en getransporteerd. Uit de ongevalsanalyses die in het kader van vergunningsverleningen zijn gedaan over het transport van splijtstof en uraniumverrijking blijkt dat de gevolgen van een ongeval hooguit lokaal zijn. Het landelijk crisisplan straling⁵ categoriseert deze ongevallen als 'B-incidenten', die (veel) minder gevolgen hebben dan categorie A-incidenten, zoals ongevallen met kerncentrales. Dit hoofdstuk laat transport, opslag en verrijking buiten beschouwing gelaten. Dit vanwege het beperkte risico en het feit dat als daar al manco's in de kennis zijn, die belegd zijn in de RIVM-opdrachten van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS).

6.2 Lopende en geplande onderzoeken

Wat kernenergie betreft, heeft de rijksoverheid enkele initiatieven ontwikkeld, en bereidt ze andere initiatieven voor.

³ <https://www.invest-nl.nl/nl/nieuws/20-miljoen-financiering-voor-de-innovatieve-kerntechnologie-van-thorizon>

⁴ Hierbij definiëren wij 'bouw tijd' als de tijd die het duurt na het begin van de civiele werkzaamheden ('eerste heipaal') tot aan de eerste levering aan het elektriciteitsnet.

⁵ <https://open.overheid.nl/documenten/ronl-99c4f56e-4331-4ec8-b30c-cc94ebd9078a/pdf>

Sinds 2023 heeft het ministerie van KGG (EZK) gelden beschikbaar gesteld voor het verbeteren van het onderwijs voor kernenergie en kerntechniek, van mbo- tot academisch niveau. Die gelden zijn beschikbaar gesteld aan de TUDelft en NRG Pallas, die dat programma in Nederland verzorgen [4]

KGG heeft via RVO een interessepeiling voor een MOOI-subsidie voor kernenergie op twee thema's laten doen: (1) Nucleaire reactor- en splijtstofcyclus-technologie; en: (2) Opslag van radioactief afval en eindberging [5]. Het Nederlandse bedrijfsleven kon tot 12 mei 2025 zijn interesse kenbaar maken.

De staatssecretaris van IenW kondigde in 2024 aan de beslissing over het realiseren van een geologische eindberging voor hoogradioactief afval naar voren te willen halen in de tijd. [6] Het ministerie van IenW neemt deel in het Meerjarig Multidisciplinair Innovatieprogramma (MMIP) van KGG voor de financiering, die nodig is om het hiervoor benodigde onderzoek te doen. Het programma voorziet ook in het verschaffen van een bredere kennisbasis voor de stralingsbescherming in het algemeen. Op het moment van schrijven van dit stuk is er nog geen besluit bekendgemaakt over het toekennen van de gevraagde gelden.

6.3 Gezondheid

Kerncentrales zenden zelf een zeer kleine hoeveelheid straling uit en lozen streng gecontroleerd radioactieve stoffen. Ook ontstaat er radioactief afval. De komende paragrafen leggen dit nader uit en bespreken wat het effect daarvan is.

6.3.1 *Radioactiviteit, verval en straling*

Radioactiviteit is een eigenschap van bepaalde atomen. Eenmaal in het leven van een radioactief atoom *vervalt* het atoom, waarbij het op dat ene moment energie (straling) uitzendt. Daarbij wordt een ander (en vaak niet-radioactief) atoom gevormd. Zo wordt uranium uiteindelijk, na enkele vervalstappen, stabiel lood.

Radioactieve stoffen als uranium en thorium (en de stoffen waarnaar zij vervallen), komen overal in de natuur in de bodem voor. Als wij stoffen uit de bodem halen (ertsen en mineralen, fossiele brandstoffen, of die stoffen gebruiken om er bijvoorbeeld bouwmaterialen van maken), komen er dus radioactieve stoffen in onze leefomgeving. En omdat planten in de bodem wortelen, is ook ons voedsel enigszins radioactief. Wij staan dus continu aan straling bloot en dat is onvermijdbaar. Het is een natuurlijk fenomeen. De komende paragrafen werken uit op welke manier wij blootstaan door de productie van elektriciteit met kerncentrales, en wat de gezondheidseffecten daarvan zijn [7].

6.3.2 *Externe straling*

Als bijproduct van de kernsplijtingen in de reactorkern ontstaan radioactieve reststoffen. Bij het verval van een deel van deze stoffen komt gammastraling vrij. Gammastraling heeft als enige van alle soorten straling die bij radioactief verval kunnen worden uitgezonden de eigenschap dat deze een groot doordringend vermogen heeft en dus wel door de wanden van de kernreactor heen komt. Een miniem deel van de gammastraling komt buiten het reactorgebouw. Een nog kleiner deel

bereikt de terreingrens, het openbaar toegankelijke terrein buiten het 'hek' rondom de centrale. Dit heet 'externe straling'.

In de vergunning van de centrale is geregeld dat passanten op openbaar toegankelijk terrein nooit meer dan een bepaalde dosis aan externe straling mogen ontvangen. Voor de kerncentrale in Borsele is dat een dosis van 10 microsievert per jaar. Dat is ongeveer de dosis die de gemiddelde inwoner van Nederland in twee dagen ontvangt, uit natuurlijke bronnen [7]. Het RIVM voert metingen uit aan deze externe straling en heeft tot nu toe steeds geconcludeerd dat de kerncentrale aan deze eis voldoet [8].

Verder is het belangrijk te beseffen dat deze dosis door enkelingen wordt ontvangen: dit is geen waarde die voor alle mensen in Nederland geldt.

6.3.3 *Lozing van radioactieve stoffen*

De kerncentrale in Borsele heeft ook vergunning om een bepaalde hoeveelheid radioactieve stoffen naar lucht en water te lozen. Na lozing in lucht kunnen de deeltjes direct worden ingeademd en zo in ons lichaam terechtkomen. Stoffen opgelost in water kunnen ook in ons lichaam belanden, als de deeltjes door planten of dieren worden opgenomen en zo in onze voedselketen terechtkomen. Na lozing in lucht is het ook mogelijk dat radioactieve deeltjes op de grond belanden. Als ze dan vervallen, kunnen ze voorbijgangers treffen met de straling die zij uitzenden (*externe straling*). Gewassen of dieren kunnen ze zo ook opnemen, waardoor ze in onze voedselketen terechtkomen.

Het RIVM voert metingen uit aan de monsters op basis waarvan de kerncentrale haar lozingen rapporteert en concludeert dat de eigen metingen goed overeenkomen met die van de kerncentrale zelf [9]. Op verschillende manieren is een schatting te maken van de blootstelling die deze lozingen veroorzaken. Deze schattingen komen allemaal uit op een dosis van minder dan 0,1 microsievert per jaar. Dat staat gelijk aan de dosis die iedereen in Nederland ongeveer per uur ontvangt uit natuurlijke bronnen [7].

Verder is het belangrijk te beseffen dat deze dosis door enkelingen wordt ontvangen. Dit is geen waarde die voor alle mensen in Nederland geldt.

6.3.4 *Radioactief afval*

Kerncentrales produceren radioactief afval. Het sterkst stralende afval komt uit de brandstofstaven, die uit de reactor komen. Ongeveer 5 procent van het gewicht van de afgevoerde brandstof bestaat uit radioactieve restproducten van de kernsplijting. De overige 95 procent is in principe nog voor het maken van nieuwe brandstof te gebruiken. Dat gebeurt ook in het geval van de kerncentrale Borssele. In het Franse La Hague scheidt de firma Orana chemisch het nog bruikbare deel. De radioactieve restproducten worden in glas gegoten en gaan terug naar Nederland. Daar worden zij opgeslagen bij COVRA, de centrale organisatie voor radioactief afval die zich in Vlissingen-Oost, niet ver van de kerncentrale, bevindt [10].

Daarnaast ontstaat er ook nog bedrijfsafval dat licht radioactief is, zoals handschoenen, glaswerk en overschoenen uit het laboratorium, en afval dat bij onderhoudswerkzaamheden ontstaat. Ook dat materiaal wordt opgeslagen bij COVRA. Bij COVRA geldt hetzelfde als bij de kerncentrale: ook COVRA heeft een vergunning voor het lozen van

radioactieve stoffen naar lucht en water. Ook geldt er een maximum jaarlijkse dosis door externe straling aan hun terreingrens. Het RIVM meet ook deze vergunningsvoorwaarden na, met dezelfde conclusies als hierboven voor de kerncentrale Borssele [11, 12].

Een deel van het afval dat naar COVRA gaat, komt in aanmerking voor geologische eindberging. Dat betekent dat het afval waarvan wij ons langdurig willen afschermen, 400-600 meter onder de grond wordt opgeborgen. De veiligheidsstudies die op dit moment door COVRA zijn uitgewerkt (over een fictieve berging), gaan ervan uit dat de verpakkingen wegroesten en uiteindelijk in contact met water komen. Het is dan niet uitgesloten dat er radioactief materiaal uit het afval in dat water oplost en zich met dat water langzaam een weg naar de oppervlakte zal banen. Hierdoor zijn er over ongeveer 200.000 jaar individuen die een dosis van 10 microsievvert per jaar ontvangen [13]. Dat is gelijk aan de huidige norm voor externe straling en ongeveer de dosis die de gemiddelde inwoner van Nederland in twee dagen uit natuurlijke bronnen ontvangt.

Verder is het ook hier weer belangrijk te beseffen dat deze dosis door enkelingen wordt ontvangen. Dit is geen waarde die voor alle mensen in Nederland geldt.

6.3.5 *Dosis-effectrelatie*

De *international commission for radiation protection* (ICRP) brengt al decennialang rapporten uit met de nieuwste inzichten over de effecten van straling en adviezen met betrekking tot stralingsbescherming. Hun rapport nr. 103 [14] is de basis voor de Europese (en daarmee ook de Nederlandse) wet- en regelgeving op het gebied van ioniserende straling.

Uit onderzoek aan mensen die aan een hoge dosis ioniserende straling zijn blootgesteld, blijkt dat mensen hierdoor later in hun leven kanker kunnen krijgen. Per *sievert* moet men volgens bovengenoemd ICRP-document rekening houden met 5 procent extra kans op overlijden (door de ioniserende straling). Een sievert is de eenheid waarin de stralingsdosis wordt uitgedrukt, en is een *risicomaat*: iemand die in korte tijd een dosis van 0,2 sievert heeft ontvangen, heeft tweemaal zoveel kans om hierdoor te overlijden als iemand die een dosis van 0,1 sievert heeft ontvangen. Een voorbeeld: in Nederland, waar ongeveer 30 procent van de mensen aan kanker overlijdt, zou die kans naar 31 procent stijgen als iedereen een dosis van 0,2 sievert zou oplopen. Omdat de effecten van ioniserende straling zo klein zijn, is het zeer moeilijk om wetenschappelijk valide conclusies te trekken voor blootstellingen beneden de 0,1 sievert. Dat geldt al voor de natuurlijke straling (ongeveer 0,002 sievert) waaraan wij jaarlijks bloot staan, en des te meer voor de stralingsnormen (0,000 01 sievert, 10 microsievvert) waaraan de uitstoot van kerncentrales en hun afval moeten voldoen.

Kennisvragen:

- Het onderzoek naar de publieksperceptie van kernenergie en radioactief afval kreeg nog weinig aandacht in Nederland. KGG gaf aan in hun *Programma-aanpak Small Modular Reactors*^[6] dat er behoefte is aan kennis over publieksparticipatie. Kernenergie neemt onder de manieren om energie op te wekken een bijzondere positie in: de mate van gevaarstelling ervan wordt heel verschillend gezien door experts en het publiek. Dat maakt

dat juist bij kernenergie onderzoek naar de publieke perceptie zinvol kan zijn.

6.3.6 *Kernongevallen*

Bij een kernongeval kunnen radioactieve stoffen op onbeheerste wijze naar buiten komen en zich in de leefomgeving verspreiden. Op basis van door de overheid vastgestelde scenario's, gekoppeld aan modelberekeningen, is een schatting te maken van een ongeval met een bepaalde kerncentrale, gebaseerd op de technologie van de centrale, de ligging, veel voorkomende weertypen, et cetera [15]. Deze analyses schatten de dosis die de mensen in de omgeving zouden ontvangen bij een ongeval. Omdat de overheid normen heeft bepaald waarboven bepaalde maatregelen aan de orde zijn (vaak zijn deze ontleend aan internationale gremia als het bovengenoemde ICRP), krijgt men zo ook een beeld van de maatschappelijke impact die een kernongeval zou kunnen hebben.

Bovenstaande manier van het kijken naar kernongevallen is beperkt, in de zin dat het puur kijkt naar stralingsdosis. Maar een ongeval kent vele dimensies, zoals duidelijk bleek tijdens de COVID-19-pandemie. Wordt er net als in een RIVM-rapport uit 2020 breed naar kernongevallen gekeken, dan blijkt dat het van meerwaarde is om multidisciplinair naar zo'n ongeval te kijken. Een van de aandachtspunten die naar voren kwam, is dat maatregelen die men met de gekozen normen van nu uit stralingsbescherming zou nemen, wellicht om andere redenen onwenselijk zijn [16]. Een voorbeeld hiervan is het evacueren van omwonenden op grote afstand van het kernongeval.

In de wetenschappelijke literatuur is zelfs de stelling verdedigd dat geen van de evacuaties naar aanleiding van het kernongeval met de Fukushima-Dai-ichi kerncentrale gerechtvaardigd waren. En maar een klein deel van de evacuaties naar aanleiding van het kernongeval met de kerncentrale van Tsjernobyl. Dat wil zeggen dat slechts een klein deel van de evacuaties ertoe heeft geleid dat de betreffende mensen een beter (gezonder, ...) leven kregen [17].

Dat komt doordat evacueren van mensen op zichzelf ook grote gevolgen kan hebben voor de gezondheid, zeker voor kwetsbare groepen. Met de kennis van nu is het daarom verstandig om ook die aspecten in kaart te hebben, omdat de manier waarop de overheid respons biedt aan kernongevallen invloed heeft op de volksgezondheid op langere termijn.

Lopend onderzoek:

- Er loopt binnen centrum Veiligheid van het RIVM (in opdracht van de ANVS) een project dat zich richt op de zogenoemde *Stralingsbeschermingsstrategie* bij kernongevallen. Dit is een vervolg op de analyses die in eerdere onderzoeken [15, 16] zijn gedaan, dus zowel scenario-onderzoek naar blootstelling aan ioniserende straling, als naar de perceptie ervan.

6.4 Veiligheid

In 'Gezondheid' zijn zaken behandeld waar kerncentrales een mogelijk risico voor de gezondheid kunnen vormen. Ook kernongevallen vallen doorgaans in deze categorie. Bij de andere technieken die dit rapport behandelt, worden in de paragraaf 'Veiligheid' situaties behandeld waarin er binnen korte tijd mensen komen te overlijden. Het enige

ongeval waarbij er op korte termijn doden te betreuren waren, was het ongeval met de kerncentrale van Tsjernobyl in 1986. Binnen enkele weken heeft dit ongeval het leven gekost van dertig mensen [18].

6.5 Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk

- Circulariteit en afval optimalisatie
 - o *Safe-by-design* is een begrip dat binnen verschillende sectoren aan de basis staat van de ontwerpfase. Analooq daaraan is het ook wenselijk, gezien de ambitie van Nederland om rond 2050 een circulaire economie te hebben, om het begrip *circular-by-design* te introduceren. Kerncentrales die nu worden gepland, draaien in de periode 2035-2100. Daarom zou het opportuun zijn om ook erop te sturen dat het met de ontmanteling van de kerncentrale gepaarde afval kan worden hergebruikt.
- Kernongevallen: wat is optimaal?
 - o Bij een crisis krijgen bestuurders advies vanuit de desbetreffende discipline (bij een kernongeval: het crisisexpert-team Straling en nucleair). De ervaring in oefeningen leert dat bestuurders bij hun beslissingen om de crisis te beheersen uit voorzorg soms meer of zwaardere maatregelen willen nemen, of deze maatregelen op een groter gebied van toepassing willen laten zijn. Aan iedere maatregel kleven ook nadelen en het ontbreekt tot nu toe aan een multidisciplinair afwegingskader dat de voor- en nadelen op een rij zet.
 - o Door vroeg in een incident een maatregel te treffen, wordt het latere werk (bijvoorbeeld in de nazorgfase) vergemakkelijkt. Het verdient aanbeveling om lessen te halen uit crises uit het verleden met een lang tijdsverloop (zoals het kernongeval in Fukushima, of COVID-19), en ook de latere fase (maanden tot jaren) in de planvorming voor crisisbeheersing te betrekken.
- Het RIVM keek op twee manieren naar kernongevallen [15, 16]. Dit lijkt twee verschillende beelden neer te zetten over hetzelfde kernongeval met de kerncentrale Borssele. Het is onduidelijk wat de samenhang tussen deze twee rapporten is. Dat komt doordat beide rapporten het resultaat zijn van verschillende kennisvragen die in verschillende context gesteld zijn. Daarom is een kennisvraag: wat is precies het verschil in de manier van kijken naar dit kernongeval in Borssele en waar wordt het verschil in uitkomst van beide studies door verklaard? Als hierover meer duidelijkheid wordt gegeven, kan dat beleidsmakers ook helpen om te bepalen op welk moment bij een onverhoopt ongeval het gerechtvaardigd is om omwonenden te evacueren.
- Vergelijk van chemische en radioactieve stoffen. Er is weinig onderzoek gedaan naar het verschil in wet- en regelgeving rond allerlei stoffen. Zijn chemische en radioactieve stoffen bijvoorbeeld gelijk voor de wet? Of wordt de ene categorie aan strengere normen gehouden dan de andere, en welke redenen zijn dan daarvoor aan te wijzen? Te denken valt aan:
 - o Eindberging van chemisch (ondiep, deponie) en radioactief afval (diep, geologisch).

- o Normstelling emissies en grenswaarden. Wat is het beschermingsniveau dat voor allerlei stoffen gekozen wordt, en wat is de rationale daar achter?

6.6 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren zijn gekomen tijdens de interviews en in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). Deze beleidsvragen waren voor de aanwezigen belangrijk. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 6.1 Opgehaalde beleidsvragen over kernenergie uit de interviews en beleidssessies, weergegeven in de matrixvorm, die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Kernenergie			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bij small modular reactors (SMR's) zou certificering van een bepaald ontwerp kunnen helpen in een kostenreductie wanneer er een tweede, vergelijkbare reactor wordt gebouwd. Die is immers al gecertificeerd, waardoor het ontwerp minder controlestappen behoeft. Is certificering daarom wenselijk? - Huidige normen zullen niet altijd afdoende zijn bij ontwikkeling van nieuwe SMR's: voor nu alleen doelstellende regelgeving hiervoor. Van nieuwe types small modular reactors (SMR) is nog te weinig kennis over bijvoorbeeld afval. Denk aan zoutgekoelde reactoren of Thorium-reactoren. - Ontwikkeling van schepen op kernenergie: richtlijnen nodig in de toekomst? 	<ul style="list-style-type: none"> - Er moeten beleidskeuzes gemaakt worden in welke richtingen Nederland zich wil voorbereiden: welke typen SMR's bijvoorbeeld? Als je ver vooruit probeert te plannen, hoe kun je dan een goede kosten-batenanalyses maken? Heeft Nederland de keuze om te wachten op de mogelijkheid om andere typen reactoren te bouwen? - Welke eisen worden er gesteld aan het elektriciteitsnet: dat moet altijd werken, want koeling is de belangrijkste schakel in de veiligheid. - Hoe om te gaan met economische effecten bij rampen met straling (bijvoorbeeld export ligt stil)? - Kernenergie ook in andere regio's dan de huidige: vergunningverlening moet rekening houden met omliggende industrieën, toestroom personeel en ruimtelijke ordening in de toekomst. Er is dus een brede impactanalyse nodig van de bouwfase van een reactor (op infrastructuur, huisvesting,

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Kernenergie			omringende bedrijven enzovoort).
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>		
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Kennisontwikkeling is gewenst bij andere VR's dan Zeeland. - Multidisciplinaire oefeningen van crisisscenario's vragen om betrokkenheid van gemeenten bij deze oefeningen. nazorg (ook langere termijn) zou meer aandacht moeten krijgen bij oefeningen. - Afvalopslag is nu afdoende geregeld, maar kan wellicht in de toekomst tegen grenzen oplopen. Wat betekent dat voor het veilig opslaan? - Transport van radioactief afval zal toenemen bij extra centrales. Wat heeft dit voor consequenties?*
Evaluatie	<i>Monitoring</i>		

* Perceptie is een belangrijk onderwerp bij kernenergie. En: er zou ook meer gekeken moeten worden naar energiebesparing.

** Transport gaat door België, naar de afvalverwerker in Frankrijk, en dan weer terug naar Nederland voor opslag bij de COVRA.

6.7 Referenties

1. Internationaal Atoomenergie Agentschap, *Power Reactor Information System*,
<https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=423>, geraadpleegd op 16-10-2024.
2. Zie bijvoorbeeld *EnergyGraph*,
<https://energygraph.info/d/q7IpAJHVz/overview?orgId=1&refresh=30m>, geraadpleegd op 16-10-2024.
3. Hoofdlijnenakkoord kabinet Schoof,
<https://www.kabinetsformatie2023.nl/documenten/publicaties/2024/05/16/hoofdlijnenakkoord-tussen-de-fracties-van-pvv-vvd-nsc-en-bbb>, geraadpleegd op 16-10-2024.
4. <https://www.nuclearacademy.nl/>
5. https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/missiegedreven-onderzoek-ontwikkeling-en-innovatie/interessepeiling-subsidie_15
6. <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2024/09/04/staatssecretaris-jansen-wil-eerder-besluit-over-eindberging-radioactief-afval>

7. R. Smetsers en P. Bekhuis, Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland, RIVM-rapport 2021-0032, 2021 (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0032.pdf>)
8. C.P. Tanzi, Stralingsniveaumetingen aan de terreingrens van de EPZ kerncentrale Borssele in 2021, RIVM-rapport 2022-0132 (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0132.pdf>)
9. P.J.M. Kwakman, Contra-expertise op bepalingen van radioactiviteit in afvalwater en ventilatielucht van de kernenergiecentrale Borssele, RIVM-briefrapport 2021-0156. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0156.pdf>)
10. EPZ, KCB MER: Milieu-effectrapportage brandstofdiversificatie, 2010.
11. C.P. Tanzi, Gammastralingsniveaumetingen aan de terreingrens van COVRA N.V. te Borssele in 2021 met het MONET-meetnet, RIVM-briefrapport 2022-0131. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0131.pdf>)
12. P.J.M. Kwakman, Contra-expertise op bepalingen van radioactiviteit in afvalwater en ventilatielucht van COVRA NV, RIVM-briefrapport 2021-0157. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0157.pdf>)
13. COVRA, OPERA safety case, 2017. (<https://www.covra.nl/app/uploads/2019/08/Opera-SafetyCase.pdf>)
14. ICRP, Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. (<https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>)
15. J.M. Tomas *et al.*, Radiologische gevolgen van mogelijke ongevalsscenario's voor Kerncentrale Borssele, RIVM-rapport 2021-0047. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0047.pdf>)
16. T.J. Kerckhoffs *et al.*, Afweging van voor- en nadelen van beschermende maatregelen bij kernongevallen, RIVM rapport 2020-0058. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0058.pdf>)
17. I. Waddington *et al.*, J-value assessment of relocation measures following the nuclear power plant accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi, Process Safety and Environmental Protection, Volume 112, Part A, November 2017, Pages 16-49.
18. UNSCEAR-website over het kernongeval in Tsjernobyl in 1986, <https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/chernobyl.html>

7 Geothermie – Harmen Mijnlieff, TNO

Dankwoord

De auteur bedankt Johan van Middelaar, Jan Diederik van Wees en Jon Limberger voor het becommentariëren van dit hoofdstuk. De commentatoren zijn niet verantwoordelijk voor de uiteindelijke tekst.

7.1 Inleiding

Tijdens de aanleg en het gebruik van een geothermiesysteem kunnen zich ongewenste gebeurtenissen voordoen, die een effect kunnen hebben op de fysieke veiligheid en gezondheid. Wanneer de gevolgen aan de oppervlakte of het maaiveld, een zodanige intensiteit bereiken, kunnen ze een direct veiligheids- of gezondheidsrisico vormen, of na verloop van tijd de gezondheid negatief beïnvloeden.

Risico is een combinatie van de kans op het optreden van een ongewenste gebeurtenis en het mogelijke effect daarvan. Dit betekent dat bij het beschrijven van risico's een zekere mate van kwantificering nodig is: zowel van de kans van optreden als van de potentiële ernst van het effect. Voor geothermiesystemen is kwantificering lastig. Sommige ongewenste gebeurtenissen zijn namelijk nog niet goed in modellen te vangen zijn en er zijn weinig ervaringsfeiten om risico-inschattingen te kalibreren, of statistisch te benaderen. Geothermie is immers nog een relatief jonge sector in Nederland. Bovendien is de energiedrager bij aardwarmte (zout) water, wat geen gevaarlijke stof is. Er zijn in Nederland geen fatale incidenten geweest, of incidenten die tot langdurige gezondheidseffecten hebben geleid.

Over het algemeen hebben de geïdentificeerde risico's bij geothermie naar verwachting een lage kans van optreden en/of een zodanig beperkt effect, dat ze niet of nauwelijks een risico vormen. Voor de meeste ongewenste gebeurtenissen zijn uitgebreide analysemethoden voorhanden, voorzorgsmaatregelen voorgeschreven en mitigerende maatregelen gedefinieerd. De aangewezen toezichthouder op geothermie is Staatstoezicht op de Mijnen.

Dit hoofdstuk geeft een inventarisatie van ongewenste gebeurtenissen die kunnen optreden bij opsporing en winning van geothermie. Deze ongewenste gebeurtenissen zijn gecategoriseerd op basis van hun dominante effect op de gezondheid, veiligheid of op een ander domein, zoals het milieu of de economie. Vervolgens wordt per type ongewenste gebeurtenis het effect in termen van dreiging en risico behandeld:

- Gezondheid:
 - o Blootstelling aan 'Naturally Occurring Radioactive Material' (NORM);
 - o Luchtverontreiniging;
 - o Geluidshinder;
 - o Trillingshinder.
- Veiligheid:
 - o Gevolgen van aardbevingen;
 - o Explosie als gevolg van blow-out bij boorwerkzaamheden;
 - o Explosie als gevolg van overdruk in de bovengrondse procesinstallatie;

- o Explosie- en brandgevaar vanwege in opgepompte water opgeloste gassen, die ontvlambaar zijn;
- o Explosie-, brand- of verstikkingsgevaar omdat de werkvloeistof van mogelijk toekomstige diepe closed-loop systemen uit ontvlambare stoffen of mogelijk CO₂ bestaat.
- Anders:
 - o Chemische vervuiling grondwater;
 - o Biologische vervuiling grondwater;
 - o Thermische vervuiling grondwater.

Als bovenstaande effecten zich voordoen, zijn ze gewoonlijk terug te voeren op:

- 1) Werkzaamheden rond het boren van de put;
- 2) Werkzaamheden rond de aanleg en het opereren van de installaties;
- 3) Integriteitsverlies van aardwarmteinstallatiecomponenten;
- 4) Geïnduceerde seismiciteit.

7.1.1 *Huidige status aardwarmtewinning in Nederland*

Geothermie (aardwarmte) is een energiebron die in Nederland vooral effectief inzetbaar is, al dan niet met warmtepompen, voor de verwarming van huizen, gebouwen en kassen. Daarnaast kan geothermie in combinatie met warmtepompen ook aan een deel van de industriële warmtevraag voldoen. In de toekomst behoort elektriciteitsopwekking met geothermie tot de mogelijkheden, ook in Nederland. Geothermie is een hernieuwbare energiebron die continu beschikbaar is en niet afhankelijk is van weersomstandigheden, zoals wind- en zonne-energie. In de afgelopen 20 jaar is het aantal geothermiesystemen van nul naar 32⁶ gegroeid, met een totaal geïnstalleerd vermogen van ongeveer 480 MW⁷. De installaties werken niet altijd op de maximale capaciteit, en in 2023 waren er twintig operationeel. Deze systemen hebben in 2024 een totale hoeveelheid energie van 7,5 PJ geproduceerd. Het merendeel van de warmte-energie wordt aan de glastuinbouw geleverd, een sector die op jaarbasis rond de 13 PJ aan warmte verbruikt⁸. Voor het winnen van aardwarmte zijn elektrisch aangedreven pompen nodig. Hierdoor kost het energie om warmte-energie te produceren. De verhouding tussen energieproductie en -verbruik wordt uitgedrukt in de 'coëfficiënt of performance' (COP). De COP van de huidige installaties varieert tussen de tien en vijftig, met een gemiddelde van ongeveer dertig. Ter vergelijking, de COP van een elektrische kachel is altijd lager dan één. De ambitie is om in 2030 15 PJ/jaar te produceren en in 2050 zelfs 200 PJ/jaar⁹. Dit betekent een forse uitbreiding van de huidige productiecapaciteit. Doordat de aanleg van een warmte(transport)net kostbaar is, wordt een geothermie-installatie bij voorkeur op een bestaand netwerk aangesloten, dicht bij de warmtevraag. De bestaande installaties zijn daardoor voornamelijk gerealiseerd in glastuinbouwgebieden. De verwachting is dat er in de toekomst meer

⁶ [Jaarverslag 2023 - Delfstoffen en aardwarmte in Nederland | NLOG](#)

⁷ : Sommatie van het maximum gerealiseerd maandvermogen per geothermiesysteem van de looptijd van dat systeem tot statusdatum 31-12-2023.

⁸ [Energiemonitor Glastuinbouw 2023](#), Bijlage 6.

⁹ Kamerbrief no 31239 – 320; Stimulering duurzame energieproductie. Mei 2020.

installaties worden gerealiseerd in stedelijke gebieden met een grote gecentraliseerde warmtevraag.

Een geothermiesysteem werkt het efficiëntst wanneer het continu dezelfde hoeveelheid warmte produceert. De warmtevraag fluctueert echter dagelijks en is sterk seizoensafhankelijk. Van weinig tot geen vraag in de zomer, tot meer vraag dan het systeem kan leveren in de winter. Daarom is het een ideale basislastbron, die het best tot zijn recht komt in combinatie met warmtebuffers, zoals Hoge Temperatuur Opslag (HTO), die essentieel zijn in het toekomstige warmteleverings- en distributiesysteem.

7.1.2 *Geothermiesystemen in Nederland*

Geothermie is in essentie het benutten van aardwarmte. Er zijn verschillende types geothermiesystemen die de warmte in de aardkorst en bodem op een verschillende manier benutten. Het systeemontwerp kan een *open systeem* zijn, waarbij het bodem- of formatiewater wordt opgepompt naar het maaiveld. Daar wordt met een warmtewisselaar de warmte gewonnen (of erin gestopt), om vervolgens weer in dezelfde reservoirlaag te worden teruggesompt. Dit in tegenstelling tot *gesloten systemen*, waarbij er een gesloten lus in de ondergrond wordt geïnstalleerd. Hierin stroomt een werkvloeistof, die de warmte aan de ondergrond onttrekt, dan wel in de ondergrond inbrengt. Een gesloten systeem is te zien als een ondergrondse warmtewisselaar.

Een andere indeling voor geothermische systemen is te maken op basis van de aard van het reservoir, de watervoerende laag:

- Poreuze en permeabele reservoirs (matrix-permeabel).
- Permeabiliteit gerelateerd aan scheuren en breuken die van nature aanwezig zijn.
- Dicht (niet tot zeer laag permeabel) gesteente, waarin artificiële permeabiliteit wordt gecreëerd, de zogenoemde Enhanced Geothermal Systems (EGS). Hierbij wordt warmte voornamelijk onttrokken door stroming tussen het gecreëerde reservoir en de put. Een andere optie is een Advanced Geothermal System (AGS). Een AGS is een gesloten systeem van putsegmenten waarbij de warmte voornamelijk door geleiding uit het omliggende gesteente wordt onttrokken.

Warmtewinning uit de ondergrond van Nederland is ook op te delen op basis van het dieptebereik:

- Bodemenergie: van maaiveld tot 500 m (dit is een arbitraire grens gebaseerd op de bovengrens voor geothermie in de Mijnbouwwet), temperatuurbereik tot circa 25 °C. Dit dieptebereik wordt benut door een aantal verschillende systemen:
 - o Warmte koude opslagsystemen (WKO), die open, dan wel gesloten kunnen zijn (zie ook [Bodemwarmtewisselaars | RVO.nl](#)).
 - o Aquifer thermal energy storagesystemen (ATES), dit zijn in essentie open systemen:
 - Hoge temperatuur opslagsystemen (HTO);
 - Midden temperatuur opslagsystemen (MTO);
 - Lage temperatuur opslagsystemen (LTO);
 - o Conventionele open bodemenergiesystemen.

- Ondiepe geothermie: 500 – 1500m, temperatuurbereik in de orde van 25 – 55 °C.
 - o Hoge temperatuur opslagsystemen (HTO).
 - o Conventionele open geothermische systemen.
- Diepe geothermie: 1500 – 4000 m, temperatuurbereik in de orde van 55 – 135 °C.
 - o Conventionele open geothermische systemen
 - o Advanced geothermal system gesloten systemen (AGS).
- Ultradiepe geothermie: 4000 m en dieper, temperatuurbereik >135 °C.
 - o Conventionele open geothermische systemen, met name in breuk-permeabel reservoir.
 - o Enhanced Geothermal Systems (EGS) (open systemen).
 - o Advanced Geothermal System (AGS) (gesloten systemen).

Dit document richt zich met name op *geothermie* zoals het in de Nederlandse ondergrond op basis van de diepte wordt gedefinieerd. Dus warmtewinning in het dieptebereik van 500 meter en dieper.

Ongewenste gebeurtenissen over bodem-energiesystemen worden niet behandeld. Juridisch gezien valt geothermie (ondiep, diep en ultradiep) onder de Mijnbouwwet. Het bevoegd gezag voor geothermie ligt bij het ministerie van Klimaat en Groene Groei, met het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) als toezichthouder. Voor de bodemenergie ligt het bevoegd gezag bij de provincies. De oppervlakte-installatie van de geothermiesystemen valt juridisch gezien onder de Omgevingswet. Op installaties die zijn aangevraagd voor de ingang van de Omgevingswet op 1 januari 2024 blijft in bepaalde gevallen het BARM (Besluit Algemene Regels Milieu Mijnbouw) van kracht via het overgangsrecht. Zie voor meer informatie hiervoor de [uitleg op het IPLO](#).

Voor elk van de types geothermie-systemen kunnen ongewenste gebeurtenissen worden geïdentificeerd die een effect kunnen hebben op de fysieke veiligheid en gezondheid. Deze ongewenste gebeurtenissen zijn niet voor alle systeemtypes hetzelfde. Zelfs als de ongewenste gebeurtenissen vergelijkbaar zijn, kunnen de kans, effect en daarmee het risico significant verschillen.

7.2 Gezondheid

Met effecten op de gezondheid worden gebeurtenissen of processen bedoeld die langer dan een half jaar effect hebben op een mens.

7.2.1

Blootstelling aan 'Naturally Occurring Radioactive Material' (NORM)

In het geothermische water bevinden zich minimale hoeveelheden (ppm) radioactieve ionen, zoals radioactief lood. De concentraties hiervan zijn zeer laag en vormen geen direct gevaar voor de gezondheid. In het geothermische productieproces echter wordt het geothermische water in een andere druk-, temperatuur- en chemische omgeving gebracht. Hierbij vinden chemische reacties plaats tussen de componenten van de installatie en de ionen in het geothermische water, of tussen de ionen in het geothermische water onderling. Dit kan leiden tot het neerslaan van mineralen in de putverbuizing en de installatie. Sommige van die nieuw gevormde mineralen, ook wel 'scaling' genoemd, kunnen radioactieve ionen in het mineraalrooster invangen en als zodanig de radioactieve elementen concentreren op één plaats,

bijvoorbeeld in de filters of op bepaalde plaatsen in de putverbuizing en de installatie. Op deze plekken kan daardoor een grotere mate van radioactiviteit ontstaan. Dat betekent dat er voorzichtigheid geboden is met de afvoer van deze 'scaling'. Bij het vervangen van filters, buizen en leidingen bestaat dus de kans dat deze een verhoogd stralingsniveau hebben. Er is uitgebreide documentatie over hoe te handelen met NORM, zoals de industriestandaard 'Werken met NORM op geothermielocaties'. De ANVS¹⁰ en het SodM¹¹ zien bij geothermieprojecten hierop toe. In de praktijk betekent dit dat de blootstelling van werknemers aan extra straling van NORMs onder de Nederlandse jaargemiddelde stralingsdosis blijft, en het publiek niet meer dan 1/10 van deze dosis binnenkrijgt. Alles hierboven wordt verplicht als incident geregistreerd.

Een veelgebruikte mitigerende maatregel is het gebruik van mijnbouwhulpstoffen, ook wel 'inhibitors' genoemd. Deze stoffen zorgen ervoor dat de mineraalvormende reactie niet kan plaatsvinden of significant wordt gereduceerd. Hierdoor ontstaat er geen scaling en dus ook geen ophoping van radioactieve elementen. Een andere mitigerende maatregel is het gebruik van composiet materiaal in de put en installatie om de chemische reacties met het staal te vermijden.

Kennisvragen:

Om een betere voorspelling te kunnen doen voor het scaling-potentieel, kan meer onderzoek worden gedaan naar de aard van chemische processen in relatie met precieze druk-temperatuur en 'chemische' omgeving. Vervolgens is het op basis daarvan mogelijk de juiste mijnbouwhulpstof te selecteren om scaling tegen te gaan, maar ook een inhibitor te gebruiken die geen negatieve invloed heeft op de prestaties van het geothermiesysteem.

Nadere informatie:

- Industriestandaard Werken met NORM op Geothermie locaties. 2023. Geothermie Nederland. <https://geothermie.nl/wp-content/uploads/2023/04/IS-6-NORM-Werken-met-Naturally-Occuring-Radioactive-Materials-v6-FINAL-01-04-2023.pdf>
- Berekening van specifieke vrijgavewaarden voor NORM uit de geothermie. <https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2023/03/Berekening-van-specifieke-vrijgavewaarden-voor-NORM-uit-de-geothermie.pdf>
- Radioactieve rest- en afvalstromen in Nederland. Een inventarisatie. RIVM-rapport 2022-0073 <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0073.pdf>

7.2.2

Luchtverontreiniging

Tijdens de aanlegfase, die afhankelijk van het type boortoren een aantal maanden kan duren, leidt de uitstoot van uitlaatgassen van dieselaggregaten mogelijk tot luchtverontreiniging.

In al het geothermisch water zit in meer of mindere mate opgelost gas. Tijdens het 'in bedrijf' zijn van de installatie is het mogelijk dat gas, dat vrijkomt uit het formatiewater, incidenteel wordt 'ge-vent' (afgeblazen)

¹⁰ Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming

¹¹ Staatstoezicht op de Mijnen

of 'geflared' (verbrand). Hierbij komen gassen vrij, zoals methaan, CO₂ en mogelijk stikstofdioxiden.

In geval van een noodsituatie of door slijtage/corrosie kan de gasscheidingsinstallatie en verbonden infrastructuur voor 'opgelost gas' lek raken. Hierdoor komen de in het geothermische water opgeloste gassen in de atmosfeer vrij. Als beheersmaatregel kan de installatie snel worden uitgezet, zodat er geen stroming meer is in het primaire circuit en er dus geen nieuw opgelost gas kan vrijkomen.

Het ontsnappen van stinkende gassen via de flare, een lek in de installatie of tijdens het boren, veroorzaakt mogelijk geurhinder. Tot op heden is er bij geothermie geen indicatie dat het bekende, zeer stinkende en zeer giftige gas H₂S in het boor- of productieproces is aangetroffen, laat staan in een concentratie die gezondheidseffecten of geurhinder veroorzaakt. In de procedures en monitoring van het boorproces wordt altijd streng en strikt gelet op het voorkomen van dit gas.

7.2.3 *Geluidshinder*

In de aanlegfase leidt het boren met een grote boortoren en randapparatuur zeker tot een bovengemiddeld geluidsniveau dat 24 uur per dag aanwezig is, omdat het boren een volcontinue activiteit is. Het boorproces duurt een aantal maanden. Geluidshinder-verminderende maatregelen zijn mogelijk en worden ook ingezet. In de wet zijn normen en regels voor geluidsoverlast opgesteld voor het oprichten, veranderen of het in werking hebben van een inrichting of mijnbouwwerk.

Daarnaast kan zowel tijdens het boren als tijdens de productie hinder van laagfrequent geluid optreden, veroorzaakt door bijvoorbeeld de pompen. Laagfrequent geluid valt deels buiten het menselijk gehoor. De geluidshinder kan gezondheidseffecten hebben, zoals slapeloosheid. Het boorproces is van korte duur en zal niet tot langdurige gezondheidseffecten leiden. Tijdens de voorziene jarenlange productie veroorzaakt laagfrequent geluid eventueel een gezondheidseffect. Het zou nuttig zijn om te verkennen in hoeverre er meer onderzoek nodig is naar deze mogelijke gezondheidseffecten.

Kennisvragen:

Het kennisrapport '[Methods for the assessment of low-frequency noise from mining activities in the Netherlands](#)' geeft een zeer uitgebreide lijst met aanbevelingen voor verder onderzoek. Om niet het risico te lopen onvolledig of onjuist te refereren, verwijzen we de lezer naar bovenstaand rapport, pagina 86, waar de complete aanbevelingslijst is gekopieerd.

Lopende en geplande onderzoeken:

- Bij verschillende industriële activiteiten, waaronder geothermieprojecten, kan laagfrequent geluid (LFG) optreden. Daarmee is inzicht in de aard en impact van LFG relevant voor de beoordeling en uitvoering van geothermieprojecten.

Om meer kennis te vergaren over LFG, startte het SodM in maart 2025 met een experimenteel onderzoek naar LFG, waarbij langdurig op één locatie wordt gemeten. Dit gebeurt in de omgeving van het terrein van een gasopslagfaciliteit van TAQA in Alkmaar. Het onderzoek bestaat uit vier fasen, waarbij de toezichthouder na elke fase beoordeelt of er

voldoende meerwaarde is om door te gaan. Het perspectief van omwonenden wordt in elke fase meegenomen. De uitkomsten zijn niet alleen relevant voor gasopslag, maar kunnen ook waardevolle inzichten bieden voor geothermieprojecten. [Staatstoezicht op de Mijnen doet onderzoek naar laagfrequent geluid | Nieuwsbericht | Staatstoezicht op de Mijnen](#)

Nadere informatie:

- Methods for the assessment of low-frequency noise from mining activities in the Netherlands. [KEM-31 Infrasound \(<100Hz\) generation and observation in The Netherlands \(finished\) · KEM programma.](#)
- [Dossier Wabo en Geluid - Kenniscentrum InfoMil\)](#)

7.2.4

Trillingshinder

Trillingen bij geothermiesystemen kunnen verschillende oorzaken hebben en zullen in verschillende sterktes en frequentie voorkomen. Afhankelijk van de sterkte, de duur en de herhalingstijd van de trilling kan deze een veiligheidsrisico (zoals schade aan woningen), dan wel een gezondheidsrisico (zoals slapeloosheid) vormen. Richtlijnen voor acceptabele normering van trillingen worden gegeven in SBR richtlijn A & B. De volgende trillingsbronnen zijn geïdentificeerd, met waar mogelijk mitigerende maatregelen:

- Trillingen tijdens de aanlegfase: Het boren van de geothermieputten gebeurt met een zware boortoren, wat trillingen kan veroorzaken. Naast de boortoren, staan er op de locatie ook generatoren die trillingen kunnen veroorzaken. De reikwijdte van die trillingen lijkt voorsnog beperkt. Mitigerende maatregelen zijn bijvoorbeeld het strategisch plaatsen van generatoren, het gebruik van dempers, of aanpassing van het boorproces om de trillingssterkte te verlagen.
- Trillingen vanuit de bovengrondse installatie: Deze zijn op te wekken door de pompen die ervoor zorgen dat het geothermische water in het primaire en ook in het secundaire circuit wordt rondgepompt. Hinder is mogelijk op relatief korte afstand van het systeem tijdens de draaiuren. Gemiddeld genomen, draaien de systemen in Nederland 8.000 uur per jaar. Mitigerende maatregelen zijn bijvoorbeeld het trillingsarm opstellen van de pompen.
- Trillingen door logistieke bewegingen: Zwaar vrachtverkeer tijdens de aanleg van het systeem en daarna tijdens onderhoudsoperaties kan trillingen veroorzaken. Tijdens de aanleg is er sprake van intensief vrachtverkeer gedurende een aantal maanden (gemiddeld duurt de aanleg twee en halve maand). Tijdens de operationele fase van het geothermische systeem moeten er (meer)jaarlijks onderhoudswerkzaamheden plaatsvinden, waarbij zwaar vrachtverkeer noodzakelijk kan zijn.

Voor trillingshinder door de boorinstallatie en logistieke bewegingen zijn maatregelen geïdentificeerd en voorhanden. Of het is van een zodanig tijdelijke aard, dat op andere manieren naar een gepaste oplossing gezocht moet worden.

Nadere informatie:

- SBR-richtlijn A & B, [Bepalen en beoordelen van hinder door trillingen | Informatiepunt Leefomgeving](#).

7.3 Veiligheid

Met veiligheidseffecten bedoelen we in dit hoofdstuk gebeurtenissen of processen, die korter dan een half jaar effect hebben op een mens.

7.3.1 Geïnduceerde seismiciteit

Seismiciteit is jargon voor aardbevingen. Geïnduceerde seismiciteit verwijst naar aardbevingen die door menselijk handelen in de ondergrond kunnen ontstaan, zoals bij het winnen van aardwarmte. Aardbevingen ontstaan als gesteenten aan weerszijde van een breuk in de ondergrond schoksgewijs langs elkaar bewegen. Dit kan gebeuren als de spanningssituatie in de ondergrond bij een (bestaande) breuk een bepaalde kritische drempel overschrijdt. Aardbevingen vormen alleen een bedreiging voor de veiligheid als ze resulteren in een grondsnelheid of grondversnelling boven een bepaalde waarde. Dat kan leiden tot gedeeltelijke instorting van gebouwen en als gevolg daarvan fataal letsel.

Aardbevingen kunnen zowel tijdens het boorproces als tijdens de productie geïnduceerd worden:

- Geïnduceerde aardbevingen door de aanleg van het geothermiesysteem: Tijdens het boren van de geothermieputten is het mogelijk dat een bestaande breuk in de diepe ondergrond wordt doorboord. Breuken kunnen zeer permeabel zijn. Hierdoor bestaat er een kans dat de boorvloeistof vanuit het boorgat de breuk instroomt. Dit kan de breukeigenschappen en de spanningen op de breuk verstoren, wat kan leiden tot reactivatie van de breuk en voelbare trillingen aan het maaiveld. Het boortraject wordt in het algemeen zodanig ontworpen dat het doorboren van breuken wordt vermeden. Ook kan de boorspoeling worden aangepast om spoelingsverliezen te beperken als vermoed wordt dat in een kritische zone wordt of gaat worden geboord.
- Geïnduceerde aardbevingen (seismiciteit) door de geothermiewinning: Tijdens de winning wordt warmte onttrokken aan het geothermische water, waarna het afgekoelde geothermische water wordt teruggevoerd in het reservoir. Dit koelt het reservoir en de directe omgeving af, waardoor het gesteente een beetje krimpt. Daarnaast wordt het geothermische water onder overdruk terug het reservoir ingepompt. Door deze processen verandert de van nature al aanwezige spanning in en rond de koude zone. Indien er een breuk in het invloedsgebied (koude zone in de ondergrond) van het geothermiesysteem aanwezig is, bestaat de mogelijkheid dat die breuk gereactiveerd wordt als reactie op die veranderende spanning. Die reactivatie kan trillingen veroorzaken, die aan het maaiveld voelbaar kunnen zijn.

Tot dusver zijn er bij de in Nederland gebruikte matrix-permeabele-geothermiesystemen geen voelbare of schadeveroorzakende trillingen geregistreerd. Op basis van theoretische gronden en modelsimulaties

wordt de kans op dit soort trillingen als 'zeer klein' beschouwd. Bij de twee geothermie-systemen in breukgerelateerd reservoir gesteente is wel micro-seismiciteit tot net voelbare seismiciteit geregistreerd. Desondanks vereist de wet- en regelgeving dat er uit voorzorg een Seismische Dreigings- en Risico-Analyse (SDRA) wordt uitgevoerd, voordat een geothermieproject van start gaat. Voor de seismische dreiging en het risico bij geothermie is een uitgebreide SDRA-methodiek beschikbaar. De uitvoerder is verplicht om altijd gebruik te maken van het landelijke KNMI-seismische monitoringsnetwerk. Afhankelijk van de SDRA-uitkomst moet een aanvullend lokaal netwerk voor de seismische monitoring worden opgezet. Naast de monitoringsinspanning is voor elk geothermieproject een seismisch beheersprotocol (SRB) van kracht. Die beschrijft wat er moet gebeuren als een aardbeving wordt geregistreerd. Op basis van grondsnelheden zijn verschillende categorieën aardbevingen gedefinieerd, die elk specifieke acties en verplichtingen met zich meebrengen.

Kennisvragen:

Om de continue verbetering van de risicoanalyse en mitigatie van geïnduceerde aardbevingen te realiseren, kan aanvullend onderzoek worden gedaan, zowel voor het modelinstrumentarium als voor datavergaring. Momenteel wordt een modelinstrumentarium gebruikt dat nog niet alle processen omvat die voor seismiciteit bepalend zijn. Dit resulteert in een zeer ruime bandbreedte voor de inschatting van de dreiging en het risico van trillingen. Hierbij wordt uitgegaan van een zogenaamd 'worst-case'-scenario, waarvan de kans op optreden nagenoeg nihil is. Voor een betere en nauwkeurige bepaling van het veiligheids- en schaderisico bij geothermie, is het nodig om de onzekerheidsbandbreedte van de analyseresultaten te verkleinen. Dit vereist goede, theoretische modellen die alle processen omvatten, waaronder ook plastisch gedrag van gesteenten en a-seismische beweging langs breuken. Dit om zo een realistische magnitude-frequentierelatie voor geïnduceerde aardbevingen te kunnen bepalen. Deze modellen moeten gekalibreerd worden met veld- en laboratoriumgegevens om bruikbaar te zijn in het beleidsdomein. Hiervoor moet onder andere een gedetailleerd seismisch monitoringssysteem worden opgezet, met goede dekking voor de huidige en toekomstige geothermie locaties. Data uit die monitoringssystemen moeten vervolgens op een innovatieve manier in de modellering worden geïntegreerd.

Ook is de vraag of bij de in Nederland gebruikelijke geothermiesystemen het zogenoemde 'trailing effect' kan optreden. Dit effect houdt in dat een zwaardere aardbeving optreedt vlak nadat een geothermie-installatie is stilgelegd - meestal als reactie op een eerdere, lichtere aardbeving. Dit effect wordt vooral waargenomen bij systemen, die gebruikmaken van breuken in de ondergrond, zoals EGS-systemen. In Nederland is het 'trailing effect' één keer waargenomen. Dit vond plaats bij een installatie, die warmte produceerde uit een verbreukt kalksteenreservoir. Deze installatie is tot nader order buiten gebruik gesteld. Bij de huidige geothermie-installaties in Nederland, die warmte produceren uit poreuze en permeabele zandsteenreservoirs en dus geen gebruikmaken van ondergrondse breuken, zijn na het stopzetten van de productie helemaal geen aardbevingen waargenomen.

Naast de seismiciteitsgegevens zijn andere gegevens nodig om (lokale) modellen te kunnen opstellen en kalibreren, zoals geomechanische en thermische gesteente-eigenschappen en de druk- en temperatuurverdeling in het reservoir.

Lopende en geplande onderzoeken:

Voor gedetailleerde seismische monitoring is inmiddels een aantal onderzoeksprojecten geïnitieerd:

- Data-acquisitieprojecten:
 - o Ammerlaan, detail seismische monitoring in een diepe verlaten put. (zie [Onderzoeksproject naar geothermie en seismiciteit in Pijnacker \(tno.nl\)](#)).
 - o Geo4All; Meten, Monitoren & Modelleren in Kwintsheul, Bleiswijk, Middenmeer (Delft).
 - o Kwintsheul detail seismische monitoring aan maaiveld door TUD (zie [Seismic monitoring of Nature's Heat Geothermal Project in Kwintsheul \(Netherlands\) — TU Delft Research Portal](#)).
 - o DAP-project: uitgebreide seismische monitoring met verschillende technieken.
 - o In een aantal Nederlandse laboratoria (waaronder TUD, TNO, UU, PanTerra) wordt aan gesteentemonsters gemeten om een aantal gesteente-mechanische en -thermische eigenschappen te bepalen. Analysetechnieken moeten verfijnd en uitgebreid worden om ook nog andere essentiële parameters te bepalen.
- Verder ontwikkelen van modellen om te onderzoeken hoeveel van de spanning in het gesteente kan verdwijnen. Bijvoorbeeld door vervorming zonder aardbevingen (plastisch gedrag), a-seismische verschuiving en andere mechanismen, zoals die onderliggend aan het 'trailing effect'. Hiervoor zijn betere computermodellen nodig en nieuwe metingen aan gesteente om de modelparameters te bepalen. Het inventariserende onderzoek naar hoe plastisch gesteentegedrag invloed heeft op aardbevingen moet worden uitgebreid met onderzoek naar de invloed van plastisch gedrag van gesteente op scheurvorming en -groei. Daarnaast wordt veel onderzoek gedaan naar hoe goed het afsluitende gesteentepakket werkt bij CO₂-opslag (CCS, zie hoofdstuk 9.4.2).
- Opzetten van modellen die op basis van locatiespecifieke parameters een adequate voorspelling van de seismiciteit geven. Er wordt (is) al onderzoek verricht naar alternatieve modellen om voortschrijdend inzicht en meer ondergrondse processen in het modelinstrumentarium te vangen zoals in:
 - o DeepNL;
 - o Geo4All;
 - o WarmingUp, [nederlandse samenvatting rapport buijze et al 2021 quantification of induced seismicity potential of geothermal operations.pdf](#);
 - o [KEM-15 Seismic Risk due to Cooling Effects in Geothermal Systems \(finished\) · KEM-programma](#);

Nadere informatie:

- SBR-richtlijn A & B, zie [Beleid, wet- en regelgeving - Kenniscentrum InfoMil](#).
- TNO-AGE, 2020. Risico's van eventuele seismiciteit bij geothermie. https://www.nlog.nl/sites/default/files/2023-11/age_20-10.036_risicos_seismiciteit_geothermie.pdf
- L. Buijze, L. van Bijsterveldt, H. Cremer, B. Paap, H. Veldkamp, B. Wassing, J.-D. van Wees, J. ter Heege. 22 May 2019. Review of worldwide geothermal projects: mechanisms and occurrence of induced seismicity. <https://www.nlog.nl/sites/default/files/2019-09/worldwidegeothermalprojectsrelationinducedseismicity-tno-2019-r10043.pdf>
- Seismische dreigings- en risicoanalyse voor geothermie: zie [SDRA Geothermie & Integriteit afdichtend pakket | NLOG](#)
- Seismisch respons en beheerssysteem: zie [Seismisch respons en beheerssysteem voor geothermie | NLOG](#)
- SRB zie [Seismisch respons en beheerssysteem voor geothermie | NLOG](#)
- Marelis, A., Beekman, F., Van Wees, J., 2024, 3D mechanical analysis of geothermal reservoir operations in faulted sedimentary aquifers using MACRIS.

7.3.2*Chemische explosie als gevolg van blow-out bij boorwerkzaamheden*

Een ander veiligheidsrisico is een chemische explosie¹² (hierna 'explosie') door een blow-out tijdens boorwerkzaamheden. Een blow-out kan optreden wanneer een potentieel nog niet ontdekt gas, voorkomend in de ondergrond, wordt aangeboord en ongecontroleerd naar de oppervlakte ontsnapt. Dit kan leiden tot een explosie als het gas in contact komt met een ontstekingsbron. Om dit risico te minimaliseren, worden:

- Ten eerste de boortrajecten van geothermieputten zo ontworpen dat ze niet door potentiële gasvoorkomens gaan.
- Ten tweede blow-out preventers (BOP's) gebruikt die de druk in de boorput kunnen beheersen en de uitstroom van gas kunnen stoppen.
- Ten derde strikte veiligheidsprotocollen gevolgd tijdens het boren om de kans op een blow-out te verminderen.

7.3.3*Fysische explosie door overdruk in de bovengrondse procesinstallatie*

Een van de veiligheidsrisico's bij geothermie is de mogelijkheid van een fysische explosie¹³ door overdruk in de bovengrondse procesinstallatie. Tijdens de exploitatie van een geothermische installatie wordt formatiewater met verhoogde druk door het systeem gepompt. Als de drukregulerende systemen falen, kan dit leiden tot een overdruk. Dat kan de installatie beschadigen en mogelijk een explosie veroorzaken. Dit risico wordt beheerst door het gebruik van drukregulerende kleppen en door regelmatige inspecties en onderhoud van de apparatuur om ervoor te zorgen dat de druk binnen veilige grenzen blijft.

¹² Een explosie van een gevaarlijke stof wordt vaak een chemische explosie genoemd. Dit type explosie ontstaat door een snelle chemische reactie, zoals een oxidatie- of ontledingsreactie, waarbij plotseling veel warmte en gas vrijkomen.

¹³ Een fysische explosie is een plotselinge en krachtige ontlading van energie die optreedt wanneer een vat of container bezwijkt door inwendige overdruk of onderdruk. Dit kan gebeuren met objecten, zoals spuitbussen, gasflessen, vaten of (opslag)tanks.

7.3.4 *Explosie- en brandgevaar vanwege in opgepompte water opgeloste gassen die ontvlambaar zijn*

Bij alle geothermische systemen in Nederland zit gas opgelost in het geothermische water in de diepe ondergrond. Een deel van die opgeloste gassen kan ontvlambaar zijn, zoals methaan, wat een explosie- en brandgevaar oplevert. Wanneer het water naar het maaiveld wordt gepompt, neemt de druk op het water af en kan het opgeloste gas ontsnappen. Dit is vergelijkbaar met het openen van een frisdrankfles. Bij een groot aantal geothermiesystemen bestaat een groot deel van dat gas uit methaan, naast stikstof en CO₂. In veel gevallen wordt het gas afgevangen in de installatie en nuttig aangewend in een warmtekrachtkoppeling (WKK)-installatie. De restgassen, met name CO₂, worden bij geothermie-installaties in de glastuinbouw nuttig ingezet in de kassen als plantengroei-stimulerende toevoeging aan het interne kasklimaat. Methaan is brandbaar en kan explosief ontbranden als het in bepaalde concentraties ontsnapt uit de installatie en er een ontstekingsbron in de nabijheid van het lek aanwezig is.

In de mijnbouwwet en aanverwante documentatie staat goed beschreven en gedefinieerd hoe dit risico is te analyseren en mitigerende maatregelen en handelingsprocedures zijn op te stellen als een ongewenste gebeurtenis zich voordoet. Om dit risico te beheersen, worden onder andere ontgassingsinstallaties en fakkels gebruikt om de gassen veilig af te voeren. Daarnaast worden er strikte veiligheidsmaatregelen genomen om ervoor te zorgen dat er geen ontstekingsbronnen in de buurt van de ontgassingsinstallaties aanwezig zijn.

7.3.5 *Explosie-, brand- of verstikkingsgevaar, omdat de werkvloeistof van closed-loopsystemen bestaat uit ontvlambare stoffen of CO₂*

Gesloten geothermie-systemen die mogelijk in de toekomst in Nederland operationeel kunnen worden, berusten op warmte-uitwisseling tussen gesteente en een werkvloeistof in de gesloten geothermische primaire loop. De werkvloeistof is bij voorbeeld iso-pentaaan, -butaan of CO₂. Iso-pentaaan en -butaan zijn brandbaar en kunnen explosief ontbranden, als ze in bepaalde concentraties ontsnappen uit de installatie en er een ontstekingsbron in de nabijheid van het lek aanwezig is. CO₂ is in hoge concentratie giftig. Dit soort systemen zijn in de geothermie nog niet in Nederland in gebruik. Gesloten bodem-energiesystemen met werkvloeistoffen (voornamelijk water met glycol) worden in Nederland al wel toegepast.

Kennisvragen

Onderzoekers proberen beter te begrijpen welke chemische stoffen aanwezig zijn in het formatiewater en hoe deze veilig zijn te beheren en af te voeren. Dit omvat ook de ontwikkeling van nieuwe technologieën en methoden om de impact van deze stoffen voor de veiligheid, gezondheid en het milieu te minimaliseren. Daarnaast kan meer kennis worden ontwikkeld over de risico's van explosies en branden als gevolg van ontvlambare gassen in het opgepompte water. Dit omvat onderzoek naar de beste praktijken voor het veilig ontgassen van formatiewater en het voorkomen van ontstekingsbronnen in de nabijheid van geothermische installaties.

Omdat gesloten geothermie-systemen in Nederland nog niet operationeel zijn, is een kennisvraag hoe mitigerende en

beheersmaatregelen te identificeren uit ervaringen uit het toepassingsgebied bodemenergiesystemen en ervaringen uit het buitenland met diepe closed-loopsystemen. Een inventarisatieonderzoek zou daarom behulpzaam zijn.

Nadere informatie:

- Veiligheidsregelgeving en handboeken.
- Dijkstra, H., Dinkelman, D., Hanegraaf, M., Veldkamp, H., & Wees, J. D. van. (2020). Whitepaper: Duurzaamheid van Geothermie in Warmtenetten.

7.4 Andere domeinen

Met effecten op andere domeinen worden gebeurtenissen of processen bedoeld die bijvoorbeeld impact hebben op het milieu of de economie, maar geen directe gezondheids- of veiligheidseffecten hebben op de mens.

7.4.1 Vervuiling van grondwater

Grondwater is zoet tot brak water in de ondergrond dat gebruikt kan worden voor drinkwater, beregening, irrigatie en als leefomgeving voor planten en dieren. Dit grondwater bevindt zich in het ondiepe deel van de ondergrond (variërend van 0 tot 450 m diep) en lokaal dieper (tot 750 m op enkele plaatsen in Zuidoost Brabant en Midden-Limburg, zie TNO, 2007¹⁴). Chemische vervuiling betekent contaminatie van het grondwater met grondwatervreemde organisch en anorganisch chemische stoffen, of een significante verhoging van de van nature in het grondwater voorkomende verbindingen en ionen. Vervuiling van het grondwater kan optreden als de integriteit van de geothermische installatie, de afsluitende capaciteit van het onder- of bovenliggende afdichtende pakket, of de afsluitende verbinding van de putverbuizing met de gesteentelagen is aangetast.

Hoewel de vervuiling van het grondwater niet direct als een veiligheids- of gezondheidsrisico wordt gezien, is het bij wet verboden om in grondwaterbeschermings- en wingebieden te boren. Hierdoor zal het grondwater bestemd voor drinkwater niet direct vervuild raken. Mocht dat onverhoopt toch gebeuren door introductie van vervuild water van buiten het beschermingsgebied door bijvoorbeeld grondwaterstroming, dan wordt dat in het drinkwaterwinningsproces opgemerkt en zal het water afdoende gezuiverd worden of niet in het distributienetwerk worden ingevoerd.

7.4.1.1 Chemische vervuiling grondwater

Chemische grondwatervervuiling kan op meerdere momenten en manieren optreden. Tijdens de aanlegfase, de operationele fase of tijdens abandonnering, zowel op de locatie aan het oppervlak als in het boorgat op diepte.

Op de locatie:

- 1) Aanlegfase: Tijdens het boorproces kunnen boorvloeistof of andere benodigde vloeistoffen onbedoeld uitvloeien over de locatie. Een andere dreiging is een zogenaamde blow-out.

¹⁴ TNO 2007 Naar een uniforme landelijke inrichting van het KRW-grondwatermeetnet Zoet-Zout?. 2007-U-R0490/B

Daarbij stroomt er ongecontroleerd en mogelijk explosief vloeistof uit de put.

- 2) Operationele fase: Er kan een lek ontstaan in de bovengrondse installatie, waardoor zout geothermisch water uit het primaire circuit stroomt. Ook kunnen opslagtanks voor mijnbouwhulpstoffen lek raken.

In het boorgat:

- 1) Aanlegfase: Tijdens de aanlegfase worden watervoerende- en afdichtende lagen doorboord. Hierbij kan direct contact ontstaan tussen de watervoerende lagen en de vloeistoffen in het boorgat. De boorvloeistof zou de watervoerende laag kunnen indringen en lokaal de grondwatersamenstelling kunnen veranderen. Dit is in sommige gevallen als vervuiling te beschouwen.
- 2) Operationele fase: Er kan een lek ontstaan in de verbuizing, waardoor geothermisch water buiten de put kan treden. Gebeurt dit ter hoogte van de grondwaterlagen of via mogelijk niet (goed) gecementeerde of niet dichtgeknepen ruimte tussen de verbuizing en gesteentelagen? Dan kan geothermisch water de watervoerende laag indringen en grondwatervervuiling veroorzaken.

Een andere dreiging is dat het afdichtende pakket boven het geothermische reservoir kan scheuren door veranderingen in druk en temperatuur in het reservoir en de direct aanpalende afdichtende pakketten. (Dit noemen we ook wel integriteit afdichtend pakket of 'seal integrity'.) Hierdoor kan geothermisch water via die scheur naar bovenliggende reservoirs stromen en uiteindelijk in een grondwaterlaag belanden.

- 3) Abandonneringsfase: Na beëindiging van de productiefase wordt de bovengrondse installatie verwijderd en worden de putten geabandonneerd. Daarbij wordt de verbinding van het geothermische reservoir met de oppervlakte verbroken door op verschillende plekken in het boorgat 'pluggen' te zetten. De put wordt zo in verschillende compartimenten verdeeld die niet met elkaar in verbinding staan. De bovenste sectie wordt tot een aantal meters onder maaiveld afgesneden. Zolang deze compartimentalisatie intact blijft, wordt lekkage door en langs de put voorkomen. Alleen als de pluggen hun afsluitende werking verliezen, kan water of gas van het ene compartiment naar het andere stromen en eventueel aan de top van de put uittreden. Aangezien geothermisch water in het algemeen zwaarder is dan het water in bovenliggende lagen, zal het niet van nature de neiging hebben naar boven te stromen, richting zoetwaterlagen en uiteindelijk maaiveld.

Er zijn vele voorschriften in de mijnbouwwet en bijbehorende regelingen, handleidingen en branchedocumenten die toezien op het ontwerp, de bouw, het gebruik en het verlaten van de installatie. De dreigingen worden per project geïdentificeerd. Het dreigingsniveau wordt bepaald en mitigerende maatregelen worden genomen. Een aantal (vooral preventieve) maatregelen is wettelijk verplicht. Bijvoorbeeld de eis in het putontwerp dat het boorgat bij de aanleg gescheiden wordt van de zoetwaterdragende lagen door een

conductorpijp te boren, of te heien van maaiveld tot in een grondwaterscheidende kleilaag. Afhankelijk van de locatie in Nederland hebben conductors in de geothermie lengtes van 25 tot 250 meter. Het plaatsen van een geheide conductor voorkomt vervuiling van de grondwaterlagen. Er wordt namelijk niet met boorspoeling gewerkt en er is in principe geen ruimte tussen conductor en aardlagen waarlangs grondwater kan stromen. Bij het boren van een conductor wordt er geboord zonder schadelijke stoffen in de boorspoeling. De ruimte tussen conductor en aardlagen wordt gevuld met cement of bentoniet (een speciaal soort klei).

De putten bestaan uit boorgaten die voorzien zijn van stalen buizen, die met cement aan het omringende gesteente zijn vastgezet. Volgens de in het branchedocument 'Veilig putontwerp' gegeven instructies, worden de putten zodanig ontworpen met dubbele barrières van kwalitatief goed materiaal, dat het ontstaan van gaten in de verbuizing door corrosie en/of erosie wordt geminimaliseerd. Daarnaast is het een mijnbouwwettelijke plicht om periodiek te controleren of de verbuizing nog in goede staat is. Ook wordt de annulus (ruimte tussen overlappende buizen/casings) continu gemonitord op druk. Zo kan lekkage door één van de buizen die de annulus begrenzen worden opgemerkt en moet er dan gepaste actie worden ondernomen.

Voor alle mijnbouwhulpstoffen die op de boor- of productielocatie aanwezig zijn, dient te worden gedocumenteerd wat ze zijn en waaruit ze bestaan. De richtlijnen voor het werken met mijnbouwhulpstoffen zijn vastgelegd in een branchedocument (zie onderstaande Nadere informatie). Op de locatie is het gebruik van een vloeistofdichte asfaltvloer verplicht. Die vloer moet zorgen dat onbedoeld uitgestroomde vloeistoffen niet buiten de locatie terechtkomen. Het installeren van een blow-out-preventor (BOP) is verplicht als vooraf een blow-out als mogelijke dreiging is geconstateerd. Ook moet worden aangetoond dat eventuele scheurvorming in het afdichtend pakket onder de toegestane norm blijft. Hiervoor is een methodiek beschikbaar (Tensile failure Assessment of the Seal (TAS)), die een adequate indicatie geeft van de integriteit van het afdichtend pakket. Deze is beschikbaar via www.nlog.nl ([SDRA Geothermie & Integriteit afdichtend pakket | NLOG](#)). Mitigerende maatregelen zijn het beperken van de injectiedruk en/of -temperatuur, zodat de berekende mate van scheurvorming onder de gestelde norm blijft. Tenslotte wordt een beheersplan opgesteld zodat in geval zich een ongewenste gebeurtenis voordoet, deze op een adequate en gepaste manier wordt aangepakt.

Kennisvragen:

Voor voorspellende modellen en gerichte aanpak van specifieke dreigingen is het essentieel de exacte processen te kennen en ook de afhankelijkheid van die processen van veranderingen in druk, temperatuur en chemische omgeving. Ervaringen in de geothermische sector met corrosie-inhibitoren zijn wisselend. De samenstelling van de inhibitor in relatie tot samenstelling van het geothermische water, druk, temperatuur en het materiaal van de verbuizing blijkt cruciaal te zijn voor de effectiviteit. Omdat de inhibitor vooral onder in de productieput toegevoegd wordt aan de opwaartse stroom van geothermisch water, moet de inhibitor stabiel blijven onder veranderende temperatuur, druk

en watersamenstelling. In de praktijk wordt de inhibitor met het geothermische water rondgepompt, waarbij het in de afgekoelde waterstroom in de injectieput weer onder hogere druk komt. Modellen die de corrosieprocessen en de effectiviteit van inhibitors beter kunnen voorspellen, zijn ondersteunend aan passende, mitigerende maatregelen en leiden ook tot reductie van dreiging en risico.

De inschatting of scheurvorming kan optreden, is momenteel onzeker. Om een meer realistische prognose te kunnen maken, is het nodig om de modellen te verbeteren. Daarbij worden meer dynamische processen meegenomen in de analysetools, zoals scheurinitiatie en -groei in zowel het reservoir als in de afdichtende pakketten onder temperatuur- en drukveranderingen. Daarnaast is voor de huidige en toekomstige modellen een kennisvraag om de mechanische en thermische gesteente-eigenschappen beter en nauwkeuriger te bepalen. Voor verschillende typen reservoirs en afdichtende pakketten in de Nederlandse ondergrond moet worden onderzocht hoe de gesteente-eigenschappen variëren onder (operationele) condities.

Lopende en geplande onderzoeken:

Bij het winnen van aardwarmte in Nederland worden soms stoffen toegevoegd aan het systeem om ongewenste chemische reacties te voorkomen. Meestal gaat het om het tegengaan van corrosie of het neerslaan van mineralen in leidingen en installaties. Er is veel ervaring opgedaan met hoe goed en stabiel deze stoffen werken—zowel positief als negatief. Uitvoerders en leveranciers werken samen om eventuele problemen bij het gebruik van deze stoffen op te lossen via een praktisch en herhaald proces van onderzoek, testen en monitoring. De opgedane kennis wordt gedeeld binnen de sector.

Nadere informatie:

- Informatiefolder Geothermie en grondwater. [GNL-Factsheet-Boren-naar-aardwarmte.pdf \(geothermie.nl\)](#)
- Inventarisatie STOWA; [Mogelijke lange-termijneffecten van grootschalige geothermie op grondwaterkwaliteit | STOWA](#)
- Risico's van Geothermie voor Grondwater, KWR BTO 2016.077 | November 2016. [BTO-2016.077-Risico-s-van-Geothermie-voor-Grondwater.pdf \(kwrwater.nl\)](#)
- Branche document veilig putontwerp. https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2021/03/Factsheet_Industriestandaard_duurzaam_putontwerp-133120.pdf en verwijzingen daarin.
- Integriteit afdichtend pakket; https://www.nlog.nl/sites/default/files/2023-09/tno_2023_r11773_bepaling_integriteit_afdichtende_gesteente_pakketten_voor_geothermieprojecten_in_nederland.pdf.
- Verantwoord gebruik mijnbouwhulpstoffen door operators geothermie, Chemical Management aanpak ter ondersteuning van operators geothermie bij het verantwoord gebruik van mijnbouwhulpstoffen. 22-02-2021, Jongerius Consult. [Rapport Kennisagenda aardwarmte - Verantwoord gebruik mijnbouwhulpstoffen in geothermie \(kasalsenergiebron.nl\)](#); zie ook [Ontwikkeling Chemical Management Tool voor operators - Geothermie Nederland](#)
- KEM-18 Qualitative risk assessment of long-term behavior of conventional sealing materials used in wells and their interaction

with each other and the formations. [KEM-18 Qualitative risk assessment of long term behavior of conventional sealing materials used in wells and their interaction with each other and the formations \(finished\) KEM programma.](#)

- Alternatieve materialen voor verbuizing. [KIRA Non-Alloy Based Tubulars Literature Review \(ebn.nl\)](#)
- Seismicity potential of geothermal operations in the North Sea Supergroup in the Roer Valley Graben. TNO 24 January 2025. https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2025/04/TNO-2024-R12041-Seismicity-potential-RVG-FINAL_v1.pdf

7.4.1.2 Thermische vervuiling grondwater

Thermische grondwatervervuiling kan alleen tijdens de operationele fase optreden. Enkel op het traject waar de productieput en, in mindere mate de injectieput, de grondwaterlagen doorsnijdt. Het omhoog gepompte geothermische water heeft een veel hogere temperatuur (variërend van net over de 30 °C tot 100 °C), dan de temperatuur van de ondiepe grondwaterlagen. Het geothermische injectiewater heeft meestal een temperatuur van 15 tot 35 graden. Dat is warmer dan de temperatuur van het ondiepe grondwater, maar aanzienlijk lager dan bij de productieput. De dreiging is dus met name bij de productieput. Daar kan een warmtestroom vanuit de put naar de omliggende grondwaterlaag op gang komen. Hierdoor zal de temperatuur van de grondwaterlaag en het grondwater nabij de put stijgen. Door de lokale grondwatertemperatuurstijging kunnen verschillende processen op gang komen:

- Een convectiestroom die in een watervoerende laag met een qua grondwatersaliniteit gelaagde opbouw kan zorgen dat het zoete deel verzilt of kan zorgen voor verspreiding van al aanwezige vervuiling (zaklagen).
- Verandering van de chemische oplosningevenwichtssituatie van mineralen waardoor er meer opgeloste stoffen in het grondwater komen.
- Loslaten van stoffen die aan de gesteentematrix zijn gebonden.
- Microbiologische veranderingen door de verhoogde temperatuur.

Op dit moment is het beschermingsniveau voor de nationale grondwaterreserves onderwerp van besluitvorming. De uiteindelijke normstelling en het beschermingsregime wordt vastgesteld op basis van onder meer informatie uit het programma Bodem, Ondergrond en Grondwater en het Programma Duurzaam Gebruik Diepe Ondergrond. Totdat deze norm is vastgesteld, gelden voor de gebieden, die indicatief als Nationale Grondwaterreserves zijn aangewezen in de Structuurvisie Ondergrond (2018), vooralsnog geen uniforme beperkingen voor boringen. Tenzij deze gebieden overlappen met Grondwaterbeschermingsgebieden of Aanvullende Strategische Voorraden.

Voor Grondwaterbeschermingsgebieden geldt dat boringen wettelijk niet zijn toegestaan, waardoor het dreigingsniveau voor drinkwatervoorraden als nihil wordt beschouwd. Voor de meeste overige grondwatervoorraden geldt een vergelijkbare bescherming, met enkele uitzonderingen in bepaalde provincies.

Aardwarmtewinning onder Drinkwaterbeschermingsgebieden is toegestaan. Aardwarmtereservoirs bevinden zich namelijk op veel grotere diepte dan de drinkwaterlagen (honderden meters tot enkele kilometers dieper). Als het doelreservoir voor aardwarmte diep onder het beschermingsgebied ligt, kan het schuin vanaf een locatie buiten het drinkwaterbeschermingsgebied worden aangeboord.

Lopende en geplande onderzoeken:

Bij de productieput Naaldwijk-GT-02 van het project Trias-Westland, wordt het temperatuureffect van aardwarmtewinning in het eerste en tweede watervoerende pakket gemeten. Een vervolg op dit project is nog niet bekend.

De reikwijdte van eventueel optredende temperatuursanomalieën in de grondwaterlaag wordt momenteel onderzocht (Temperatuurmonitoringproject Trias Westland). Er worden metingen verricht om onder meer de modellen te kalibreren.

Nadere informatie:

- Van Lopik, J.H., Hartog, N., Zaadnoordijk, W.J., Gijsbert Cirkel, D., Raof, A., 2015, Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings. *Advances in Water Resources*; 85(partA):32-45
- [Temperatuurmonitoringproject Trias Westland - Data - EBN:](https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/temperatuurmonitoringproject-trias-westland/)
<https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/temperatuurmonitoringproject-trias-westland/>
- Rapportage milieuhygiënische risico's thermische vervuiling nabij geothermieputten. 19 maart 2021. Auteurs: S.H.J. Peeters, H.F. Mijnlief en B.M.M. van Kempen.
https://www.nlog.nl/sites/default/files/2023-11/age_21-10.017_sodm_bvk_rapportage_milieuhygienische_risicos_thermische_vervuiling_nabij_geothermieputten.pdf en *Nadere informatie daarin*

7.4.1.3

Biologische vervuiling grondwater

Biologische grondwatervervuiling treedt op als in het geothermische water bacteriën en schimmels groeien. Dit kan gebeuren als er (onbedoeld) zuurstof of nutriënten aan het geothermische water worden toegevoegd, die de groei van bacteriën en schimmels bevorderen. Als de verbuizing (inclusief de conductor) van een put lek raakt in het bereik van de zoetwataquifer, kan deze biologisch verontreinigd raken. Een ander aandachtspunt is dat thermische vervuiling van de zoetwataquifer lokaal omstandigheden kan scheppen, die bacterie- en schimmelgroei bevorderen. Daarnaast kan de opwarming van de grondwaterlaag in de nabije omgeving van de put de microbiologische activiteit veranderen, wat de kwaliteit van het grondwater kan beïnvloeden.

De beheersing en mitigerende maatregelen zijn hetzelfde als bij thermische vervuiling.

Kennisvragen:

Momenteel is er geen inzicht of biologische grondwatervervuiling optreedt en of het een probleem kan vormen. In opvolging van het Temperatuurmonitoringproject Trias Westland naar temperatuursverandering van grondwaterreservoirs nabij

productieputten kan het project uitgebreid worden met grondwateranalyse om eventuele veranderingen in microbiologische activiteit te onderzoeken.

7.5 Lopend onderzoek

De kennisvragen voor een efficiënte doorontwikkeling van aardwarmtewinning zijn onder andere in 2021 geïnventariseerd, zoals beschreven in het rapport *Innovatie Aardwarmte 2021* ([Innovatieagenda Aardwarmte rapport v def.pdf \(geothermie.nl\)](#)). De onderzoeksgebieden die in dit rapport staan, worden al deels opgepakt in de diverse onderzoeksprojecten. Naast kleinere losstaande onderzoeksprojecten, worden in Nederland veel overkoepelende onderzoeksprojecten geïnitieerd en uitgevoerd. De onderwerpen variëren van theoretisch onderzoek, modelonderzoek, laboratoriumonderzoek tot veldobservaties. Al het onderzoek richt zich op een beter begrip van de processen in de ondergrond en de installaties die bij de winning van aardwarmte een rol spelen. Een beter begrip van de ondergrond en de processen die daar plaatsvinden, leidt tot betere en accuratere voorspellingen. Dat draagt bij aan reductie van dreiging, risico en onzekerheid.

Focuspunten in de onderzoeken zijn:

- Seismiciteit: Sub-onderwerpen, zoals de relatie tussen koudefrontprogressie en seismiciteit, de incorporatie van a-seismische slip, plasticiteit van gesteenten in modellen, trailing effect, breuksterkte, et cetera.
- Geochemische aspecten: Onderzoek naar het corrosie- en neerslagpotentieel van geothermisch water onder veranderende druk, temperatuur en chemische omgevingsfactoren.
- De geologische architectuur van de ondergrond: Noodzakelijk voor betere en gedetailleerdere modellen van de opbouw van de ondergrond waarmee dreigingen en risico's beter kunnen worden geanalyseerd.
- Putontwerp en materiaalsoorten: Onderzoek naar alternatieve materialen voor verbuizing, afdichtingsmaterialen waaronder cement en klei en afdichtingstechnieken.

Hieronder een niet-uitputtende lijst van onderzoekprogramma's waarin bovenstaande focusgebieden deels worden geadresseerd.

Lopende en afgesloten programma's:

- **Geo4All** - [Aardwarmtesector start innovatieprogramma Geo4all - Geothermie Nederland](#).
- **WarmingUp** - [Thema's - WarmingUp](#).
- **DeepNL** - [DeepNL | NWO](#).
- Kennisprogramma over de Effecten van Mijnbouw. - [KEM programma](#) - en dan met name KEM-06, -12, -15, -16, -18, -31.
- [Onderzoeksproject naar geothermie en seismiciteit in Pijnacker \(tno.nl\)](#).
- [SCAN - Duurzame energie in Nederland - SCAN aardwarmte](#).
- Kennis en Innovatie Roadmap Aardwarmte (KIRA) [Onderzoek naar aardwarmte - EBN](#).
- TKI Energy and Industry (www.topsectorenergie.nl).
- Geothermica - [GEOTHERMICA](#).

- European Technology and Innovation Platform ETIP - [ETIP-Geothermal – European Technology & Innovation Platform on Geothermal](#).
- RVO voor subsidie voor onderzoek bijvoorbeeld [Slimme energiesystemen \(rvo.nl\)](#).
- [Innovatieagenda Aardwarmte rapport v def.pdf \(geothermie.nl\)](#).
- Kas als energiebron - [Projecten Kennisagenda Aardwarmte \(kasalsenergiebron.nl\)](#).
- [Kennisagenda Aardwarmte afgerond met webinar, KIRA neemt stokje over: Kas als energiebron](#).
- Samenwerkingsmiddelen Onderzoek (SMO).

7.6 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren kwamen tijdens interviews en de in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 7.1 Opgehaalde beleidsvragen over geothermie uit de interviews en beleidssessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Geothermie			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Vereist de introductie van geothermie en de bijkomende risico's een harmonisatie met andere (industriële en publieke) activiteiten? Zo ja, hoe dan? - In hoeverre kan ruimtelijke ordening stapeling van risico's voorkomen? - Hoe om te gaan met het feit dat water geen gevaarlijke stof is (en dus geen milieubelastende activiteit), maar dat er wel degelijk risico's zijn? - Leren van lessen uit andere landen. Bijvoorbeeld Duitsland, waar geothermie al vaker wordt toegepast dan in Nederland. - Wat gebeurt er met een put als een project klaar is? 	<ul style="list-style-type: none"> - Wie krijgt voorrang op levering van warmte? - Hoe om te gaan met kwetsbare groepen in geval van een incident?

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Geothermie			
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>		- Wens om integraal overzicht te hebben: hoe gaat geothermie samen met andere energievormen?
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	- Nog veel onzekerheid over door menselijke activiteit geïnduceerde seismiciteit bij geothermie.	- Welke alternatieven zijn er beschikbaar als een geothermieput uitvalt? - Kennis verbeteren bij de VR's op gebied van incidentbestrijding (lekkages, et cetera).
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	- Wens om incidenten te registreren en te evalueren. - Ook nodig om modellering te blijven verbeteren.	

* Perceptie is belangrijk bij geothermie; gezondheidseffecten hangen onder andere af van hoe mensen betrokken zijn.

8 Biomassa – Mariusz Cieplik, TNO

8.1 Inleiding

Biomassa wordt in de energietransitie voornamelijk gebruikt voor het genereren van warmte en elektriciteit. Het wordt ook gezien als de belangrijkste beschikbare bron van duurzame koolstof voor de materialen- en chemicaliëntransitie, met coproductie van vloeibare energiedragers. Biomassa omvat residuen van bosbouw, akkerbouw, veeteelt en aquatische biomassa, zowel planten als algen. Ook fungi/schimmels en reststromen van aquacultuur kunnen als biomassa dienen.

Volgens de systematiek die in beleidsdocumenten [1] wordt gebruikt, zijn deze biomassastromen onder te verdelen in:

- Productiestromen: de hoofdproducten waarop de landbouw of bosbouw is gericht, zoals graan, suikerbieten, micro-algen, melk, vlees, zaaghout en hout voor papierproductie, en de producten van zee- en water bouw: micro- en macro-algen.
- Primaire reststromen: stromen die in het veld vrijkomen bij de productie, zoals stro, loof, mest, dunningshout, takken en tophout.
- Secundaire reststromen: reststromen die vrijkomen bij het verwerkingsproces van de productiestroom, zoals kaf, doppen, bietenpulp, slachtafval en zaagsel.
- Tertiaire reststromen: reststromen die ontstaan na gebruik of consumptie van een product, zoals rioolwaterzuiveringsslib, GFT en afvalhout uit de bouw.

Het geavanceerde gebruik van diverse biomassastromen voor materialen en chemicaliën vraagt om uitgebreide behandeling. Er zijn echter voor deze behandeling plaatsvindt al gezondheidsrisico's verbonden aan de ruwe biomassa, afhankelijk van het type en de bewerkingsroutes. Ook de diverse thermochemische conversietechnieken die worden ingezet om warmte en kracht te produceren en de toekomstige hoogwaardige producten hebben eigen specifieke risico's. Deze risico's worden puntsgewijs genoemd in de volgende sectie. Effecten op de (menselijke) gezondheid en veiligheid (die niet los van elkaar te zien zijn) worden vervolgens beschreven in daaropvolgende paragrafen.

8.2 Inventarisatie van factoren met potentiële impact op veiligheid en gezondheid bij bio-energie

Veiligheids- en gezondheidsrisico in transport, opslag en voorbehandeling van ruwe en thermisch voorbewerkte biomassa, voorafgaand aan de hoofdconversie:

Voordat biomassa omgezet wordt in verschillende producten, wordt het eerst geogst, mechanisch (bijvoorbeeld verkleining) en soms thermisch (drogen) voorbewerkt. Daarna wordt het getransporteerd naar de eindconversielocatie. Verder kan op deze eindgebruiklocatie ook langdurige opslag en tevens interne overslag en transport (handling)

plaatsvinden, voorafgaand aan het conversieproces zelf. Dit kan leiden tot potentiële problemen, zoals beschreven in deze sectie.

Microbiologische bioagentia

Ruwe biomassa kan een bron zijn van bioagentia. Deze kunnen de biomassa-componenten zelf omvatten, of ontstaan zijn in (langdurige) opslag en transport van biomassa, bijvoorbeeld door biodegradatie van biomassa. Denk aan microbiologische bioagentia, zoals schimmels en bacteriën die zich na de oogst en tijdens transport en opslag van biomassa kunnen ontwikkelen [2]. Maar ook aan dierlijke en menselijke ziektekiemen, zoals schimmels, bacteriën, of prionen bij gebruik van reststromen, zoals mest, rioolslib en diermeel (MBM). Verder kan verse aquatische biomassa rotten en daarbij giftige stoffen (H₂S bijvoorbeeld) produceren, en bevatten sommige cyanobacteriën giftige microcystines (bijvoorbeeld giftige blauwalgen). Met name studies in Denemarken hebben hoge concentraties micro-organismen in stro- en houtspaandersstof aangetoond [2]. Significante correlaties zijn ook gevonden tussen de aanwezigheid van bacteriën/schimmels en de concentraties van endotoxinen in het stof dat gevormd is in overslag van in buiten opgeslagen gebaald stro en houtspaanders. Deze endotoxinen zijn componenten van het buitenste membraan van veelvoorkomende gramnegatieve bacteriën, zoals *E. coli* en *Salmonella*. Endotoxinen kunnen aanzienlijke effecten hebben op de menselijke gezondheid door interacties met het immuunsysteem en koorts veroorzaken. In ernstige gevallen leiden endotoxinen tot acuut orgaanfalen en septische shock.

Stofvorming:

Bij opslag en (intern) transport bestaat er een risico op de vorming van stof, dispersie [3] in de lucht en de hieraan verbonden explosierisico's [4]. Dit heeft potentieel impact, zowel op het milieu als op de mensen in de directe omgeving en daarbuiten. Naast de eerdergenoemde microbiologische bioagentia kunnen pollen en zaadresten die mogelijk vrijkomen bij gebruik van natuurbeheerbiomassa en agroresiduen leiden tot allergische reacties.

Uitloogbaarheid:

Blootstelling van in bulk opgeslagen biomassa aan regenwater of bij het afscheiden van waterige bijproducten door biologische degradatieprocessen, kan leiden tot emissie van diverse stoffen in de vorm van vloeistoffen, of als waterige oplossingen. Dit betreft onder anderen zouten, zware metalen (vooral bij industriële gemengde residu's), organische zuren (vooral mieren-, melk- en azijnzuur) en toxische organische verbindingen (vooral bij thermisch voorbewerkte biomassa, componenten, zoals furfural en (poli)fenolische verbindingen) [5]. Deze emissies kunnen (water/grond) milieu-toxisch zijn, en ook gezondheidsrisico's vormen voor mens en dier.

Broei:

De eerdergenoemde biologische activiteit van (in bulk opgeslagen) ruwe biomassa kan leiden tot de ontwikkeling van hoge temperaturen door broei in het materiaal en in sommige gevallen tot spontane ontbranding. Biomassa is daarmee potentieel brandgevaarlijk [6].

Gasvormige emissies:

In andere gevallen kan bioactiviteit in natte biomassa die warmte goed kan dissiperen (dat wil zeggen geleidelijk afvoeren, waardoor geen warmteophoping kan optreden), leiden tot het ontstaan van toxische en/of gevaarlijke gasvormige emissies. Denk bijvoorbeeld aan CO₂ en methaan die kunnen ontstaan door gisting in biomassa en ook aan zwavel- en stikstofverbindingen. Deze gasvormige emissies kunnen zich zonder voldoende ventilatie ophopen in afgesloten ruimtes (opslag/transport containers). Dit kan tot verstikking, vergiftiging (CO, H₂S) en/of ontbrandingsrisico's leiden. Verder kan verse aquatische biomassa rotten en daarbij giftige stoffen [7] (H₂S bijvoorbeeld) produceren. Ook kunnen vluchtige organische componenten, zoals organische zuren of de eerdergenoemde organische verbindingen, uit de biomassa uitdampen, al dan niet door het toedoen van verhoogde temperatuur door broeiprocessen. Deze kunnen ook irriterend, zo niet-giftig zijn bij voldoende hoge concentraties.

Sommige aquatische biomassastromen kunnen verhoogde concentraties arseen bevatten, waarvan voornamelijk vaak onbekend is of het de giftige, dan wel de niet-giftige variant betreft. In diverse publicaties [8] werd gerapporteerd dat bruine algen over het algemeen hogere niveaus van totaal As (tot 230 µg/g droog gewicht) vertoonden, dan rode algen (tot 39 µg/g droog gewicht) en groene algen (tot 23,3 µg/g droog gewicht). Het is ook bekend dat andere zeer zorgwekkende stoffen (zoals PFAS of PCB's) zich in sommige aquatische biomassa kunnen ophopen. Maar ook dat dit effect zeer afhankelijk is van lokale waterkwaliteit en van de specifieke biomassasoort. Dit heeft belangrijke gevolgen voor de juiste 'geïnformeerde' keuzes van de verwerkingstechnieken en de daaraan verbonden mitigatie van blootstellings- en verspreidingsrisico's.

8.3 Veiligheids- en gezondheidsrisico's verbonden aan de biomassa hoofdconversieprocessen

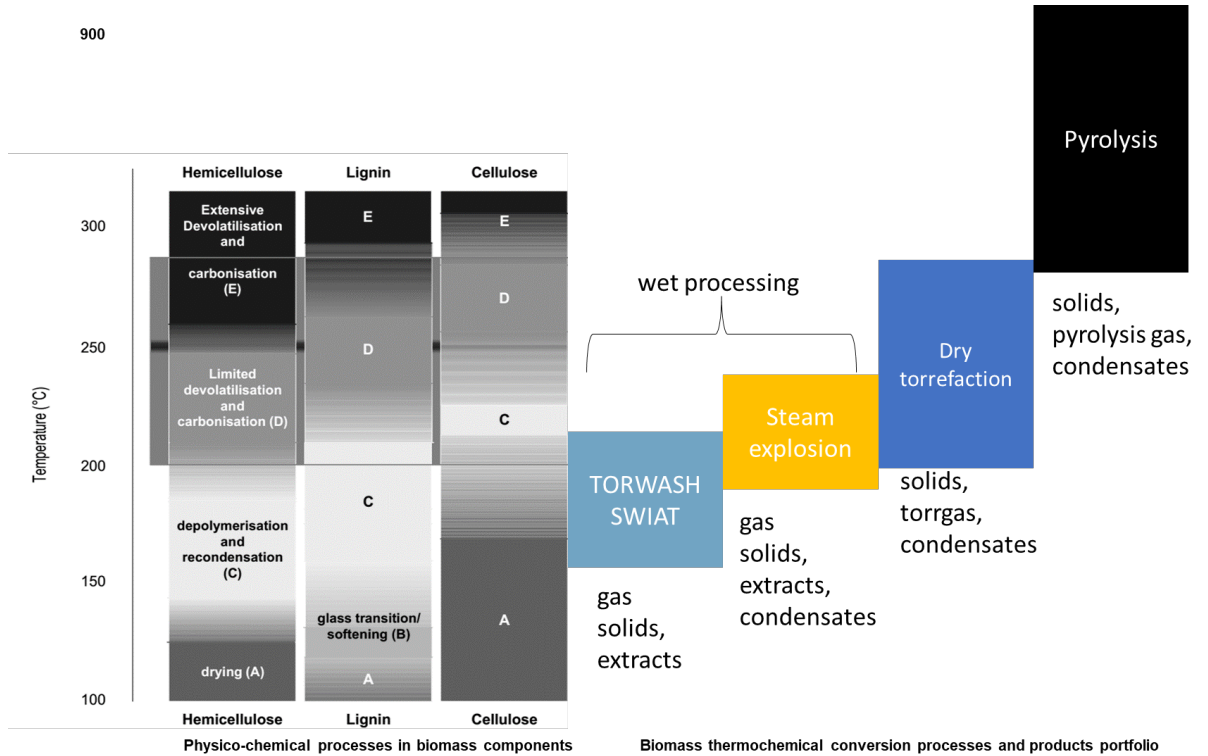
Er bestaan vele thermochemische conversieroutes voor biomassa. Deze zijn hieronder in het kort beschreven, inclusief hun specifieke veiligheids- en gezondheidsrisico's.

Thermische en hydrothermale biomassa voorbereiding:

Om de diverse biomassa's uniformer qua samenstelling en beter geschikt voor langeafstand transport en langetermijnopslag te maken, wordt steeds meer gebruikgemaakt van thermochemische voorbereidingstechnieken, al dan niet in combinatie met mechanische bewerking.

Deze processen zijn schematisch weergegeven in Figuur 8.1.

Figuur 8.1 Schematische samenvatting van thermochemische voorbereidingsprocessen (thermische regimes en productportfolio) van biomassa voor toepassing in bio-energie.



Drogen en verdichten: In de meest simpele vorm, wordt de biomassa geconserveerd (dat wil zeggen geschikt gemaakt voor langdurig transport/opslag) door het te drogen, vaak door toepassing van laagwaardige (rest) warmte. Deze behandeling helpt om de biologische processen zoals broei te vertragen. Mits op voldoende hoge temperatuur uitgevoerd, kan het leiden tot de pasteurisatie of sterilisatie van het materiaal. Zonder verdere verdichting heeft droge (<10% vocht) biomassa echter gemiddeld meer neiging tot stofvorming dan niet-gedroogde biomassa. Om dit te onderdrukken en de transportefficiency te verhogen, wordt vaak verdichting toegepast. Dit gebeurt via het pelleteren of briketteren [9]. Pelleteren of briketteren is het proces waarbij het materiaal tot korrels wordt geperst. Deze voorbehandeling werkt echter alleen zolang de biomassa droog blijft, omdat de organische matrix van de biomassa in principe intact blijft. Bij contact met water kunnen de pellets weer mechanisch uit elkaar vallen en kan er alsnog broei ontstaan. Verder is er brandgevaar bij een te hoge drogingstemperatuur. Te hoge temperaturen kunnen ook door de mechanische bewerking veroorzaakt worden.

Thermische voorbehandeling (droge torrefactie): Door gebruik van hogere temperaturen kan droge (<30% vocht) biomassa verder geconserveerd worden door de toepassing van zogenaamde torrefactie: een proces vergelijkbaar met het roosteren van koffiebonen of cacao. Torrefactie [10] wordt uitgevoerd door biomassa in afwezigheid van zuurstof/lucht kortstondig (<30 min) te verhitten tot een temperatuur van ongeveer 200-250 °C. Getorreficeerd materiaal wordt meestal

verdicht door het te pelletteren. De risico's van deze technologie worden vooral veroorzaakt door de hoge temperatuur in het proces. Het is noodzakelijk om zuurstof/luchtinlek te elimineren, om zo brandgevaar te voorkomen. Ook zijn getorreficeerde materialen zonder adequate verdere behandeling bekend om hun pyrofore [11] eigenschappen (i.e. spontane warmteontwikkeling bij contact met atmosferische lucht/vocht, hetgeen kan leiden tot het ontsteken van het materiaal). Een adequate nabehandeling is daarom onmisbaar om brandgevaar te minimaliseren bij (langdurig) transport en opslag van getorreficeerde biomassa [12].

Hydrothermale behandeling: Om natte (>50% vocht) biomassa verder te conserveren en uniform te maken, kunnen hydrothermale processen toegepast worden. Het gaat dan om behandelingen die onder hoge temperatuur in het waterige milieu uitgevoerd worden. Een voorbeeld hiervan is het TORWASH-proces dat toegepast wordt op natte biomassastromen, zoals waterplanten, rioolslib en voedingsindustriresidu's [13]. Ook de zogenoemde stoomexplosie [14] is toe te passen. Een bijkomend voordeel is dat ook het merendeel van de problematische zouten en mineralen verwijderd kan worden met TORWASH, of door combinatie van stoomexplosie en wassen. Daardoor dragen deze behandelingen bij aan een reductie van emissies en problemen in de eindtoepassing [15]. De risico's van deze behandelingen zijn vooral gelinkt aan het gebruik van hoge temperaturen (190-230 °C) en druk (>15 bar(a)). Deze risico's zijn mechanisch (explosie) en thermisch (vrijkomen van grote hoeveelheden hete dampen en vaste stof) van aard. Er kunnen ook (milieu)toxische organische (furfural, organische zuren) en anorganische stoffen (HCl, H₂S) bij vrijkomen.

Thermochemische fractionering van biomassa: Houtachtige en grasachtige biomassa bestaat hoofdzakelijk uit drie organische polymeren: hemicellulose, cellulose en lignine. Andere soorten biomassa, zoals voedings- en voederindustrie residuen, kunnen ook andere stoffen bevatten, waaronder eiwitten en vetten, typisch in een vorm die een directe scheiding moeilijk maakt.

Om deze componenten voor geavanceerde toepassingen te ontsluiten, worden steeds vaker zogenaamde fractioneringsprocessen toegepast. Deze kunnen ook de eerdergenoemde hydrothermale behandelingen omvatten (stoomexplosie en TORWASH) of gebruikmaken van organische oplosmiddelen (zogenaamde solvolise en organosolv processen [16]). Het gebruik van organische oplosmiddelen, zoals ethanol of aceton kan, naast het vrijkomen van corrosieve/toxische gassen en condenseerbare stoffen (vluchtige organische zuren, CO, vluchtige furanics) voor aanvullende brand- en toxiciteitsrisico's zorgen.

Pyrolyse: Pyrolyse is een verzamelterm voor de biomassa bewerkingsprocessen onder zuurstofloze, hoge-temperatuur (500-900 °C) condities. Door geleidelijke verhoging van temperatuur en door toepassing van verschillende verblijftijden in combinatie met deeltjesgrootte (hetgeen leidend tot snelle of trage omzetting) kan biomassa omgezet worden in een mix van producten. Een snel (Engels: fast/flash) pyrolyseproces (met verblijftijd van enkele seconden) leidt typisch tot de vorming van een hoge concentratie van (bij

kamertemperatuur) vloeibare componenten, zogenoemde pyrolyseolie. Bij tragere pyrolyse (tientallen minuten tot uren) en vooral bij lagere temperaturen (<700 °C) wordt een vast product (bio)char of biokool dominant. Bij hoge temperatuur zijn gasvormige componenten (pyrolysegas) dominant.

Ongeacht de specifieke verdeling van de producten is er altijd een verhoogd risico op de aanwezigheid van kankerverwekkende, toxische aromatische (bijvoorbeeld benzeen) en polyaromatische koolwaterstoffen (PAK's) in alle productstromen. Bij gebruik van verontreinigde stromen (bijvoorbeeld PFAS-houdende grondstoffen) is de conversie van organohalogeen-componenten zeer beperkt. Er kan dus ook een overdracht van deze componenten naar de producten plaatsvinden. Ook is de pyrolyseolie soms zeer corrosief, zowel door de aanwezigheid van organische zuren (miere/azijn) als ook de gemineraliseerde chloor- en zwavelcomponenten. Bij de keuze tot biochar-productie en diens toepassing voor koolstofsekwestratie (dat wil zeggen een langdurige opslag) in de grond, moet er altijd aandacht besteed worden aan een adequate controle op PAKs om milieuverontreiniging te voorkomen. Ook is stofvorming van biochar vooral bij sekwestratie-toepassingen een belangrijk risicoaspect. Pyrolysegassen bevatten zowel toxische stoffen, zoals koolmonoxide, als brandbare/explosieve componenten met de geassocieerde risico's, zoals toxiciteit en explosiviteit.

Vergassing: Bij vergassing wordt biomassa omgezet onder hoge temperatuur (700-1300 °C) in de aanwezigheid van een beperkt volume van lucht/zuurstof ten opzichte van het volume dat nodig is voor een complete verbranding. Er bestaan diverse vergassingstechnologieën, elk met specifieke technische uitdagingen en beoogde toepassing [17]. Ongeacht de technologische uitvoering resulteert vergassing primair in de vorming van brandbaar productgas, die hoofdzakelijk bestaat uit koolstofmonoxide, koolstofdioxide, methaan en waterstof. Bij een aantal technologieën blijft een kleine deel van het materiaal (<10% op massa basis) over in de vorm van niet omgezette koolstof (char). De eigenschappen van de gevormde producten zijn zeer vergelijkbaar met de producten van de eerder beschreven pyrolyse, met de specifieke verbonden risico's. Daarnaast zijn er ook specifieke risico's te identificeren bij lage-tot-medium-temperatuurvergassing (700-850 °C). Deze risico's zijn hoofdzakelijk verbonden aan organische bijproducten en vooral vergassingsteren. In zekere zin zijn deze teren vergelijkbaar met de pyrolyseolie. Typisch bevat dit vloeibare bijproduct veel hogere concentraties van (poly)aromatische koolwaterstoffen, waarvan de risico's al zijn benoemd.

Verder is er vanwege de aanwezigheid van een hoge concentratie reducerende stoffen in het productgas (CO, H₂) een verhoogd risico op zogenaamde metal dusting (carburisatie, carbonylvorming), die tot hoge toxiciteit van vaste reststromen (vliegias en vliechar) kan leiden. En net zoals bij pyrolyse kunnen organohalogeen-verbindingen (dioxine, PFAS, polybroomdifenyleters) vooral bij gebruik van verontreinigde rest- en gemengde/afval stromen gevormd of niet volledig worden omgezet. Daarom is het zeer belangrijk om adequate productgasvoorbewerking

toe te passen bij de gekozen integratie met chemische (synthese) en thermische (HT warmte/WKK) eindgebruikers.

Verbranding: Als laatste van de toegepaste thermochemische conversieprocessen wordt verbranding genoemd. Deze zeer goed bekende en breed verspreide techniek levert tot nu toe veruit de grootste bijdrage aan bio-energie, in de vorm van warmte en elektriciteit [18], ook in Nederland. Verbranding is op kleine schaal (10 kWth) toepasbaar, beginnend met open haarden en pellet kachels voor verwarming van huizen. Ook op medium grote schaal wordt biomassaverbranding toegepast, zoals bij diverse afvalverbrandings- of biomassaenergie-centrales (Alkmaar, Cuijk, Delfzijl). De bulk van de elektriciteitsproductie wordt gerealiseerd door zogenaamde mee- en bijstook in grote elektriciteitscentrales op basis van stofverbrandingsfornuizen (poederkool of fijngemalen biomassa).

Vergisting: Naast thermochemische routes, worden er ook biochemische routes toegepast om biomassa om te zetten in biobrandstoffen en bio-chemicaliën. Naast de traditionele vergisting van suikers tot alcohol en organische zuren wordt een grote bijdrage van de vergisting verwacht door vooral suiker- en vethoudende reststromen om te zetten naar methaan. Dit draagt bij aan de vergroening van de energiehuishouding. Bij biodigestie voor de productie van methaan worden verschillende temperatuurregimes gebruikt: psychrofiële vergisting (0-20 °C), mesofiële vergisting (20-45 °C) en thermofiële vergisting (45-75 °C), afhankelijk van het type grondstof en de gewenste producten. Het gebruik van een verscheidenheid aan grondstoffen (reststromen uit de voedingsindustrie, waterzuiveringslib, landbouwresiduen), als ook ongewenste zij-conversieroutes, kunnen potentieel leiden tot een aantal risico's. Er kunnen giftige gassen zoals waterstofsulfide (H₂S) en ammoniak (NH₃) tijdens het vergistingsproces vrijkomen. Ook kunnen ongewenste organische zuren, zoals boterzuur, in het proces gevormd worden. Maar de meeste gevaren hebben te maken met het zogenaamde digestaat – een vloeibaar of (water-verzadigd) vaste-stof-residu uit de vergisting. Het residu, vaak na een thermische behandeling om de aanwezige bacteriën te pasteuriseren, wordt voornamelijk gebruikt als grondverbeteraar, en als meststof in landbouw. Dit kan resulteren in overdracht van toxische componenten naar het milieu. In een recent reviewartikel [19] is de aanwezigheid van organische microverontreinigingen, zware metalen en biologische pathogenen in anaerobe digestaat van voedsel- en industriële residuen onderzocht. De studie toont aan dat, hoewel de concentraties van *Escherichia coli*, *Enterococci* en *Salmonella* onder de toegestane niveaus liggen, de sporevormende bacterie *Bacillus cereus* in hoge concentraties aanwezig is. Dit vormt een potentieel risico voor voedselveiligheid, vooral bij gebruik van digestaat in hydroponische systemen (landbouwmethode waarbij de wortels van planten worden blootgesteld aan water dat verrijkt is met voedingsstoffen, in plaats van aan grond). Daarnaast worden zware metalen zoals cadmium, chroom, koper, lood, kwik, nikkel en zink gemeten. In sommige gevallen in hoge concentraties. De verontreinigingsbronnen kunnen divers zijn. Koper en zink kunnen bijvoorbeeld komen van in diervoeder gebruikte micronutriënten en mineralen, die in dierlijke meststromen geconcentreerd kunnen worden. Ook kan slijtage van vergistingsinstallaties en transportinfrastructuur

(corrosie/erosie) zorgen voor toename van concentratie van nikkel en chroom. Helaas is ook moedwillige verontreiniging door gebruik van verontreinigde afvalstromen bij covergisting niet uit te sluiten. Hierbij moet worden opgemerkt dat de concentraties meestal wel onder de wettelijke limieten blijven.

De aanwezigheid van zogenaamde opkomende stoffen (*Engels*: Contaminants of Emerging Concern, CECs), waaronder pesticiden, farmaceutische middelen en voedseladditieven, is ook gedocumenteerd. Hoewel de ecotoxicologische risico's van deze CECs over het algemeen laag zijn, benadrukt de studie de noodzaak van verder onderzoek naar de toxiciteit van mengsels van CECs en hun langetermijneffecten op de bodem en voedselproductie.

Door de ontwikkeling en implementatie van nieuwe conversieroutes, komen er ook steeds meer secundaire conversieresiduen beschikbaar, zoals lignine-rijke vloeibare stromen. Deze stromen lopen zeer uiteen in hun chemische samenstelling en daardoor ook qua risico's. In de huidige setting wordt vooral gekeken naar gebruik van deze stromen als zogenaamd 'energy island': een geïntegreerde on-site verbrandingsinstallatie. De verbrandingseigenschappen van dergelijke stromen zijn tot nu toe grotendeels onbekend, omdat de conversietechnologieën nog steeds in ontwikkeling zijn. Maar in het algemeen worden ze gezien als uitdagende stromen voor minerale belasting en potentiële emissies.

Er zijn grote verschillen in risico's geassocieerd met diverse schaalgroottes en technische vormen van verbrandingstechnologieën en -processen. In principe geldt dat milieurisico's door verspreiding van toxisch fijnstof (PM10/2.5), zuurvormende componenten (NOx/SOx/HX) en/of organohalogeën-verbindingen (onder andere dioxine) sterk afnemen bij schaalvergroting van het verbrandingsproces. Dit heeft hoofdzakelijk te maken met inadequate en instabiele conversiecondities, vooral bij opstarten en stoppen van kleinere installaties [20]. De emissie van koolstofmonoxide, onverbrande koolwaterstoffen en roet is in principe beperkt tot kleine installaties – en vooral bij particuliere pelletkachels een groot probleem. Dit hoofdzakelijk door de combinatie van instabiele verbranding en het ontbreken van effectieve stofafvangst-installaties in het rookgaskanaal (zie hieronder). Bij particulieren geldt ook dat de installatie frequent wordt gestart en gestopt. Dit zijn juist de periodes waarbij de grootste risico's optreden.

Verder zijn ook het hergebruik van vaste reststromen (bodem/vliegassen) en de gezondheidsrisico's van deze stoffen (alkaliniteit, zware metalen verontreiniging, dioxine en PFAS) zeer schaal- en brandstof-afhankelijk. Bij schone, droge, houtachtige biomassa zijn de emissies het laagst, vooral bij grootschalige toepassingen. Bij gebruik van (onbehandeld) afval of gemengde stromen blijven de risico's bij potentiële emissies hoog en kunnen deze alleen gemitigeerd worden door de toepassing van zeer uitgebreide rookgas reinigingstreinen, i.e. meerdere rookgasbehandelingsinstallaties om specifieke componenten te verwijderen, zoals (dioxine, PFAS) toxische metalen (Cr, Ni, et cetera), gassen (zwavel- en zoutzuur) en (fijn)stof.

8.4 Gezondheid

8.4.1 *Luchtemissies op leefniveau*

Zoals beschreven in de voorgaande sectie, zijn er risico's die zich voordoen bij transport en opslag van alle biomassa conversietechnieken: emissies van fijnstof en gasvormige milieubelastende componenten. Meestal betreft het goed gedocumenteerde processen met adequate emissievergunningen – vooral bij installaties met gereguleerde emissies. Echter, bij kleinschalige verbranding met installaties met enkel een EU-typekeuring toelating en zonder aanvullende fijnstofcontrole of bij gebruik van mineraal/as-rijke brandstoffen, kunnen de lokale emissies van fijnstof, NO_x en HCL aanzienlijk verhoogd zijn [21]. Een goed voorbeeld hiervan zijn bekende casussen van de stillegging van een torrefactie installatie of enkele lokale warmtecentrales door (tijdelijke) excessieve fijnstofemissies. Bij overlast door kleine installaties met enkel een EU-typegoedkeuring, vaak in particulier gebruik, kan echter moeilijk worden ingegrepen en kunnen deze alsnog de lokale luchtkwaliteit op leefniveau aanzienlijk beïnvloeden. Deze emissies zijn sterk terug te dringen door de verplichte toepassing van stofafvangst ook bij kleine installaties of door de toepassing van opgewerkte brandstoffen [22].

Emissies van microbiologische bio-agentia, zoals sporen van schimmels, kunnen problematisch zijn. Vooral bij ruwe biomassa kan het ontstaan van broei en biologische activiteit gepaard gaan met dispersie van bio-agentia. In verschillende onderzoeken [23, 24] is aangetoond dat onbewerkte biomassa zeer diverse microben kan herbergen, waarvan de meeste soorten hemicellulose en cellulose metaboliseren (dat wil zeggen daarop groeien). Een deel daarvan is gevaarlijk voor mens en dier. Aan de andere kant heeft TNO in een intern onderzoek aangetoond dat thermisch voorbewerkte biomassa veel minder bacteriële en schimmel-activiteit vertoont, zelfs bij openlucht opslag. Dit is echter enkel onderzocht voor een zeer klein aantal stromen uit thermische voorbewerking van biomassa. Verder zijn de aangetroffen soorten typisch lignine-afbrekende microben, die in het algemeen minder gevaarlijk zijn voor mens en dier.

De effecten op de gezondheid van bovengenoemde emissies kunnen divers zijn. Acute blootstelling (vooral in slecht geventileerde ruimtes) aan CO/CO₂ en/of methaan kan tot verstikking en/of vergiftiging leiden. Fijnstof-emissies, vooral bij langdurige blootstelling, kunnen leiden tot chronische luchtwegaandoeningen. Ook fungeren fijnstofdeeltjes vaak als dragers van gecondenseerde organische stoffen, zoals aromatische PAKs, dioxines of terpenen (uit onvolledige conversie van hars van naaldhout), die toxisch en carcinogeen kunnen zijn. Ook schimmel- en bacteriële infecties door blootstelling aan bio-agentia uit biomassa-opslag kunnen vooral tot luchtweginfecties leiden.

Lopende en geplande onderzoeken:

- Bij diverse EU- en NL-onderzoeksprojecten zijn in recente jaren verbeteringen bij opwerking en toepassing van biomassa ontwikkeld om mogelijke stofvorming te beperken. Deze opgedane kennis moet nog breed gedissemineerd en toegepast worden.

- Diverse EU- en internationale samenwerkingsverbanden (European Energy Research Alliance WP5 (Stationary Bioenergy), International Energy Agency Bioenergy Tasks 32 and 33 (Gasification and Combustion) besteden hieraan aandacht in de vorm van specifieke programmalijnen. Deze omvatten ook het onderzoeken van de inzet van primaire en secundaire residu stromen voor warmte- en energieopwekking.
- Ook het proactief bij de EC agenderen om soortgelijke aspecten adequaat in aanstaande Horizon Europe-programma op te nemen, is belangrijk om middelen voor gericht onderzoek beschikbaar te stellen. Dit gebeurt onder andere door deelname aan de European Energy Research Alliance (EERA) Sub-programma Bioenergy.

Kennisvragen:

- Welke specifieke fijnstof- en NO_x-emissies-reducerende middelen zijn toe te passen zonder de kosten van (kleinschalige) bio-energie productie aanzienlijk te verhogen? Deze maatregelen betreffen zowel technische aanpassingen (doekenfilters, elektrostatische filters, katalysatoren), als maatregelen op het niveau van grondstof/brandstofkwaliteit.
- In hoeverre is er een sluitend wetenschappelijk bewijs beschikbaar dat thermochemische voorbewerking van biomassa leidt tot een significante reductie in biologische activiteit onder gangbare bulkopslagcondities? Wat zijn de mogelijke technische en beleidsmatige consequenties van deze potentieel gunstigere eigenschappen voor bulkopslagbedrijven zowel als de eindgebruikers?
- De beoordeling van secundaire conversieresiduen uit extractieve en thermochemische biomassavoorbewerking vereist gerichte aandacht om hun relevante eigenschappen voldoende te karakteriseren. Dit is essentieel voor de ontwikkeling van thermochemisch efficiënte en kosteneffectieve technieken voor directe warmte- en elektriciteitsopwekking binnen specifieke conversieprocessen. De onderzoeksvragen die hierbij horen gaan over de beschikbaarheid/volumes, de fysische zowel als (micro)biologische en chemische eigenschappen van de reststromen, zoals:
 - o Wat is het geprognosticeerde totale volume van een specifieke reststroom?
 - o Wat zijn de primaire fysieke kenmerken van het materiaal (vloeistof/suspensie/vaste stof)?
 - o Wat is het watergehalte en welke ontwateringsopties kunnen toegepast worden om thermische conversie efficiency te verhogen?
 - o Welke bio-agentia zijn aanwezig en welke maatregelen (pasteurisatie, chemische de-activering) moeten genomen worden om (verdere) bacteriële groei en dispersie te voorkomen?
 - o Welke (potentieel) schadelijke chemische stoffen bevinden zich in het materiaal en in welke chemische associatie?
 - o Welke thermische conversietechniek past het beste bij specifieke eigenschappen-set van de stroom, met nadruk op

maximum thermische procesefficiency en minimaliseren van luchtemissies?

8.4.2

Organische bijproducten bij pyrolytische biomassa (voor)behandeling

Bij alle op pyrolytische processen gebaseerde biomassavoorbehandeling en omzettingstechnologieën worden zeer complexe organische vloeibare stoffen gevormd. Deze zijn doorgaans schadelijk door hun zeer lage pH en/of de aanwezigheid van (poly)aromatische koolwaterstoffen, die ook vluchtig kunnen zijn. Deze stoffen kunnen in contact met huid, maar ook door het inademen, schadelijk (irriterend of bijtend, zoals organische zuren), acuut toxisch (bijvoorbeeld furfural), of kankerverwekkend (benzeen, PAK's) zijn.

Bij het gebruik van gemengde residustromen, vooral als daarin plastic zit, kan er ook sprake zijn van de aanwezigheid van PFAS en andere organohalogeën-verbindingen, zoals vlamvertragers. Deze kunnen onvoldoende omgezet worden en ook door reageren naar nieuwe verbindingen van dit type. Dit kan resulteren in de aanwezigheid van bovengenoemde persistente organische verontreinigingen (Engels: POPs) in de eindproducten. Verwacht wordt dat de meeste van deze stoffen worden opgevangen in reinigingsprocessen, maar bij onvolledige verwijdering kunnen deze verspreid worden via luchtemissies bij de eindconversiestap.

Lopende en geplande onderzoeken:

- In diverse EU- en internationale samenwerkingsverbanden (European Energy Research Alliance (sub-programma Stationary Bioenergy), International Energy Agency Tasks 33 en Task 43 (Gasification and Bioenergy) wordt aan de bovenstaande onderwerpen aandacht besteed.
- TNO-EMT, in samenwerking met Umeå Universiteit (Zweden, gespecialiseerd op het gebied van POPS-analyse in uitdagende matrices), voert op dit moment een specifiek promotieprogramma uit. Dat is gericht op de karakterisering van (PFAS, dioxine en vlamvertragers) in diverse (tussen)producten, en reststromen van geavanceerde biomassa conversietechnieken.

Kennisvragen:

De meeste biomassa-voorbewerkingsprocessen bij pyrolyse en vergassing zijn vooralsnog in pilot- of demonstratiefase. Bij verdere commercialisering van deze nieuwe technologieën/processen wordt er zeker aandacht besteed aan adequate maatregelen op de conversielocatie. Dit om blootstelling aan of verspreiding van gevaarlijke stoffen te voorkomen. Het is op dit moment echter niet goed in kaart gebracht welke samenstelling deze reststromen hebben en vooral op het gebied van POPs vraagt dat om verder verkenningswerk. De specifieke vragen zijn:

- o Wat zijn de emissies bij het gebruik van vergassingsteren en pyrolyseoliën direct op de site als brandstof voor de lokale warmteopwekking, al dan niet geïntegreerd met het hoofdconversieproces?
- o Welke schadelijke componenten kunnen potentieel overgebracht en verspreid worden bij valorisatie van pyrolytische bijproducten

als alternatieve grondstoffen, en op welke manier kan dit voorkomen worden?

8.4.3 *Chemicaliënverspreiding en geuremissies*

Bij openlucht-opslag van biomassa kunnen wateroplosbare chemicaliën uitgespoeld worden, door uitloging met regenwater. Ook kan er sprake zijn bij droog en warm weer van geuremissies, door verdamping van vluchtige organische stoffen. In beide gevallen betreft het een risico van verspreiding van chemische stoffen, zowel vluchtige als wateroplosbare. Het is aangetoond dat potentieel schadelijke stoffen, zoals furfural en sommige organische zuren, aanwezig zijn en dus geëmitteerd kunnen worden uit zulke materialen.

Kennisvragen:

Vanwege een relatief lage marktpenetratie van geavanceerde biomassa-opwerkingstechnologieën en een tot nu toe beperkte inzet van dergelijke grond- en brandstoffen, is het vooralsnog onduidelijk in hoeverre deze potentiële emissies tot gezondheidsrisico's en schade kunnen leiden. Bij de verwachte toename van de inzet, komen de volgende kennisvragen naar voren:

- o Welke specifieke schadelijke/toxische vluchtige componenten kunnen worden geëmitteerd door verdamping, afhankelijk van de specifieke grondstofkarakteristiek en het toegepaste voorbereidingsproces?
- o Welke schadelijke/toxische componenten kunnen uitgespoeld worden door het (regen)water en wat is een specifieke waterzuivering behoefte om verspreiding in het milieu te voorkomen?

Lopend onderzoek:

Een aantal TNO-projecten kijkt op dit moment specifiek naar uitloogbaarheid van (thermochemisch voorbereide) biomassa. De onderzoeksresultaten worden in de nabije toekomst gedissemineerd.

8.5 Veiligheid

8.5.1 *Incidenten veroorzaakt door stofvorming, broei en ongecontroleerde opwarming van biomassa*

Er zijn meerdere voorbeelden van stofdispersie incidenten bekend (in Nederland en elders in de wereld) bij biomassahandling en (voor)bewerking. Een van de meest bekende voorbeelden is een explosie in het biomassa-opslagsysteem bij de RWE Amercentrale in 2014. Dit incident is teruggeleid tot broei in een van de bunkers, die tot de vorming van brandbare gassen en ongecontroleerde opwarming van biomassa heeft geleid. Dit leidde tot ontsteking van het aanwezige stof. Ook zijn er meerdere brandincidenten geweest bij torrefactie-installaties (waaronder ook in Nederland), waarbij vers geproduceerd materiaal op een ongecontroleerde manier spontaan ontbrandde. Dit is terug te leiden tot de primaire eigenschappen van zowel onbewerkte als voorbereide biomassa [4]. Vanwege deze eigenschappen geldt er, in vergelijking met de kolen- en mineralenindustrie, een veel strengere ATEX-compliance en -bewaking en moeten de juiste stofhuishouding maatregelen toegepast worden.

Lopende en geplande onderzoeken:

Bij diverse EU- en NL-projecten zijn in recente jaren verbeteringen ontwikkeld bij opwerking en toepassing van biomassa om mogelijke stofvorming en bijbehorende stofexplosierisico's te beperken. Verder zijn er specifieke, betere analysemethoden ontwikkeld om biomassa-broei en spontaan opwarmingspotentieel te voorspellen. Deze technische maatregelen moeten echter nog in specifieke processen worden toegepast. De analytische methodes moeten voor erkende, wettelijk-bindende toepassing ook verder gestandaardiseerd worden.

Kennisvragen:

In het algemeen zijn de eigenschappen wat betreft stofvorming, explosiviteit en pyroforische reactiviteit zeer materiaal-specifiek. Hoewel er in het verleden diverse categorieën van stoffen zijn onderzocht, is het nu duidelijk dat met de komst van nieuwe feedstocks deze eigenschappen continu onderzocht moeten worden. De kennisvragen hebben vooral betrekking op de keuze en de gestandaardiseerde vorm van (verplichte) analyses, om deze eigenschappen te toetsen:

- o Welke analysemethoden zijn het meest doeltreffend voor de voorspelling van een verhoogd risico op stofvorming, vooral bij langdurige opslag?
- o Welke analysemethoden zijn toe te passen om pyroforische activiteit te toetsen op een realistische manier en op kleine schaal?
- o Hoe kan de invloed van weersomstandigheden kwantitatief nagebootst worden in een analysemethode, om de invloed op de stofvorming bij openlucht opslag te toetsen?

8.6 Overig

In het algemeen zijn de geavanceerde biomassa conversietechnieken nog volop aan het ontwikkelen. Deze nieuwe technologieën zijn vaak nog op relatief kleine schaal toegepast. De juiste kennisachtergrond en proceservaring lijkt bij een deel van de betrokken partijen onvoldoende aanwezig te zijn. Een risico hiervan is dat dat er meer bedrijfsongelukken en milieudelicten (zoals het vrijkomen van corrosieve gassen, spillouts van chemicaliën) in deze ontwikkelings- en implementatiefase kunnen plaatsvinden.

8.7 Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk

- Wat zijn de toelaatbare brandstofkwaliteiten voor huishoudelijk/particulier/kleinschalig gebruik?
- Wat zijn de kaders van specifieke ruimtelijke ordening met betrekking tot het toelaten van kleinschalige biomassaverbranding (vooral in bebouwde omgeving)?
- Hoe moeten de diverse nieuwe biomassa-afgeleide stromen (thermochemisch opgewerkte biomassa, residuen uit fractionering en dergelijke) wettelijk gedefinieerd worden om het toepassen van dergelijke stromen formeel mogelijk te maken?
- Hoe kunnen 'end-of-waste'-verklaringstrajecten voor gemengde biomassa-/afvalstromen gerealiseerd worden, mits compliance met milieuregels aangetoond?

8.8 Voorstellen: onderzoeksprojecten

Kennisprojectdefinities Biomassaconversie en Veiligheidsaspecten

- **Informatieverspreiding, disseminatie en het creëren van maatschappelijk en industrieel draagvlak van de veiligheidsaspecten bij biomassaconversieroutes**
Gericht op het verzamelen, structureren en breed toegankelijk maken van kennis over bestaande en nieuw ontwikkelde veiligheidsaspecten binnen diverse biomassaconversieroutes. Dit omvat risicoanalyses, best practices, en het delen van inzichten via workshops, publicaties en digitale platforms met stakeholders uit industrie, beleid en wetenschap. Een methode om draagvlak te creëren is 'Citizen Science'.
- **Inventarisatie en karakterisering van nieuwe biomassa-soorten en -afgeleide stromen**
Voortzetting van systematische identificatie en uitgebreide fysisch-chemische karakterisering van opkomende biomassa-soorten en hun afgeleide stromen. Doel is het verbeteren van de kennisbasis voor conversie-efficiëntie, milieu-impact en veiligheid, inclusief het ontwikkelen van gestandaardiseerde analysemethoden. Zorgdragen dat bestaande bronnen, zoals Phyllis- en S2Biom-databases aangevuld worden met nieuwe records, een brede bekendheid krijgen en interactief gebruikt worden.
- **Verbetering van emissiemeting, monitoring en modellering op verschillende schaalniveaus**
Ontwikkeling en verfijning van methodieken voor het meten en modelleren van emissies van biomassa-gerelateerde processen. Dit omvat:
 - o Lokale emissiebijdragen van houtstook aan luchtkwaliteit en blootstelling.
 - o Emissies naar de omgeving bij vergistingsinstallaties en thermochemische processen.
 - o Integratie van data in regionale en nationale emissiemodellen voor beleidsdoeleinden.

8.9 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren kwamen tijdens interviews en tijdens de in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 8.1 Opgehaalde beleidsvragen over biomassa uit de interviews en beleidsessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Biomassa			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Het actief volgen van nieuwe ontwikkelingen (overheid loopt altijd achter bij de markt). - EU-normering voor luchtkwaliteit is streng. Kunnen we wel meer biomassa gaan verbranden en toch onder die normen blijven? - Biomassa-installaties zijn kleiner dan conventionele installaties en daardoor meer over het land verspreid. Dat geldt dus ook voor de bijbehorende risico's. Wat betekent dit voor harmonisatie tussen verschillende (industriële) activiteiten? - Hoe de risico's van voor- en natraject mee te wegen? Waaronder het risico bij transport en opslag van biomassa. - Installatie van CO₂-melders en thermometers verplicht stellen bij installaties met/opslag van biomassa? Kan helpen bij het tijdig signaleren van broei, wat de belangrijkste oorzaak is van brand. - Praktijkkennis over vergassing is beperkt. Er zijn nog geen installaties in bedrijf, maar er liggen initiatieven voor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Centraliseren van biomassa-installaties overwegen om aantal risicobronnen te verkleinen. - Wens voor de invoering van een APK-achtige keuring van installaties. - Betere normering voor kleine verbranders en houtkachels. Op dit moment geen vergunning nodig en minder strenge eisen aan emissies.*
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>		
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Toewerken naar een expliciete afweging van financiën versus gedoogconstructies bij wettelijke normen voor toezicht, handhaving en strafnormen. - Wat is er geregeld voor de afvalstroom? 	<ul style="list-style-type: none"> - Installatiebeheerders beschikken over weinig vakkennis; ook - Bijscholing van incidentbestrijders is nodig, want ze beschikken niet altijd voldoende kennis over procesinstallaties (ontzwavelingsproces bij productie van CNG).

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Biomassa			
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	- Inventarisatie van kleine biomassa-installaties (houtkachels en kleine vergisters) ontbreekt - Incidentenonderzoek zou nu door leveranciers gedaan moeten worden, maar dat gebeurt nauwelijks. Wens om, net als in Duitsland, door een onafhankelijk instituut, incidenten te laten onderzoeken en ervan te leren. Dat bevordert ook meer openheid rondom (leren van) incidentanalyses.	

* Zou je een katalysator op je houtkachel kunnen installeren om emissies te reduceren? En wat zijn hiervan dan eventueel de risico's (brandgevaar bijvoorbeeld)?

8.10 Referenties

1. Bart Strengers en Hans Elzenga, "Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa", PBL rapport 2020, https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2020-beschikbaarheid-en-toepassingsmogelijkheden-van-duurzame-biomassa-verslag-zoektocht-naar-gedeelde-feiten-opvattingen_4188.pdf
2. Sirpa Laitinen, Juha Laitinen, Leena Fagernäs, Kirsi Korpijärvi, Leena Korpinen, Kari Ojanen, Marjaleena Aatamila, Mika Jumpponen, Hanna Koponen, Jorma Jokiniemi, Exposure to biological and chemical agents at biomass power plants, Biomass and Bioenergy, Volume 93, 2016, Pages 78-86, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.025>.
3. Kanageswari, S.V.; Tabil, L.G.; Sokhansanj, S. Dust and Particulate Matter Generated during Handling and Pelletization of Herbaceous Biomass: A Review. Energies 2022, 15, 2634. <https://doi.org/10.3390/en15072634>
4. Pedro Abelha and Mariusz K. Cieplik, Energy & Fuels 2021 35 (3), 2357-2367, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c04246
5. Abhishek Singhal, Christian Roslander, Avishek Goel, Arnold Ismailov, Borbala Erdei, Ola Wallberg, Jukka Konttinen, Tero Joronen, Combined leaching and steam explosion pretreatment of lignocellulosic biomass for high quality feedstock for thermochemical applications, Chemical Engineering Journal, Volume 489, 2024, 151298, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151298>
6. Erik Anerud, Sally Krigstin, Johanna Routa, Hanna Brännström, Mehrdad Arshadi, Christopher Helmeste, Dan Bergström, Gustaf Egnell, "Dry matter losses during biomass storage - Measures to minimize feedstock degradation, IEA BioEnergy (Task 43), 2019

7. Rodríguez-Martínez, Rosa & Reali, Miguel & Torres-Conde, Eduardo & Bates, Michael. (2024). Temporal and spatial variation in hydrogen sulfide (H₂S) emissions during holopelagic Sargassum spp. decomposition on beaches. *Environmental Research*. 247. 118235. [10.1016/j.envres.2024.118235](https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118235).
8. Ghosh, D., Ghosh, A. & Bhadury, P. Arsenic through aquatic trophic levels: effects, transformations and biomagnification—a concise review. *Geosci. Lett.* 9, 20 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00225-y>
9. Xuyang Cui, Junhong Yang, Zeyu Wang, Xinyu Shi, Better use of bioenergy: A critical review of co-pelletizing for biofuel manufacturing, *Carbon Capture Science & Technology*, Volume 1, 2021, 100005, ISSN 2772-6568, <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100005>.
10. Stelt, M.J.C. & Gerhauser, H. & Kiel, J. & Ptasinski, Krzysztof. (2011). Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: A Review. *Biomass & Bioenergy - BIOMASS BIOENERG.* 35. 3748-3762. [10.1016/j.biombioe.2011.06.023](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023).
11. Evangelista, Brieuc & Arlabosse, Patricia & Govin, Alexandre & Salvador, Sylvain & Bonnefoy, Olivier & Dirion, Jean-Louis. (2018). Reactor scale study of self-heating and self-ignition of torrefied wood in contact with oxygen. *Fuel*. 214. 590-596. [10.1016/j.fuel.2017.11.048](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.048).
12. M.C. Carbo, P.M.R. Abelha, M.K. Cieplik, P. Kroon, C.F. Mourao Vilela, J.H.A. Kiel, "Handling and storage of torrefied biomass pellets" ECN report ECN-L--16-036, via TNO repository <https://publications.tno.nl/publication/34630774/S9IH15/I16036.pdf>
13. TORWASH® TNO technology "TNO wet biomass treatment process" patent no WO2013162355
14. Mihaela Tanase-Opedal, Solmaz Ghoreishi, Dag Helge Hermundsgård, Tanja Barth, Størker T. Moe, Rune Brusletto, Steam explosion of lignocellulosic residues for co-production of value-added chemicals and high-quality pellets, *Biomass and Bioenergy*, Volume 181, 2024, 107037, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.107037>.
15. Abelha, Pedro & Leiser, Simon & Pels, Jan & Cieplik, Mariusz. (2022). Combustion properties of upgraded alternative biomasses by washing and steam explosion for complete coal replacement in coal-designed power plant applications. *Energy*. 248. 123546. [10.1016/j.energy.2022.123546](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123546).
16. P.J. de Wild, W.J.J. Huijgen, "Solvent-Based Biorefinery of Lignocellulosic Biomass", ECN report ECN-B--15-001, via TNO repository <https://publications.tno.nl/publication/34627959/3VjG28/b15001.pdf>
17. Jitka Hrbek, Christoph Pfeifer, Donatella Barisano, Berend Vreugdenhil, Joakim Lundgren, Reinhard Rauch, Xhesika Korovesi and Enrico Catizzone, "Gasification applications in existing infrastructures for production of sustainable value-added products", IEA BIOENERGY: TASK 33 report 2021, via https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/01/Gasification_integration_report.pdf

18. Dina Bacovsky, Christa Dißauer, Bernhard Drosch, Matthias Kuba, Doris Matschegg, Christoph Schmidl, Elisa Carlon, Fabian Schipfer, and Florian Kraxner, "How bioenergy contributes to a sustainable future" IEA Bioenergy report 2023 via <https://www.ieabioenergyreview.org/>
19. Oksana Golovko, Lutz Ahrens, Jenny Schelin, Mattias Söregård, Karl-Johan Bergstrand, Håkan Asp, Malin Hultberg, Karin Wiberg, Organic micropollutants, heavy metals and pathogens in anaerobic digestate based on food waste, *Journal of Environmental Management*, Volume 313, 2022, 114997, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114997>
20. Brian K. Gullett, Abderrahmane Touati, and Michael D. Hays, PCDD/F, PCB, HxCBz, PAH, and PM Emission Factors for Fireplace and Woodstove Combustion in the San Francisco Bay Region, *Environmental Science & Technology* 2003 37 (9), 1758-1765, DOI: 10.1021/es026373c
21. Senem Ozgen, "Particulate Matter Emission Reduction from Pellet Boilers: Status, Potentiality and Challenges", *Chem. Eng. Transitions*, 92/2022.
22. Pedro Abelha, Carlos Mourão Vilela, Pavlina Nanou, Michiel Carbo, Arno Janssen, Simon Leiser, "Combustion improvements of upgraded biomass by washing and torrefaction", *Fuel*, Volume 253, 2019, Pages 1018-1033, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.050>.
23. Fengel, D., & Wegener, G. (1983). *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Berlin: Walter de Gruyter.
24. Noll, M., & Jirjis, R. (2012). Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. *Applied microbiology and biotechnology*, 95(3), 551- 563.

9 Elektrificatie: energieopslag/buffering – Jochem Wijten, RIVM

9.1 Inleiding

In het Nationaal Plan Energiesysteem [1] is vastgelegd dat we in Nederland inzetten op zoveel mogelijk elektrificatie. Dit betekent dat er meer elektriciteit geproduceerd en getransporteerd gaat worden dan nu. Daarnaast is er behoefte aan opslag in energieopslagsystemen (EOS'en), voor momenten waarop het aanbod te laag is voor de vraag naar elektriciteit. Dit hoofdstuk focust op de risico's van zulke EOS'en, in het bijzonder op elektrochemische energieopslagsystemen.

Meerdere methodes van duurzame energieopwekking werken op oncontroleerbare momenten. Zo wekken windturbines enkel stroom op wanneer het waait, en werken zonnepanelen alleen wanneer er licht op schijnt. Dit valt regelmatig niet samen met de momenten waarop in woningen, kantoren of bedrijven de energie wordt verbruikt. Om de tijd tussen energieopwekking en energieverbruik te overbruggen, worden onder andere EOS'en ingezet. EOS'en dienen ook om congestie op het elektriciteitsnet te verminderen bij fluctuerende energieopwekking uit duurzame bronnen, zodat een constante levering van elektriciteit mogelijk is. De voorspellingen zijn dat er in 2040 wereldwijd 2,5 TWh tot 4 TWh aan EOS'en in gebruik zijn. Dat is een groei van zes tot tien keer de huidige hoeveelheid [2-4]. In Nederland is deze groei geïllustreerd door bijvoorbeeld een toename van 77 procent in slechts vijf maanden tijd in 2023, zoals gerapporteerd door TenneT [5]. De exacte snelheid waarmee het aantal geïnstalleerde batterijen toeneemt is van veel factoren afhankelijk, maar door de meeste stakeholders wordt een sterke toename verwacht ook voor de komende jaren. Op het moment van schrijven wordt de opslag van elektrische energie in EOS'en gedomineerd door lithiumhoudende energiedragers.

Met de toenemende elektrificatie worden ook steeds meer producten op alle vlakken elektrisch. Denk dan aan transport, gebruiksartikelen of industriële processen. Dit zijn vaak zaken die voorheen, of in het heden nog steeds, van energie voorzien werden met fossiele brandstoffen. Dit betreft grote hoeveelheden energie. Daarom groeit ook de vraag voor elektrische energieopslag, voornamelijk in de vorm van batterijen. Daarnaast zijn mogelijke consequenties, zoals voor de bedrijfszekerheid en gevoeligheid voor storingen van grootschalige toename van elektrische aandrijving. Bijvoorbeeld in industriële processen nog niet volledig in beeld. Continuïteit kan ook van belang zijn voor de veiligheid van chemische processen.

Een belangrijk aspect van batterijen is de energiedichtheid, oftewel hoeveel energie in een bepaald gewicht of volume is op te slaan. Voor automobilisten is dat een van de factoren die bepaalt hoe ver een elektrische auto kan rijden, nadat deze is opgeladen.

9.2 Gezondheid

9.2.1 *Elektromagnetische velden*

Alles met elektriciteit veroorzaakt elektromagnetische velden. In de toekomst neemt het aantal bronnen van elektromagnetische velden door

de elektrificatie alleen maar toe. Denk hierbij aan hoogspanningsleidingen, warmtepompen, elektrische voertuigen, elektrische ventilatie, zonnepanelen, buurtbatterijen en elektrische apparaten. Met al deze zaken komen burgers nagenoeg dagelijks in aanraking. Elektrificatie leidt met name leiden tot een toename in laagfrequente elektromagnetische velden waarmee gebruikers, omstanders of omwonenden te maken krijgen [6]. Voor alle bronnen van elektromagnetische velden bestaan blootstellingslimieten. Beneden de blootstellingslimieten is er geen wetenschappelijk bewijs voor gezondheidseffecten.

Sommige mensen ervaren gezondheidsklachten als zij in de buurt komen van bronnen die elektromagnetische velden produceren, bij blootstellingsniveaus ver beneden de blootstellingslimieten [7]. Dit wordt 'elektrogevoeligheid' genoemd.

De klachten die elektrogevoeligen ervaren, zijn reëel en kunnen ernstig zijn en de kwaliteit van leven nadelig beïnvloeden. De oorzaak van de klachten is echter wetenschappelijk niet duidelijk [8]. Het RIVM draagt actief bij aan de voorlichting over risico's van elektromagnetische velden in het Kennisplatform Elektromagnetische velden.

Kennisvragen:

- Er is wetenschappelijke onzekerheid over de langetermijneffecten van elektromagnetische velden op de gezondheid [6]. Er zijn aanwijzingen dat er mogelijk een verhoogd risico is voor het ontstaan van leukemie bij kinderen bij langdurige blootstelling aan magnetische velden van hoogspanningslijnen met een veld sterker dan 0,4 microtesla. Er is echter geen oorzakelijk verband aangetoond. Er is dus niet te zeggen of de gezondheidseffecten veroorzaakt worden door magnetische velden [15]. Ook volwassenen hebben mogelijk een hoger risico op leukemie, maar daarvoor is nog minder wetenschappelijke onderbouwing. De bijbehorende kennisvraag is: Wat zijn de risico's voor de gezondheid van langetermijnblootstelling aan elektromagnetische velden?
- Nagenoeg al het bestaande onderzoek betreft elektromagnetische velden bij hoogspanningslijnen. Het is niet bekend in hoeverre deze inzichten ook gelden bij andere elektrische componenten in het net.
- Wanneer een toename van blootstelling aan elektromagnetische velden gemonitord zou worden, is het zaak om eerst ook te inventariseren hoe sterk de blootstelling op dit moment is. Het monitoren van een toename in blootstelling aan elektromagnetische velden is nodig, mocht er in de toekomst een duiding gewenst zijn over de impact van blootstelling op de gezondheid bijvoorbeeld door langetermijneffecten.

9.2.2

Laagfrequent geluid

Een toename in laagfrequent geluid door elektrificatie komt voornamelijk door een toename in elektrische apparatuur. Er is veel onderzoek gedaan naar de effecten van geluid in het algemeen (alle toonhoogten samen). Daarin is aangetoond dat geluid verschillende effecten heeft, zoals hinder, slaapverstoring en aandoeningen aan het hart- en vaatstelsel. Een aantal onderzoeken heeft specifiek gekeken

naar laagfrequent geluid (LFG) en het effect daarvan op de gezondheid. Daaruit bleek blootstelling aan LFG samen te hangen met (ernstige) hinder en mogelijk met slaapverstoring. Er is geen bewijs voor andere directe gezondheidseffecten van LFG. Het ondervinden van hinder van een bromtoon kan echter wel leiden tot onder andere concentratieproblemen en vermoeidheid [9-10]. Ter verduidelijking: dit betreft voor het grootste deel geluid dat buiten het menselijk gehoor valt of op de grens daarvan ligt.

Kennisvragen:

Zijn alle gezondheidsrisico's van laagfrequent geluid voldoende in beeld? Wat is de toename in blootstelling aan laagfrequent geluid ten gevolge van de elektrificatie? Brengt een eventuele toename risico's met zich mee, en zo ja, wat is dan de dosis (dB)- effect relatie voor dit specifieke frequentiebereik?

9.2.3 Vrijkomen (gevaarlijke) stoffen uit batterijen

Wanneer energie chemisch wordt opgeslagen, zoals in een batterij, dan bestaat er het risico dat deze chemicaliën, of afbraakproducten, vrijkomen. Ook in andere producten die onderdeel zijn van de elektrificatie van ons energiesysteem komen chemicaliën voor. De impact die deze stoffen kunnen hebben, hangt sterk af van de chemische samenstelling van een batterij. Stoffen kunnen vrijkomen bij een incident, zoals bij brand of beschadiging van de batterij. Dit gaat dan via de rook, het bluswater en de as. Ook kunnen de stoffen die vrijkomen uit een batterij, zonder dat er brand optreedt, schadelijk zijn. Daarnaast kunnen stoffen langzaam weglekken uit batterijen wanneer deze bijvoorbeeld op een afvalhoop liggen.

Bij lithium-ion-batterijen en natrium-ion-batterijen kunnen bijvoorbeeld giftige stoffen als waterstoffluoride, stikstofdioxide, en giftige metalen vrijkomen. Ook kunnen bij deze batterijen brandbare en explosieve stoffen vrijkomen, zoals koolwaterstoffen en waterstof. Wanneer mensen met deze stoffen in aanraking komen, kan dat leiden tot effecten die variëren van huidirritatie tot aan overlijden. In het geval van Redox-flow-batterijen kunnen ook giftige stoffen vrijkomen, zoals vanadium of waterstofbromide. Daarnaast kan er een waterstofwolk ontstaan uit de oplossingen, die brandbaar en explosief kan zijn. Er is veel kennis beschikbaar over de effecten die verschillende chemische stoffen hebben op het menselijk welzijn. Het is echter per batterijtype afhankelijk welke stoffen kunnen vrijkomen en hoeveel. Ook de kans op het vrijkomen van stoffen verschilt per batterij. Zo is de naam 'lithium-ion-batterij' al een verzamelnaam van meerdere verschillende op lithium gebaseerde batterijen. Binnen deze verzamelnaam loopt het type stoffen dat kan vrijkomen al ver uiteen.

Lopende onderzoeken:

Er loopt bij het RIVM een promotieonderzoek in samenwerking met universiteit Leiden voor het toepassen van natrium ter vervanging van lithium/nikkel/kobalt. Ten slotte loopt er nog een onderzoek over de productgroep van batterijen. Er loopt onderzoek naar safe-and-sustainable-by-design van producten, waar batterijen ook een onderwerp is.

Er wordt onderzocht of de ECHA (European chemicals agency) gevaarlijke stoffen in batterijen in de REACH-verordening (registration,

evaluation, authorisation and restriction of chemicals regulation) kan onderbrengen.

Kennisvragen:

- Welke stoffen kunnen bij nieuwe energieopslag-technologieën mogelijkwijs vrijkomen? Door deze vraag te onderzoeken, wordt inzicht in de risico's van deze nieuwe technologieën verkregen [11-12]. In studies die op dit moment worden uitgevoerd, wordt regelmatig vergeleken met lithium-ion-batterijen en genoemd dat de kans op een thermal runaway lager is bij de nieuwe technologie dan bij een lithium-ion-batterij. Voor een goed inzicht in mogelijke risico's dienen echter ook eventuele andere risico's in beschouwing genomen te worden die niet in het geval van een lithium-ion-batterij aanwezig zijn.
- Wat zijn de risico's voor de gezondheid en veiligheid van advanced materials die gebruikt worden in EOS'en? En zijn er alternatieven beschikbaar waarbij de risico's lager zijn?

9.3 Veiligheid bij EOS'en met batterijen

Bij energieopslag in batterijen is het doel om in een relatief klein gewicht en/of volume een grote hoeveelheid energie op te slaan. Deze energie wil vrijkomen. Het doel is de energie vrij te laten komen op controleerbare wijze wanneer wij deze energie nodig hebben. De kans bestaat echter altijd dat deze energie ongecontroleerd vrijkomt. Om vast te kunnen stellen hoe veilig een technologie is, is het noodzakelijk om bij iedere wijze van energieopslag een analyse te maken van de scenario's waarbij de energie ongecontroleerd kan vrijkomen. Het is onvoldoende om enkel aan te tonen dat de faalscenario's van een andere technologie niet mogelijk zijn.

Bij iedere technologie moet rekening gehouden worden met de kans op ongevallen. Het is dan ook belangrijk om van tevoren de mogelijke ongevalsscenario's na te gaan en de kans op en het effect van dat scenario te bepalen. Het bepalen van ongevalsscenario's is bij elke inpassing een belangrijk goed. Zo kent bijvoorbeeld een EOS in een kelder andere scenario's en behoeft deze andere voorzieningen, dan een EOS op maaiveldniveau zonder omliggende bebouwing.

9.3.1 *Ongecontroleerd vrijkomen van energie*

Brand en explosie:

Brand en explosie zijn veelvoorkomende routes waarbij energie ongecontroleerd vrijkomt. Brand kan ontstaan door wrijving, bij bijvoorbeeld een vliegwiel, of door chemische reacties, zoals bij een thermal runaway bij een lithium-ion-batterij. Bij een aantal batterijen vormt zich waterstof als zich een incident voordoet, die vervolgens kan ontsteken. Binnen safe-by-design-principes wordt nagedacht over de brandbaarheid van een energieopslagsysteem, en hoe dit is te voorkomen en/of te bestrijden.

Elektrocucie:

De energie kan zich wanneer deze vrijkomt ook nog in elektrische vorm bevinden. Dit kan leiden tot electrocutie. Omgaan met de gestrande energie is vooral een uitdaging tijdens de incidentbestrijding en de

daaropvolgende ontmanteling. Voor de omgeving zijn de risico's van elektrocutie zeer beperkt.

Lopend onderzoek:

Voor het veilig vervoer van batterijen wordt er in het UN ECOSOC Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods door Nederland (RIVM namens het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat) bijgedragen aan het werk voor de classificatie van lithium-ion- en natrium-ion-batterijen en de vervoersvoorwaarden voor deze batterijen in de bijbehorende gevarenklasse.

Kennisvragen:

- In het kader van incidentbestrijding is het behulpzaam om te inventariseren op welke plekken in gebouwen zich batterijen bevinden en wat voor batterijen dit zijn. Een door een elektrische scooter of een thuisbatterij veroorzaakte brand vraagt een andere bestrijdingsmanier dan een woningbrand met een niet-EOS-gerelateerde oorzaak. Het is voor hulpverleners waardevol om bij een incident dergelijke kennis beschikbaar te hebben.
- Er is onvoldoende data over het aantal incidenten met EOS'en om de frequentie van falen te kunnen afleiden. Nu wordt de faalkans afgeleid op basis van conservatieve expertkennis en analogieën. Met meer informatie over het aantal incidenten met EOS'en kan de faalkans scherper worden afgeleid en zijn risico's rondom EOS'en beter in te schatten. Dergelijke kennis leidt naar verwachting tot meer plaatsingsmogelijkheden, omdat het risico nauwkeuriger wordt berekend.
- Er is nog weinig bekend over de risico's bij het hergebruiken van batterijen (second life) en de levensduur van batterijen. Bij veroudering neemt het risico van ongevallen met batterijen toe. Ook is de levensduur van belang om in beeld te krijgen wat de milieu-impact van batterijen is.

9.3.2 Bestrijding bij incidenten met batterijen

Batterijen bevinden zich tegenwoordig overal. Het NIPV heeft onder andere scenarioboeken gepubliceerd over een EOS in een kelder. Deze EOS'en zijn moeilijk bereikbaar voor de brandweer en daardoor is een brand moeilijk te bestrijden. Hetzelfde geldt bijvoorbeeld voor elektrische voertuigen in parkeergarages.

De zelfredzaamheid van mensen kan beperkt zijn. Daarnaast is er onvoldoende publiek besef over de gevaren van batterijen en waar deze zich allemaal kunnen bevinden. Er zijn gevallen bekend van incidenten met elektrische fietsen/scooters in kelders en appartementen die een brand veroorzaken. Burgers zijn niet bekend met de gevaren van een gaswolk die uit een batterij komt en dat deze bijvoorbeeld explosief kan ontsteken. Een burger kan over het algemeen een batterijbrand ook niet zelf blussen.

Het is bij het RIVM niet bekend of er een analyse is van een mogelijke verandering in de frequentie van (lokale) stroomuitval door de introductie van EOS'en. Dit kan een rol spelen in de werking van beveiligingssystemen die afhankelijk zijn van stroom, inclusief de beveiligingssystemen van de EOS'en zelf.

De bestrijding van incidenten kan erg lastig zijn. De uitdagingen waarvoor hulpverleners komen te staan, zijn voor iedere technologie

anders. Ook zijn de effecten vaak groot ten opzichte van wat bijvoorbeeld bij een normale brand te verwachten is. Branden met EOS'en zijn heviger en lastig te blussen. Een uitdaging op dit moment is dat de brandweer niet altijd weet of er zich een energieopslagsysteem in het gebouw bevindt. Gedurende het vorderen van de energietransitie (bijvoorbeeld vanaf 2050) is het mogelijk dat de aanwezigheid van batterijen vaak genoeg voorkomt dat daarvan wordt uitgegaan, vergelijkbaar met aardgas nu.

Door een thuisbatterij kunnen zoveel brandbare stoffen vrijkomen dat er in geval van ophoping een hevige explosie kan plaatsvinden. Dit vormt een toenemend risico voor incidentbestrijders, die vaak niet weten in welke garage of kelder een thuisbatterij aanwezig is.

9.4 Lopend en gepland onderzoek

Hieronder staat in tabel 9.1 een samenvatting van de lopende onderzoeken bij het RIVM in 2024. Voor projecten die zich op dit moment binnen Europa afspelen, is een database beschikbaar¹⁵.

Tabel 9.1 RIVM-portfolio Batterijen 2024

Project	Activiteit	Opdrachtgever
Duurzame Mobiliteit en Transport	Participatie en ondersteuning Interdepartementale werkgroep Batterijen ¹⁶ .	IenW
Duurzame Mobiliteit en Transport	Signaleren voor Interdepartementale werkgroep Batterijen met drie nieuwsbrieven.	IenW
Vervoer gevaarlijke stoffen	Vorbereiding & deelname plenaire vergadering ESOSOC UN-TDG ¹⁷ ; deelname werkgroep Lithiumbatterijen onder ESOSOC UN-TDG.	IenW
Relevantie EOS'en voor omgevingsveiligheid	Briefrapport over of er effecten kunnen optreden bij incidenten met EOS'en waarbij omwonende kunnen komen te overlijden.	IenW
Opstellen rekenmethode lithium-ion opslagen en EOS'en	Het opstellen van een omgevingsveiligheid rekenmethode rondom grootschalige opslag van lithium-ion-batterijen (en producten die deze bevatten) en het opstellen van een rekenmethode rondom EOS'en.	IenW
EU-project IRISS	Onderzoek naar SSbD van (stoffen in) batterijen in de keten (roadmap).	EC

¹⁵ Deze database is met [deze link](#) te bereiken.

¹⁶ Interdepartementale werkgroep Batterijen-deelnemers: I&W/Mobiliteit (voorzitter), EZK, FIN, V&J, Binnenlandse Zaken, RVO, RWS, Verenigde Brandweer, NVWA, ILT en RIVM.

¹⁷ ECOSOC stands for Economic and Social Council, which is one of the six principal organs of the United Nations. ECOSOC Sub-Committee of Experts on the Transport of Dangerous Goods (TDG)

Project	Activiteit	Opdrachtgever
EU-project Safera SUESS	Onderzoek naar SSbD van elektrolietsystemen in batterijen.	EC
Nationaal stoffenbeleid	ZZS in batterijen.	IenW
Onderzoeksproject	Promotieonderzoek: Natrium als mogelijke vervanger van kobalt, nikkel en lithium in batterijen (samenwerking VSP-Leiden Universiteit) .	Leiden Universiteit
Onderzoeksproject	Productgroep analyse, casus Batterijen.	PBL
SSbD-kader voor batterijen	Het ontwikkelen van een safe-and-sustainable-by-design-kader voor producten, waaronder batterijen.	IenW

9.5 Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk

- Plaatsingsregels
 - o Wat is toegestaan bij het plaatsen van batterijen in binnenruimtes, kelders of parkeergarages?
 - o Wat is toegestaan bij particuliere plaatsing in huis?
- Beschikbaarheid van ongevalsinformatie.
- Hoe om te gaan met een combinatie van verschillende technieken? Zoals het plaatsen van windturbines dicht bij een grootschalig EOS-systems.
- Batterij-paspoorten
 - o Het volgen van batterijen gedurende hun levensloop.
- Hergebruik van batterijen
 - o Welke veiligheidseisen of tests moeten aan hergebruik voorafgaan?
- Informeren van burgers
 - o Hoe moeten burgers op de hoogte gesteld worden van de risico's?
 - o Wat is de huidige publieke perceptie rond EOS'en, en welke handvatten geeft deze perceptie aan beleidmakers?
 - o Hoe beïnvloedt het vergelijken van de risico's van EOS'en met alternatieven de publieksperceptie?
 - o Mogelijkheden om de batterijkwaliteit te kunnen testen? Denk aan uniforme test-stations voor elektrische fietsen bijvoorbeeld, indien mogelijk.

9.6 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren kwamen tijdens interviews en tijdens de in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn voor de aanwezigen belangrijke zaken. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 9.2 Opgehaalde beleidsvragen over elektrificatie uit de interviews en beleidsessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Elektrificatie			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Leveringszekerheid is vanuit het oogpunt van crisisbeheersing belangrijk; hoe vertaalt zich dat in normen aan de voorkant? - Sommige risico's (bijvoorbeeld van EOS'en) zijn nog niet volledig in kaart gebracht. - Is de huidige normering voor thuisbatterijen adequaat? Zo nee, wat is er nog nodig (afhankelijk van schaalgrootte)? 	<ul style="list-style-type: none"> - Welke vormen van voorzorg zijn toe te passen bij vergunningverlening als de risico's nog niet volledig in kaart zijn gebracht? - Als we het veiligheidsniveau in Nederland gemiddeld genomen gelijk houden, dan zijn er toch plekken in Nederland waar de veiligheid lokaal wat minder wordt. Hoe gaan we daarmee om?
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Er is behoefte aan meer safe-by-design qua bestrijdbaarheid van bijvoorbeeld brand bij incidenten (vooral voertuigbranden). - Er is behoefte aan handvatten hoe om te gaan met de locatie van EOS-en en batterijen. Die kunnen overal staan (dak, kelder, parkeergarage) en dat stelt specifieke eisen aan crisisbeheersing.
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bij branden met batterijen ontstaat vervuild bluswater. Steeds vaker plaatst men (indien mogelijk) schermen en laat de brand uitbranden. Vraag is wat milieutechnisch gezien beter is: blussen of uit laten branden. - In hoeverre kunnen zwerfstromen (i.r.t. EOS-en en de afstand tot gasleidingen) corrosie veroorzaken aan gasleidingen? 	<ul style="list-style-type: none"> - Er is behoefte aan meer kennis over de verscheidenheid aan batterijen, die gebruikt worden in voertuigen. - Hoe om te gaan met het voorzorgsprincipe in relatie tot transformatorhuisjes, die er al staan, vaak dicht bij bebouwing?

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Elektrificatie			
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	- Behoeftte om incidenten goed vast te leggen**, maar ook bijna-incidenten. Dit zou bij een partij neergelegd moeten worden, inclusief de inspanning om te leren van deze (bijna-)incidenten.	

* Voor de ontwikkeling van nieuwe technieken zou je een soort societal readiness-level willen inbouwen: is de samenleving klaar voor deze ontwikkeling? Analoog aan het technology readiness level. Beleving is een heel belangrijk aspect bij de energietransitie in het algemeen.

** De volgende incident-database werd tijdens de beleidsessie genoemd: [BESS Failure Event Database - EPRI Storage Wiki](#). Battery Energy Storage System Failure Incident Database. Opgericht in 2021, bevat tot nu toe (juli 2024) 88 incidenten uit Noord-Amerika, Europa, Azië en Australië.

9.7 Referenties

- [1] Nationaal Plan Energiesysteem, ministerie van Economische Zaken, 2023, [Nationaal Plan Energiesysteem | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)
- [2] Christensen, P. A., et al. (2022). "Risk Management over the Life Cycle of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles." Fabig Newsletter(84): 5-27.
- [3] ExpertgroepBatterijen (2022). "Actieagenda Batterijsystemen." Retrieved 28-10-2022, from <https://batterycompetencecluster.nl/nieuws/actieagenda-batterijsystemen-aangeboden-aan-tweede-kamer>.
- [4] Liu, Y. and X. Huang (2021). "Fire Risk of Transporting and Storing Massive Li ion Batteries." Fabig Newsletter(82): 6-16.
- [5] Tennet, <https://www.strategy.nl/post/34-gw-aan-batterijprojecten-in-beeld-bij-netbeheerders-per-eind-februari-2023>, bezocht: 11-03-2025.
- [6] RIVM, <https://www.rivm.nl/elektromagnetische-velden>, 05-09-2024.
- [7] Kennisplatform elektromagnetische velden, <https://www.kennisplatform.nl/blootstellingslimieten-voor-elektromagnetische-velden/>, bezocht 11-03-2025.
- [8] Kennisplatform elektromagnetische velden, <https://www.kennisplatform.nl/elektrogevoeligheid/>, bezocht 11-03-2025.
- [9] Factsheet Laagfrequent Geluid, RIVM, <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2020-09/Factsheet%20laagfrequent%20geluid.pdf>
- [10] RIVM, <https://www.rivm.nl/laagfrequent-geluid-en-bromtonen/hinder-en-gezondheidsklachten>, bezocht 11-03-2025.
- [11] NIPV 2023, H. Brans, Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid.
- [12] RHDHV 2023, G. Koolman, M. Seyfi, B. van den Broek, G. van den Broek Humphrey, T. Bakker, Onderzoek Veiligheid Energie Opslag Systemen

- [13] Soeteman-Hernández L.G., Blanco C.F., Koese M., Sips J.A.M., Noorlander C.W., Peijnenburg J.G.M., Life cycle thinking and safe-and-sustainable-by-design approaches for the battery innovation landscape, *iScience*, 26 (3), 2023.
- [14] RIVM, Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie, 2023, Rapport 2023-0310.
- [15] RIVM, Nieuwe schatting aantal kinderen met leukemie bij bovengrondse hoogspanningslijnen, 2025, Rapport 2024-0196

10 Waterstof en waterstofdragers – Johan van Middelaar, TNO

Dankwoord

De auteur bedankt Denise Harkema voor het becommentariëren van dit hoofdstuk.

10.1 Inleiding

In de energietransitie spelen waterstof en van koolstofarme waterstof afgeleide waterstofrijke energiedragers (hierna: waterstofrijke energiedragers) een cruciale rol in het verminderen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en het structureel verlagen van CO₂-uitstoot. Om koolstofarm te kunnen worden genoemd, moet de waterstof voldoen aan een besparing op de uitstoot van broeikasgassen gedurende de levenscyclus van minimaal 70 procent ten opzichte van de fossiele referentie.¹⁸ Hernieuwbare waterstof is waterstof die wordt geproduceerd door de splitsing van water via elektrolyse en waarbij de gebruikte elektriciteit afkomstig is van hernieuwbare bronnen. Dit wordt ook wel 'op elektriciteit gebaseerde hernieuwbare waterstof' genoemd, of 'groene waterstof'.

10.1.1 Vormen van waterstof en waterstofdragers

Waterstofdragers bieden diverse oplossingen voor de energietransitie, maar elke drager heeft specifieke voordelen en uitdagingen. Waterstofdragers maken het mogelijk om energie van hernieuwbare bronnen in een hogere energiedichtheid dan via 100 procent zuivere waterstof op te slaan, te transporteren en te gebruiken in verschillende sectoren. De keuze van de juiste waterstofrijke energiedrager hangt af van de specifieke toepassingen en logistieke vereisten. En er is voortdurende innovatie nodig om deze technologieën kosteneffectief en breed inzetbaar te maken. Hieronder zijn verschillende vormen van waterstof en waterstofrijke energiedragers samengevat. De volgende paragrafen beschrijven per waterstofdrager of waterstofvorm wat algemene karakteristieken zijn van de betreffende chemische stof en typische voor- en nadelen voor het gebruik van deze vorm in relatie tot veiligheid en gezondheid.

10.1.1.1 Gasvormig (gecomprimeerd) waterstof (cH₂)¹⁹

Waterstof is het meest voorkomende element in het universum. Onder normale omstandigheden is het gasvormig en vormt het waterstofgas (H₂ (g)). Het comprimeren van waterstofgas kost energie, waarbij de druk tot 800 bar kan oplopen. Dit noemen we gecomprimeerd waterstof (cH₂). Het wordt vloeibaar bij -253 °C. Waterstof is het lichtste bekende gas (waterstof is dus lichter dan lucht) en heeft een lage energiedichtheid per volume-eenheid (m³). Per gewicht (kg) heeft waterstof een hoge energiedichtheid van 120 megajoule (MJ) per kg. Dit is bijna drie keer zoveel als aardgas (45 MJ per kg). Transport van cH₂

¹⁸ De emissiefactor van de fossiele referentie is gesteld op 94 g CO_{2, eqv.}/MJ. De Europese Richtlijn Hernieuwbare Energie (Renewable Energy Directive (RED), DIRECTIVE (EU) 2023/2413) hanteert een reductiepercentage van minimaal 70% ten opzichte van de referentie, terwijl de Europese regelgeving over het opzetten van een raamwerk om duurzaam beleggen te faciliteren (REGULATION (EU) 2020/852), ook wel bekend als EU Taxonomy, uitgaat van 73,4%.

¹⁹ <https://www.britannica.com/science/hydrogen>

gebeurt op dit moment hoofdzakelijk in gascilinders (tubes) op vrachtwagens bij een druk van 200 tot 500 bar. Bij waterstoftankstations kan de druk oplopen tot 800 bar voor sneltanken en tot 700 bar in voertuigen. Hoewel waterstof in sommige opzichten minder energie per volume bevat dan aardgas, heeft het een veel bredere explosiegrens, waardoor het onder een groter bereik van concentraties en omstandigheden een explosieve atmosfeer kan vormen. Het voorkomen van hoge waterstofconcentraties hangt sterk af van het gebruik, zoals de bedrijfsdruk en de omvang van een lekkage. Bij conservatieve aannames wordt vaak uitgegaan van directe ontsteking na een lekkage. Uit onderzoek en praktijkervaring met incidenten blijkt echter dat ook vertraagde ontsteking kan optreden, wat kan leiden tot een explosie met aanzienlijke overdruk.

10.1.1.2 Vloeibare waterstof (LH₂)

Vloeibare waterstof betreft hetzelfde element als gasvormig waterstof, alleen wordt de stof in een andere fase (vorm) benut. Bij extreem lage temperaturen (-253 °C) kan waterstof in vloeibare vorm worden opgeslagen (ook wel liquid hydrogen of LH₂ genaamd). Dat biedt een hogere energiedichtheid per volume dan gasvormige waterstof. Vloeibare waterstof is geschikt voor langeafstandstransport en de opslag van grote hoeveelheden waterstof. Voordelen zijn onder andere de grotere energiedichtheid, wat het geschikt maakt voor toepassingen waar beperkte ruimte beschikbaar is, en dat meer energie per eenheid volume kan worden getransporteerd. Een ander voordeel is dat vloeibaar waterstof zeer zuiver is. Nadelen van LH₂ zijn de relatief hoge energie- en transportkosten en technische uitdagingen voor het koelen en onderhouden van lage temperaturen tot -253 °C, om LH₂ vloeibaar te houden. Daarnaast vereist het gespecialiseerde cryogene transporttanks en een infrastructuur om de lage temperaturen te handhaven en aan het veiligheidsniveau te voldoen.

10.1.1.3 Ammoniak (NH₃)

Ammoniak is (onder normale omgevingscondities) een kleurloos en giftig gas. Ammoniak wordt doorgaans geproduceerd uit waterstof en stikstof, waarbij de waterstof gemaakt wordt met aardgas. Tijdens dit proces komt CO₂ vrij. Ammoniak wordt vooral gebruikt als grondstof voor de productie van kunstmest en kunststoffen. Het kan ook worden gebruikt als brandstof of als waterstofdrager. In dat laatste geval vindt de terugwinning van waterstof uit ammoniak plaats via het (thermisch) kraken van ammoniak. De opslag en het transport van ammoniak zijn relatief gemakkelijk uitvoerbaar en kennen brede toepasbaarheid in de bestaande infrastructuur, wat meteen de gebruiksvoordelen van deze vorm zijn. Het grootste gevaar van ammoniak in gasvorm is de toxische eigenschap. Voor cryogeen ammoniak in vloeibare vorm kunnen bij vrijkomen snel hoge concentraties bereikt worden, waarbij ook brandgevaar een factor is. Een ander aspect is de lage geurdrempel. Hierdoor zal bij slechts weinig vrijkomen een groot gebied overlast ervaren. Naast veiligheidsaspecten voor de mens, spelen ook milieuaspecten een rol. Ammoniak lost namelijk makkelijk op in water, waardoor het aquatisch milieu - en dus ook de kwaliteit van het grondwater - in gevaar kan komen.

- 10.1.1.4 Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's)
Waterstof kan worden gebonden aan chemische stoffen die vloeibaar zijn onder normale omgevingscondities, waardoor waterstof eenvoudiger te transporteren is. Dit zijn de zogeheten Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC's). Voorbeelden van LOHC's zijn toluen-methylcyclohexaan (TOL-MCH), N-ethylcarbazon en dibenzyltolueen (DBT). Diverse LOHC's bevatten (of vormen tijdens gebruik) stoffen die door het RIVM als Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) worden beschouwd vanwege onder andere kankerverwekkendheid, schadelijke effecten op voortplanting en neiging tot accumulatie in mens en milieu. Bovendien kunnen LOHC's slecht biologisch afbreekbaar zijn en daarom aanzienlijke toxiciteitsrisico's met zich meebrengen.²⁰ LOHC's worden toegepast voor het transport en de opslag van waterstof over lange afstanden, zonder hoge druk of extreme temperaturen. Na transport van LOHC's wordt de waterstof 'afgegeven' via een chemisch proces genaamd dehydrogenering. Bij dit proces wordt de waterstofdrager omgezet naar waterstof en de drager. Deze is vervolgens herbruikbaar voor een volgend transport (de zogeheten 'reversibele vloeibare waterstofdragers'). Technische uitdagingen zijn de ontwikkeling van efficiënte ontkoppelings- en terugwinningsprocessen en de reductie van bijkomende energiekosten.
- 10.1.1.5 Methanol
Methanol is een al breed toegepaste en goed onderzochte chemische stof, die naast de bestaande industriële toepassingen ook wordt beschouwd als een mogelijke vloeibare waterstofdrager binnen de energietransitie. Methanol is een kleurloze vloeistof en een alcohol en wordt (nog) geproduceerd door het gebruik van aardgas als grondstof. In het chemische proces wordt aardgas eerst omgezet naar syngas, een mengsel van waterstof en koolmonoxide (CO). Daarna wordt het syngas omgezet naar methanol. Hernieuwbare methanol, ook wel groene methanol genoemd, wordt geproduceerd met hernieuwbare waterstof en CO₂. Methanol is acuut toxisch: opname via inademing, inslikken of huidcontact kan leiden tot ernstige gezondheidseffecten. Chronische blootstelling kan hoofdpijn en oogirritatie veroorzaken, maar er zijn geen aanwijzingen voor mutageniteit, carcinogeniciteit of reproductieve toxiciteit bij mensen [[Methanol: toxicological overview - GOV.UK](#)].
- 10.1.1.6 Liquid Synthetic Methane
Liquid Synthetic Methane (LSM) - ook wel e-methaan of Synthetic Natural Gas (SNG) genaamd - is een andere optie voor het opslaan en transporteren van groene waterstof. Deze waterstofdrager wordt gemaakt van groene waterstof en CO₂. LSM is brandbaar en explosief bij menging met lucht, kan in afgesloten ruimtes verdrinking (zuurstoftekort) veroorzaken, en bij contact door zijn cryogene temperatuur ernstige bevriezingsletsels opleveren. LSM heeft het voordeel dat het past in de bestaande (aardgas-)infrastructuur. Dat levert een kostenvoordeel op ten opzichte van andere waterstofdragers.

²⁰ [Liquid hydrogen carriers: an overview of technical aspects and SVHC properties, RIVM](#): M. Marinković, J. Ng-A-Tham; RIVM-rapport 2023-0369.

- 10.1.1.7 Natrium- en kaliumboorhydride
Boorhydrides zoals natriumboorhydride (NaBH_4) en kaliumboorhydride (KBH_4) zijn vaste stoffen in poeder- of korrelvorm die sterk reageren met water en daarbij waterstofgas vormen, wat brand- en explosiegevaar oplevert. Ze zijn giftig bij inslikken, veroorzaken ernstige huid- en oogbeschadiging en kunnen bij inademing luchtwegirritatie en mogelijk ernstige gezondheidseffecten veroorzaken. Natriumboorhydride is bovendien geclassificeerd als reproductietoxisch. Beide stoffen zijn recent aangemerkt als potentieel zeer zorgwekkend, wat gevolgen heeft voor regelgeving en transport in bulk. Hoewel ze interessant zijn als relatief stabiele opslagmedia voor waterstof en worden onderzocht in pilots voor energieopslag, blijven er grote uitdagingen bestaan. Voorbeelden hiervan zijn veilige handling, ontwikkeling van efficiënte katalysatoren, kosten en energie voor regeneratie. Opslag en gebruik vereisen strikte veiligheidsmaatregelen, zoals droge, inerte omstandigheden en persoonlijke beschermingsmiddelen, omdat contact met vocht direct tot gevaarlijke reacties leidt. Vervoer over de weg is al toegestaan. Vanwege het label ZZS ligt de uitdaging of vervoer kan/mag worden toegestaan vanwege toxiciteit voor aquatisch milieu en mogelijke effecten gevolgen daarvan.
- 10.1.1.8 Uitbreiding van de nationale en mondiale waterstofinfrastructuur
Voor de periode tot 2030 wordt verwacht dat er een start wordt gemaakt met de uitbreiding van de waterstofinfrastructuur, zoals met waterstoftankstations in stedelijke knooppunten (zoals Amsterdam en Rotterdam), langs belangrijke transportcorridors en met (inter)nationale waterstofpijpleidingen voor efficiënt transport van waterstof, zoals de Delta Rhine Corridor (DRC). Een van de onderwerpen in die uitrol is de EU's Alternative Fuels Infrastructure Regulation (AFIR), die aanleg vereist van waterstoftankstations op elke 200 km langs Europese hoofdwegen²¹ tegen 2030 (Trans-European core network). Een andere ontwikkeling is de aanleg van een nationaal waterstofnetwerk, dat Gasunie momenteel ontwikkelt door bestaande aardgasleidingen om te bouwen. Het doel van dit netwerk is om alle grote industrieclusters via een ringnetwerk met elkaar te verbinden. Daarnaast is er de ontwikkeling van de European Hydrogen Backbone (EHB), een gezamenlijk initiatief van Europese gasinfrastructuurbedrijven. Het plan is om tegen 2040 een pan-Europees waterstofnetwerk van meer dan 40.000 km te realiseren, gebruikmakend van omgebouwde aardgasleidingen. Het eerste deel van het netwerk, met een lengte van 11.600 km, moet tegen 2030 klaar zijn en industriële clusters en havens met elkaar verbinden.
- 10.1.1.9 Ontwikkeling en opschaling van groene waterstofproductie
Tot slot en meer algemeen, komen in bepaalde regio's in de wereld grootschalige projecten tot ontwikkeling voor de productie van groene waterstof met zonne- en windenergie. Dit gebeurt met name daar waar ruimte is en hernieuwbare (duurzame) bronnen aanwezig zijn. In de industrie zal het gebruik van groene waterstof op gang komen, zoals voor de productie van staal en in chemische processen. Voor de opslag en transport worden nieuwe LOHC-technologieën toegepast voor veilige en efficiënte opslag en transport en zijn er nieuwe energie-efficiëntere

²¹ [Regulation - 2023/1804 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)

technologieën voor cryogene opslag van vloeibare waterstof. Een onzekerheid is of er waterstof getransporteerd gaat worden, of dat er eerst halffabricaten gemaakt worden in die regio's waar de waterstof goedkoop te produceren is, om deze vervolgens naar Nederland te transporteren.

Tegen 2050 zal de waterstofeconomie aanzienlijk verder zijn ontwikkeld, zoals een (inter)nationale geïntegreerde infrastructuur voor waterstofproductie, -opslag, en -transport. Waterstof zal een belangrijke energiedrager zijn voor diverse sectoren, in ieder geval voor de transportsector en de industrie. Het zal waarschijnlijk ook een rol spelen voor de productie van nul-emissie elektriciteit in regelbare centrales op momenten dat energie uit zon en wind niet in de marktvraag kunnen voorzien en deze vraag niet ver genoeg teruggeregeld kan worden. Om dat te bereiken, zal groene waterstof op grote schaal worden geproduceerd door hernieuwbare energiebronnen. Er worden dan waarschijnlijk ook nieuwe technieken en methoden toegepast, zoals vergassing van biomassa en waterstofproductie uit zeewater. Ook zullen mogelijk nieuwe materialen en technologieën voor opslag en transport van LOHC's en nieuwe cryogene technieken voor koude (vloeibare) opslag gebruikt worden. In de industrie zal toepassing van waterstof aanzienlijk zijn veranderd. Voor transport zal grootschalig gebruik gemaakt worden van waterstof of waterstofrijke energiedragers als brandstof voor zwaar transport, scheepvaart en luchtvaart, waardoor fossiele brandstoffen bijna volledig zullen zijn geëlimineerd.

10.1.2 Overzicht veiligheids- en gezondheidsrisico's

Onderstaand overzicht vat de gevaren voor (fysieke) veiligheid en gezondheid van verschillende waterstofdragers samen.

Waterstofdrager	Gevaar voor veiligheid en gezondheid			
	Toxisch	Brand	Explosie	Fysiek*
1. Gasvormig (gecomprimeerd) waterstof (CH ₂)		√	√	√****
2. Vloeibare waterstof (LH ₂)		√	√	√****
3. Ammoniak (NH ₃)	√	√		√
4. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)	√**	√		√
5. Methanol (CH ₃ OH)	√	√	√	√
6. Synthetisch methaan (LSM)		√		√
7. Natriumboorhydride				√

* Fysieke gevaren, zoals gevolg van hoge/lage temperatuur, hoge/lage druk, aanraking of (huid)contact, inademing, verstikking, fragmenten, stress corrosion cracking (SCC).

** Inclusief potentieel ZZS, zoals (componenten in) dibenzyltolueen (DBT), naftaleen (NAP) en decahydronaftaleen (DHN).

*** Waterstof kan in bepaalde stalen leidingen en procescondities leiden tot verbrossing. Momenteel vindt herziening van de review over verbrossing plaats bij NIPV o.b.v. onderzoeksresultaten in samenwerking met materiaaldeskundigen van de Gasunie

10.2 Veiligheidsrisico's van waterstof en waterstofdragers

De energietransitie zal een wisselende impact hebben op de veiligheidssituatie van onze installaties en infrastructuur. De gevolgen kunnen zowel positief als negatief zijn. Een positief gevolg is dat de veiligheidsrisico's van fossiele brandstoffen afnemen, bijvoorbeeld door de uitfasering van LNG. Negatieve gevolgen zijn de nieuwe risico's door de introductie van nieuwe technologieën en de grootte van de volumestromen van waterstof en ammoniak. Vooral bij de introductie van ammoniak om fossiele brandstoffen te vervangen, zal een verschuiving plaatsvinden van brand- en explosiescenario's naar toxische wolk-scenario's.

10.2.1 Brandgevaar

Diverse vormen van waterstof en waterstofdragers hebben stofeigenschappen die een brand- en explosiegevaar veroorzaken tijdens de toepassing (productie, transport, opslag). De ontvlambaarheid van een chemische vloeistof wordt bepaald door het vlampunt; de temperatuur waarbij een stof voldoende damp ontwikkelt om tot ontbranding te komen. Een gas kan bij voldoende concentratie en aanwezigheid van genoeg zuurstof en een ontstekingsbron ontbranden. Waterstof kan gemakkelijk ontbranden of exploderen bij hogere concentraties en heeft ook weinig ontstekingsenergie nodig om te ontbranden. Ammoniak en sommige LOHC's zijn ontvlambaar, maar hebben relatief veel energie nodig om te ontsteken en bereiken in weinig situaties een explosiegevaarlijke concentratie. Methanol is zeer brandbaar en de methanolvlammen zijn lichtblauw en daarmee (overdag) moeilijk zichtbaar. Omdat methanoldampen zwaarder zijn dan lucht, kunnen deze zich verspreiden en mogelijk ontsteken.

Waterstof heeft een groot ontvlambaarheidsbereik (qua concentratie in de lucht) en een lage ontstekingsenergie. Dit betekent dat een kleine vonk of een statische ontlading al voldoende is om waterstof te laten ontbranden. Bovendien heeft waterstof een hoge vlamtemperatuur en een hoge verbrandingssnelheid. Het is geurloos en brandt met een onzichtbare vlam. Hierdoor kan zich ongemerkt een gevaarlijke situatie voordoen. Een waterstofvlam kan dicht genaderd worden, omdat deze minder warmte uitstraalt dan vlammen van koolwaterstoffen. Waterstof is lichter dan lucht, waardoor het makkelijk opstijgt en zich verdunt. In een besloten omgeving kan zich een gevaarlijke situatie voordoen als waterstof zich ophoopt onder het plafond [2]. Dit alles kan leiden tot snelle en intense branden of explosies die veel schade kunnen aanrichten aan mensen, gebouwen en infrastructuur.

Kennisvragen over brandgedrag van waterstof en toxische bijproducten:

Gedrag van waterstofvlammen

Waterstofvlammen zijn bijna onzichtbaar en hebben een zeer hoge temperatuur. Ze zijn daarmee moeilijk te detecteren en het bestrijden van deze vlammen is risicovol. Ook de vlammen van methanolbrand zijn moeilijk zichtbaar in daglicht, wat detectie en brandbestrijding

bemoeilijkt. Hierover is met name in de olie en gasindustrie al kennis beschikbaar. Voor synthetisch methaan geldt dat alhoewel de verbrandingseigenschappen van methaan bekend zijn, mengsels met andere gassen en onzuiverheden variaties kunnen veroorzaken die niet volledig zijn onderzocht.

Toxische bijproducten bij verbranding van methanol en LSM

Een ander kennisvraag is of er bij de verbranding van methanol toxische bijproducten kunnen vrijkomen, zoals formaldehyde. Het volledige scala en de impact van deze bijproducten op de gezondheid is nog niet volledig bekend. Ook is een kennisvraag of er langetermijngezondheidseffecten van blootstelling aan lage concentraties verbrandingsproducten zijn. En wat de mogelijke impact kan zijn op mensen die in de nabijheid van opslagfaciliteiten of transportcorridors wonen of werken.

Aanpassing van bestaande infrastructuur

Ook is een vraag in hoeverre de bestaande (bedrijfs)brandweerinfrastructuur aangepast kan worden om verschillende waterstofdragers veilig en effectief te blussen. Dit gaat om zowel opslagfaciliteiten en transportmiddelen, als om brandblusinstallaties. Ook de compatibiliteit van materialen die in infrastructuur worden gebruikt met de specifieke chemische en fysische eigenschappen en procescondities van waterstofdragers kan nader worden onderzocht, vooral onder brandomstandigheden.

Lopende/geplande onderzoeken:

Er wordt verschillend onderzoek gedaan naar de veiligheids- en gezondheidsrisico's van waterstofdragers, maar er blijven belangrijke kennisvragen. Lopende en geplande onderzoeken richten zich op het gedrag van waterstofvlammen, de gezondheidsimpact van toxische bijproducten bij de verbranding van methanol en synthetisch methaan en de aanpassing van infrastructuur voor veilige operaties met waterstofdragers.

Gedrag van waterstofvlammen

- HyResponse-project: Dit door de Europese Commissie gefinancierde project richt zich op de responsverbetering van hulpdiensten bij waterstofincidenten. Onderdeel van het onderzoek is het gedrag van waterstofvlammen en de ontwikkeling van effectieve detectie- en bestrijdingsmethoden.
- Sandia National Laboratories: Sandia werkt aan experimenten en simulaties om de thermische en optische eigenschappen van waterstofvlammen beter te begrijpen. Dit omvat onderzoek naar de detectie van bijna onzichtbare vlammen.
- HSE Science and Research Centre: De Britse Health and Safety Executive voert onderzoek uit naar de detectie en bestrijding van waterstofbranden, inclusief het gebruik van infrarood- en UV-camera's.

Toxische bijproducten bij verbranding van methanol en synthetisch methaan

- Methanol Institute: Deze organisatie financiert onderzoek naar de gezondheids- en milieueffecten van methanolgebruik, inclusief de bijproducten van verbranding, zoals formaldehyde. Studies richten zich op de emissies en hun gezondheidseffecten bij verschillende gebruiksscenario's.
- European Research Council (ERC) -projecten: Verschillende ERC-gefinancierde projecten onderzoeken de emissies van synthetische brandstoffen, inclusief synthetisch methaan, en hun impact op de luchtkwaliteit en gezondheid.

Aanpassing van bestaande infrastructuur

- H2SAFE-project: Geleid door de Europese Commissie richt dit project zich op het ontwikkelen van richtlijnen en standaarden voor de veilige opslag en transport van waterstof. Een belangrijk onderdeel is het onderzoek naar materiaalcompatibiliteit en de aanpassing van bestaande infrastructuur.
- European FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking): Financiering van onderzoeksprojecten die zich richten op de aanpassing van opslag- en transportinfrastructuur voor waterstof, inclusief veiligheidsanalyses en ontwikkeling van nieuwe materialen en technologieën die bestand zijn tegen de specifieke chemische en fysische eigenschappen van waterstof en zijn dragers.

10.2.2 *Explosiegevaar*

Er zijn vier vormen van waterstof en waterstofdragers drie soorten explosie te onderscheiden: gaswolkexplosie, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) en Deflagratie-naar-Detonatie-Transitie' (DDT).

- Gaswolkexplosie (Vapour Cloud Explosion, VCE)
Een gaswolkexplosie (VCE) is een explosie die ontstaat wanneer een wolk van brandbaar gas of damp zich mengt met lucht en wordt ontstoken. Dit gebeurt meestal na een lekkage van een brandbare stof. Als de wolk groot genoeg is en zich tussen obstakels bevindt, kan de verbranding zeer snel verlopen en een krachtige drukgolf veroorzaken. De gevolgen zijn vaak zware schade aan installaties en gebouwen, secundaire branden en grote risico's voor mens en milieu.
- Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)
Een BLEVE is een explosie die optreedt wanneer een vat met een onder druk staande vloeistof scheurt. De vloeistof is verhit tot boven zijn kookpunt bij atmosferische druk. Wanneer het vat scheurt, daalt de druk plotseling, waardoor de vloeistof snel verdampt en een explosieve uitzetting veroorzaakt.
- Deflagratie-naar-Detonatie-Transitie (DDT)
Een ander punt van aandacht bij waterstof is het risico van de overgang naar detonatie, waarbij detonatievoortplantingssnelheden hoger zijn dan de geluidssnelheid. Dit kan onder bepaalde omstandigheden een aanzienlijke drukimpuls veroorzaken aan de mens en de omgeving. Een deflagratie van een waterstof-luchtmengsel (subsonische verbrandingssnelheden) ontwikkelt zich bij ongevallen waarschijnlijk tot detonatie, omdat waterstof een

kortere DDT heeft in vergelijking met andere brandstoffen. Dat betekent dat de deflagratie zich in geval van vertraagde ontsteking waarbij een betere menging wordt bereikt, of als de verbranding door externe obstakels wordt versterkt, tot detonatie kan ontwikkelen, met ernstige gevolgen.

Kennisvragen:

Explosie

Hoewel bekend is dat waterstof een zeer lage ontstekingsenergie heeft, kan nader onderzoek worden uitgevoerd naar de specifieke omstandigheden die leiden tot explosies bij verschillende druk- en temperatuurscenario's. Denk daarbij zowel aan het fenomeen DDT als aan het gedrag van en (al dan niet kunnen) ontstaan van een BLEVE van vloeibare waterstof.

Detectie

Een andere kennisvraag is hoe (kleine) lekkages zijn te detecteren die tot explosies kunnen leiden, vooral vanwege de kleurloze en geurloze eigenschappen van waterstof. Er is behoefte aan geavanceerde detectiesystemen die effectief zijn in diverse operationele omgevingen.

Scenario-analyse en risicomodellering

Het is nog niet volledig bekend hoe explosies ontstaan en wat de effecten precies zijn, zoals bij grootschalige opslag (volumes) van vloeibare waterstof bij bepaalde procescondities. Modellen die de verschillende kansen, effecten, procescondities en de rol van assetintegriteit (zoals verbrossing of materiaalmoetheid) modelleren, zijn nog in ontwikkeling.

Lopende/geplande onderzoeken:

Er zijn diverse lopende en geplande onderzoeken die gericht zijn op het verbeteren van ons begrip van de veiligheids- en gezondheidsrisico's van waterstofdragers. Deze onderzoeken richten zich op het gedrag van explosies onder verschillende omstandigheden, de detectie van waterstoflekkages en de ontwikkeling van geavanceerde risicomodellen.

Gedrag van explosies

- HyTunnel-CS-Project: Dit door de Europese Unie gefinancierde project onderzoekt de veiligheid van waterstoftransport in tunnels en ondergrondse ruimtes. Het project richt zich specifiek op het gedrag van waterstofexplosies onder verschillende omstandigheden, inclusief de overgang van deflagratie naar detonatie (DDT).
- HySEA (Hydrogen Safety for Energy Applications): Dit project onderzoekt het gedrag van waterstofexplosies in containers en kleine ruimtes. Het doel is om inzicht te krijgen in explosiedynamica, inclusief DDT.
- Sandia National Laboratories: Sandia voert onderzoek uit naar de explosiegedragingen van zowel gecompriëerde als vloeibare waterstof. Dit omvat experimenten en simulaties om te begrijpen hoe verschillende druk- en temperatuurscenario's explosies beïnvloeden.

Detectie

- HYDRAITE (Hydrogen Delivery Risk Assessment and Technology Improvement for Europe): Dit project richt zich op het verbeteren van de veiligheid van waterstof distributiesystemen, inclusief de ontwikkeling van geavanceerde detectiesystemen voor waterstoflekkages. Het doel is om effectieve detectiemethoden te ontwikkelen die de kleinste lekkages in diverse operationele omgevingen kunnen opsporen.
- PULSE (Photonic Upconversion Laser Sensor for Hydrogen Leak Detection): Een door de EU gefinancierd project dat werkt aan de ontwikkeling van geavanceerde lasersensoren, die in staat zijn om waterstoflekkages op te sporen door gebruik te maken van fotonische technologieën. Deze sensoren zijn bedoeld om in real-time te werken en uiterst kleine waterstofconcentraties te detecteren.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory): NREL onderzoekt verschillende detectietechnologieën voor waterstoflekkages, waaronder optische sensoren, elektrochemische sensoren en micro-elektromechanische systemen (MEMS). Het doel is om de gevoeligheid en betrouwbaarheid van detectiesystemen te verbeteren.

Scenario-analyse en risicomodellering

- SH2IFT (Safe Hydrogen Fuel Handling and Use for Efficient Implementation): Dit Noorse project richt zich op het ontwikkelen van risicomodellen voor de opslag en het gebruik van waterstof, met speciale aandacht voor de integriteit van opslagfaciliteiten en de gevolgen van materiaalvermoeidheid en -verbrossing.
- HyRAM+ (Hydrogen Risk Assessment Models Plus): Een softwaretool dat door Sandia National Laboratories is ontwikkeld in samenwerking met andere partners. HyRAM+ combineert risicobeoordeling, probabilistische analyse en scenariomodellering om de veiligheid van waterstofsysteem te evalueren. Het model is bedoeld om verschillende procescondities en de integriteit van assets te simuleren.
- SUSANA (Sustainable Hydrogen Acceptance): Dit door de EU gefinancierde project richt zich op de ontwikkeling van geïntegreerde modellen om de veiligheidsrisico's van grootschalige waterstofopslag en -transport te evalueren. Het project omvat het modelleren van explosiescenario's en het analyseren van de rol van asset integrity onder verschillende omstandigheden.

10.2.3*Cavernestabiliteit*

Ondergrondse opslag van waterstof biedt veel potentieel voor duurzame energieopslag, maar brengt ook specifieke gevaren met zich mee, zoals lekkage, explosie en bodemdaling. Deze risico's vereisen grondige evaluatie en beheer om de veiligheid en effectiviteit van opslag te waarborgen.

Kennisvragen over ondergrondse waterstofopslag:

Er zijn verschillende kennisvragen op het gebied van ondergrondse waterstofopslag. Dit omvat de interne structuur van zoutlichamen, de interactie tussen opslagcavernes en andere ondergrondse processen, en

de impact van drukcycli op de stabiliteit en integriteit van cavernevelden. Daarnaast zijn er kennisvragen over de effecten van instabiele cavernes op de stabiliteit van een caverneveld dat wordt gebruikt voor energieopslag.

Lopende/geplande onderzoeken:

KEM-28, uitgevoerd als onderdeel van het Kennisprogramma Effecten Mijnbouw in opdracht van het ministerie van Klimaat en Groene Groei, vormt een eerste diepgaand onderzoek naar de risico's van waterstofopslag in zoutcavernes in Nederland. Hoewel het onderzoek aantoont dat waterstofopslag technisch mogelijk lijkt, blijven er aanzienlijke onzekerheden. Met name rond het kruipgedrag van zout, zelfherstellend vermogen en de effecten op de porositeit van anhydriet. Deze aspecten zijn cruciaal voor de langetermijnintegriteit en stabiliteit van de cavernes. SodM benadrukt het belang van locatie-specifiek geologisch onderzoek om de veiligheid te waarborgen, zowel voorafgaand aan de aanleg als tijdens de exploitatie. Ook is er aandacht voor zorgvuldig ontwerp en monitoring, met speciale focus op onzuiverheden in het zout, en behoedzame drukcycli in de beginfase van opslag. Materialen en infrastructuur dienen aangepast te zijn aan de kenmerken van waterstof. Betrokkenheid van omwonenden, organisaties en overheden is onmisbaar gedurende elke ontwikkelingsfase. De lessen uit KEM-28 zijn vanwege de technische complexiteit en risico's dan ook leidend in toekomstige vergunningverlening en toekomstig toezicht.

Parallel aan dit onderzoek wordt bekeken of lege gasreservoirs op middellange termijn geschikt zijn voor waterstofopslag. Net als bij zoutcavernes, speelt daarbij de heterogeniteit van de ondergrond, de impact van drukwisselingen en de effecten op oppervlakte en infrastructuur — zoals bodemdaling — een belangrijke rol. In Zuidwending is in de MER-beoordeling van HyStock expliciet aandacht besteed aan de samenhang van zoutwinning en waterstofopslag, de rolverdeling tussen betrokken partijen en de onderbouwing van locatiekeuzes. SodM heeft de noodzaak geadviseerd voor expliciete beschrijving van samenwerking, verantwoordelijkheden en locatie-motivatie. De inzichten uit KEM-28 vormen samen met de adviezen voor opslag in gasreservoirs en Zuidwending de basis voor een robuust beleidskader. Dit kader richt zich op veilige, efficiënte en maatschappelijk verantwoorde ondergrondse waterstofopslag. Het dient als leidraad voor vergunningverlening, risicomanagement en toezicht. [Onderzoek naar opslag van waterstof in zoutcavernes | Staatstoezicht op de Mijnen](#).

10.3 Beleidsvragen, ingebracht door auteur hoofdstuk

10.3.1 Nationale en internationale ontwikkelingen

De OECD heeft op verzoek van de Nederlandse overheid, en gefinancierd door het DG voor Structurele Hervormingssteun (DG REFORM) van de Europese Commissie (EC), een rapport opgesteld, genaamd 'Risk-based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen' [3]. De bevindingen en aanbevelingen in het rapport zijn toegesneden op de Nederlandse context, maar kunnen ook relevant zijn voor andere landen, rekening houdend met specifieke contextuele kenmerken. Het doel is om de overgang naar een wijdverbreid gebruik van emissiearme

waterstof te ondersteunen door een reeks aanbevelingen te ontwikkelen voor de regulering en governance ervan. Daartoe analyseert het rapport zes verschillende scenario's, geselecteerd op verzoek van het Nederlandse ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK), over verschillende delen van de waterstoflevenscyclus van productie tot gebruik.

In de afgelopen periode zijn, vooruitlopend op en voor wetgeving, verschillende studies uitgevoerd naar de (omgevings)veiligheid van waterstofdragers. Denk dan onder andere de ontwikkeling van een richtlijn voor ammoniak (PGS12), en de studie 'Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers'[4]. Deze schets een visie op mogelijke volumes op korte termijn.

De ministeries van KGG en Infrastructuur en Waterstaat hebben inmiddels een kabinetsvisie op waterstofdragers opgesteld. Dat deden ze samen met een interdepartementale werkgroep en stuurgroep. Deze visie richt zich op welke dragers geschikt zijn, hoe ze veilig en duurzaam zijn te vervoeren en op te slaan, en onder welke voorwaarden fysieke stromen in Nederland mogelijk zijn. De onderbouwing bestaat uit een maatschappelijke kosten-batenverkenning en een multicriteria-analyse waarin ketens zijn beoordeeld op publieke waarden, zoals leveringszekerheid, betaalbaarheid, duurzaamheid en gezondheid. Geen enkele drager is dominant. De keuze hangt af van toepassing en locatie. Veiligheid en milieueffecten worden per drager afzonderlijk beoordeeld, waarbij ammoniak bijvoorbeeld extra aandacht krijgt. Het kabinet heeft aangekondigd de visie regelmatig te herijken en internationale samenwerking te intensiveren. [5,6] [Kamerbrief over kabinetsvisie waterstofdragers | Kamerstuk | Rijksoverheid.nl](#).

10.3.2 *Marktontwikkelingen*

Nederland is in hoge mate afhankelijk van de import van waterstofdragers. Tot nu toe zijn dit vooral fossiele dragers, zoals aardgas en aardolie, die als energiedrager of grondstof een centrale rol spelen in onze economie. In de energietransitie zal deze afhankelijkheid waarschijnlijk niet verdwijnen, maar verschuiven naar energie- en waterstofdragers op basis van hernieuwbare energiebronnen. Zoals geschetst in de marktverkenning, betekent dit dat niet alleen pure waterstof een rol zal spelen, maar juist ook verbindingen die waterstof als basis hebben en als afgeleide verbinding worden geïmporteerd en ingezet. Het gaat hierbij voor een belangrijk deel om stoffen die nu al bekend zijn en op grote schaal worden gebruikt, zoals methanol en ammoniak. Daarnaast kunnen ook hernieuwbare varianten van fossiele brandstoffen (e-fuels, zoals synthetische kerosine) en e-methaan (de synthetische tegenhanger van aardgas en LNG) een rol gaan spelen. Tegelijkertijd zullen sommige bestaande 'waterstofdragers' in de toekomst mogelijk juist verdwijnen, afhankelijk van technologische en marktontwikkelingen.

De ontwikkeling van risico's rondom waterstofdragers wordt in belangrijke mate bepaald door marktontwikkelingen. Naarmate de volumes van waterstofdragers in transport en opslag toenemen, groeit ook het risico op incidenten. Het is echter belangrijk te benadrukken dat het hierbij voor een groot deel gaat om risico's die al bekend zijn uit de

praktijk van transport en distributie van stoffen als ammoniak, methanol en LSM. Voor deze stoffen bestaan al decennialang logistieke ketens, regelgeving en handelingsperspectieven voor incidentbestrijding. De introductie van waterstofdragers betekent dus niet dat we plotseling met geheel nieuwe en onbekende risico's worden geconfronteerd. De echte vernieuwing zit vooral in de opkomst van enkele relatief nieuwe dragers, zoals vloeibare waterstof en natrium-/kaliumboorhydride. Voor deze stoffen zijn de technologie en logistiek nog in ontwikkeling en is er minder praktijkervaring met grootschalig transport en incidentbestrijding. Dit brengt additionele onzekerheden met zich mee, maar de volumes zijn voorlopig nog klein en de kans op incidenten blijft daardoor beperkt.

Naast de marktontwikkelingen speelt ook de technologische ontwikkeling van conversie, opslag en transport een cruciale rol in de risico-ontwikkeling. Veel van deze technologieën staan nog in de kinderschoenen, of zijn slechts kleinschalig toegepast. Hierdoor zijn de risico's nog niet volledig bekend. Dit vraagt om voortdurende monitoring en kennisontwikkeling, zodat tijdig op nieuwe risico's kan worden geanticipeerd. Ook de snelheid en richting van de marktontwikkeling zijn nog onzeker, waardoor het lastig is risico's goed in te schatten en tijdig te anticiperen. De keten van productie tot eindgebruik wordt langer en complexer, met meer schakels waar incidenten kunnen optreden. Dit vergroot de kans op incidenten en maakt de beheersing ervan uitdagender. Hoe deze risico's zich manifesteren, hangt sterk af van de gekozen route in de energietransitie. Er zijn energiescenario's die voortbouwen op bestaande infrastructuur en gematigde groei van waterstofdragers. Andere energie-scenario's zetten in op innovatie en snelle opschaling van nieuwe technologieën. In beide gevallen bepalen de snelheid van technologische ontwikkeling, de schaal van import en distributie, en de ketencomplexiteit het risicoprofiel voor de komende decennia. Meer informatie over waterstofveiligheid staat op de website van NLHydrogen [7].

10.4 Overige aandachtsgebieden

Ontwikkelingen op het gebied van waterstof en waterstofrijke energiedragers gaan razendsnel en in verschillende richtingen. Op dit moment lijken ontwikkelen een bepaalde kant op te gaan. Het is echter niet met zekerheid te zeggen wat de ontwikkelingen op de langere termijn zijn, bijvoorbeeld door de dynamiek in de markt of geopolitieke, technologische of sociale ontwikkelingen. Er zijn echter algemene punten die voor alle waterstofdragers gelden, zoals het omgaan met onzekerheden, ontwikkelen van standaarden en normen, en incidentmanagement. Deze punten zijn hieronder samengevat.

10.4.1 *Ontwikkelen van standaarden, normen en (reken)voorschriften*

Inmiddels verschijnen steeds meer standaarden en normen voor waterstof en waterstofrijke energiedragers en zaken die hiermee hebben te maken. Zo is er inmiddels voor bijvoorbeeld waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen een PGS-richtlijn beschikbaar [11]. Een ander voorbeeld is dat, in een consortium onder leiding van ISPT met HyCC, Ørsted, Shell, Yara, DNV, Royal HaskoningDHV en TNO, een richtlijn voor veiligheid bij grootschalige

elektrolyse is gepubliceerd [12]. ISPT is inmiddels gestart met een tweejarig vervolgproject voor veiligheidsnormering met hetzelfde consortium, OEM's (leveranciers) van elektrolyzers en het Nederlands Normalisatie Instituut (NEN). Dit nieuwe project bouwt voort op de resultaten van het eerste rapport [13]. Voor wat betreft rekenmodellen zijn in de afgelopen tijd vragen gerezen of de huidige (reken)voorschriften nog toepasbaar zijn voor de verschillende waterstofdragers. Met name vanwege de toegenomen schaalgrootte (hoeveelheid opgeslagen stof), nieuwe (gevaarlijke) stoffen en toepassing van nieuwe technologie voor bijvoorbeeld grootschalige opslag van (koude) waterstof en ammoniak, die wereldwijd nog niet bestaan.

10.4.2 *Incidentmanagement*

Incidentmanagement, en incidentbestrijding in het bijzonder, is een belangrijk aandachtspunt voor het beheersen van risico's bij import, opslag, bewerking en transport van waterstofrijke energiedragers. Door de complexiteit en de ernstige gevolgen van mogelijke incidenten, is het essentieel dat er robuuste en effectieve strategieën en handelingsperspectieven worden ontwikkeld. De combinatie van grotere hoeveelheden over langere afstand, toenemende complexiteit van infrastructuur (zoals combinatie van transport via buis – schip – spoor – weg) verhoogt doorgaans de kans op incidenten. Het vereist hooggekwalificeerd personeel en geavanceerde technologieën om de integriteit van opslagtanks, pijpleidingen en transportmiddelen te waarborgen. Vanwege de fysisch chemische eigenschappen, procescondities en concentratie van opslaglocaties kunnen incidenten ook escaleren door domino- en/of cascade effecten. Er zal een toenemende behoefte zijn aan training, voorbereiding en (speciale) middelen om ervoor te zorgen dat alle partijen, zowel aan de kant van preventie en preparatie als repressie en nazorg, in geval van incidenten goed kunnen blijven opereren.

10.4.3 *Safe-and-Sustainable-by-Design (SSbD)*

Een belangrijke maatschappelijke ontwikkeling is Safe-and-Sustainable-by-Design (SSbD). Waar de SSbD-filosofie toepasbaar is, is de energietransitie. Hierbij worden nieuwe technologieën ontwikkeld en geïmplementeerd en bestaande technologieën aangepast voor nieuwe toepassingen. Dit brengt nieuwe risico's met zich mee, maar biedt ook kansen om vanaf het begin veiligheid en gezondheid mee te nemen in het ontwerp. Het gaat daarbij om de risico's voor veiligheid en gezondheid over de gehele keten gedurende de levenscyclus van de energievoorziening, zoals bij de import, productie, verwerking, opslag, transport, overslag en gebruik in alle maatschappelijke sectoren. Zowel RIVM als TNO zijn actief betrokken bij de ontwikkeling en promotie van de SSbD-filosofie. Zij zijn kernpartners in diverse projecten en Europese projecten en (kennis)netwerken op dit gebied. Daarnaast hebben zij bijgedragen aan gidsen voor de industrie om het SSbD-innovatieproces te ontwikkelen en implementeren. Adviesbureau Antea heeft een overzicht geschetst met kansen voor toepassing van Safe-by-Design in de energietransitie, gebaseerd op opgedane ervaringen, literatuur en expertopinion [15]. Deze inzichten kunnen worden benut bij het realiseren van nieuw beleid en het verkrijgen van nieuwe inzichten voor de toepassing van SSbD in de energietransitie.

10.5 Mogelijke onderzoeksprojecten

10.5.1 *Een holistische, proactieve en integrale risicobenadering*

Een holistische, proactieve en integrale risicobenadering houdt rekening met verschillende veiligheidsrisico's en andere aspecten, zoals milieu, publieksperceptie en economie. Hierbij wordt geen enkele technologie als volledig risicovrij beschouwd. Proactief houdt in dat risico's zo vroeg mogelijk worden geïdentificeerd, zodat maatregelen kunnen worden genomen, voordat ze tot incidenten leiden. Hierbij wordt actief gezocht naar signalen van mogelijke risico's om die preventiemaatregelen te kunnen nemen. Het afwegen van veiligheidsmaatregelen tegen andere risico's in een integrale risicobenadering leidt tot een evenwicht tussen veiligheid, gezondheid en andere factoren. Daarnaast wordt aanbevolen om toekomstscenario's (op strategisch niveau) en maatgevende incidentscenario's (op tactisch niveau) te ontwikkelen. Het werken met scenario's vergroot de flexibiliteit en stelt organisaties in staat om tijdig te reageren op veranderende omstandigheden. Maatgevende incidentscenario's helpen bij het beheersen van veiligheids- en gezondheidsrisico's, zowel in de ruimtelijke inrichting als bij incidentmanagement. Mogelijke domino- en keteneffecten zijn ook in deze scenario's mee te nemen.

10.5.2 *Identificeren van waterstofinnovaties en regelgevingsbehoeften*

Om aan bovenstaande invulling te geven, is de identificatie van waterstofinnovaties en regelgevings-behoeften een mogelijke eerste stap. Waterstof als onderdeel van industriële processen is al lang een toepassing en wordt gereguleerd door bestaande veiligheids- en milieuwetgeving voor industriële risico's. De energietransitie vereist grootschalige invoering van een aantal waterstofinnovaties, waarvoor momenteel over het algemeen nog geen specifiek regelgevend kader is. Omdat diverse toepassingen nieuw zijn, zijn er vaak nog geen specifieke regels voor, of zijn deze nog niet opgenomen in omgevingsplannen. Het is essentieel dat nieuwe toepassingen van waterstof op de juiste manier worden gefaciliteerd en tegelijkertijd effectief worden gereguleerd. De overheid kan ervoor zorgen dat nieuwe waterstoftechnologieën en -toepassingen effectief mogelijk worden gemaakt met standaarden, normen en (reken)voorschriften. Leren van (huidige) knelpunten die innovatie belemmeren, kan een ander onderdeel zijn in de identificatie van waterstofinnovaties en regelgevingsbehoeften. Hierbij kan ook, mede op basis van de kabinetsvisie, een overzicht worden gemaakt van welke waterstofinnovaties prioriteit hebben om op te schalen en die problemen opleveren in de bestaande projecten, bestemmingsplannen en vergunningskaders. Vaak zijn er al plannen ontwikkeld voor het opschalen van waterstofproductie en/of -gebruik, maar is er niet noodzakelijk een overzicht gemaakt van mogelijke knelpunten op het gebied van regelgeving, veiligheid of gezondheid. Dit kan voor een groot worden gedaan via gesprekken met belanghebbenden, zoals projectorganisaties, vergunningverlenende instanties en industrie.

10.5.3 *Ontwikkelen van standaarden, normen en (reken)voorschriften*

Bij de energietransitie is de invulling van normen en voorschriften voor risico's en onzekerheden nog niet volledig in detail bepaald. Er wordt begonnen met een algemene risicobenadering, maar die moet nog nader worden uitgewerkt. Daarbij moet ook gedacht worden aan het

ontwikkelen van standaarden, normen en (reken)voorschriften die op wetenschap en praktijk gebaseerd zijn. Denk voor veiligheid en gezondheid bijvoorbeeld aan normen en/of standaarden voor veiligheidsafstanden, aandachtsgebieden, criteria voor het beoordelen van risico's en valide (reken)modellen.

10.5.4 *Ketenstudies voor veiligheid en gezondheid*

Het doel van ketenstudies voor de veiligheid en gezondheid van verschillende waterstofdragers is om een uitgebreid en geïntegreerd beeld te krijgen van de risico's en veiligheidsuitdagingen die optreden in elke fase van de waterstofwaardeketen. Dit omvat alles vanaf de lokale productie van waterstof, productie van waterstofdragers, (inter)nationaal transport, verlading, conversie, opslag (inclusief overslag in hubs en opslag van waterstof in cavernes), gebruik en verwerking tot en met de export en retourstromen van waterstofdragers. Denk hierbij ook aan het maken van 'safety-footprints' om mogelijke veiligheids- en gezondheidsrisico's in de keten als geheel inzichtelijk te maken. Omdat inmiddels vergunningen voor de eerste (grote) ammoniak-terminals (haven van Rotterdam) en vloeibare waterstof (haven van Amsterdam), lijkt het logisch om met een studie naar veiligheid en gezondheid in deze ketens te beginnen.

10.5.5 *Handelingsperspectief voor incidentbestrijding*

Medio 2025 zijn – onder andere door het ministerie van IenW en JenV - onderzoeken gestart naar de gevaren en de ontwikkeling van (nieuwe) risico's door de komst van waterstofdragers, inclusief (on)mogelijkheden en uitdagingen voor incidentbestrijding. Deze onderzoeken laten onder andere zien dat het gebruik van waterstofdragers de komende decennia sterk kan toenemen. Met name ammoniak en vloeibare waterstof, maar ook LOHC's, methanol, LSM en natriumboorhydride. De risico-ontwikkeling toont aan dat veel risico's uit de praktijk bekend zijn met stoffen als ammoniak, methanol en LSM (vergelijkbaar met LNG), maar dat nieuwe dragers en grotere volumes zorgen voor extra onzekerheden en complexiteit. Het toepassen van scenariodenken maakt duidelijk dat incidenten met grote impact, zoals toxische wolken of explosies in woongebieden, in de toekomst voorstelbaar zijn en dat de reguliere brandweer hierop nog onvoldoende is voorbereid. Uit de analyse blijkt dat veiligheidsregio's onder andere behoefte hebben aan meer diepgaande kennis over het gedrag van waterstofdragers, effectgebieden, emissiesnelheden en effectiviteit van maatregelen. Geavanceerde detectie- en meetapparatuur, snelle en betrouwbare informatievoorziening, en middelen voor bronbestrijding en effectbeperking zijn essentieel. Structurele training, duidelijke afspraken over rollen en verantwoordelijkheden, en samenwerking met externe partijen zijn noodzakelijk. Ook is er behoefte aan heldere en actuele regelgeving en richtlijnen, met nadruk op de voorbereidingsfase. Ook voor de acute bestrijding zijn specifieke middelen en snelle besluitvorming essentieel.

10.6 **Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies**

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren kwamen tijdens interviews en tijdens in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen

belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidsessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 10.1 Opgehaalde beleidsvragen over waterstof uit de interviews en beleidsessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Waterstof			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<p>Accepteren van risico's tegen welke baten: in hoeverre willen en kunnen wij aan de energievraag (ook van bijvoorbeeld Duitsland) voldoen? Welke risico's levert dit op voor delen van Nederland? Zouden er dan ergere major events kunnen zijn dan nu en zo ja, welke? En welke andere/huidige risico's vallen weg?</p> <p>Stel dat men de keuze maakt om waterstof niet ondergronds op te slaan/te vervoeren: hebben we dan voldoende de afweging op orde voor zowel de risico's/veiligheid als het ruimtebeslag?</p> <p>Hebben we de stapeling van risico's voldoende in beeld? Hoe vertaalt zich dat in de normen?</p> <p>Pilots met nieuwe technieken zijn essentieel om tijdig de nodige ervaring op te doen.</p>	<p>Toepassing van de visie op waterstofdragers, zoals voor grootschalige opslagen transporteren (import/export) van en naar Nederland per buisleiding, binnenvaart, over de weg of per spoor?</p> <p>Risk appetite en maatschappelijke acceptatie is lager voor nieuwe ontwikkelingen; hoe hiermee om te gaan, ook bij het creëren van ruimte (ook fysiek!) voor pilots?</p> <p>Industrie loopt voorop: hun ervaringskennis zou beleidsmakers kunnen helpen.</p>
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>		<p>Bevoegd gezag mag niet meewegen wat een bepaalde aanvraag voor een activiteit bij een Seveso-bedrijf bijvoorbeeld betekent voor transportbewegingen naar andere delen van het land. Hoe hiermee om te gaan?</p> <p>VR heeft vanuit crisisbeheersing behoefte aan een handreiking met basisscenario's, die vanwege</p>

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Waterstof			de waterstoftechnologie zouden kunnen optreden.
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en hand- having</i>	Wat zijn de mogelijke rampscenario's, zodat men de crisisbeheersing hierop kan inrichten. Bijvoorbeeld, welke specifieke eisen aan crisisbeheersing vloeien voort uit eventueel vervoer van ammoniak door Nederland?	Behoeftte aan gelijktrekken kennisniveau (bijvoorbeeld gemeenten, OD's) over aandachtsgebieden
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Behoeftte aan monitoring van de ondergrond en de integriteit van zoutkoepels. Behoeftte om ook te monitoren in hoeverre verschillende gevulde zoutcavernes elkaar wellicht beïnvloeden/ interferentie vertonen.	

* Algemeen: meer inzicht in de veiligheid van de verschillende opties binnen de energietransitie. Waar gaan we op vooruit en waar op achteruit? En: Risicoperceptie is belangrijk bij waterstof.

10.7 Referenties

1. RIVM-rapport 2023-0369. Liquid hydrogen carriers: an overview of technical aspects and SVHC properties
2. [NIPV Toolbox Waterstof](#)
3. [OECD-library](#)
4. [Berenschot. Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers](#)
5. [Rijksoverheid. Kamerbrief bij rapport studie MKBV Waterstofdragers](#)
6. https://www.oecd.org/en/publications/risk-based-regulatory-design-for-the-safe-use-of-hydrogen_46d2da5e-en.html
7. [NLHydrogen. Overzicht publicaties](#)
8. [Port of Rotterdam. Haven van de toekomst - waterstof](#)
9. [SmartPort. Handelingsperspectief voor schoner, stiller en veiliger Rotterdamse haven](#)
10. [TNO. 15 dingen die je moet weten over waterstof](#)
11. [PGS 35. Waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen](#)
12. [ISPT. Safety Aspects of green hydrogen production on industrial scale](#)
13. [ISPT. New report sheds light on industrial-scale green hydrogen safety](#)
14. AnteaGroup, Onderzoeksrapport Safe-by-design in relatie tot de energietransitie, 2022
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/01/28/onderzoeksrapport-safe-by-design-in-relatie-tot-de-energietransitie>
15. NIPV-scenariokaarten [Alle scenariokaarten - Scenarioboeken](#)

11 CO₂-afvang, -transport en -opslag – Mark Spruijt, RIVM

11.1 Inleiding - klimaatverandering en koolstofdioxide (CO₂)

De energietransitie is ingezet om de opwarming van de aarde af te remmen en in het beste geval een halt toe te roepen. Om hierin te kunnen slagen, moet wereldwijd afstand worden gedaan van het conventionele gebruik van fossiele brandstoffen, in ieder geval zodanig, dat de uitstoot van koolstofdioxide en andere broeikasgassen in de atmosfeer wordt teruggedrongen [1]. Het pad inslaan van fossiele naar duurzame energie biedt uitdagingen, aangezien de energiebehoefte overal ter wereld nog zal toenemen. Internationaal stuurt men op een klimaat-neutrale energievoorziening, anders dan 'fossiel', maar nieuwe technologieën zijn niet per direct beschikbaar. En een wijziging van de infrastructuur is vaak niet op korte termijn te realiseren. Ook in Nederland is het een meerjarig traject, waarbij marktpartijen de overheid tijd en (vergunning)ruimte vragen om technisch en rendabel in de transitie te kunnen voorzien. De broeikasgasuitstoot in Nederland daalt mogelijk met 44 tot 52 procent in 2030 [2], ten opzichte van 1990, mits alle vastgestelde en voorgenomen maatregelen tijdig worden uitgevoerd. De kans is echter klein dat hiermee het wettelijk klimaatdoel van 55 procent minder uitstoot in 2030 wordt gehaald. Wereldwijd daalt de uitstoot van broeikasgassen ook niet hard genoeg. Dit heeft ook gevolgen voor het klimaat in Nederland [3,4].

Om een eerste grotere emissiereductie op korte termijn en gaandeweg de energietransitie al te kunnen verwezenlijken, is er de optie van het grootschalig afvangen, transporteren en opslaan van CO₂. Zoals te lezen valt in een door EBN uitgebrachte 'white paper', is er inmiddels voldoende technologie aanwezig voor het grootschalig afvangen, transporteren en opslaan van CO₂ [5]. In plaats van het permanent ondergronds opslaan van CO₂ is hergebruik een tweede optie. De twee parallelle ketens van processen gaan respectievelijk door het leven als *Carbon Capture (Transport) and Storage*, CC(T)S en *Carbon Capture (Transport) Utilisation and Storage*, CC(T)US.

11.1.1 *Huidige status van CCU(S) – Carbon Capture, Utilisation and Storage*

Strikt genomen is de letter 'U' in CCU(S) te zien als een verzamelnaam voor alle technologieën die worden (her)ingezet voor het fossielvrije (her)gebruik van CO₂ tot bijvoorbeeld een (bio)brandstof. Ofwel, 'utilization' is waar geprobeerd wordt om – het liefst met behulp van groen opgewekte energie – CO₂ te (her)gebruiken voor het maken van (chemische) basisgrondstoffen, waarmee weer nieuwe producten zoals plastics zijn te fabriceren.

Enhanced Oil Recovery (EOR) neemt waar het CCUS aangaat een aparte plaats in. EOR is een methode die al in de Verenigde Staten, maar ook elders werd toegepast, voordat de verduurzaming van energievoorziening en CCU(S) op de voorgrond kwamen [6]. Kort aangestipt, betreft EOR het injecteren van onder andere CO₂ als 'drijfgas'. Zo realiseert men een ondergrondse drukverhoging in het reservoir voor het optimaliseren van de oliewinning. Dezelfde aanpak wordt ook al enige tijd toegepast bij aardgaswinning, zogenaamde 'CO₂ storage with enhanced gas recovery (CSEGR)' [7]. Het aan het

Nederlandse offshore veld K12B verrichte praktijkonderzoek mag genoemd worden als een goede nationale case-study voor CO₂-injectie, met monitoring van de integriteit van het veld en de putten [8,9]. EOR en GSEGR worden geschaard onder 'utilization', aangezien het feitelijk een productiegerichte CO₂-opslag betreft. De vraag blijft echter of het 'duurzame benutting' betreft, omdat alsnog de winning van fossiele brandstof wordt gefaciliteerd, en de hoeveelheid ondergronds permanent gestalde CO₂ vaak niet meer is dan de hoeveelheid CO₂ die door de gewonnen brandstof weer uitgestoten wordt. Wat netto nog steeds leidt tot meer CO₂ in de atmosfeer. In de genoemde Nederlandse casestudy bevat het aardgas van nature al tot 13 procent CO₂ en gaat het slechts om het niet direct uitstoten, maar terug injecteren van deze CO₂.

De CCU(S)-initiatieven zijn volop in ontwikkeling en resulteren in veelbelovende onderzoeksresultaten in de proceschemie. Voortschrijdend inzicht heeft echter inmiddels geleid tot een bijgestelde verwachting voor wat betreft het bereik van deze (kostbare) technologie. Ondanks alle diversiteit aan ideeën en toepassingen, is CCU(S) technologisch (nog) een onzekere investering en is het niet op te schalen tot de grote CO₂-reductieslag die nodig is. Uitgaande van het huidige gebruik van fossiele brandstof is de hoeveelheid CO₂ die ideaal gezien weggewerkt moet worden enorm groot. Dit hoofdstuk beperkt zich daarom tot CCTS, en richt zich voornamelijk op veiligheid – specifiek een veilig leidingtransport.

11.1.2 *Aanloop naar CCTS – Carbon Capture, Transport and Storage – in Nederland*

CCTS is een meer 'volwassen' techniek, en wordt beschouwd als een noodzakelijk geachte (tussen)oplossing, waarmee gedurende de energietransitie tijdelijk winst is te boeken. De beperkte beschikbare opslagcapaciteit in geologische formaties is hierbij echter een punt van aandacht. Deze 'sinks' zijn bij voorkeur lege (hervulbare) gasvelden, waarnaast ook permanente opslag onder waterdragende lagen ('aquifers'). Gecreëerde (uitgeleegde) zoutcavernes als definitieve of tijdelijke CO₂-opslag zijn voorgesteld, maar in Nederland reserveert men deze beperkte (en kostbare) ruimte als buffer voor aardgas of waterstof.

Het zo kort mogelijk houden van de transportafstand scheelt in de kosten. Maar juist het eerste projectvoorstel, waarbij de ondergrondse CO₂-opslag niet ver van de industriële bron was, stuitte in Nederland op grote maatschappelijke weerstand. De zorgen over de veiligheid van een destijds nog experimentele onderneming en het wantrouwen dat bij het publiek werd gewekt, waren redenen waarom opslag onder een woonwijk in Barendrecht in 2010 strandde [10,11]. 'Not under my backyard' was de publieke tendens. Hierna zette de politiek in Nederland een streep door onshore plannen, en werd de CO₂-opslag van land naar zee verbannen ('near-shore' en 'offshore' gasvelden). Ook dan speelt nog de kwestie van de maatschappelijke kosten en baten [12,13].

In de periode die na Barendrecht volgde, bleek het voor marktpartijen te lastig om tot een goede business case te komen, met het 'ROAD' (near shore) als slepend voorbeeld [14], een projectplan dat uiteindelijk een stille dood stierf. De handel in 'afvalstof CO₂', in essentie de prijs per

ton, maakte initiatieven niet financieel rendabel. Inmiddels is CCTS echter ook opgenomen in de nationale subsidierondes voor duurzame energie (SDE++), waardoor er momenteel meerdere initiatieven gaande zijn.

Dit hoofdstuk gaat in op de infrastructuur die CCTS met zich meebrengt, inclusief de risico's (veiligheid en gezondheid) die mogelijk daaraan verbonden zijn. Er kan hiervoor geput worden uit een groot aantal onderzoeksprojecten dat de afgelopen twee decennia is uitgevoerd. De kennis die destijds is opgedaan, in onder andere het Nederlandse onderzoeksprogramma CATO2 [15], wordt nu omgezet naar de praktijk. Tal van peer-reviewed artikelen in wetenschappelijke tijdschriften zijn nu beschikbaar. De IEAGHG-website (een programma van het internationaal energieagentschap) biedt links naar informatieve rapportages [16]. Ook er zijn bijvoorbeeld inzichten uit industrieprojecten te zien op (commerciële) websites, zoals die van DNV [17]. Websites van TNO en diens Noorse evenknie SINTEF bieden eveneens een aanbevelenswaardig overzicht van de 'state-of-art' en de lopende onderzoeken.

11.1.3 *Huidige en toekomstige CCTS-projecten in Nederland*

In Europa, met als voorloper het olie- en gasproducerende land Noorwegen [18], maar ook daarbuiten [19], vinden tal van (semi) commerciële projecten plaats met ondergrondse injectie van CO₂. Nederland loopt met projecten 'Porthos', 'Aramis' en 'CO₂next' ook in de voorhoede mee. Al doende dienen zich nog steeds aanvullende toepassingsgerichte, praktische (kennis)vragen aan, in zowel design, engineering en uitvoering. Daarnaast zijn er ook vragen waaronder die op het gebied van veiligheid, gezondheid en milieu.

Als eerste ging de realisatie van 'Porthos' van start. Volgens plan wordt CO₂ van de industrie in het Rotterdamse havengebied afgevangen, getransporteerd en opgeslagen in lege gasvelden onder de Noordzee. Onder land gaat momenteel zo'n 30 kilometer aan transportleiding de grond in. Dat wordt aangesloten op een ander leidingdeel, strekkend tot 20 kilometer in de Noordzee. Naar verwachting zal 'Porthos' in 2026 operationeel zijn.

Een consortium van enkele marktpartijen financiert momenteel de projectorganisatie CO₂next, en zal zeer wel mogelijk zijn plannen verwezenlijken voor de bouw van een vloeibare CO₂-terminal op de Maasvlakte. Wellicht kunnen in de nabije toekomst (zee)schepen daar ook vloeibare CO₂ van verre aanleveren. Net als de energiemarkt is die van de CO₂-handel er één van wereldwijde vraag en aanbod. Met deze voorziene op- en overslag ('CO₂ Hub') faciliteert CO₂next in de beoogde CO₂-transport- en opslagketen, met als doel deze uit te baten. De definitieve investeringsbeslissing is echter nog niet gemaakt, en zal binnenkort vallen.

Aramis is een publiek-private samenwerking, die van plan is om een netwerk van pijpleidingen aan te leggen naar lege gasvelden in de Noordzee. CO₂next heeft aangegeven diens terminal hierop te willen aansluiten. Op de tekentafel heeft de terminal een opstartcapaciteit van ongeveer 5,4 Mtpa (miljoen ton per jaar) en een potentieel om de

capaciteit te laten groeien tot ongeveer 15 Mtpa. Men richt zich voornamelijk op een inbedrijfstelling in 2028. Net als bij CO₂next is het Aramis-project nog geen zekere zaak. Recent hebben enkele marktpartijen zich teruggetrokken uit de financiering van de aanleg van de leidingen, omdat men het een riskante investering acht. Daarmee is het project teruggeworpen naar (meer) overheidssteun [20].

Niettegenstaande de projecthobbels, kreeg de realisatie van een infrastructuur van enkele CO₂-hoofdtransportleidingen formeel doorgang. Via de aan te leggen Delta-Rhine Corridor en Delta-Schelde CO₂connection gaat de aanvoer over land via Moerdijk naar Rotterdam plaatsvinden, vanuit de industriegebieden in Limburg (Sittard-Geleen), het Duitse Ruhrgebied, de Zeeuwse en Antwerpse haven- en industriegebieden. Zeer wel mogelijk worden daarna meerdere aantakkingen vanuit Duitsland en België gerealiseerd. Voor meer gedetailleerde informatie over de genoemde projecten verwijzen we naar de betreffende websites [21, 22, 23, 24].

Voor wat betreft de recente beleidsvisie op koolstofverwijdering zijn het rapport van de Stichting Natuur en Milieu (oktober 2024) en het rapport en advies van de Wetenschappelijke Klimaatraad (juli 2024) lezenswaardig [25, 26]. Het ministerie van KGG bracht vervolgens in maart 2025 een Kamerbrief Routekaart Koolstofverwijdering uit [27].

11.2 Gezondheidsrisico's van CO₂

Hoewel CO₂ niet als gevaarlijk bekend staat, zijn er toch risico's voor de mens aan CCS. De lucht die we inademen bestaat voor circa 21 procent uit zuurstof (O₂) en ongeveer 78 procent uit stikstof (N₂). De rest bestaat uit een aantal andere gassen, zoals argon, waterdamp en koolstofdioxide. De concentratie CO₂ in de buitenlucht ligt rond 400 parts per million (ppm). In stedelijk gebied is de concentratie iets hoger dan in landelijk gebied. De 400 ppm CO₂ komt overeen met ongeveer 0,04 volume procent. Kortom, CO₂ is beperkt, maar alom aanwezig. De volgende paragrafen gaan in op de gezondheidsrisico's van CO₂.

11.2.1 *Effecten op de mens bij een buisleidingbreuk*

Hoewel CO₂ in lage concentraties niet als toxische stof is gecategoriseerd, reageert het menselijk lichaam (ademcentrum) wel degelijk op sterke verhoging van de CO₂-concentratie. En treden bij een te lange blootstelling aan zeer hoge concentraties van deze stof toxiciteit en irreversibele effecten op [28,29,30,31]. In een besloten ruimte is het ongemerkt vrijkomen van CO₂ voor de mens potentieel zeer gevaarlijk, aangezien de stof in overmaat de omgevingslucht verdringt. Zo creëert het een zuurstofarme omgeving, waarbij concentratieverlies en verwardheid optreedt. In de overtreffende trap leidt een overmaat aan CO₂ tot het bewusteloos raken, met uiteindelijk risico op verstikking.

Andere gevaren dan verstikking ontstaan wanneer CO₂ onder een hoge druk in de buitenlucht vrijkomt. Juist als het gas zich actief (turbulent) vermengt met de omringende lucht, is de zuurstofverdringing beperkt. Een calamiteit waarbij CO₂ (of een ander gas) onder hoge druk vrijkomt, zoals uit een industriële installatie of uit een transportleiding, manifesteert zich overduidelijk. Bij de bron zal het uitstromen gepaard

gaan met zeer veel lawaai, mogelijk zo oorverdovend dat het bij de mens gehoorschade teweegbrengt.

Breuk van een hogedrukleiding met een grote diameter kan gepaard gaan met een (initiële) drukgolf en een kratervorming. Afhankelijk van de uitstroomcondities kan het gas door sterke afkoeling van omringende vochtige lucht (de condensatie van water) zichtbaar zijn. Door een mogelijke vorming van 'koolzuursneeuw' (faseovergang van gasvormig naar vast CO₂) kan blootstelling aan de koude leiden tot bevroeringsverschijnselen. Denk hierbij aan het effect van een brandblusser van mega-formaat. In de krater kan de koolzuursneeuw blijven hangen en weer gasvormig worden, waarbij tijdelijk een lokaal mogelijk verstikkende CO₂-concentratie kan ontstaan.

11.2.2 *Voorbeelden van incidenten met CO₂*

Enkele incidenten zijn illustratief. Het bedrijf OCAP [32], opgericht voordat de energietransitie en CCU(S) op de voorgrond kwamen, verzorgt in Zuidwest Nederland commercieel de distributie van CO₂ via een lokaal leidingnetwerk. Vanuit een raffinaderij en een bio-ethanolfabriek voorziet OCAP aangesloten glastuinbouwers van CO₂, waarmee zij de atmosfeer in hun kassen verrijken, aangezien de stof groeibevorderend is voor planten. OCAP kwam in opspraak na een (vermeende) kleine lekkage van de leiding bij een sloot in Zoetermeer, en werd in verband gebracht met de vondst van dode eenden. De onrust bij burgers was gewekt, aangezien de leiding in de nabijheid van een woonwijk loopt. Daarnaast was er in 2008 in Honselersdijk sprake van een groot en luid incident met een leiding van OCAP, maar zonder (dierlijke) slachtoffers. Door graafwerkzaamheden aan het warmtenet ontstond er een groot lek, waarbij het CO₂ zich ophoopte in parkeergarages.

Er zijn echter ook andere gevallen bekend waarbij een gestaag lekkende CO₂-leiding onopgemerkt bleef. Het betreft voor het merendeel industriële incidenten waar CO₂ zich in een besloten omgeving kon verspreiden, de ruimte van onderaf kon vullen, en zich in lagere delen als een onzichtbare deken ('silent killer') kon verzamelen. Zo konden omstandigheden ontstaan, die voor een argeloos blootgestelde werknemer bedwelmend of verstikkend waren.

Een ander industrieel incident vond in 2008 plaats in Mönchengladbach. Als gevolg van brand in een fabriekspand kwam, zoals bedoeld, een grote hoeveelheid CO₂ uit een gasblusinstallatie vrij. Nadat de brand was gedoofd doordat de zuurstof was verdreven, werden ter ventilatie deuren opengezet, en bleef het CO₂ buiten rondom het gebouw hangen. Uiteindelijk zijn de hulpdiensten op het terrein overgegaan tot het inzetten van een helikopter. Met de veroorzaakte turbulentie wist men de opgehoopte CO₂ versneld met de omringende lucht te mengen [33].

Lopend onderzoek:

Aangezien CO₂ zwaarder is dan lucht, kan ongewenst vrijgekomen CO₂ leiden tot ophopingen met hoge concentraties die gevaarlijk zijn voor de gezondheid. Dit is een belangrijk aspect om mee te nemen in omgevingsveiligheidsbeleid, zeker met de ontwikkeling van de geplande CO₂-buisleidingen voor CCTS in het achterhoofd. Dergelijke analyses zijn

ook nodig met een toespitsing op de Nederlandse context. Het RIVM werkt actief hieraan. Daarnaast worden de genoemde gezondheidseffecten ook meegenomen in een groot holistisch project dat veel van de in de komende paragraaf genoemde kennis tot één geheel wil brengen, **SKYLARK (VK)**.

11.3 Veiligheid CO₂-capture, -transport en -opslag in de industriële en in bebouwde omgeving

11.3.1 CO₂ door de transportleiding

Bij het transporteren van gevaarlijke stoffen, welke dan ook, via buisleidingen in de bebouwde omgeving is en blijft omgevingsveiligheid een punt van aandacht, en dus is alertheid van kracht voor een eventueel grootschalig buisleidingstelsel voor CO₂. Vanaf de eerste CCTS-plannen is het veiligheidsaspect van de gehele transportketen onderkend [34,35,36,37,38]. Omdat het OCAP-leidingnetwerk in zijn soort de eerste in Nederland was, leverde het de eerste casus kwantitatieve risicoanalyse CO₂-leidingtransport op. Analyses zijn destijds door RIVM, TNO [39], en ingenieursbureaus opgesteld en meermalen bediscussieerd.

Net als voor een CO₂-afvanginstallatie (de extractie uit rookgassen, de zogenaamde carbon capture plant), en een bovengrondse CO₂-opslag, is ook een CO₂-leiding een industriële (transport)activiteit. Hierdoor geldt de wettelijke verplichting om de daaraan verbonden risico's kwantitatief te beschouwen. In vaktermen moet een Quantitative Risk Assessment (QRA) worden uitgevoerd. De uitkomsten daarvan worden getoetst aan de gestelde norm. Het RIVM heeft de voorgeschreven QRA-rekenmethodiek in het begin van 2025 herzien, maar CO₂ was niet de aanleiding voor deze actualisatie. Naast algemene wijzigingen is methodiek verbijzonderd voor wat betreft het rekenen aan CO₂-buisleidingen [40]. Daar waar de algemene rekenmethodiek alsnog niet zomaar toepasbaar blijkt, kan naar een zogeheten 'maatwerkpaak' worden uitgeweken. Dit kan het geval zijn als er bij de vergunningaanvraag en door de initiatiefnemer aanvullende risicoreducerende (als in: design and operations) maatregelen aan het bevoegd gezag worden voorgesteld. Concreet betreft het de numerieke verwerking van dergelijke argumenten in de QRA, waarmee de verlaging van de (standaard) faalfrequentie of de inperking van het effectgebied onderbouwd kunnen worden.

Een significant verschil tussen de eerste CO₂-gasleiding in Nederland, OCAP en een aankomend buisleiding(netwerk) is de voorziene schaalgrootte. Om op de voorziene schaal CO₂ te kunnen vervoeren, wordt de diameter veel groter, en wordt het gas onder hoge druk geplaatst en verdicht tot een dichte of superkritische vloeistof. Dit betekent dat er ontwerpmaatregelen getroffen moeten worden tegen mogelijke scheurvorming of corrosie (onder andere zuiverheid, wanddikte, materiaalkeuze, crack arrestors, inwendige coating, het aantal afsluiters per strekkende meter).

Als we die vergelijken met de olie- en aardgasleidingen waarmee langjarige ervaring is opgedaan, kan slechts beperkt worden teruggevallen op feitelijke faalcijfers voor CO₂-transport in (hoge druk)

buisleidingen [41, 42, 43]. Dit maakt het vaststellen van een faalfrequentie lastig. Zeker wanneer men afwijkt van de standaard aanpak. Hiermee samenhangend is de relatie tussen de fractie aan onzuiverheden in een CO₂-transportstroom en het optreden van corrosie in de leiding. Degradatie van de transportleiding onder invloed van een (on)zuivere CO₂-stroom wordt al meerdere decennia grondig onderzocht en is een terugkerend punt van discussie. De integriteit van de transportleiding en het leidingnetwerk als geheel bepalen immers de veiligheid [44, 45]. Theoretische modelontwikkeling, al dan niet ondersteund door experimenteel onderzoek [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52], leverde een verbeterd inzicht het uitstroombegedrag van de stof bij incidenten. Het onderzoek resulteerde in gevalideerde (wetenschappelijke getoetste) modellen. Deze zijn deels opgenomen in de commercieel verkrijgbare rekenpakketten, die gebruikt worden om tot een simulering van CO₂-uitstroom te komen. Verspreiding zoals deze is bij een incident te verwachten [53, 54].

11.3.2 *Overzicht van onderzoeksprojecten naar de veiligheid CO₂-transportleidingen*

Vanaf 2004 is in Nederland en op Europees niveau (EU Research) serieus ingezet op een verscheidenheid aan onderzoek naar alle schakels in de Carbon Capture Transport and Storage keten, waaronder projecten waarbij de aspecten veiligheid en gezondheid ook aan bod kwamen. Destijds heeft Nederland zelf met de projecten CATO-1 en CATO-2 [15] toonaangevend onderzoek neergezet en in de opbouw van kennis geïnvesteerd.

In een review-artikel van Vitali et al. [55] staat een helder overzicht van de 'state-of-art' van alle in veiligheidgerelateerde onderzoeksprojecten opgedane kennis en de deels openbaar beschikbaar gestelde informatie uit Joint Industry Projects (JIPs). Het artikel beschouwt de risico's van CO₂-transportleidingen. Ook geeft het een overzicht van risicoanalyse- en modelleringsbenaderingen voor de denkbare scenario's – gegeven het type falen van een CO₂-leiding, en het fysische gedrag van bij het incidenteel vrijkomen van de stof. Daarbij geeft het een goede kijk naar de modelontwikkeling en de validatie daarvan met behulp van experimentele data.

Het merendeel van de genoemde (EU-gesubsidieerde) projecten kent – ook na de sluitingsdatum – openbare websites. Veel wetenschappelijke (peer-reviewed) publicaties die uit al dit onderzoek voortkomen, zijn eveneens openbaar en online toegankelijk. Onderstaande Tabel geeft een overzicht van de meest toonaangevende veiligheidgerelateerde onderzoeksprojecten [55].

Tabel 11.1 Overzicht van de meest toonaangevende EU-gesubsidieerde projecten die betrekking hadden en hebben op de veiligheid van hoge druk CO₂-pijpleidingen. De projectduur, de schaal en de doelstellingen worden uiteengezet [55].

JIP/RP Name	Years/Period	Scale	Objectives and Scope
CO2SAFEARREST	2016–2019	Full-scale	Burst tests research program. Two full-scale tests with buried pipeline (CO ₂ -N ₂ mixture), 24 inches.
COSHER	2011–2015	Large-Scale	Obtain data to support the development of models to determine safety zones/consequence distances.
CO2PIPETRANS	2009–2015	Medium-Scale Large-Scale	Fill the knowledge gap identified in the DNV-RP-J202. Results of the project were included in DNVGL-RP-F104 (2017).
COOLTRANS	2011–2015	Large-Scale	Identify and propose solutions to key issues relating to the safe routing, design, construction and operation of onshore CO ₂ pipelines in the UK.
CO2PIPEHAZ	2009–2013	Small Scale Large-Scale	Improve the understanding of the hazards represented by CO ₂ releases.
CO2QUEST	2013–2016	Small Scale Medium-Scale	Study the impact of the quality of CO ₂ on storage and transport.
CATO	2004–2008 2010–2014 2015-ongoing	N/A	A national program, which includes complete studies in all aspects of CCS.
CO2EUROPIPE	2009–2011	N/A	Outline guidance to elements of the European plan to develop large-scale EU CO ₂ infrastructure.
CO2RISKMAN	2010–2013	N/A	Development of industry guideline to assist the designer and projects on the emerging CCS industry. Potential hazards associated with handling CCS CO ₂ streams are discussed.

Aan deze lijst kunnen nog de EU-Research-projecten **CO2IMPACTS** en **COCATE** worden toegevoegd.

Het project 'The impacts of the quality of CO₂ on transport and storage behavior', (**CO2 IMPACTS**, 2013-2016, EU Research FP7-programma – onder leiding van SINTEF, Noorwegen) richtte zich op de impact van onzuiverheden in afgevangen CO₂ uit elektriciteitscentrales en andere CO₂-intensieve industrieën, de consequenties bij CO₂-transport en -opslag. Dit omvatte vloeistofeigenschappen van CO₂, het fasegedrag van de stof onder invloed van onzuiverheden, en de ongewenste chemische reacties die in de industriële infrastructuur en op de opslaglocaties mogelijk optreden.

In het project **COCATE**, 'Large-scale CCS-transportation infrastructure in Europe', (2010-2013, EU-Research FP7, onder leiding van Franse IFP), is een netwerk van verschillende kleinere bronnen bestudeerd. Het doel was om de complexiteit van voorgestelde praktijkcases boven tafel te krijgen. Hiermee ging men verder dan eerdere ketenstudies, waarbij werd uitgegaan van een 'rechttoe-, rechtaan'-aanpak: één grootschalige bron (één elektriciteitscentrale, draaiend op kolen of gas), één afvanginstallatie, één tijdelijke opslag of CO₂-Hub, één transportmodus en uiteindelijk één ondergrondse opslag. Een van de doelstellingen van het COCATE-project was het bestuderen van de haalbaarheid van een (inter)nationale transportinfrastructuur, die in staat is om meerdere geologische opslaglocaties te verbinden met een cluster van verschillende industriële faciliteiten. Een economisch model werd ontwikkeld, een analyse gedaan aan de hand van een theoretisch gedefinieerd (grensoverschrijdend) transportnetwerk (per boot of via buisleiding), met als doel de totale kosten van CO₂-transport te minimaliseren. Inmiddels gedateerd werden in COCATE vijf casestudy's

ontwikkeld. Deze leidden tot het vinden van een kosten-optimaal netwerk tussen drie bronnen met verschillende emissieprofielen, twee reservoirs met verschillende geologische karakteristieken en capaciteiten, onshore en offshore pijpleidingen en twee gedefinieerde havens (export Le Havre, import Rotterdam).

Met het oog op een veilig transport voerde men tijdens het COCATE-project ook een theoretische analyse uit van de risico's die verbonden zijn aan het laten samenkomen van de emissiestromen van verschillende broninstallaties om dit op één locatie af te vangen (pooling and capture). Hierbij komen aanvullende eisen aan de leidinginfrastructuur en de transportcondities (stromingsgedrag) kijken. De integriteit van 'standaard' leidingmateriaal werd in de praktijk beproefd met belastingtesten (corrosie), waarbij de effectiviteit van een beschermende coating (inline) is beschouwd. Voor wat betreft de ruimtelijke inpassing en de omgevingsveiligheid, werd het raamwerk van QRA's specifiek bezien voor een buisleiding vanuit de stoffeigenschappen voor CO₂. Dit resulteerde onder andere in een zwaar gas verspreidingsmodel, specifiek voor CO₂.

CO2SAFEARREST was een grootschalig testprogramma, waarbij geforceerd het breuk- en barstgedrag van koolstofdioxide pijpleidingen onder belasting (druk) is onderzocht.

Het **COSHER**-Joint Industry-project (JIP) omvatte grootschalige release-experimenten (UK). Het doel was het fysisch gedrag bij het vrijkomen en verspreiden van CO₂ onder hoge druk te bestuderen, uitgaande van een volledige leidingbreuk en een representatieve, forse leidingdiameter. Het hoofddoel van het project was het verkrijgen van gegevens ter ondersteuning van de ontwikkeling van modellen voor het bepalen van veiligheidszones en effectafstanden.

Het project **CO2PIPETRANS** was verdeeld in twee fasen. Een aantal belangrijke kennisvragen (onzekerheden in modellen, uitstromings-verspreidingsgedrag CO₂ tijdens een leidingbreuk) werd in fase 1 geïdentificeerd, wat ten eerste resulteerde in de publicatie van DNVGL-RP-J202. Met nader experimenteel onderzoek (in fase 2) zijn kennisvragen (uit fase 1) opgepakt. De resultaten daarvan zijn opgenomen in de publicatie DNV-RP-F104 'Design and operation of carbon dioxide pipelines, recommended practice'.

Het **COOLTRANS**-onderzoeksprogramma was een driejarig onderzoeks- en ontwikkelingsproject (2011-2014) om belangrijke problemen wat betreft de veilige route, het ontwerp, de bouw en de exploitatie van onshore pijpleidingen voor het transport van koolstofdioxide in verdichte fase te identificeren, aan te pakken en op te lossen. National Grid Carbon (VK) heeft het project opgezet en geleid. De studie werd uitgevoerd aan de hand van een praktijkcase in het Verenigd Koninkrijk. Onder de vlag van dit onderzoeksprogramma is een reeks aan grootschalige CO₂-release-experimenten uitgevoerd, waarvan de resultaten in modelvalidatie zijn opgenomen.

CO2PIPEHAZ was een EU-onderzoeksprogramma waarbij deskundigen uit het Verenigd Koninkrijk, andere Europese landen en China betrokken waren. Tijdens het project zijn theoretisch fysische modellen ontwikkeld. Er werden kleinschalige en grootschalige experimenten uitgevoerd om deze modellen te valideren, en om het inzicht in de gevaren die gepaard gaan met de uitstoot van een falende CO₂-leiding te verbeteren. De experimentele tests werden uitgevoerd door INERIS (FR) en University College London (VK) en Dalian University of Technology (China).

Het **CO2QUEST**-project, in feite een opvolging van **CO2PIPEHAZ**, werd eveneens gecoördineerd door University College London. Daarbij sloten academische partners in Europa, de HSE in het VK en de Canadese overheid zich aan. Daarnaast is met de Dalian University of Technology (China) samengewerkt. Het voornaamste doel was om te onderzoeken in hoeverre concessies in de kwaliteit (zuiverheid) van CO₂ zowel bij opslag als bij transport kritiek kunnen zijn. Het project richtte zich op de ontwikkeling van geavanceerde fysische (uit)stromingsmodellen. Experimenten op kleine en middelgrote schaal vanuit hogedrukpijpleidingen zijn uitgevoerd met een reeks onzuiverheden door INERIS (FR), ter validatie van hypothesen en modellen. Ook werd falen van pijpleiding(materiaal) bestudeerd.

Het **CATO-programma** is een Nederlands onderzoeksprogramma dat de gehele CCTS-keten omvatte. Het acroniem CATO staat voor CO₂-afvang, transport en opslag in het Nederlands. De oorsprong van het CATO-project, en een goede samenvatting van de doelstellingen en projectresultaten zijn te lezen in 'Linking the Chain' [15] dat ter afsluiting van fase 1 en 2 is uitgebracht. Onder **CATO2** is eveneens experimenteel werk uitgevoerd. De derde fase van CATO begon eind 2014. De publicaties, opgedane kennis en ervaring wordt opgenomen in een aantal geplande CCTS-projecten in Nederland.

Het project **CO2EUROPIPE** was een Europees project met als doel aanbevelingen voor een toekomstige grootschalige Europese CO₂-infrastructuur te ontwikkelen. Hierbij lag de nadruk op de beschrijving van de infrastructuur die nodig is voor grootschalig transport van CO₂, inclusief injectiefaciliteiten en de mogelijkheid tot hergebruik van de beschikbare infrastructuur voor het transport van aardgas.

Tenslotte noemen we het **CO2RISKMAN**-project, geïnitieerd en geleid door DNV. Hierin stelde men zich tot doel om brancherichtlijnen te ontwikkelen, met de ambitie om daarmee te voorzien in nuttige referenties voor de CCUS-industrie. Hierin was het beheersen van veelvoorkomende technische problemen en het onderkennen van de potentiële gevaren die verband houden met de omgang met CO₂ gasstromen uiteengezet.

Samenvattend is te stellen dat de afgelopen 20 jaar grote stappen zijn gezet waarmee CCTS nu van een concept naar de praktijk is gekomen. Er is met zowel publiek als privaat gefinancierd onderzoek enorm veel theoretisch en praktisch werk verzet. Bijvoorbeeld onderzoek om te komen tot verbetering van (gevalideerde) uitstroom- en verspreidingsmodellen (effectgericht). Daarnaast is (brongericht)

materiaalkundig onderzoek verricht, dat inzicht verschaft voor het behoud van de leidingintegriteit.

Tenslotte, noemen we ook een momenteel lopend onderzoek: Het privaat-publieke project **SKYLARK (VK)** heeft de ambitie om de open einden voor wat betreft het veilig uitbaten van CO₂-buisleidingen aan elkaar te knopen, en grootschalige falingsexperimenten uit te voeren. Dit ter aanvulling op hetgeen bijvoorbeeld tijdens **COSHER, CO2PIPEHAZ, CO2QUEST** en **COOLTRANS** is gedaan.

11.4 Veiligheid van de gehele CCTS-keten, mens én het milieu

Per stap in de CCTS-keten zijn nog aandachtspunten aan te geven ter waarborging van veiligheid, gezondheid, mens en milieu. De Europese Unie financiert onverminderd onderzoek om tot een verbeterde zuivering van CO₂ uit industriële bronnen te komen. Ook worden de opties verkend voor een eventueel gedeeltelijk hergebruik van de stof. De websites van de lopende (praktijk)projecten **C4U, CaLby2030, HERCCULES, INITIATE, ConsenCUS, ELECTRA, Encase en EMPHATICAL** leveren een inzicht in het multidisciplinaire karakter van de CCUS-/CCTS-research.

Tot dusver is de aandacht hoofdzakelijk uitgegaan naar een veilige CO₂-transportleidinginfrastructuur, aangezien het raakvlak in Nederland met een dichtbebouwde omgeving evident en momenteel het meest exemplarisch is. Uiteraard is de wet- en regelgeving (externe veiligheid, de NL-implementatie van de Seveso-richtlijnen) ook leidend voor alle proces-chemische installaties in de CCTS-keten, nader te noemen de 'capture plant', en een bufferopslag(en) met (gekoeld) CO₂. Aparte wetgeving is van toepassing voor het (veilig) transport van gevaarlijke stoffen over binnenwateren, via het spoor en over de weg. De stof CO₂, de CCTS-keten als geheel, is niet anders dan enig ander proces, transport of opslag. Een uitzondering is de opslag in de diepe ondergrond en off-shore-werkzaamheden, die onder de Mijnbouwwet vallen.



Wanneer men veiligheid van de gehele CCTS-keten [1] overziet, kennen de stappen 'capture', 'conditionering', 'transport' (de transportleiding, of anders) en de 'opslag' van CO₂ ieder eigen vraagstukken. Het recente review-artikel (2024) van de hand van Tamburini et al. [57] geeft een systematisch overzicht van de 'best practices' in risicoanalyses, uitgevoerd op al deze afzonderlijke elementen in de CCTS-keten. Het stuk gaat verder dan CO₂-leidingfalen en benoemt (uitgaande van de risicoanalyses) de 'knowledge gaps'. Een ander recent reviewartikel, van Liu et al. [58], verschenen in 2023 beziet gehele CCTS-keten vanuit de huidige technologische uitdagingen.

Volgens Tamburini et al. [57] op het gebied van risicoanalyses in de CCTS-keten nog onderbelichte onderwerpen aan te wijzen. De onderstaande tabel is overgenomen uit het artikel.

Tabel 11.2 Een tabel uit [57] met een overzicht van alle fases van een CCTS-project en een antwoord op de vraag of de aanwezige kennis specifiek of algemeen is.

Results of the gap analysis.

CCS step	Sub-step or alternatives	Critical scenario identification	End-point scenario identification	Release frequencies	Models for consequence analysis		
					Source term	Near-field	Far-field
Capture	-						
Conditioning	-						
Transport	Onshore pipeline						
	Sealine						
	Road (truck)						
	Rail (tanker)						
	Ship (vessel)						
Injection and Storage	Injection						
	Storage						

 = specific information available - specific validated scenarios/data/models
 = incomplete or general information only - generic scenarios/data/models with no specific validation for CO₂

11.4.1 Capture-strategieën en chemische stoffen

De ambitie om grootschalig CO₂ af te vangen uit bijvoorbeeld industriële rookgassen, of het anderszins te betrekken van CO₂ dat als afvalstof (restproduct) voortkomt uit de industrie, vereist op zichzelf een efficiënt chemisch proces en een procesinstallatie. Het CO₂ moet op een of andere wijze geëxtraheerd, gescheiden worden van de andere gassen. Afhankelijk van de industriële bron, betreft het voornamelijk stikstof en water, waarnaast 'vervuilingen' als SO_x, NO_x, CO, en H₂S – of andere stoffen, zoals mogelijk metalen. Afhankelijk van de grondigheid waarmee men de extractie en verdere zuivering aanpakt (door normering, en kosten-baten afweging bepaald) blijven deze stoffen, uitgezonderd stikstof, in zekere mate in de CO₂-processtroom aanwezig.

Men ontkomt bij het capture-proces niet aan het gebruik van de hiervoor geschikte chemicaliën, stoffen waaraan CO₂ zich selectief chemisch bindt en waarvan op enig moment CO₂ ook weer (met een chemische reactie) is te scheiden.

Een meest bekende proces-chemische route (gas-scrubbing) maakt gebruik van amines, waarvan de meest onderzochte toepassing met de stof monoethanolamine (MEA) is. Ook bij een zo veel mogelijk efficiënt proces en het cyclisch gebruik van deze stof, of soortgelijke stoffen, levert het CO₂-capture-proces degradatieproducten op, en introduceert men (in beperkte mate) additionele emissies. Sommige van deze stoffen (bijvoorbeeld nitrosamines en aldehyden) worden als toxisch en 'zeer zorgwekkend' gecategoriseerd. Of dat als een potentiële impact op mens en milieu te billijken is, is voer voor discussie [59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66]. Zeker omdat het om significante hoeveelheden gaat.

Eveneens is de vraag te stellen of de energie die letterlijk in het verwezenlijken van de CCTS-keten moet worden gestoken, hoe efficiënt die inmiddels qua technologie is ontwikkeld, al dan niet te verenigen is

met de oorspronkelijke doelstelling: het verlagen van de CO₂-voetafdruk. Zeker wanneer de energie wordt gebruikt voor CO₂-afvang, het transport en de opslag uit fossiele bron [67,68,69,70]. Concreet betreft het de energie en materialen voor de bouw van een capture-installatie, productie van de genoemde CO₂-absorberende stoffen, die onderdeel zijn van een volledige Life Cycle Analysis.

Als alternatief voor vloeistofextractie met onder andere MEA worden ook de CO₂-ad- en absorberende eigenschappen van vaste stoffen onderzocht. Een variëteit aan natuurlijke (rest)materialen en mineralen zijn in staat om CO₂ (tijdelijk) te binden [71, 72, 73]. Daarmee zijn deze echter (nog) niet zomaar procesmatig in te zetten.

Direct Atmospheric Capture (DAC) wordt momenteel intensief onderzocht. Het CO₂ wordt daarbij dus niet noodzakelijkerwijs bij de industriële bron, maar gewoon het meest diffuus uit de ons omringende lucht onttrokken [74]. Het is de vraag of deze aanpak werkelijk efficiënter is. Mogelijk dat de locatie waar een DAC-installatie wordt neergezet het verschil maakt, en de wijze waarop het zo verkregen zuivere CO₂ vervolgens of wordt ingezet of wordt opgeslagen. De concentratie aan CO₂ in de atmosfeer is honderden keren lager vergeleken met industriële (schoorsteen)uitstoot, en een uitdaging van een andere orde. Niet verrassend ontkomt men bij DAC evenmin aan de chemische technologie, scheidingsstappen met hulpstoffen [75, 76,77]. Dit onderzoek is volop gaande, bij universiteiten en in de private sector. Nederland kent verschillende startups.

Samenvattend, ligt voor de verschillende capture-technologieën het gebruik van 'hulpchemicaliën' wezenlijk anders, en zijn de implicaties voor gezondheid en milieu ook uiteenlopend. Los daarvan zal de productie van hulpchemicaliën, zoals de genoemde amines ook energie vergen, en een koolstofvoetafdruk hebben. Dit geldt overigens in meerdere of mindere mate voor alle stappen in CCTS-keten, ook de technologisch meest efficiënt gekozen routes: alles overziend zijn ze energie consumerend, en vooralsnog kostbaar [78]. Dit laatste is echter niet uniek, in beschouwing nemend dat andere methodes voor koolstofarme energieproductie vaak ook relatief kostbaar zijn.

Tenslotte, hoe schoon is schoon genoeg? Schoon genoeg om corrosie in betaalbare (veilige) transportleidingen te beperken, schoon genoeg om in geologische formaties achter te laten? Of CO₂ dat schoon genoeg is om in voedingsmiddelenindustrie in te zetten, of in de glastuinbouw te gebruiken voor productie van groente, geschikt menselijke consumptie? Bronnen waaruit CO₂ is betrokken, de gewenste zuivering en (eind)bestemming vormen een onderbelicht aspect in de CCTS- en CCUS-ketens.

Kennisvragen:

- Er kunnen verschillende ZZS-chemicaliën betrokken zijn bij het afvangen van CO₂, of zich al in de rookgassen bevinden waaruit CO₂ wordt afgevangen. Daarom is een kennisvraag of dit gas vervolgens schoon genoeg is voor de volgende stap. Ook is een vraag of opslag in geologische formaties op langere tijdsschaal tot problemen kan leiden, zoals water- of bodemvervuiling.

- Is deze CO₂-stroom schoon genoeg voor gebruik in de proceschemie, glastuinbouw of voedingsmiddelenindustrie?
- Als vervuiling in de CO₂-stroom ook ZS-stoffen betreft, is de concentratie in de lucht hiervan dan problematisch bij een breuk van een dense-phase of superkritische CO₂-buisleiding? Kan vervuiling eventueel ook effect hebben op het fase-diagram en dus het transportgedrag van dense-phase of superkritische CO₂?

11.4.2 CO₂-opslag in geologische formaties

Wanneer het standpunt van de Nederlandse overheid overeind blijft om CO₂-opslag alleen diep onder de zeebodem toe te staan, zijn fysieke veiligheid en gezondheid (en een negatieve publieke perceptie) niet primair aan de orde. In die zin is Nederland met een eigen opslagcapaciteit op zee in het voordeel vergeleken met bijvoorbeeld een land als Polen [79] dat slechts een eigen on-shore-capaciteit kan gebruiken, danwel een weg moet vinden om CO₂ te hergebruiken of CO₂ moet exporteren. Directe gevolgen voor de Nederlandse bevolking, als in een onwaarschijnlijke, maar worst-case-blootstelling door het instantaan falen van de integriteit van de geologische formatie (aardbeving, blow-out) zijn met de keuze voor off-(near) shore niet te verwachten.

In Nederland is er onderzoek geweest in opdracht van SodM naar de integriteit van afgesloten, buiten gebruik gestelde olie-en gasputten [80]. Daar waar de cementen of stalen afsluiting intact is, is de afsluiting deugdelijk, maar imperfecties in en tussen de verschillende materialen zijn al langer bekend als oorzaken van methaanlekken. Onderzoek naar geschikte materialen voor het afsluiten van een met CO₂ gevulde, ondergrondse locatie gebeurde bijvoorbeeld in het project **CEMENTTEGRITY** [81]. Vragen over de effecten van CO₂ onder hoge druk op de geologische formaties waarin ze zijn opgeslagen, en effecten op tektonische activiteit van buitenaf kwamen aan bod in het project **SHARP** [82]. Onderzoek naar de invloed van 'koude', vloeibare injectie van CO₂ is aan bod gekomen in het project **RETURN** [83]. Dat project heeft stappen gezet om deze meer kosteneffectieve methode van CO₂-opslaan mogelijk te maken.

Voor wat betreft personen die op een platform (CO₂-injectie) werken, is de arbeidsveiligheid uiteraard wel een punt van aandacht. Dat is echter niet fundamenteel anders dan bij de werkzaamheden die in de conventionele olie-en gas (offshore) industrie worden uitgevoerd. De geschiktheid van het materiaal en materieel (diep-well equipment, put - 'casing') en de ervaring van de partij die het werk onderneemt, moet gegarandeerd zijn. Het gaat immers om hoge (injectie)drukken en een corrosief milieu (de CO₂, de gesteldheid van de diepe ondergrond en het zeewater).

Voor wat betreft het milieu is van belang dat de geschiktheid van het veld uit een goede (pre)selectieprocedure voortkomt. Eveneens dat de integriteit van de put(ten) is gegarandeerd. Dat de kwaliteit van het geïnjecteerde CO₂ wordt gemonitord en de ondergrondse verspreiding daarvan in het reservoir. Tenslotte, dat een doordacht plan B op de plank ligt, zodat de signalering van ongewenste verspreiding in het reservoir adequaat is, eventuele lekkages (zeebodem) tijdig worden

opgemerkt, en maatregelen mogelijk zijn. Vrijkomend CO₂ zorgt voor een verzuring, of lekkage zich nu op land of in de zee manifesteert. Dit vereist zakelijke afspraken (hoeveelheden, samenstelling, prestatie-indicatoren, een afrekenmodel en boeteclausule) en heldere wetgeving.

Lopend onderzoek:

Recentelijk heeft de Universiteit Twente in samenwerking met het CCTS-project Porthos maritieme seismometers geplaatst binnen de 500-meter zone vanaf het CO₂-injectiepunt onder de Noordzee [84]. Deze activiteiten zijn onderdeel van het **DeepNL DICTUM**-onderzoek, waarmee vroegtijdig veranderingen in de ondergrond detecteerbaar zijn. De testfase loopt tot 2026. Vanaf 2027 worden deze seismometers officieel onderdeel van het landelijke KNMI-seismologische meetnetwerk.

Vanuit de internationale samenwerking **Q-Fibre**, geleid door Noorwegen, wordt er onderzoek gedaan naar de monitoring via glasvezelkabels van de stabiliteit en integriteit van CCS-putten en hun afsluitmaterialen [85]. Vanuit Nederland zijn TU Delft, EBN en Shell partners in dit onderzoeksproject.

Kennisvragen:

- Er kan onderzoek worden gedaan naar hoe er in geval van een lekkage of seismische activiteit vanuit een onderzeese opslagfaciliteit kan worden ingegrepen. Hoe gaat de signalering eruitzien?
- Welke mogelijkheden voor reparatie zijn er onder de Nederlandse zeebodem bij een mogelijk incident?
- Op welke tijdschaal blijft nazorg nodig?

11.5 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren kwamen tijdens interviews en tijdens de in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 11.3 Opgehaalde beleidsvragen over CCS uit de interviews en beleidssessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
CCS			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Behoeftte aan kaders om te bepalen of een veld geschikt is voor CO₂-opslag, inclusief een eenduidige definitie van lekkage en een opslagcomplex. - Hebben we de risico's van grootschaliger verwerking van 	<ul style="list-style-type: none"> - Wat is acceptabel als het gaat over de hoeveelheid lekkage, vrijkomen van ZZS en corrosietempo? - Vooralsnog ontbreekt harmonisatie in normstelling tussen verschillende landen.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
CCS		<p>CO₂ (superkritisch, wellicht met meer onzuiverheden, hoge druk) voldoende in beeld?</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hoeveel lekkage door scheurvorming (en op welke tijdschaal) kan die optreden? - Normen voor vrijkomen van ZZS (amines) bij CO₂-afvang (er is een ISO-norm in de maak)? - Hoe zit het met corrosie in leidingen (die sneller gaat dan in theorie verwacht werd)? - Is er voldoende kennis over eventuele bodemdaling en over interactie van CO₂ (of vervuilingen, die aanwezig zijn in de CO₂) met de bodem? - Welke maatregelen hebben hoeveel effectreductie? <p>Bijvoorbeeld inbouwen van kleppen in leidingen of het bouwen van een muur rond een buisleiding.</p>	
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>		<ul style="list-style-type: none"> - Behoeft aan duidelijke handvatten waarop te beoordelen wanneer er een vergunning moet worden verleend. - Bij het verlenen van een vergunning moet al nagedacht zijn over het afsluiten na gebruik en de monitoring: wens om nu al duidelijk te hebben waarop gemonitord moet worden.
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	- Wanneer is een buisleiding op een paar meter boven de grond een betere oplossing is dan onder de grond?	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	- Wat is het handelingsperspectief voor bijsturing naar aanleiding van resultaten uit de monitoring? Mocht er lekkage gesignaleerd worden, wat kan er dan nog iets gedaan worden om zo'n lek te dichten?	- Om eventuele bodemdaling/lekkages te monitoren, moet je nu al beginnen met monitoren.

11.6 Referenties

- [1] Rapporten Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.
<https://www.ipcc.ch/reports>
- [2] L. van der Net, N. Staats, P.W.H.G. Coenen, J.D. Rienstra, P.J. Zijlema, E.J.M.M. Arets, K. Baas, S.A. van Baren, R. Dröge, K. Geertjes, E. Honig, B. van Huet, R.A.B. te Molder, J.A. Montfoort, T.C. van der Zee, M.C. van Zanten.
Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2022 National Inventory Report 2024, RIVM report 2024-0017, DOI 10.21945/RIVM-2024-0017.
<https://www.rivm.nl/publicaties/greenhouse-gas-emissions-in-netherlands-1990-2022>
- [3] Naar een gezonde leefomgeving in een veranderend klimaat: themaverkenning bij de Volksgezondheid Toekomst Verkenning 2024 – RIVM-rapport 2024-0048.
- [4] Klimaat- en Energieverkenning 2022, PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag, 2022, PBL-publicatienummer: 4838
- [5] CO₂-opslag in Nederland: het is noodzakelijk en het kan veilig (whitepaper), EBN, Utrecht 7 Juli 2022.
<https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/co2-opslag-in-nederland-het-is-noodzakelijk-en-het-kan-veilig/>
- [6] Paul Noothout, Frank Wiersma, Omar Hurtado, Doug Macdonald, Jasmin Kemper, Klaas van Alphen.
CO₂ Pipeline infrastructure – lessons learnt, Energy Procedia 63 (2014) 2481 – 2492.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.271>
- [7] Shu-Yang Liu, Bo Ren, Hang-Yu Li, Yong-Zhi Yang, Zhi-Qiang Wang, Bin Wang, Jian-Chun Xu, Ramesh Agarwal.
CO₂ storage with enhanced gas recovery (CSEGR): A review of experimental and numerical studies, Petroleum Science, Volume 19, Issue 2, April 2022, Pages 594-607.
<https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.12.009>
- [8] Vandeweyer, V., van der Meer, B., Hofstee, C., Mulders, F., D’Hoore, D., Graven, H., (2011).
Monitoring the CO₂ injection site: K12-B. Energy Proc. 4, 5471–5478.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.532>
- [9] Vandeweyer, Vincent and Hofstee, Cor and Pelt, van, Wouter and Graven, Hilbrand.
CO₂ Injection at K12-B, the Final Story (December 31, 2020). Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference 15-18 March 2021.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3820865>
- [10] Bart W. Terwel, Emma ter Mors, Dancker D.L. Daamen.
It’s not only about safety: Beliefs and attitudes of 811 local residents regarding a CCS project in Barendrecht, International Journal of Greenhouse Gas Control 9 (2012) 41-51.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.02.017>

- [11] Emma ter Mors, Esther van Leeuwen, Christine Boomsma and Renate Meier.
Media Coverage of Carbon Capture and Storage: An Analysis of Established and Emerging Themes in Dutch National Newspapers, *Energies* 2023, 16, 2056.
<https://doi.org/10.3390/en16042056>
- [12] Kevin Broecks, Corin Jack, Emma ter Mors, Christine Boomsma, Simon Shackley.
How do people perceive carbon capture and storage for industrial processes? Examining factors underlying public opinion in the Netherlands and the United Kingdom.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102236>
- [13] Christine Boomsma, Emma ter Mors, Corin Jack, Kevin Broecks, Corina Buzoianu, Diana M. Cismaru, Ruben Peuchen, Pim Piek, Diana Schumann, Simon Shackley, Jasmin Werker.
Community compensation in the context of Carbon Capture and Storage: Current debates and practices. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 101 (2020) 103-128.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103128>
- [14] Read A., Gittins C., Uilenreef J., Jonker T., Neele F., Belfroid S., Goetheer E., Wildenborg T.
Lessons from the ROAD project for future deployment of CCS, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 91, December 2019, 102834.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102834>
- [15] 'Linking the Chain' (integrated CATO2 knowledge prepares for the next step in CO2 Capture and Storage'), R. de Vos ed., CPI Zutphen, 2014, ISBN 978 90 822377 0 2.
https://co2-cato.org/publish/pages/3764/2014_book_linking_the_chain.pdf
- [16] <https://ieaghg.org/publications-library/>
- [17] <https://www.dnv.com/focus-areas/ccs/safety/>
- [18] <https://nccs.no/>
- [19] Patricia Loria, Matthew B.H. Bright, Lessons captured from 50 years of CCS projects, *The Electricity Journal*, Volume 34, Issue 7, August–September 2021, 106998
<https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106998>
- [20] 'Shell en Total trekken zich deels terug uit cruciaal CO₂-opslagproject, overheid springt bij', NRC 22 April 2025, Chris Hensen.
- [21] <https://www.aramis-ccs.com/>
- [22] <https://www.porthosco2.nl/>
- [23] <https://co2next.nl/nl/about/>
- [24] <https://www.delta-rhine-corridor.com/nl>
- [25] <https://www.wkr.nl/adviezen/co2-verwijdering>
- [26] <https://natuurenmilieu.nl/publicatie/visie-op-koolstofverwijdering/>
- [27] <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2025/03/14/bijlage-1-minvkgg-routekaart-koolstofverwijdering>
- [28] <https://rvszoekstelsysteem.rivm.nl/stof/detail/858>
- [29] <https://www.rivm.nl/probitrelaties/kooldioxide>
- [30] <https://www.hse.gov.uk/carboncapture/carbondioxide.htm>
- [31] <https://www.rivm.nl/documenten/evaluation-toxicity-co2>
- [32] <https://www.ocap.nl/>

- [33] Spoelstra, M. en Rosmuller, N.
Kennisbundel Kooldioxide, Instituut Fysieke Veiligheid (2022).
<https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/03/20220215-IFV-Kennisbundel-CO2.pdf>
- [34] Gale, J.; Davison, J.
Transmission of CO₂—Safety and economic considerations.
Energy 2004, 29, 1319–1328.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.090>
- [35] Kay Damen, Andre Faaij, Wim Turkenburg.
Health safety and environmental risks of underground CO₂ storage, overview of mechanisms and current knowledge, Climatic Change (2006) 74: 289–318.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-005-0425-9>
- [36] Koornneef, J.; Spruijt, M.; Molag, M.; Ramirez, A.; Faaij, A.; Turkenburg, W.,
Uncertainties in risk assessment of CO₂ pipelines. Energy Procedia 2009, 1, 1587–1594.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.208>
- [37] Koornneef J, Spruijt M, Molag M, Ramírez A, Turkenburg W, Faaij A.
Quantitative risk assessment of CO₂ transport by pipelines--a review of uncertainties and their impacts. Journal of Hazardous Materials, 2010 May 15;177(1-3):12-27.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.068>
- [38] M.M.J. Knoope, I.M.E. Raben, A. Ramírez, M.P.N. Spruijt, A.P.C. Faaij,
The influence of risk mitigation measures on the risks, costs and routing of CO₂ pipelines, International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 29, October 2014, Pages 104-124
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.08.001>
- [39] Molag, M., and I. M. E. Raben.
"Externe veiligheid onderzoek CO₂-buisleiding bij Zoetermeer." TNO, Apeldoorn (2006): 46.
- [40] <https://www.rivm.nl/documenten/rekenvoorschrift-omgevingsveiligheid-module-v-versie-januari-2025>
- [41] Matteo Vitali, Cristina Zuliani, Francesco Corvaro, Barbara Marchetti, Fabrizio Tallone,
Statistical analysis of incidents on onshore CO₂ pipelines based on PHMSA database,
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 77, July 2022, 104799
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104799>
- [42] Dongmin Xi, Hongfang Lu, Yun Fu, Shaohua Dong, Xinmeng Jiang, John Matthews.
Carbon dioxide pipelines: A statistical analysis of historical accidents. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 84 (2023), 105129,
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105129>
- [43] Andrew Duguid, Jared Hawkins, Laura Keister,
CO₂ Pipeline risk assessment and comparison for the midcontinent United States,
International Journal of Greenhouse Gas Control 116 (2022) 103636,
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103636>

- [44] J. SONKE, B.H. Morland, G. Moulie, M.S. Franke, Corrosion and chemical reactions in impure CO₂. International Journal of Greenhouse Gas Control 133, March 2024, 104075.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104075>
- [45] Matteo Vitali, Francesco Corvaro, Barbara Marchetti, Alessandro Terenzi. Thermodynamic challenges for CO₂ pipelines design: A critical review on the effects of impurities, water content, and low temperature. International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 114, February 2022, 103605.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103605>
- [46] Mack, A., Spruijt, M.P.N. Validation of Open Foam for heavy gas dispersion applications, Journal of Hazardous Materials 262, 504-516 2013.
- [47] A. Mack, M.P.N. Spruijt. CFD dispersion investigation of CO₂ worst case scenarios including terrain and release effects. Energy Procedia 51 (2014) 363–372.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.043>
- [48] Christopher J. Wareing, Michael Fairweather, Samuel A.E.G. Falle, Robert M. Woolley. Validation of a model of gas and dense phase CO₂ jet releases for carbon capture and storage application. International Journal of Greenhouse Gas Control 20 (2014) 254–271.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.11.012>
- [49] Russell Cooper, Julian Barnett, Pipelines for transporting CO₂ in the UK, Energy Procedia 63 (2014) 2412 – 2431.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.264>
- [50] Mohammad Ahmad, Barbara Lowesmith, Gelein De Koeijer, Sandra Nilsen, Henri Tonda, Carlo Spinelli, Russell Cooper, Sigmund Clausen, Renato Mendes, Onno Florisson. COSHER joint industry project: Large scale pipeline rupture tests to study CO₂ release and dispersion. International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 37, June 2015, Pages 340-353.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.04.001>
- [51] Robert M. Woolley, Michael Fairweather, Christopher J. Wareing, Samuel A.E.G. Falle, Haroun, Mahgerefteh, Sergey Martynov, Solomon Brown, Vagesh D. Narasimhamurthy, Idar E. Stovrik, Lene Sælen, Trygve Skjold, Ioannis G. Economou, Dimitrios M. Tsangaris, Georgios C. Boulougouris, Nikolaos Diamantonis, Laurence Cusco, Mike Wardman, Simon E. Gant, Jill Wilday, Yong Chun Zhang, Shaoyun Chen, Christophe Proust, Jerome Hebrard and Didier Jamois. CO₂PipeHaz: quantitative hazard assessment for next generation CO₂ pipelines. Energy Procedia 63 (2014) 2510 – 2529.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.274>
- [52] Sergey Martynov, Solomon Brown, Haroun Mahgerefteh, Vikram Sundara, Shaoyun Chen, Yongchun Zhang, Modelling three-phase releases of carbon dioxide from high-pressure pipelines Process Safety and Environmental Protection 92 (2014) 36–46.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2013.10.004>

- [53] M.M. van der Voort, R.M.M. van Wees, J.M. Ham, M.P.N. Spruijt, A.C. van den Berg, P.C.J. de Bruijn, P.G.A. van Ierschot, An experimental study on the temperature dependence of CO₂ explosive evaporation, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (July 2013) 26(4):830–838.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.02.016>
- [54] <https://www.dnv.com/software/services/plant/co2-challenges-in-safety-modelling/>
- [55] <https://www.gexcon.com/blog/co2-hazard-modelling-with-effects/>
- [56] Vitali, M., Zuliani, C., Corvaro, F., Marchetti, B., Terenzi, A.; Tallone, F.
Risks and Safety of CO₂ Transport via Pipeline: A Review of Risk Analysis and Modeling Approaches for Accidental Releases. *Energies* 2021, 14, 4601.
<https://doi.org/10.3390/en14154601>
- [57] Federica Tamburini, Francesco Zanobetti, Mariasole Cipolletta, Sarah Bonvicini, Valerio Cozzani.
State of the art in the quantitative risk assessment of the CCS value chain. *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 191, Part B, November 2024, Pages 2044-2063.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.066>
- [58] Enbin Liu, Xudong Lu, and Daocheng Wang
A Systematic Review of Carbon Capture, Utilization and Storage: Status, Progress and Challenges, *Energies* 2023, 16, 2865.
<https://doi.org/10.3390/en16062865>
- [59] S.B. Fredriksen, Klaus-J. Jens, Oxidative degradation of aqueous amine solutions of MEA, AMP, MDEA, Pz: A review, *Energy Procedia* 37 (2013) 1770 – 1777.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.053>
- [60] Andrzej Rusin, Katarzyna Stolecka, An Analysis of Hazards Caused by Emissions of Amines from Carbon Dioxide Capture Installations, *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 25, No. 3 (2016), 909-916.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/61646>
- [61] Hajime Kimura, Toshiaki Kubo, Masatoshi Shimada, Hideo Kitamura, Koshito Fujita, Kensuke Suzuki, Kenji Yamamoto, Makoto Akai, Environmental risk assessment of MEA and its degradation products from Post-Combustion CO₂ Capture Pilot Plant: Drafting technical guidelines. *Energy Procedia* 114 (2017) 6490 – 6500.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1785>
- [62] Gary T Rochelle, Thermal degradation of amines for CO₂ capture, *Current Opinion in Chemical Engineering* 2012, 1:183–190.
<https://doi.org/10.1016/j.coche.2012.02.004>
- [63] Gary T. Rochelle, Air pollution impacts of amine scrubbing for CO₂ capture, *Carbon Capture Science & Technology*, Volume 11, June 2024, 100192.
<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100192>
- [64] Vanja Buvik, Solrun J. Vevelstad, Peter Moser, Georg Wiechers, Ricardo R. Wanderley, Juliana Garcia Moretz-Sohn Monteiro, Hanna K. Knuutila, Degradation behaviour of fresh and pre-used ethanolamine, *Carbon Capture Science & Technology* 7 (2023) 100110.
<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100110>

- [65] Daniel Mullen, Lucas Braakhuis, Hanna Katariina Knuutila, Jon Gibbins, and Mathieu Lucquiaud. Monoethanolamine Degradation Rates in Post-combustion CO₂ Capture Plants with the Capture of 100% of the Added CO₂, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2024, 63 (31), 13677-13691. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01525>
- [66] Amanda E. Poste, Merete Grung, Richard F. Wright Amines and amine-related compounds in surface waters: A review of sources, concentrations and aquatic toxicity, *Science of the Total Environment* 481 (2014) 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.066>
- [67] Patricia Luis, Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives, *Desalination* Volume 380, 15 February 2016, Pages 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.004>
- [68] Magdalena Strojny, Paweł Gładysz, Dawid P. Hanak, Wojciech Nowak. A Comparative analysis of CO₂ capture technologies using amine absorption and calcium looping integrated with natural gas combined cycle power plant, *Energy* Volume 284, 1 December 2023, 128599. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128599>
- [69] Frederic Clarens, José Jorge Espí, Mario Rafael Giraldo, Miquel Rovira, Lourdes F. Vega. Life cycle assessment of CaO looping versus amine-based absorption for capturing CO₂ in a subcritical coal power plant, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 46 (2016) 18–27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.12.031>
- [70] Magdalena Strojny, Paweł Gładysz, Wojciech Nowak Preliminary comprehensive assessment of CO₂ utilization versus CO₂ storage in Poland. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 66 (2024) 103817. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103817>
- [71] Seul-Yi Lee, Soo-Jin Park, A review on solid adsorbents for carbon dioxide capture, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 23, 25 March 2015, Pages 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.001>
- [72] Olusola Olaitan Ayelerua, Helen Uchenna Modekwe, Oluwatayo Racheal Onisuru, Chinemerem Ruth Ohoro, Christianah Aarinola Akinnawo, Peter Apata Olubambi, Adsorbent technologies and applications for carbon capture, and direct air capture in environmental perspective and sustainable climate action, *Sustainable Chemistry for Climate Action* Volume 3, 2023, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100029>
- [73] Xiang Yun Debbie Soo, Johnathan Joo Cheng Lee, Wen-Ya Wu, Longgang Tao, Cun Wang, Qiang Zhu, Jie Bu, Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review, *Journal of CO₂ Utilization* 81 (2024) 102727. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>
- [74] Paul Feron, Growing interest in CO₂ capture from air, *Greenhouse Gas Sci Technol.* 9:3–5 (2019). <https://doi.org/10.1002/ghg>

- [75] Radu Custelcean, Direct Air Capture of CO₂ Using Solvents, Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng. 2022. 13:217–34.
<https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-092120-023936>
- [76] Ali Kiani, Will Conway, Mohamed H. Abdellah Graeme Puxty, Ann-Joelle Minor, Gerard Kluivers, Robert Bennett and Paul Feron, A study on degradation and CO₂ capture performance of aqueous amino acid salts for direct air capture applications;
<https://doi.org/10.1002/ghg.2302>
- [77] Wang, J., Fu, R., Wen, S. et al. Progress and current challenges for CO₂ capture materials from ambient air. Adv Compos Hybrid Mater 5, 2721–2759 (2022); <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00567-3>
- [78] Turgut M. Gür, Carbon Dioxide Emissions, Capture, Storage and Utilization: Review of Materials, Processes and Technologies, Progress in Energy and Combustion Science 89 (2022) 100965.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100965>
- [79] Magdalena Strojny, Paweł Gładysz, Wojciech Nowak Preliminary comprehensive assessment of CO₂ utilization versus CO₂ storage in Poland. Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 66, June 2024, 103817.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103817>
- [80] Eric van Oort (EVO Energy Consulting), Qualitative Risk Assessment of Long-Term Sealing Behavior of Materials and Interfaces in Boreholes KEM-18 – Final Report, 2022.
https://kemprogramma.nl/file/download/7a5e459b-2a87-468a-98db-025d2140b870/kem-18finalreport_geredigeerd.pdf
- [81] CEMENTTEGRITY Final Report.
<https://static1.squarespace.com/static/5672ab009cadb60e553e3529/t/682f62470335916d72218c92/1747935818710/CEMENTTEGRITY+Final+report+v2.pdf>
- [82] SHARP Final Report. [Final report from the SHARP project – ACT](#)
- [83] RETURN Final Report.
<https://return-act.eu/wp-content/uploads/2025/01/D1.7-Final-report.pdf>
- [84] Fadel, I.E.A.M. Nieuw seismometersysteem voor real-time monitoring in Noordzee.
<https://www.utwente.nl/nieuws/2025/6/339226/nieuw-seismometersysteem-voor-real-time-monitoring-in-noordzee>
- [85] Joonsang Park, Lars Grande and Thea Sveva Faleide, Powerpoint presentation for Q-Fibre Quantitative Strain Monitoring for Well and Seal Integrity through Wellbore Fibre Optic Cables.
<https://static1.squarespace.com/static/5672ab009cadb60e553e3529/t/66e033a45164193b9576be0c/1725969317807/CETP+Q-Fibre+at+ACT-CETP+at+RCN.pdf>

12 Binnenmilieu en isolatie – Piet Jacobs, TNO

Dankwoord

De auteur dankt Christianne Luijten voor haar waardevolle input over biobased materialen bij het schrijven van dit hoofdstuk.

12.1 Inleiding

Gebouwen in Nederland worden verduurzaamd: we gaan van aardgas af en stappen over op warmtenetten, warmtepompen en andere technologische oplossingen. Daarvoor worden gebouwen beter geïsoleerd en om de binnenluchtkwaliteit op orde te houden wordt mechanische ventilatie aangelegd. De verbeterde isolatie zorgt er ook in warme maanden voor dat de warmte beter wordt vastgehouden. Om bewoners tegen oververhitting te beschermen, is voor nieuwbouw een grenswaarde in de bouwregelgeving geïntroduceerd: TOjuli. Het uitgangspunt voor de dimensieloze grenswaarde van 1,20 voor TOjuli is gebaseerd op 450 uur gewogen temperatuuroverschrijding [1]. Met deze relatief ruwe methode wordt bij het ontwerp van het merendeel van de woningen voorkomen dat extreme oververhittingssituaties ontstaan. Bij specifieke omstandigheden kan in de gebruiksfase toch oververhitting optreden. Daarnaast is TOjuli alleen van toepassing bij de nieuwbouw van woningen. Bij renovatie geldt de TOjuli dus niet. Ook is deze niet van toepassing op scholen.

Naast het effect van isolatie op oververhitting, kan isolatie en het luchtdicht maken van een woning zonder aanvullende maatregelen ook een negatief effect hebben op de binnenluchtkwaliteit. Paragraaf 11.2.2 beschrijft dit.

12.2 Gezondheid

12.2.1

Oververhitting door toename isolatiegraad en klimaatverandering

Recente simulaties²² in opdracht van RVO/TKI Urban Energy laten zien dat het isoleren van de bestaande bouw zonder warmte-werende voorzieningen voor een stijging van de koelbehoefte zorgt. Door de toepassing van buitenzonwering en nachtventilatie is het thermisch comfort aanzienlijk te verbeteren en is de stijging van de koelbehoefte reduceerbaar. De wijze van ventilatie en de effectieve beperking van de directe zoninstraling zijn daarbij bepalende randvoorwaarden, die sterk afhangen van het gebruikersgedrag.

De hiervoor genoemde simulaties geven aan dat in een warmer wordend klimaat het isoleren van woningen naar een beter niveau dan de huidige Standaard voor woningisolatie juist zorgt voor een daling van de koelbehoefte. Meer isolatie zorgt dus niet altijd voor meer oververhitting. Wel moeten we hierbij opmerken dat uit de simulaties volgt dat ook met isolatie voorbij de Standaard voor woningisolatie er in een opwarmend klimaat een grotere koelbehoefte blijft dan in de uitgangssituatie van de matig geïsoleerde woning.

²² TSE6240004 - Klimaatadaptatie en verduurzamingspakketten gebouwde omgeving, Nieman in opdracht van RVO/TKI Urban Energie, februari 2025.
[\(20250320 Rapport Klimaatadaptatie verduurzaming Gebouwde Omgeving - Nieman.pdf\)](#)

Lopende en geplande onderzoeken:

- Cooldown Coach: de ontwikkeling van een digitale gedragscoach die op basis van een binnentemperatuursensor, internet-of-things-data en een thermisch gebouwmodel, de binnentemperatuur bij verschillend gedrag voorspelt. De tool geeft via een display advies over de optimale bediening van zonwering en de optimale momenten om ramen te openen en te sluiten. TNO heeft in de zomer van 2024 een eerste pilot uitgevoerd in zeven sociale huurwoningen. Het merendeel van de deelnemende bewoners vond de Cooldown Coach nuttig. Er was ook een duidelijk verschil in binnentemperatuur waarneembaar tussen gebruikers die de adviezen opvolgden en gebruikers die dat niet deden²³ Na de opstart, die door TNO is gefinancierd, werd de tool samen met woningcorporaties verder opgeschaald. In 2025 is een plan opgesteld om in de zomer van 2026 in vijf woningen tegelijkertijd te kunnen meten. Aedes vervult hierbij een coördinerende rol.
- EU-project healthRiskADAPT: dit project startte in November 2024. Doelstelling is het ontwikkelen van tools om risico's in te schatten en het ontwikkelen van oplossingen voor klimaatadaptatie. De projectfocus is op oververhitting, luchtvervuiling (zomersmog), bosbrand-emissies en verlenging van het pollenseizoen. Vanuit TNO en twee Nederlandse mkb-bedrijven ligt de focus op het ontwikkelen van oplossingen om oververhitting en het voorkomen van slechte luchtkwaliteit in bestaande scholen.
 - o Looptijd 4 jaar;
 - o Coördinator NILU (Noorse KNMI).
- Pilotprojecten door TNO, woningbouwcorporatie De Alliantie, Wageningen University en BBA: Binnenmilieu om de efficiëntie van maatregelen tegen hittestress te onderzoeken. De focus ligt hierbij op ouderen en kwetsbaren in sociale huurwoningen.
 - o Monitoring zomer 2024. Deze metingen waren erop gericht om het effect van maatregelen, zoals zonwering, op de binnentemperatuur vast te stellen.
 - o Monitoring door TNO in 2025 van temperatuur en luchtkwaliteit in een faciliteit voor langdurige zorg.
- GoHot: Gezond omgaan met hitte en pollen in een veranderend klimaat. Dit ZonMw-project is in december 2024 gestart en loopt gedurende negentien maanden. Grootschalige sterfte en ziekte door blootstelling aan hitte, pollen en luchtverontreiniging dreigen bij verdergaande klimaatverandering toe te nemen. Het GoHot-consortium gaat onderzoeken wie wanneer risico loopt, hoe we risico's verkleinen en welke organisaties welke rol kunnen nemen om mensen effectief en tijdig te informeren en te instrueren.
- VRO/NEN initieerde in 2025 de opzet van een bepalingmethode waarmee op een objectieve wijze hittebestendigheid van een woning is vast te stellen. De doelstelling is om eind 2026 een eerste concept voor een NTA op te leveren.

²³ De Cool Down Coach – <https://publications.tno.nl/publication/34644711/OZlPhYJo/vries-2024-cool.pdf>

Kennisvragen:

De huidige renovatiepakketten richten zich vooral op het reduceren van de warmtevraag op koude dagen. Ze besteden nog relatief weinig aandacht aan het reduceren van de koeltevraag op warme dagen en het voorkomen van oververhitting. De kennisvraag is: welke maatregelen helpen om nu en in de toekomst oververhitting in de bestaande bouw te voorkomen en de koeltevraag te reduceren? Onderzoeksvragen betreffen zowel technische maatregelpakketten, voorlichting aan bewoners, als mogelijkheden in wetgeving om dit voor de bestaande bouw te regelen. Hoe zorg je ervoor dat bewoners zonwering en ramen ook daadwerkelijk op tijd gebruiken? Ook is opname van particuliere hitteweringsoplossingen in subsidieregelingen mogelijk.

12.2.2 Reduceren natuurlijke ventilatie in luchtdichte woningen

Ongeveer de helft van de Nederlandse woningen [2] is uitgevoerd met een natuurlijk ventilatiesysteem. Dat is een systeem zonder ventilatoren, dat werkt onder de invloed van wind en thermiek. Deze woningen zijn voor hun ventilatie afhankelijk van toevoer en afvoer via ramen of roosters. Als de ramen en roosters gesloten zijn, bijvoorbeeld ter voorkoming van tocht in de winter, geluidsoverlast of regeninslag, hangt de enige lucht die van buiten naar binnen komt in de woning af van de aanwezigheid van naden en kieren in de gevel. Isolatie en het luchtdicht maken van woningen verlaagt vaak per direct de ventilatie via infiltratie in deze woningen. Zeker als ook eventueel aanwezige klapramen worden vervangen door vast dubbel glas. Bij renovatie door woningcorporaties worden dan vaak ventilatieroosters aangebracht, in combinatie met mechanische afzuiging. Bij renovatie door particuliere woningeigenaren is onbekend in welke mate ventilatie-componenten zoals roosters en afzuigboxen bij woningisolatie worden aangebracht. Uit Iers onderzoek [3] volgt dat na isolatie de luchtdichtheid toenam. Ook kwam daaruit dat de concentratie van binnenluchtverontreinigingen zoals fijnstof, significant hoger werd, omdat het ventilatiesysteem niet werd aangepast. Uit Nederlands onderzoek [2] blijkt dat de kans op vocht en/of schimmel in geval van mechanische afzuiging een factor 1,8 lager is dan in geval van natuurlijke ventilatie.

Lopende en geplande onderzoeken:

- PPS-toeslag Gezond en Energie-Efficiënt Ventileren (GEEV): TNO ontwikkelt samen met woningbouwcorporaties en toeleveranciers van ventilatiesystemen ontwerprichtlijnen voor de afvoerszijde van ventilatiesystemen. Deze voorkomen schimmelvorming en slechte luchtkwaliteit. Dit onderzoek is in juni 2024 gestart en loopt tot eind 2025.
- Renovatieverkenner: een rekenkern die TNO en TU Eindhoven samen met architectenbureau De Twee Snoeken ontwikkelen, waarmee de energiebesparing en het binnenklimaat na renovatie voorspelbaar is.
- Grootschalige monitoring werkelijke prestaties: in 2023 is bij TNO in het kader van een intern project een beeld gevormd wat een dergelijke monitoring kan inhouden. De data zijn te verkrijgen door metingen, vragenlijsten, opname of uit openbare data. De monitoringsparameters zijn hierbij op drie niveaus ingedeeld:

- o Basisniveau – om comfort, de binnenluchtkwaliteit en de energetische prestatie te karakteriseren.
- o Niveau 2 – parameters zoals filterkwaliteit en ventilatiecapaciteit, die inzicht geven in hoe de werkelijke prestaties zijn te verbeteren.
- o Niveau 3 – parameters die inzicht geven in de invloed van bewonersgedrag zoals de instelling van de verwarming, gebruik van het ventilatiesysteem, open ramen, et cetera.

Kennisvragen:

- Het is momenteel onduidelijk in hoeverre de energietransitie effect heeft op het binnenmilieu van woningen en of hierbij nog verschillen tussen bouwjaren en/of type woningen optreden. Periodieke grootschalige monitoring kan in deze behoefte voorzien. De laatste opname [4] is uit 2004/2005. In Frankrijk worden dergelijke onderzoeken periodiek uitgevoerd. Samen met de enquête van Woononderzoek Nederland (WoON) kan dit veel informatie opleveren over het binnenmilieu in woningen van verschillende bouwjaren, wel of niet gerenoveerd. Het effect van bewonersgedrag, et cetera.
- Vooral bestaande particuliere koopwoningen en particuliere huurwoningen zijn momenteel nog voorzien van een natuurlijk ventilatiesysteem. Het ontbreekt deze groep eigenaren/bewoners aan het besef dat bij renovatie een aanpassing van het ventilatiesysteem nodig is. Voor degenen die een dergelijke ventilatie-oplossing willen aanleggen, is informatie gewenst over hoe je een goedwerkend, energiezuinig, comfortabel en geluidsarm mechanisch ventilatiesysteem kunt ontwerpen en aanleggen. Het ontbreekt hiervoor aan ontwerp tools en voorbeeldontwerpen.

12.2.3

Onvoldoende capaciteit voor kookafzuiging in appartementen

Afgelopen jaren zijn veel nieuwbouwwoningen opgeleverd, zonder dat de koper de optie had of kreeg om voor de afzuigkap een doorvoer direct naar buiten te laten maken. Kopers wordt vaak medegedeeld dat bij het maken van een dergelijke doorvoer de garantie vervalt, omdat dan niet is te garanderen dat de woning voldoende op temperatuur wordt gehouden. Dit is gezien het kortstondige karakter van koken vrijwel nooit een probleem en duidt dan eerder op een gebrek aan verwarmingscapaciteit. Wat wel belangrijk is, is dat de doorvoer zo wordt aangelegd dat de water- en dampwering van de gevel ter plekke in stand blijft. Een andere genoemde reden is dat het aanbrengen van een afzuigkap met afvoer naar buiten de werking van het balansventilatiesysteem zou verstoren. Kopers worden dan gedwongen om een recirculatiekap toe te passen. Ook dit argument is onjuist. Een alternatieve mogelijkheid is om een motorloze afzuigkap direct op het ventilatiesysteem aan te sluiten. Ventilatieleveranciers waren in eerste instantie huiverig om deze oplossing te ondersteunen in verband met mogelijke verontreiniging van kanalen en van de ventilatie-unit. In de praktijk blijkt dat door toepassing van een goed vetfilter (klasse A) in de afzuigkap het merendeel van verontreiniging direct wordt afgevangen. Het merendeel van het restant slaat in de eerste bocht na de afzuigkap neer. Voordeel van een dergelijke motorloze afzuigkap is dat deze bijna

geruisloos werkt, omdat de motor in de ventilatie-unit elders is geplaatst [6].

De huidige Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) -norm voor keukenafzuiging (21 dm³/s) is gebaseerd op het na het koken afvoeren van bij het koken vrijgekomen vocht, met als doel dat er geen vochtophoping plaatsvindt [5]. Bij het opstellen van de eisen is er geen rekening gehouden met fijnstof, dat bij bakken en braden vrijkomt. Om hoge fijnstofblootstelling tijdens en na het koken te voorkomen, moet het fijnstof direct naar buiten worden afgevoerd. In 2018 heeft TNO op basis van laboratoriummetingen een minimale capaciteitseis van 83 dm³/s afgeleid [6] om aan de WHO-jaargemiddelde PM_{2.5}-advieswaarde te voldoen. De nieuwe capaciteitseis is in 2022 in het programma van eisen Gezonde Woningen [7] opgenomen.

Volgens opgave van leveranciers van afzuigkappen wordt momenteel de helft van de afzuigkappen als recirculatie-afzuigkap verkocht. Uit onderzoek blijkt dat deze recirculatie-afzuigkappen slechts beperkt fijnstof afvangen en dat koken op gas [8] zeker in combinatie met plasmafilters kan leiden tot ongezonde concentraties stikstofdioxide [9]. Mogelijk leidt gebruik van recirculatie-afzuigkappen met actieve koolstoffilters wel tot een verlaging van de stikstofdioxideconcentratie, mits deze regelmatig door de gebruikers worden vervangen.

Modelsimulaties geven aan dat vluchtige organische componenten (VOC's) die bij koken vrijkomen onder invloed van ozon en NO_x in de buitenlucht tot onder andere formaldehyde vorming kunnen leiden [10]. De overgang van koken op gas naar elektrisch koken heeft zeker een positieve invloed op het binnenmilieu. Afzuigkappen met afvoer naar buiten blijven echter noodzakelijk om fijnstof en VOC's af te voeren.

Lopende en geplande onderzoeken:

- TNO interne project KIC Air Quality: najaar 2024, in laboratorium bepalen van het Oxidatief Potentieel van fijnstof wat bij koken vrijkomt.
- PPS-toeslag Gezond en Energie-Efficiënt Ventileren (GEEV): hierin is op basis van laboratoriumexperimenten vastgesteld dat naast de vorm van de afzuigkap ook de plaatsing een groot effect heeft op de minimale capaciteit. Bij een wandafzuigkap die tot over de voorste pitten reikt, is bij een hoekopstelling 46 dm³/s in plaats van de eerdergenoemde 83 dm³/s afzuigcapaciteit vereist. Dit wordt in een nieuwe versie van het PvE Gezonde woningen meegenomen.

Kennisvragen:

Wokken op hoge temperaturen kan kankerverwekkende verbindingen opleveren en bij Chinese vrouwen die vaak roerbakken is een hoger risico op longkanker vastgesteld [11]. Het is nog onduidelijk in welke mate het bij de bereiding van Nederlandse gerechten in kookdampen vrijkomende fijnstof schadelijk is. Momenteel worden veel afzuigkappen op basis van recirculatie verkocht. Wat is hiervan het effect op de fijnstofconcentratie in het binnenmilieu? Leidt dit tot meer vocht en schimmelklachten omdat hiermee geen vocht wordt afgevoerd? Ook is onduidelijk wat het effect van plasmafilters in recirculatiekappen is op de ozonconcentratie in de binnenlucht en of vorming van ongewenste bijproducten zoals formaldehyde optreedt. Ook is onduidelijk of geurbestrijding eventueel bij koken gevormd fijnstof maskeert en tot

minder ventilatie dan gewenst leidt, doordat de bewoner de kookdampen dan minder goed ruikt.

12.2.4 *Onduidelijke user interfaces voor gebouwinstallaties*

Onderzoek laat zien dat bewoners ventilatiesystemen vaak niet bedienen zoals bedacht bij het ontwerp [12], met als gevolg een slechte binnenluchtkwaliteit of hoger energiegebruik. Automatische regelingen worden vaak ingezet om niet afhankelijk te zijn van gebruikers. Maar als het systeem niet doet wat gebruikers willen of te veel geluid produceert, leidt dit alsnog regelmatig tot het saboteren van de regeling door de bewoners. Er is weinig aandacht voor het ontwerp van gebruikersvriendelijke en effectieve user-interfaces voor de bediening van systemen in gebouwen. Terwijl een goed ontworpen user-interface die feedback geeft aan de bewoners en hen handelingsperspectief geeft, beschouwd wordt als een essentieel onderdeel van het besturingssysteem, juist ook bij systemen met automatische regelingen.

Lopende en geplande onderzoeken:

- PPS toeslag Gezond en Energie-Efficiënt Ventileren (GEEV) - TNO onderzoekt samen met huurders van sociale huurwoningen aan welke voorwaarden een gebruikersvriendelijke user-interface voor ventilatie en verwarming moet voldoen. *
- TDI500, samen met installateurs en leveranciers doet TNO onderzoek naar gebruikersvriendelijke user-interfaces voor de aansturing van hybride warmtepompen.

12.2.5 *Biobased bouwen en vocht*

Er is momenteel een trend om damp-open te bouwen, omdat wordt gesuggereerd dat dit leidt tot een comfortabeler binnenklimaat. Dit komt doordat biobased materialen hygroscopisch zijn en daardoor vocht kunnen opnemen. In dit stuk wordt damp-open bouwen omschreven als een gevel die één folie bevat: een waterkerende, maar damp-open folie. Hierdoor kan damp door de gevel bewegen en kan de gevel zowel naar binnen als naar buiten toe vocht opnemen, afgeven en bufferen. Bij dampdicht bouwen wordt gebruikgemaakt van twee folies: aan de buitenzijde een waterkerende, damp-open folie en aan de binnenzijde, achter het pleisterwerk, een dampremmende of dampdichte folie. Een dampremmende folie laat nog – sterk vertragend - een beperkte hoeveelheid waterdamp door. Een dampdichte folie daarentegen laat in principe geen waterdamp door en sluit de constructie aan de binnenzijde volledig af.

Gezondheidsclaims bij damp-open bouwen zijn meestal niet met onderzoeksresultaten onderbouwd. Ook artikelen suggereren een verbetering van de binnenluchtkwaliteit bij toepassing van biobased isolatiematerialen, zonder deze verbetering te onderbouwen. Op basis van simulaties wordt bij toepassing van biobased isolatiemateriaal en damp-open bouwen een kleine verlaging (typisch 0,5% punt) van de gemiddelde relatieve luchtvochtigheid in combinatie met een relatief grotere reductie van de dagelijkse variatie van de relatieve vochtigheid voorspeld [13]. Door damp-open bouwen met biobased isolatiematerialen kunnen volgens deze simulaties vochtemissies worden gebufferd.

Er is helaas weinig praktijkonderzoek beschikbaar om deze simulatie-resultaten te onderbouwen. In de literatuur is slechts één

praktijkonderzoek bekend. Kurnitski [14] heeft in 46 Finse woningen gedurende de zomermaanden de relatieve vochtigheid gemeten in woningen met een hygroscopische en niet-hygroscopische interieurafwerking, damp-open en dampdichte constructies en verschillende typen ventilatie. De dagelijkse variatie in relatieve vochtigheid was significant lager in woningen met gebalanceerde ventilatie en in woningen met een hygroscopische interieurafwerking. De dampdichtheid van de gevel had geen significant effect op de dagelijkse variatie in relatieve vochtigheid in de woningen.

Het is overigens niet duidelijk of deze buffering tot een gezonder binnenmilieu leidt. Hiervoor wordt vaak verwezen naar een literatuurreview van Arundel uit 1986 waarin wordt gesteld dat tussen de 40 en 60 procent relatieve vochtigheid bacteriën, virussen, schimmels en mijten de laagste overlevingskansen hebben. Maar in hoeverre dagelijkse schommelingen in relatieve vochtigheid hierop effect hebben, is niet bekend. Adan [15] heeft bijvoorbeeld afgeleid dat als de relatieve luchtvochtigheid gedurende meer dan 50 procent van de tijd hoger is dan 80 procent, schimmelgroei op wanden wordt bevorderd. Het is onduidelijk in welke mate vochtbuffering dit criterium beïnvloedt. De buffering gaat echter wel ten koste van een significant hoger watergehalte van het biobased isolatiemateriaal ten opzichte van minerale wol en fiberglas achter een dampdichte folie. In een praktijkonderzoek onder gesimuleerde condities leidde dit na drie jaar testen tot onacceptabele hoeveelheden schimmel in het isolatiemateriaal [16]. In gevels met een dampdichte laag werd in dit onderzoek alleen schimmel gevonden nabij luchtlekken in de dampdichte laag die door het aanbrengen van sensoren waren veroorzaakt. Eind 2024 is een door TNO uitgevoerde literatuurstudie²⁴ gepubliceerd die tot dezelfde conclusie kwam: damp-open constructies hebben in laboratoriumexperimenten en in simulaties een groter risico op schimmelgroei in de isolatielaag in vergelijking met constructies met een dampremmende folie. In de literatuurstudie wordt aangegeven dat er nog maar beperkt veldstudies zijn uitgevoerd die schimmelgroei in damp-open constructies evalueren.

De relatieve vochtigheid van binnenlucht kan toenemen door activiteiten zoals koken, douchen, was drogen, schoonmaken en de aanwezigheid van personen. Deze activiteiten zijn niet constant over de dag verdeeld. Meestal treden in de ochtend en rond het koken aan het begin van de avond pieken op in de relatieve luchtvochtigheid. Een verlaging van de relatieve vochtigheid is daardoor veel beter bereikbaar door betere lokale afzuiging bij koken, douchen en wasdrogen en automatische ventilatie-afstemming op het aantal aanwezige personen en de activiteiten zoals schoonmaken, dan met vochtbuffering in bouwmaterialen.

Lopend onderzoek:

- Op de Zernike Campus in Groningen worden twee houtskeletbouw demowoningen gebouwd. Eén woning wordt damp-open uitgevoerd, waarbij de dampremmende folie tussen het isolatiemateriaal en de binnenbeplating wordt weggelaten. De andere woning heeft een dampremmende folie, zoals gebruikelijk

²⁴ Claes LA, Kompatscher K, Luijten CN, Vette JF, Niederwestberg J. Influence of omitting the vapor barrier in light timber frame walls with bio-based insulation on the risk of mold growth and indoor climate: A literature review. *Journal of Building Physics*. 2024;48(5):666-702. doi:10.1177/17442591241275189

is in houtskeletbouw. Beide woningen bestaan uit vier verschillende wandopbouwen met biobased isolatiematerialen: A) houtvezelisolatie; B) bermgrasisolatie; C) cellulose; en: D) een vezelcementplaat met hennepisolatie. Per gevel wordt het vochtgedrag onderzocht, zowel in de constructie als in het binnenklimaat (relatieve luchtvochtigheid). Om de vochtproductie in beide woningen vergelijkbaar te houden, zijn ze onbewoond en wordt via een luchtbevochtiger volgens een vast schema vocht ingebracht. TNO monitort met sensoren de vochtbouw in de isolatiematerialen over tijd. De eerste meetresultaten worden in het najaar van 2025 verwacht.

Kennisvragen:

Er is een gebrek aan veldstudies – met ook echte bewoners – naar het effect van damp-open bouwen bij gebruik van biobased isolatiematerialen. Dit zowel wat betreft het eventuele bufferende effect op de fluctuatie van de relatieve vochtigheid in het binnenmilieu als het risico op schimmelvorming door condensatie in de isolatielaag. Er is momenteel een NTA over Biobased bouwen in voorbereiding die begin 2026 uitkomt. Deze biedt een overzicht van definities en relevante normen en richtlijnen.

12.3 Veiligheid

12.3.1 Koolmonoxidevergiftiging

Volgens de Onderzoeksraad voor Veiligheid [17] lopen in 90 procent van de woningen waar zich gasverbrandingsinstallaties bevinden de bewoners het risico ziek te worden of zelfs te overlijden door blootstelling aan koolmonoxide. Door elektrificeren neemt het aantal mogelijke CO-bronnen in huis af en daarmee het risico. Als bij renovatie de woning echter luchtdicht wordt gemaakt en onvoldoende aandacht wordt besteed aan luchttoevoer, kan bijvoorbeeld bij gebruik van de afzuigkap stromingsomkering ontstaan bij open verbrandingstoestellen. Daarnaast zijn houtkachels een potentiële bron van koolmonoxidevergiftiging.

12.3.2 Biobased materialen en brandveiligheid

Biobased materialen, zoals houtvezels, stro, vlas, hennep, linnen en andere biologische vezels, bieden milieuvriendelijke alternatieven voor traditionele bouwmaterialen. Zoals alle bouwmaterialen echter, hebben biobased platen hun eigen risicoprofiel, onder andere voor brandveiligheid.

Materialen worden geclassificeerd [18] op basis van hun bijdrage aan de ontwikkeling van brand en rookproductie, aangeduid als brandklassen en rookklassen:

- **Brandklassen:** Deze worden gemarkeerd met een letter en een cijfer, variërend van A1 (onbrandbaar) tot F (zeer hoge bijdrage aan brand).
- **Rookklassen:** Deze worden aangeduid met s1, s2 en s3, waarbij s1 staat voor geringe rookproductie, s2 voor gemiddelde rookproductie en s3 voor grote rookproductie.

Het doel van deze classificaties is om te voorkomen dat een beginnende brand, zoals een brandende prullenbak, zich gemakkelijk uitbreidt naar de rest van het gebouw.

Om vast te stellen in welke klasse een materiaal valt, worden twee verschillende brandtesten uitgevoerd:

- **Small Flame-test (EN-ISO 11925-2):** In deze test wordt een proefstuk blootgesteld aan een klein vlammetje (niveau aanstekervlam) om te beoordelen of het materiaal snel ontbrandt.
- **SBI-test (EN 13823):** Deze test, ook wel de 'Single Burning Item'-test genoemd, simuleert een beginnende brand en meet hoeveel energie en rook vrijkomt van het te testen product.

De bijdrage tot brandvoortplanting wordt bepaald door het samenspel van de materialen die een bepaalde constructie vormen.

Kennisvragen:

Is er een methode om de brandwerendheid van biobased plaatmaterialen te verhogen zonder de duurzaamheid te verminderen, en met behoud van een lage CO₂-uitstoot tijdens de productie? Op dit moment zijn er nog niet veel mogelijkheden om biobased isolatie- en plaatmaterialen op een verantwoorde manier te produceren of te behandelen. Er zijn niet tot nauwelijks biobased materialen op de markt, die voldoen aan brandklasse D of beter. Daarom worden deze materialen vaak zo in een constructie toegepast, dat deze materialen niet direct grenzen aan de buiten- of binnenlucht, maar afgeschermd of afgewerkt zijn, zodat de constructie voldoet aan de gestelde eisen.

12.4 Opgehaalde beleidsvragen uit de interviews en beleidssessies

Hieronder staan de beleidsvragen die naar voren kwamen tijdens interviews en tijdens de in april 2024 gehouden beleidssessies (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Tabel 12.1 Opgehaalde beleidsvragen over binnenmilieu uit de interviews en beleidssessies, weergegeven in de matrixvorm die in paragraaf 2.5 is besproken.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Binnenmilieu			
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Wat is nodig om de huidige regelgeving afdoende dekkend te maken voor gebruik van waterstof in een woning? - Welke eisen stellen we aan (de plaatsing van) batterijen in woningen? - Hittenormen: hoe warm mag een huis zijn in de zomer en wat is de samenhang tussen 	<ul style="list-style-type: none"> - Gedrag van bewoners heeft grote invloed op het binnenmilieu. Hoe hiermee om te gaan? Alleen voorlichting blijkt niet voldoende. - In plaats van capaciteitseisen stellen aan (bijvoorbeeld) ventilatie, kan ook overwogen worden om operationele eisen te stellen (CO₂-gehalte,

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Binnenmilieu		<p>hitte en isolatie van woningen, inclusief zonwering?</p> <ul style="list-style-type: none"> - Welke maatregelen zijn effectief om voldoende ventilatie te borgen? - Risico-aannames bij de crisisbeheersing gaan uit van bouwwerken van steen en beton. Hoe veranderen deze aannames bij gebruik van duurzame (wellicht brandbare) materialen? - Wat betekenen de introductie van waterstof, warmtepompen en andere nieuwe energiebronnen voor de gezondheid binnenshuis? Synergie en uitsluiting van innovatieve technieken in huis? - Effect van toename van elektromagnetische velden (EMV) en van het gebruik van elektronica in de woon- en werkomgeving? 	<p>fijnstofgehalte). Dit stelt bewoners in staat om te monitoren en gedrag aan te passen. Hoe om te gaan met deze optie?</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hoe zorgen we dat een geïsoleerd huis niet te warm wordt, goed geventileerd blijft en dat niet iedereen airconditioning gaat installeren? - Omgang met niet aangetoonde effecten en de toch terugkomende zorg hierover (bijvoorbeeld de niet-wetenschap-pelijk aangetoonde associatie van EMV van hoogspannings-lijnen met het ontstaan van leukemie bij kinderen).
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Behoeftte aan een betere manier (dan de huidige rekenmethode over hitterisico) om klachten en gebreken in de warmteregulering vast te stellen. 	
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Is het mogelijk om te regelen dat ventilatie in woningen zonder interventie van de bewoners uitgezet kan worden bij een incident in de omgeving? - Weten we voldoende van brandveiligheid in relatie tot bijvoorbeeld alternatieve (duurzame) bouwmaterialen? Weten we ook voldoende van de combinatie van materialen en wat dat doet met de brandveiligheid? - Behoeftte aan herwaardering sprinklers: metalen worden negatief gewaardeerd bij circulair bouwen, maar sprinklers hebben waarschijnlijk minder milieu-impact dan een 	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk
		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>
Binnenmilieu			
		afgebrand gebouw. Wens om met een lifecycle-analyse hiernaar te kijken.	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	- Monitoring van gebruik en klachten over PUR-schuim wenselijk. - Hoe (kosten)effectief zijn inspecties in huurwoningen in vergelijking met reageren op klachten van bewoners?	

12.5 Referenties

- [1] W. Adviseurs, "Grenswaarde zomercomfort nieuwe woningen in Bouwbesluit," 2019. [Online]. Available: [https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/08/Rapport Grenswaarden zomercomfort nieuw woningen in Bouwbesluit.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/08/Rapport_Grenswaarden_zomercomfort_nieuw_woningen_in_Bouwbesluit.pdf)
- [2] W. Kornaat, W. Borsboom, T. Kleinepier, and R. van Strien, "Vocht en schimmelvorming in woningen Bevindingen en handreikingen op basis van WoON2018 en Energiemodule 2018," 2020. [Online]. Available: <https://www.woningmarktbeleid.nl/onderwerpen/aanpak-vocht-en-schimmel/alle-illustratieve-artikelen/bevindingen-en-handreikingen-van-tno-abf-research-en-ggd-amsterdam>
- [3] Á. Broderick, M. Byrne, S. Armstrong, J. Sheahan, and A.M. Coggins, "A pre and post evaluation of indoor air quality, ventilation, and thermal comfort in retrofitted co-operative social housing," *Build. Environ.*, vol. 122, p.p. 126–133, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.05.020.
- [4] J. van Dongen and H. Vos, "Gezondheidsaspecten van woningen in Nederland," 2007.
- [5] W.F. de Gids, "Ventilatie, achtergrond van de eisen," 2011. [Online]. Available: www.rvo.nl
- [6] P. Jacobs, "Openbaar eindrapport VentKook Ventilatiesysteem met goede kookafzuiging," 2018. [Online]. Available: <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5c8/683/2e9/5c86832e9f0d8059461253.pdf>
- [7] M.G.L.C. Loomans, L. Hensen Centnerová, P. Jacobs, T. Beuker, and W. Atmar, "Programma van Eisen Gezonde Woningen 2022," p.p. 1–48, 2022, [Online]. Available: https://www.binnenklimaattechniek.nl/wp-content/uploads/2022/07/Digitaal_PVE-Gezonde-Woningen_BinnenklimaatTechniek25.pdf
- [8] P. Jacobs, M.D., A. Beelen, H.J.M. Cornelissen, A. Topal, and O. Vijlbrief, "Health effects in EU from cooking on gas - Phase II Field study," 2023. [Online]. Available: <https://publications.tno.nl/publication/34641471/zD0Xiz/TNO-2023-R11809.pdf>

- [9] P. Jacobs and E. Cornelissen, "Efficiency of recirculation hoods with regard to PM2.5 and NO2," in *Healthy Buildings 2017 conferentie*, 2017, no. July.
- [10] H.L. Davies *et al.*, "Environmental Science Processes & Impacts indoor air chemistry following cooking activities †," 2023, doi: 10.1039/d3em00167a.
- [11] I.T.S. Yu, Y.L. Chiu, J.S.K. Au, T.W. Wong, and J.L. Tang, "Dose-response relationship between cooking fumes exposures and lung cancer among Chinese nonsmoking women," *Cancer Res.*, vol. 66, no. 9, p.p. 4961–4967, 2006, doi: 10.1158/0008-5472.CAN-05-2932.
- [12] M.E. Spiekman, S.U. Boess, O.G. Santin, T.J.H. Rovers, and N. Nelis, "Effects of energy-efficient renovation concepts on occupant behaviour and hence building performance," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1085, no. 1, p. 25DUMMY, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1085/1/012023.
- [13] Y. Shang and F. Tariku, "Hempcrete building performance in mild and cold climates: Integrated analysis of carbon footprint, energy, and indoor thermal and moisture buffering," *Build. Environ.*, vol. 206, no. June, p. 108377, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108377.
- [14] J. Kurnitski, T. Kalamees, J. Palonen, L. Eskola, and O. Seppänen, "Potential effects of permeable and hygroscopic lightweight structures on thermal comfort and perceived IAQ in a cold climate," *Indoor Air*, vol. 17, no. 1, p.p. 37–49, 2007, doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00447.x.
- [15] O.C.G. Adan, *On the fungal defacement of interior finishes*, vol. 1, no. 1994. 1994. doi: 10.6100/IR427806.
- [16] W.B. Rose and D.J. McCaa, "Temperature and moisture performance of wall assemblies with fiberglass and cellulose insulation," *Therm. Perform. Exter. Envel. Whole Build.*, 1998.
- [17] Onderzoeksraad voor Veiligheid, "Koolmonoxide: Onderschat en onbegrepen gevaar," 2015.
- [18] NEN, "Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen - Deel 1: Classificatie op grond van resultaten van beproeving van het brandgedrag," 2019.

Dankbetuiging

De auteurs bedanken Joost van der Ree en Jeroen Neuvel voor hun waardevolle inbreng tijdens de reviewrondes van dit kennisoverzicht. Ook de begeleidingscommissie, met daarin een beleidsmedewerker van elk van de betrokken ministeries (BZK, EZK, IenW, JenV, SZW en VWS), wordt bedankt voor haar inbreng tijdens de overlegsessies in 2024 en 2025.

Literatuur

Hoofdstuk 2:

- [1] J.M.M. Neuvel *et al.*, Gezondheid en leefomgeving rond Chemelot, RIVM-rapport 2025-0030.
(<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2025-0030.pdf>)

Hoofdstuk 4:

- [1] Nationaal Programma Regionale Energie Strategie (RES), [Factsheet Elektriciteit](#). 2023.
- [2] van Duren, L. A. *et al.*, [Ecosystem effects of large upsclaing of offshore wind on the North Sea – synthesis report](#), Deltares, 22 april 2021.
- [3] RVO, [Monitor Wind op Land 2024](#), mei 2025.
- [4] Helpdesk Wind op Land, [Landelijke milieunormen - inhoud | Helpdesk Wind op Land](#), geraadpleegd op 25 juni 2025.
- [5] Helpdesk Wind op Land, [Praktijkverhalen lokale milieunormen | Helpdesk Wind op Land](#), geraadpleegd 20 juni 2025.
- [6] Helpdesk Wind op Land, [Nevele-arrest en de gevolgen voor windparken | Helpdesk Wind op Land](#), geraadpleegd op 20 juni 2025.
- [7] van Kamp, I. and G. van den Berg, *Gezondheidseffecten van windturbinegeluid*, in *Health effects related to wind turbine sound*. 2020, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- [8] RIVM, [Factsheet gezondheidseffecten van windturbinegeluid](#), 2021.
- [9] Ruben Peuchen, Esther Kox, Melanie Klösters, Koen Straver, [Beleving windenergie op land](#); inzichten uit vier windparken, TNO, 30 maart 2022.
- [10] GGD, *Klimaatmitigatie en negatieve gezondheidseffecten- Huidige stand van kennis en advies GGD, 10 december 2020*, GGD.
- [11] Peter Mulder, Hettie Boonman, Reinier Sterkenburg, [De verwachte impact van windturbines op huizenprijzen in Nederland. Een ruimtelijke analyse voor de periode 2020-2030](#), TNO, 3 maart 2022.
- [12] R. van Poll, S. Simon, [Ernstige hinder en slaapverstoring in Nederland - Onderzoek Beleving Woonomgeving \(OBW\) 2020.](#), RIVM 2022.
- [13] Zock, J., M. Reedijk, E.v. Kempen, and J. Devilee, *Verkenning van opties voor gezondheidsonderzoek rond windturbines*, in *Health research options around wind turbines explored*. 2022, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- [14] [Onderzoek naar de blootstelling-responsrelatie windturbinegeluid en hinder en slaapverstoring | RIVM](#), geraadpleegd op 15 september 2025.
- [15] [Gezondheidsmonitoring nabij windparken: een praktijkvoorbeeld | Antea Group](#), geraadpleegd op 15 september 2025.

- [16] [Slagschaduw en lichtschittering door windturbineparken | Informatiepunt Leefomgeving](https://www.arcadis.com/nl-nl/projects/europe/netherlands/geluidsverwachting,-d-,nl-geeft-inzicht-in-geluid-en-slagschaduw-windturbines#:~:text=Arcadis%20maakte%20de%20app%20Geluidsverwachting.nl%2C%20die%20inzicht%20biedt,verwachting%20van%20het%20windturbinegeluid%2C%20tot%2048%20uur%20voorst, geraadpleegd op 15 september 2025.</p>
<p>[17] Gooijer, L. and M. Mennen, <i>Klimaatakkoord: effecten van nieuwe energiebronnen op gezondheid en veiligheid in Nederland</i>. 2021, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.</p>
<p>[18] <a href=), geraadpleegd op 20 mei 2025.
- [19] Hof, M., C. Bodar, and T.d. Kort, *Eerste inzicht in emissies van chemische stoffen bij wind op land. Resultaten quickscan*, in *First insight into emissions of chemical substances by wind turbines on land. Results quickscan*. 2023, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM.
- [20] S. Versluis, J.H.J. Wijten, H.J. Manuel, Actualisatie rekenmethode omgevingsveiligheid windturbines, RIVM, 2024.
- [21] M. Spoelstra, Kennisbundel Windturbines, NIPV, 17 februari 2025.
- [22] [WindAction](#), geraadpleegd op 10 juni 2025.
- [23] <https://www.nedzero.nl/media/site/3f61c87d0c-1721391666/handleiding-ijsprotocol-nedzero.pdf>, geraadpleegd op 20 juni 2025.

Hoofdstuk 5:

- [1] Spoelstra MB. Kennisbundel-zonnepanelen. IFV; 2021.
- [2] Gooijer L, Mennen MG. Klimaatakkoord: effecten van nieuwe energiebronnen op gezondheid en veiligheid in Nederland. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM; 2021. Accessed September 3, 2024. <https://rivm.openrepository.com/handle/10029/624994>
- [3] Veen N van, Mennen MG, Bos PMJ, Engering T, Gerssen A, Lasaroms JJP. Schadelijke stoffen bij branden met zonnepanelen. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM; 2022. Accessed September 3, 2024. <https://rivm.openrepository.com/handle/10029/625893>
- [4] Perovskietzonnecellen | TNO. tno.nl/nl. September 9, 2024. Accessed September 3, 2024. <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnetechnologie/perovskietzonnecellen/>
- [5] Rendement zonnepanelen stijgt | TNO. tno.nl/nl. September 9, 2024. Accessed September 3, 2024. <https://www.tno.nl/nl/duurzaam/hernieuwbare-elektriciteit/zonnemodules-massamaatwerk/rendement-zonnepanelen-stijgt/>
- [6] Tandem technology for higher PV performance | TNO. tno.nl/en. September 9, 2024. Accessed September 3, 2024. <https://www.tno.nl/en/sustainable/renewable-electricity/advanced-solar-technologies/tandem-technology-higher-pv-performance/>
- [7] Heens F, de Boer L. Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie. RIVM; 2024. 10.21945/RIVM-2023-0310

- [8] Beleid zonne-energie | RVO. Accessed May 23, 2025. Beleid zonne-energie | RVO.nl
- [9] Monitoring zonne-energie | RVO. Accessed May 23, 2025. Monitoring zonne-energie | RVO.nl
- [10] Nationaal plan energiesysteem: Verdiepingsdocument B – Ontwikkelpaden ketens van het energiesysteem. Ministerie van Economische Zaken. 2023
- [11] Dusseldorp A, Pruppers MJM, Van Putten EM. Verkenning van Extreem-Laagfrequente (ELF) Magneetvelden Bij Verschillende Bronnen. RIVM; 2018. doi:10.21945/RIVM-2018-0015
- [12] Gezondheidsklachten door hitte | RIVM. Accessed September 3, 2024. <https://www.rivm.nl/hitte/gezondheidsklachten-door-hitte>
- [13] Gevolgen voor de gezondheid - Kennisportaal klimaatadaptatie. Accessed May 23, 2025. Gevolgen voor de gezondheid - Klimaatadaptatie
- [14] Barron-Gafford GA, Minor RL, Allen NA, Cronin AD, Brooks AE, Pavao-Zuckerman MA. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. Sci Rep. 2016;6(1):35070. doi:10.1038/srep35070
- [15] Khan, A., Anand, P., Garshasbi, S. et al. Rooftop photovoltaic solar panels warm up and cool down cities. Nat Cities 1, 780–790 (2024). <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00137-2>
- [16] He Y, Hii DJC, Wong NH. Solar photovoltaics deployment impact on urban temperature: Review and assessment recommendations. Build Environ. 2024;264:111920. doi:10.1016/j.buildenv.2024.111920
- [17] Lijzen JPA, Heens F, Dekker E, van Bodegraven M, Hof M. Recycling of solar panels. Comparison of scenarios for a more circular and safe product chain. RIVM; 2024.
- [18] R. van den Dikkenberg, M. Duyvis, V. Jansen, M. Leene en J. Veeneklaas, [20241014-NIPV-Gebouwbranden-met-zonnepanelen.pdf](#), TNO, NEN en NIPV, 12 juli 2024.
- [19] Kort A de. Brandrisico van in-gevel PV-panelen. Brandveilig. September 25, 2023. Accessed September 3, 2024. <https://www.brandveilig.com/artikel/brandrisico-van-in-gevel-pv-panelen-73251>
- [20] D. van der Meij, X. Rekkers en J. Keyser [20250501-VRU-NIPV-Kennisdocument-zonnepanelen.pdf](#), Veiligheidsregio Utrecht, 1 mei 2025.
- [21] Duyvis MG, Leene M, Spoelstra MB. Depositie bij branden met zonnepanelen. IFV; July 15, 2021.
- [22] M. Duyvis, M. Rovers, C. Stähler, I. Tanck, B. Verhoeven en J. Vos, [20241219-NIPV-Zonneparken-en-natuurbranden.pdf](#), NIPV, 19 december 2024.
- [23] Pessenha TMF, Haaren JF van. Zonneveld Almere Buiten A6 Reflectieonderzoek. Rijksvastgoedbedrijf. July 27, 2018.
- [24] Sreenath S, Sudhakar K, Yusop AF, Cuce E, Solomin E. Analysis of solar PV glare in airport environment: Potential solutions. Results Eng. 2020;5:100079. doi:10.1016/j.rineng.2019.100079

Hoofdstuk 6:

- [1] Internationaal Atoomenergie Agentschap, *Power Reactor Information System*, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=423>, geraadpleegd op 16-10-2024.
- [2] Zie bijvoorbeeld *EnergyGraph*, <https://energygraph.info/d/q7IpAJHVz/overview?orgId=1&refresh=30m>, geraadpleegd op 16-10-2024.
- [3] Hoofdlijnenakkoord kabinet Schoof, <https://www.kabinetsformatie2023.nl/documenten/publicaties/2024/05/16/hoofdlijnenakkoord-tussen-de-fracties-van-pvv-vvd-nsc-en-bbb>, geraadpleegd op 16-10-2024.
- [4] <https://www.nuclearacademy.nl/>
- [5] <https://www.rvo.nl/subsidies-financiering/missiegedreven-onderzoek-ontwikkeling-en-innovatie/interessepeiling-subsidie-15>
- [6] <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2024/09/04/staatssecretaris-jansen-wil-eerder-besluit-over-eindberging-radioactief-afval>
- [7] R. Smetsers en P. Bekhuis, Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland, RIVM rapport 2021-0032, 2021 (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0032.pdf>)
- [8] C.P. Tanzi, Stralingsniveaumetingen aan de terreingrens van de EPZ kerncentrale Borssele in 2021, RIVM rapport 2022-0132 (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0132.pdf>)
- [9] P.J.M. Kwakman, Contra-expertise op bepalingen van radioactiviteit in afvalwater en ventilatielucht van de kernenergiecentrale Borssele, RIVM-briefrapport 2021-0156. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0156.pdf>)
- [10] EPZ, KCB MER: Milieu-effectrapportage brandstofdiversificatie, 2010.
- [11] C.P. Tanzi, Gammastralingsniveaumetingen aan de terreingrens van COVRA N.V. te Borsele in 2021 met het MONET-meetnet, RIVM-briefrapport 2022-0131. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2022-0131.pdf>)
- [12] P.J.M. Kwakman, Contra-expertise op bepalingen van radioactiviteit in afvalwater en ventilatielucht van COVRA NV, RIVM-briefrapport 2021-0157. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0157.pdf>)
- [13] COVRA, OPERA safety case, 2017. (<https://www.covra.nl/app/uploads/2019/08/Opera-SafetyCase.pdf>)
- [14] ICRP, Publication 103, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. (<https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103>)
- [15] J.M. Tomas *et al.*, Radiologische gevolgen van mogelijke ongevalsscenario's voor Kerncentrale Borssele, RIVM rapport 2021-0047. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2021-0047.pdf>)
- [16] T.J. Kerckhoffs *et al.*, Afweging van voor- en nadelen van beschermende maatregelen bij kernongevallen, RIVM rapport 2020-0058. (<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2020-0058.pdf>)

- [17] I. Waddington *et al.*, J-value assessment of relocation measures following the nuclear power plant accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 112, Part A, November 2017, Pages 16-49.
- [18] UNSCEAR website over het kernongeval in Tsjernobyl in 1986, <https://www.unscear.org/unscear/en/areas-of-work/chernobyl.html>

Hoofdstuk 8:

1. Bart Strengers en Hans Elzenga, "BESCHIKBAARHEID EN TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VAN DUURZAME BIOMASSA", PBL rapport 2020, https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2020-beschikbaarheid-en-toepassingsmogelijkheden-van-duurzame-biomassa-verslag-zoektocht-naar-gedeelde-feiten-opvattingen_4188.pdf
2. Sirpa Laitinen, Juha Laitinen, Leena Fagernäs, Kirsi Korpijärvi, Leena Korpinen, Kari Ojanen, Marjaleena Aatamila, Mika Jumpponen, Hanna Koponen, Jorma Jokiniemi, Exposure to biological and chemical agents at biomass power plants, *Biomass and Bioenergy*, Volume 93, 2016, Pages 78-86, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.025>.
3. Kanageswari, S.V.; Tabil, L.G.; Sokhansanj, S. Dust and Particulate Matter Generated during Handling and Pelletization of Herbaceous Biomass: A Review. *Energies* 2022, 15, 2634. <https://doi.org/10.3390/en15072634>
4. Pedro Abelha and Mariusz K. Cieplik, *Energy & Fuels* 2021 35 (3), 2357-2367, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c04246
5. Abhishek Singhal, Christian Roslander, Avishek Goel, Arnold Ismailov, Borbala Erdei, Ola Wallberg, Jukka Konttinen, Tero Joronen, Combined leaching and steam explosion pretreatment of lignocellulosic biomass for high quality feedstock for thermochemical applications, *Chemical Engineering Journal*, Volume 489, 2024, 151298, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151298>
6. Erik Anerud, Sally Krigstin, Johanna Routa, Hanna Brännström, Mehrdad Arshadi, Christopher Helmeste, Dan Bergström, Gustaf Egnell, "Dry matter losses during biomass storage - Measures to minimize feedstock degradation, IEA BioEnergy (Task 43), 2019
7. Rodríguez-Martínez, Rosa & Reali, Miguel & Torres-Conde, Eduardo & Bates, Michael. (2024). Temporal and spatial variation in hydrogen sulfide (H₂S) emissions during holopelagic Sargassum spp. decomposition on beaches. *Environmental Research*. 247. 118235. 10.1016/j.envres.2024.118235.
8. Ghosh, D., Ghosh, A. & Bhadury, P. Arsenic through aquatic trophic levels: effects, transformations and biomagnification—a concise review. *Geosci. Lett.* 9, 20 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00225-y>
9. Xuyang Cui, Junhong Yang, Zeyu Wang, Xinyu Shi, Better use of bioenergy: A critical review of co-pelletizing for biofuel manufacturing, *Carbon Capture Science & Technology*, Volume 1, 2021, 100005, ISSN 2772-6568, <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100005>.

10. Stelt, M.J.C. & Gerhauser, H. & Kiel, J. & Ptasinski, Krzysztof. (2011). Biomass Upgrading by Torrefaction for the Production of Biofuels: A Review. *Biomass & Bioenergy - BIOMASS BIOENERG.* 35. 3748-3762. 10.1016/j.biombioe.2011.06.023.
11. Evangelista, Briec & Arlabosse, Patricia & Govin, Alexandre & Salvador, Sylvain & Bonnefoy, Olivier & Dirion, Jean-Louis. (2018). Reactor scale study of self-heating and self-ignition of torrefied wood in contact with oxygen. *Fuel.* 214. 590-596. 10.1016/j.fuel.2017.11.048.
12. M.C. Carbo, P.M.R. Abelha, M.K. Cieplik, P. Kroon, C.F. Mourao Vilela, J.H.A. Kiel, "Handling and storage of torrefied biomass pellets" ECN report ECN-L--16-036, via TNO repository <https://publications.tno.nl/publication/34630774/S9IH15/l16036.pdf>
13. TORWASH® TNO technology "TNO wet biomass treatment process" patent no WO2013162355
14. Mihaela Tanase-Opedal, Solmaz Ghoreishi, Dag Helge Hermundsgård, Tanja Barth, Størker T. Moe, Rune Brusletto, Steam explosion of lignocellulosic residues for co-production of value-added chemicals and high-quality pellets, *Biomass and Bioenergy*, Volume 181, 2024, 107037, ISSN 0961-9534, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.107037>.
15. Abelha, Pedro & Leiser, Simon & Pels, Jan & Cieplik, Mariusz. (2022). Combustion properties of upgraded alternative biomasses by washing and steam explosion for complete coal replacement in coal-designed power plant applications. *Energy.* 248. 123546. 10.1016/j.energy.2022.123546.
16. P.J. de Wild, W.J.J. Huijgen, "Solvent-Based Biorefinery of Lignocellulosic Biomass", ECN report ECN-B--15-001, via TNO repository <https://publications.tno.nl/publication/34627959/3VjG28/b15001.pdf>
17. Jitka Hrbek, Christoph Pfeifer, Donatella Barisano, Berend Vreugdenhil, Joakim Lundgren, Reinhard Rauch, Xhesika Korovesi and Enrico Catizzone, "Gasification applications in existing infrastructures for production of sustainable value-added products", IEA BIOENERGY: TASK 33 report 2021, via https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/01/Gasification_integration_report.pdf
18. Dina Bacovsky, Christa Dißauer, Bernhard Drosch, Matthias Kuba, Doris Matschegg, Christoph Schmidl, Elisa Carlon, Fabian Schipfer, and Florian Kraxner, "How bioenergy contributes to a sustainable future" IEA Bioenergy report 2023 via <https://www.ieabioenergyreview.org/>
19. Oksana Golovko, Lutz Ahrens, Jenny Schelin, Mattias Söregård, Karl-Johan Bergstrand, Håkan Asp, Malin Hultberg, Karin Wiberg, Organic micropollutants, heavy metals and pathogens in anaerobic digestate based on food waste, *Journal of Environmental Management*, Volume 313, 2022, 114997, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114997>
20. Brian K. Gullett, Abderrahmane Touati, and Michael D. Hays, PCDD/F, PCB, HxCBz, PAH, and PM Emission Factors for Fireplace and Woodstove Combustion in the San Francisco Bay Region, *Environmental Science & Technology* 2003 37 (9), 1758-1765, DOI: 10.1021/es026373c

21. Senem Ozgen, "Particulate Matter Emission Reduction from Pellet Boilers: Status, Potentiality and Challenges", Chem. Eng. Transitions, 92/2022.
22. Pedro Abelha, Carlos Mourão Vilela, Pavlina Nanou, Michiel Carbo, Arno Janssen, Simon Leiser, "Combustion improvements of upgraded biomass by washing and torrefaction", Fuel, Volume 253, 2019, Pages 1018-1033, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.050>.
23. Fengel, D., & Wegener, G. (1983). Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: Walter de Gruyter.
24. Noll, M., & Jirjis, R. (2012). Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. Applied microbiology and biotechnology, 95(3), 551- 563.

Hoofdstuk 9:

- [1] Nationaal Plan Energiesysteem, Ministerie van Economische Zaken, 2023, [Nationaal Plan Energiesysteem | Rapport | Rijksoverheid.nl](#)
- [2] Christensen, P. A., et al. (2022). "Risk Management over the Life Cycle of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles." Fabig Newsletter(84): 5-27.
- [3] ExpertgroepBatterijen (2022). "Actieagenda Batterijsystemen." Retrieved 28-10-2022, from <https://batterycompetencecluster.nl/nieuws/actieagenda-batterijsystemen-aangeboden-aan-tweede-kamer>.
- [4] Liu, Y. and X. Huang (2021). "Fire Risk of Transporting and Storing Massive Li ion Batteries." Fabig Newsletter(82): 6-16.
- [5] Tennet, <https://www.strategy.nl/post/34-gw-aan-batterijprojecten-in-beeld-bij-netbeheerders-per-eind-februari-2023>, bezocht: 11-03-2025.
- [6] RIVM, <https://www.rivm.nl/elektromagnetische-velden>, 05-09-2024.
- [7] Kennisplatform elektromagnetische velden, <https://www.kennisplatform.nl/blootstellingslimieten-voor-elektromagnetische-velden/>, bezocht 11-03-2025.
- [8] Kennisplatform elektromagnetische velden, <https://www.kennisplatform.nl/elektrogevoeligheid/>, bezocht 11-03-2025.
- [9] Factsheet Laagfrequent Geluid, RIVM, <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2020-09/Factsheet%20laagfrequent%20geluid.pdf>
- [10] RIVM, <https://www.rivm.nl/laagfrequent-geluid-en-bromtonen/hinder-en-gezondheidsklachten>, bezocht 11-03-2025.
- [11] NIPV 2023, H. Brans, Verkenning toekomstige batterijtypen en veiligheid.
- [12] RHDHV 2023, G. Koolman, M. Seyfi, B. van den Broek, G. van den Broek Humphrey, T. Bakker, Onderzoek Veiligheid Energie Opslag Systemen
- [13] Soeteman-Hernández L.G., Blanco C.F., Koese M., Sips J.A.M., Noorlander C.W., Peijnenburg J.G.M., Life cycle thinking and safe-and-sustainable-by-design approaches for the battery innovation landscape, iScience, 26 (3), 2023.
- [14] RIVM, Verkenning van gevaarlijke stoffen in de energietransitie, 2023, Rapport 2023-0310.

- [15] RIVM, Nieuwe schatting aantal kinderen met leukemie bij bovengrondse hoogspanningslijnen, 2025, Rapport 2024-0196

Hoofdstuk 10:

- [1] RIVM rapport 2023-0369. Liquid hydrogen carriers: an overview of technical aspects and SVHC properties
- [2] NIPV Toolbox Waterstof
- [3] OECD library
- [4] Berenschot. Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers
- [5] Rijksoverheid. Kamerbrief bij rapport studie MKBV Waterstofdragers
- [6] OECD. Risk based regulatory design for the safe use of hydrogen
- [7] NLHydrogen. Overzicht publicaties
- [8] Port of Rotterdam. Haven van de toekomst - waterstof
- [9] SmartPort. Handelingsperspectief voor schoner, stiller en veiliger Rotterdamse haven
- [10] TNO. 15 dingen die je moet weten over waterstof
- [11] PGS 35. Waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen
- [12] ISPT. Safety Aspects of green hydrogen production on industrial scale
- [13] ISPT. New report sheds light on industrial-scale green hydrogen safety
- [14] AnteaGroup, Onderzoeksrapport Safe-by-design in relatie tot de energietransitie, 2022
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/01/28/onderzoeksrapport-safe-by-design-in-relatie-tot-de-energietransitie>
- [15] NIPV Scenariokaarten Alle scenariokaarten – Scenarioboeken

Hoofdstuk 11:

- [1] Rapporten Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.
<https://www.ipcc.ch/reports>
- [2] L. van der Net, N. Staats, P.W.H.G. Coenen, J.D. Rienstra, P.J. Zijlema, E.J.M.M. Arets, K. Baas, S.A. van Baren, R. Dröge, K. Geertjes, E. Honig, B. van Huet, R.A.B. te Molder, J.A. Montfoort, T.C. van der Zee, M.C. van Zanten.
 Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990–2022 National Inventory Report 2024, RIVM report 2024-0017, DOI 10.21945/RIVM-2024-0017.
<https://www.rivm.nl/publicaties/greenhouse-gas-emissions-in-netherlands-1990-2022>
- [3] Naar een gezonde leefomgeving in een veranderend klimaat: themaverkenning bij de Volksgezondheid Toekomst Verkenning 2024 – RIVM-rapport 2024-0048.
- [4] Klimaat- en Energieverkenning 2022, PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag, 2022, PBL-publicatienummer: 4838
- [5] CO₂-opslag in Nederland: het is noodzakelijk en het kan veilig (whitepaper), EBN, Utrecht 7 Juli 2022.
<https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/co2-opslag-in-nederland-het-is-noodzakelijk-en-het-kan-veilig/>

- [6] Paul Noothout, Frank Wiersma, Omar Hurtado, Doug Macdonald, Jasmin Kemper, Klaas van Alphen.
CO₂ Pipeline infrastructure – lessons learnt, Energy Procedia 63 (2014) 2481 – 2492.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.271>
- [7] Shu-Yang Liu, Bo Ren, Hang-Yu Li, Yong-Zhi Yang, Zhi-Qiang Wang, Bin Wang, Jian-Chun Xu, Ramesh Agarwal.
CO₂ storage with enhanced gas recovery (CSEGR): A review of experimental and numerical studies, Petroleum Science, Volume 19, Issue 2, April 2022, Pages 594-607.
<https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.12.009>
- [8] Vandeweyer, V., van der Meer, B., Hofstee, C., Mulders, F., D'Hoore, D., Graven, H., (2011).
Monitoring the CO₂ injection site: K12-B. Energy Proc. 4, 5471–5478.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.532>
- [9] Vandeweyer, Vincent and Hofstee, Cor and Pelt, van, Wouter and Graven, Hilbrand.
CO₂ Injection at K12-B, the Final Story (December 31, 2020).
Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference 15-18 March 2021.
<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3820865>
- [10] Bart W. Terwel, Emma ter Mors, Dancker D.L. Daamen.
It's not only about safety: Beliefs and attitudes of 811 local residents regarding a CCS project in Barendrecht, International Journal of Greenhouse Gas Control 9 (2012) 41-51.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.02.017>
- [11] Emma ter Mors, Esther van Leeuwen, Christine Boomsma and Renate Meier.
Media Coverage of Carbon Capture and Storage: An Analysis of Established and Emerging Themes in Dutch National Newspapers, Energies 2023, 16, 2056.
<https://doi.org/10.3390/en16042056>
- [12] Kevin Broecks, Corin Jack, Emma ter Mors, Christine Boomsma, Simon Shackley.
How do people perceive carbon capture and storage for industrial processes? Examining factors underlying public opinion in the Netherlands and the United Kingdom.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102236>
- [13] Christine Boomsma, Emma ter Mors, Corin Jack, Kevin Broecks, Corina Buzoianu, Diana M. Cismaru, Ruben Peuchen, Pim Piek, Diana Schumann, Simon Shackley, Jasmin Werker.
Community compensation in the context of Carbon Capture and Storage: Current debates and practices. International Journal of Greenhouse Gas Control 101 (2020) 103-128.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103128>
- [14] Read A., Gittins C., Uilenreef J., Jonker T., Neele F., Belfroid S., Goetheer E., Wildenborg T.
Lessons from the ROAD project for future deployment of CCS, International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 91, December 2019, 102834.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102834>

- [15] 'Linking the Chain' (integrated CATO2 knowledge prepares for the next step in CO2 Capture and Storage'), R. de Vos ed., CPI Zutphen, 2014, ISBN 978 90 822377 0 2.
https://co2-cato.org/publish/pages/3764/2014_book_linking_the_chain.pdf
- [16] <https://ieaghg.org/publications-library/>
- [17] <https://www.dnv.com/focus-areas/ccs/safety/>
- [18] <https://nccs.no/>
- [19] Patricia Loria, Matthew B.H. Bright, Lessons captured from 50 years of CCS projects, The Electricity Journal, Volume 34, Issue 7, August–September 2021, 106998
<https://doi.org/10.1016/j.tej.2021.106998>
- [20] 'Shell en Total trekken zich deels terug uit cruciaal CO₂-opslagproject, overheid springt bij', NRC 22 April 2025, Chris Hensen.
- [21] <https://www.aramis-ccs.com/>
- [22] <https://www.porthosco2.nl/>
- [23] <https://co2next.nl/nl/about/>
- [24] <https://www.delta-rhine-corridor.com/nl>
- [25] <https://www.wkr.nl/adviezen/co2-verwijdering>
- [26] <https://natuurenmilieu.nl/publicatie/visie-op-koolstofverwijdering/>
- [27] <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2025/03/14/bijlage-1-minvkgg-routekaart-koolstofverwijdering>
- [28] <https://rvszoekstelsysteem.rivm.nl/stof/detail/858>
- [29] <https://www.rivm.nl/probitrelaties/kooldioxide>
- [30] <https://www.hse.gov.uk/carboncapture/carbondioxide.htm>
- [31] <https://www.rivm.nl/documenten/evaluation-toxicity-co2>
- [32] <https://www.ocap.nl/>
- [33] Spoelstra, M. en Rosmuller, N. Kennisbundel Kooldioxide, Instituut Fysieke Veiligheid (2022).
<https://nipv.nl/wp-content/uploads/2022/03/20220215-IFV-Kennisbundel-CO2.pdf>
- [34] Gale, J.; Davison, J. Transmission of CO₂—Safety and economic considerations. Energy 2004, 29, 1319–1328.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.090>
- [35] Kay Damen, Andre Faaij, Wim Turkenburg. Health safety and environmental risks of underground CO₂ storage, overview of mechanisms and current knowledge, Climatic Change (2006) 74: 289–318.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-005-0425-9>
- [36] Koornneef, J.; Spruijt, M.; Molag, M.; Ramirez, A.; Faaij, A.; Turkenburg, W., Uncertainties in risk assessment of CO₂ pipelines. Energy Procedia 2009, 1, 1587–1594.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.208>
- [37] Koornneef J, Spruijt M, Molag M, Ramírez A, Turkenburg W, Faaij A. Quantitative risk assessment of CO₂ transport by pipelines--a review of uncertainties and their impacts. Journal of Hazardous Materials, 2010 May 15;177(1-3):12-27.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.068>

- [38] M.M.J. Knoope, I.M.E. Raben, A. Ramírez, M.P.N. Spruijt, A.P.C. Faaij,
The influence of risk mitigation measures on the risks, costs and routing of CO₂ pipelines, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 29, October 2014, Pages 104-124
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.08.001>
- [39] Molag, M., and I. M. E. Raben.
"Externe veiligheid onderzoek CO₂-buisleiding bij Zoetermeer." TNO, Apeldoorn (2006): 46.
- [40] <https://www.rivm.nl/documenten/rekenvoorschrift-omgevingsveiligheid-module-v-versie-januari-2025>
- [41] Matteo Vitali, Cristina Zuliani, Francesco Corvaro, Barbara Marchetti, Fabrizio Tallone,
Statistical analysis of incidents on onshore CO₂ pipelines based on PHMSA database,
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 77, July 2022, 104799
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104799>
- [42] Dongmin Xi, Hongfang Lu, Yun Fu, Shaohua Dong, Xinmeng Jiang, John Matthews.
Carbon dioxide pipelines: A statistical analysis of historical accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 84 (2023), 105129,
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105129>
- [43] Andrew Duguid, Jared Hawkins, Laura Keister,
CO₂ Pipeline risk assessment and comparison for the midcontinent United States,
International Journal of Greenhouse Gas Control 116 (2022) 103636,
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103636>
- [44] J. SONKE, B.H. Morland, G. Moulie, M.S. Franke,
Corrosion and chemical reactions in impure CO₂.
International Journal of Greenhouse Gas Control 133, March 2024, 104075.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104075>
- [45] Matteo Vitali, Francesco Corvaro, Barbara Marchetti, Alessandro Terenzi.
Thermodynamic challenges for CO₂ pipelines design: A critical review on the effects of impurities, water content, and low temperature.
International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 114, February 2022, 103605.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2022.103605>
- [46] Mack, A., Spruijt, M.P.N. Validation of Open Foam for heavy gas dispersion applications, *Journal of Hazardous Materials* 262, 504-516 2013.
- [47] A. Mack, M.P.N. Spruijt. CFD dispersion investigation of CO₂ worst case scenarios including terrain and release effects. *Energy Procedia* 51 (2014) 363–372.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.043>

- [48] Christopher J. Wareing, Michael Fairweather, Samuel A.E.G. Falle, Robert M. Woolley.
Validation of a model of gas and dense phase CO₂ jet releases for carbon capture and storage application. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 20 (2014) 254–271.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.11.012>
- [49] Russell Cooper, Julian Barnett, Pipelines for transporting CO₂ in the UK, *Energy Procedia* 63 (2014) 2412 – 2431.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.264>
- [50] Mohammad Ahmad, Barbara Lowesmith, Gelein De Koeijer, Sandra Nilsen, Henri Tonda, Carlo Spinelli, Russell Cooper, Sigmund Clausen, Renato Mendes, Onno Florisson.
COSHER joint industry project: Large scale pipeline rupture tests to study CO₂ release and dispersion.
International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 37, June 2015, Pages 340-353.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.04.001>
- [51] Robert M. Woolley, Michael Fairweather, Christopher J. Wareing, Samuel A.E.G. Falle, Haroun, Mahgerefteh, Sergey Martynov, Solomon Brown, Vagesh D. Narasimhamurthy, Idar E. Stovrik, Lene Sælen, Trygve Skjold, Ioannis G. Economou, Dimitrios M. Tsangaris, Georgios C. Boulougouris, Nikolaos Diamantonis, Laurence Cusco, Mike Wardman, Simon E. Gant, Jill Wilday, Yong Chun Zhang, Shaoyun Chen, Christophe Proust, Jerome Hebrard and Didier Jamois. CO₂PipeHaz: quantitative hazard assessment for next generation CO₂ pipelines. *Energy Procedia* 63 (2014) 2510 – 2529.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.274>
- [52] Sergey Martynov, Solomon Brown, Haroun Mahgerefteh, Vikram Sundara, Shaoyun Chen, Yongchun Zhang, Modelling three-phase releases of carbon dioxide from high-pressure pipelines *Process Safety and Environmental Protection* 92 (2014) 36–46.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2013.10.004>
- [53] M.M. van der Voort, R.M.M. van Wees, J.M. Ham, M.P.N. Spruijt, A.C. van den Berg, P.C.J. de Bruijn, P.G.A. van Ierschot, An experimental study on the temperature dependence of CO₂ explosive evaporation, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (July 2013) 26(4):830–838.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.02.016>
- [54] <https://www.dnv.com/software/services/plant/co2-challenges-in-safety-modelling/>
- [55] <https://www.gexcon.com/blog/co2-hazard-modelling-with-effects/>
- [56] Vitali, M., Zuliani, C., Corvaro, F., Marchetti, B., Terenzi, A.; Tallone, F.
Risks and Safety of CO₂ Transport via Pipeline: A Review of Risk Analysis and Modeling Approaches for Accidental Releases. *Energies* 2021, 14, 4601.
<https://doi.org/10.3390/en14154601>

- [57] Federica Tamburini, Francesco Zanobetti, Mariasole Cipolletta, Sarah Bonvicini, Valerio Cozzani.
State of the art in the quantitative risk assessment of the CCS value chain.
Process Safety and Environmental Protection, Volume 191, Part B, November 2024, Pages 2044-2063.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.066>
- [58] Enbin Liu, Xudong Lu, and Daocheng Wang
A Systematic Review of Carbon Capture, Utilization and Storage: Status, Progress and Challenges, Energies 2023, 16, 2865.
<https://doi.org/10.3390/en16062865>
- [59] S.B. Fredriksen, Klaus-J. Jens, Oxidative degradation of aqueous amine solutions of MEA, AMP, MDEA, Pz: A review, Energy Procedia 37 (2013) 1770 – 1777.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.053>
- [60] Andrzej Rusin, Katarzyna Stolecka, An Analysis of Hazards Caused by Emissions of Amines from Carbon Dioxide Capture Installations, Pol. J. Environ. Stud. Vol. 25, No. 3 (2016), 909-916.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/61646>
- [61] Hajime Kimura, Toshiaki Kubo, Masatoshi Shimada, Hideo Kitamura, Koshito Fujita, Kensuke Suzuki, Kenji Yamamoto, Makoto Akai, Environmental risk assessment of MEA and its degradation products from Post-Combustion CO₂ Capture Pilot Plant: Drafting technical guidelines.
Energy Procedia 114 (2017) 6490 – 6500.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1785>
- [62] Gary T Rochelle, Thermal degradation of amines for CO₂ capture, Current Opinion in Chemical Engineering 2012, 1:183–190.
<https://doi.org/10.1016/j.coche.2012.02.004>
- [63] Gary T. Rochelle, Air pollution impacts of amine scrubbing for CO₂ capture, Carbon Capture Science & Technology, Volume 11, June 2024, 100192.
<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2024.100192>
- [64] Vanja Buvik, Solrun J. Vevelstad, Peter Moser, Georg Wiechers, Ricardo R. Wanderley, Juliana Garcia Moretz-Sohn Monteiro, Hanna K. Knuutila, Degradation behaviour of fresh and pre-used ethanolamine, Carbon Capture Science & Technology 7 (2023) 100110.
<https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100110>
- [65] Daniel Mullen, Lucas Braakhuis, Hanna Katariina Knuutila, Jon Gibbins, and Mathieu Lucquiaud.
Monoethanolamine Degradation Rates in Post-combustion CO₂ Capture Plants with the Capture of 100% of the Added CO₂, Industrial & Engineering Chemistry Research 2024, 63 (31), 13677-13691.
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c01525>
- [66] Amanda E. Poste, Merete Grung, Richard F. Wright
Amines and amine-related compounds in surface waters: A review of sources, concentrations and aquatic toxicity, Science of the Total Environment 481 (2014) 274–279.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.066>

- [67] Patricia Luis, Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives, *Desalination* Volume 380, 15 February 2016, Pages 93-99.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.004>
- [68] Magdalena Strojny, Paweł Gładysz, Dawid P. Hanak, Wojciech Nowak. A Comparative analysis of CO₂ capture technologies using amine absorption and calcium looping integrated with natural gas combined cycle power plant, *Energy* Volume 284, 1 December 2023, 128599.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128599>
- [69] Frederic Clarens, José Jorge Espí, Mario Rafael Giraldo, Miquel Rovira, Lourdes F. Vega.
Life cycle assessment of CaO looping versus amine-based absorption for capturing CO₂ in a subcritical coal power plant, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 46 (2016) 18–27.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.12.031>
- [70] Magdalena Strojny, Paweł Gładysz, Wojciech Nowak
Preliminary comprehensive assessment of CO₂ utilization versus CO₂ storage in Poland.
Sustainable Energy Technologies and Assessments 66 (2024) 103817.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103817>
- [71] Seul-Yi Lee, Soo-Jin Park, A review on solid adsorbents for carbon dioxide capture, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 23, 25 March 2015, Pages 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.09.001>
- [72] Olusola Olaitan Ayelerua, Helen Uchenna Modekwe, Oluwatayo Racheal Onisuru, Chinemerem Ruth Ohoro, Christianah Aarinola Akinnawo, Peter Apata Olubambi, Adsorbent technologies and applications for carbon capture, and direct air capture in environmental perspective and sustainable climate action, *Sustainable Chemistry for Climate Action* Volume 3, 2023, 100029.
<https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100029>
- [73] Xiang Yun Debbie Soo, Johnathan Joo Cheng Lee, Wen-Ya Wu, Longgang Tao, Cun Wang, Qiang Zhu, Jie Bu, Advancements in CO₂ capture by absorption and adsorption: A comprehensive review, *Journal of CO₂ Utilization* 81 (2024) 102727.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>
- [74] Paul Feron, Growing interest in CO₂ capture from air, *Greenhouse Gas Sci Technol.* 9:3–5 (2019). <https://doi.org/10.1002/ghg>
- [75] Radu Custelcean, Direct Air Capture of CO₂ Using Solvents, *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2022. 13:217–34.
<https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-092120-023936>
- [76] Ali Kiani, Will Conway, Mohamed H. Abdallah Graeme Puxty, Ann-Joelle Minor, Gerard Kluivers, Robert Bennett and Paul Feron, A study on degradation and CO₂ capture performance of aqueous amino acid salts for direct air capture applications;
<https://doi.org/10.1002/ghg.2302>
- [77] Wang, J., Fu, R., Wen, S. et al. Progress and current challenges for CO₂ capture materials from ambient air. *Adv Compos Hybrid Mater* 5, 2721–2759 (2022); <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00567-3>

- [78] Turgut M. Gür, Carbon Dioxide Emissions, Capture, Storage and Utilization: Review of Materials, Processes and Technologies, *Progress in Energy and Combustion Science* 89 (2022) 100965. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100965>
- [79] Magdalena Strojny, Paweł Gładysz, Wojciech Nowak Preliminary comprehensive assessment of CO2 utilization versus CO2 storage in Poland. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 66, June 2024, 103817. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103817>
- [80] Eric van Oort (EVO Energy Consulting), Qualitative Risk Assessment of Long-Term Sealing Behavior of Materials and Interfaces in Boreholes KEM-18 – Final Report, 2022. https://kemprogramma.nl/file/download/7a5e459b-2a87-468a-98db-025d2140b870/kem-18finalreport_geredigeerd.pdf
- [81] CEMENTTEGRITY Final Report. <https://static1.squarespace.com/static/5672ab009caddb60e553e3529/t/682f62470335916d72218c92/1747935818710/CEMENTTEGRITY+Final+report+v2.pdf>
- [82] SHARP Final Report. [Final report from the SHARP project – ACT](https://return-act.eu/wp-content/uploads/2025/01/D1.7-Final-report.pdf)
- [83] RETURN Final Report. <https://return-act.eu/wp-content/uploads/2025/01/D1.7-Final-report.pdf>
- [84] Fadel, I.E.A.M. Nieuw seismometersysteem voor real-time monitoring in Noordzee. <https://www.utwente.nl/nieuws/2025/6/339226/nieuw-seismometersysteem-voor-real-time-monitoring-in-noordzee>
- [85] Joonsang Park, Lars Grande and Thea Sveva Faleide, Powerpoint presentation for Q-Fibre Quantitative Strain Monitoring for Well and Seal Integrity through Wellbore Fibre Optic Cables. <https://static1.squarespace.com/static/5672ab009caddb60e553e3529/t/66e033a45164193b9576be0c/1725969317807/CETP+Q-Fibre+at+ACT-CETP+at+RCN.pdf>

Hoofdstuk 12:

- [1] W. Adviseurs, "Grenswaarde zomercomfort nieuwe woningen in Bouwbesluit," 2019. [Online]. Available: [https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/08/Rapport Grenswaarden zomercomfort nieuw woningen in Bouwbesluit.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/08/Rapport%20Grenswaarden%20zomercomfort%20nieuw%20woningen%20in%20Bouwbesluit.pdf)
- [2] W. Kornaat, W. Borsboom, T. Kleinepier, and R. Van Strien, "Vocht en schimmelvorming in woningen Bevindingen en handreikingen op basis van WoON2018 en Energiemodule 2018," 2020. [Online]. Available: <https://www.woningmarktbeleid.nl/onderwerpen/aanpak-vocht-en-schimmel/alle-illustratieve-artikelen/bevindingen-en-handreikingen-van-tno-abf-research-en-ggd-amsterdam>
- [3] Á. Broderick, M. Byrne, S. Armstrong, J. Sheahan, and A. M. Coggins, "A pre and post evaluation of indoor air quality, ventilation, and thermal comfort in retrofitted co-operative social housing," *Build. Environ.*, vol. 122, pp. 126–133, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.05.020.
- [4] J. Van Dongen and H. Vos, "Gezondheidsaspecten van woningen in Nederland," 2007.
- [5] W.F. de Gids, "Ventilatie, achtergrond van de eisen," 2011. [Online]. Available: www.rvo.nl

- [6] P. Jacobs, "Openbaar eindrapport VentKook Ventilatiesysteem met goede kookafzuiging," 2018. [Online]. Available: <https://projecten.topsectorenergie.nl/storage/app/uploads/public/5c8/683/2e9/5c86832e9f0d8059461253.pdf>
- [7] M. G. L. C. Loomans, L. Hensen Centnerová, P. Jacobs, T. Beuker, and W. Atmar, "Programma van Eisen Gezonde Woningen 2022," pp. 1–48, 2022, [Online]. Available: https://www.binnenklimaattechniek.nl/wp-content/uploads/2022/07/Digitaal_PVE-Gezonde-Woningen_BinnenklimaatTechniek25.pdf
- [8] P. Jacobs, M. D., A. Beelen, H. J. M. Cornelissen, A. Topal, and O. Vijlbrief, "Health effects in EU from cooking on gas - Phase II Field study," 2023. [Online]. Available: <https://publications.tno.nl/publication/34641471/zD0Xiz/TNO-2023-R11809.pdf>
- [9] P. Jacobs and E. Cornelissen, "Efficiency of recirculation hoods with regard to PM2.5 and NO2," in *Healthy Buildings 2017 conferentie*, 2017, no. July.
- [10] H. L. Davies *et al.*, "Environmental Science Processes & Impacts indoor air chemistry following cooking activities †," 2023, doi: 10.1039/d3em00167a.
- [11] I. T. S. Yu, Y. L. Chiu, J. S. K. Au, T. W. Wong, and J. L. Tang, "Dose-response relationship between cooking fumes exposures and lung cancer among Chinese nonsmoking women," *Cancer Res.*, vol. 66, no. 9, pp. 4961–4967, 2006, doi: 10.1158/0008-5472.CAN-05-2932.
- [12] M. E. Spiekman, S. U. Boess, O. G. Santin, T. J. H. Rovers, and N. Nelis, "Effects of energy-efficient renovation concepts on occupant behaviour and hence building performance," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1085, no. 1, p. 25DUMMY, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1085/1/012023.
- [13] Y. Shang and F. Tariku, "Hempcrete building performance in mild and cold climates: Integrated analysis of carbon footprint, energy, and indoor thermal and moisture buffering," *Build. Environ.*, vol. 206, no. June, p. 108377, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108377.
- [14] J. Kurnitski, T. Kalamees, J. Palonen, L. Eskola, and O. Seppänen, "Potential effects of permeable and hygroscopic lightweight structures on thermal comfort and perceived IAQ in a cold climate," *Indoor Air*, vol. 17, no. 1, pp. 37–49, 2007, doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00447.x.
- [15] O. C. G. Adan, *On the fungal defacement of interior finishes*, vol. 1, no. 1994. 1994. doi: 10.6100/IR427806.
- [16] W. B. Rose and D. J. McCaa, "Temperature and moisture performance of wall assemblies with fiberglass and cellulose insulation," *Therm. Perform. Exter. Envel. Whole Build.*, 1998.
- [17] Onderzoeksraad voor Veiligheid, "Koolmonoxide: Onderschat en onbegrepen gevaar," 2015.
- [18] NEN, "Brandclassificatie van bouwproducten en bouwdelen - Deel 1: Classificatie op grond van resultaten van beproeving van het brandgedrag," 2019.

Bijlage 1 volledige beleidsmatrices

In deze bijlage staan de volledige beleidsmatrices weergegeven, inclusief de kolommen 'organisatievraagstuk' en 'juridisch vraagstuk'. In de matrices staan per technisch onderwerp de beleidsvragen die naar voren zijn gekomen tijdens interviews en tijdens de beleidssessies die in april 2024 zijn georganiseerd (zie hoofdstuk 2). De beleidsvragen zijn zaken die voor de aanwezigen belangrijk waren. Daarbij hadden de interviews en beleidssessies een verkennend karakter en zijn alleen vertegenwoordigers van organisaties gevraagd. De resultaten geven dus geen uitputtend beeld en er heeft geen feitencheck plaatsgevonden.

Matrices met de beleidsvragen per techniek. In de kolommen staat de beleidscyclus, in de rijen het soort vraagstuk. Dit betreft de volgende technieken: windenergie, zonne-energie, elektrificatie, waterstof en andere energiedragers, geothermie, CO₂-afvang en opslag, kernenergie, biomassa en de gebouwde omgeving. Zie hoofdstuk 2 van het rapport voor een beschrijving van hoe deze matrices tot stand zijn gekomen.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Windenergie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<p>Continue behoefte aan nieuwe kennis vanwege ontwikkeling van nieuwe niche-technieken. Ook kijken naar ontwikkelingen in het buitenland en naar andere technieken (is een radarsysteem even veilig als knipperlichten?)</p> <p>Is in normen opgenomen binnen hoeveel tijd een turbine stilgelegd moet kunnen worden? Zo nee: zou dat wenselijk zijn?</p> <p>De huidige geluidsnormen zijn jaargemiddeld. Moet er een mogelijkheid komen om piekniveaus mee te nemen?</p> <p>Effecten van turbinecoatings: verwachting dat ze geen gevaar vormen, maar in het kader van het voorzorgprincipe verwijzen</p>	<p>Windturbines in elkaars nabijheid kunnen de luchtcirculatie beïnvloeden, regelgeving daarover ontbreekt. Hoe om te gaan met circulariteit en hergebruik? Daarvoor is nu niks vastgelegd.**</p>		

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Windenergie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		actiegroepen vaak hiernaar. De samenstelling van coatings is niet bekend.			
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>	Veranderingen in de windverdeling in de loop der jaren (klimaatverandering?) zouden kunnen leiden tot veranderingen in de modellering.	Er is behoefte aan duidelijkheid ten aanzien van lokaal/regionaal versus landelijk: landelijke regels en dan regionaal handelingsperspectief bieden?		
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Behoeft aan inzicht in benuttingsmogelijkheden ruimte: mag je in de contour rondom een windturbine (waar niet gebouwd mag worden) andere installaties of functies neerzetten?	Hoe kan een turbine veilig uitgeschakeld worden? (algemeen probleem bij onbemande installaties). Stillere windturbines stimuleren. Bij ijsafzetting in de winter zou je turbines kunnen stopzetten als er gevaar is voor afvallend ijs, of parkeren/aanwezigheid in de buurt van windturbines kunnen verbieden.	In geval van een calamiteit is duidelijkheid gewenst: wie is verantwoordelijk?	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Hoeveel gezondheidswinst leveren windturbines op? Bijvoorbeeld in	Het is niet mogelijk om hinder vast te leggen in normen, doordat het zo		

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Windenergie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		luchtkwaliteit (door minder fossiele/andere energieopwekking met navenante uitstoot). Wens voor slimme monitoring: zou dit kunnen leiden tot vroegtijdig signaleren van materiaalfalen of suboptimaal presteren? Gemiddeld genomen gezondheidswinst, maar lokaal wellicht niet (vanwege hinder)? Toetsen door ervaringen van huidige windparken te verzamelen en te analyseren, inclusief klachten.	subjectief is.*** Wel komt hinder tot uiting in vragenlijsten, dus wens tot monitoring.		

* Perceptie is een belangrijk onderwerp en dan met name:

- onrust rondom gezondheidseffecten. Als experiment is genoemd dat het interessant zou zijn als je mensen de mogelijkheid zou geven om een knop in te drukken als ze overlast ervaren. Als dat mensen het gevoel geeft dat ze grip hebben, wat doet dat met ervaren hinder?
- dat het lijkt alsof we ook de keuze hebben om per techniek te bepalen: het is vervelend, dus we doen het maar niet. Maar die houding heeft ook risico's, want als we niks doen is het alternatief voortschrijdende klimaatverandering. Het Rijk moet de bevolking voorlichten en ook aangeven dat we als samenleving bepaalde keuzes moeten maken.

** in de gondel zitten kritieke grondstoffen/ materialen. Op dit moment worden alle kleine turbines vervangen door grotere. De kleinere gaan allemaal naar het buitenland. Daarmee raakt Nederland veel materiaal kwijt.

*** hinder: licht, geluid, inbreuk leefomgeving, aanblik in het landschap.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Zonne-energie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	Regelgeving mist voor het gebruiken van zonnepanelen als dakbekleding, op gevels; bepalen van afstandsnormen voor panelen op daken. Toepassing van zonnepanelen in industriële omgeving: wens om integraal te kijken, dus in relatie tot andere risicobronnen. Ontwikkeling van nieuwe typen PV-systemen volgen. Bijvoorbeeld perovskiet (loodhoudend, punt van aandacht), CdTe en CIGS. Natuurbrandrisico's in zonne-weides?	Wens voor periodieke keuring en vergunningverlening voor PV-systemen (kabels en stekkers verouderen sneller bij grote hitte onder de panelen en aan de buitenlucht). Regelgeving moet worden aangepast: niet meer enkele grote leveranciers van elektriciteit, maar vele kleinere spelers. Regelgeving is nu gedecentraliseerd. Er is behoefte aan duidelijke, landelijke regels. Hoe om te gaan met circulariteit en hergebruik? Nu alleen downcycling en eventueel export (voor hergebruik of afvalverwerking).	Wens voor invoering aanduiding bij meterkast van PV en EOS (dan weet de brandweer wat er in huis is). Eisen stellen aan installateurs. Certificering is op dit moment niet verplicht. Betrek verzekeraars en installateurs bij normstelling (verzekeraars stellen wel eisen aan PV-systemen).	
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>	Wens om keten als geheel te bekijken: ook EOS of waterstofopslag, waarin de energie wordt opgeslagen.	Wens: safe- (and sustainable) by-design principes stimuleren.		
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Wens om meer internationaal samen te	Brandcompartimentering (bouwbesluit) wordt voor	Hoe om te gaan met keteneffecten van	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Zonne-energie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		werken (bijvoorbeeld vanuit het Renewable Energy Directive). Veel beleidsvragen zijn namelijk niet specifiek voor Nederland.	zonnepanelen niet altijd gevolgd (panelen over meerdere compartimenten heen).	uitval, wie doet wat en beschikken alle verantwoordelijke overheden over voldoende kennis? Hoe om te gaan met gedeelde PV-systemen (bijvoorbeeld met de burens): wie is verantwoordelijk bij een incident? Nazorg na brand regelen: opruimen glasdeeltjes Verhoging capaciteit van materieel dat nodig is bij brand (hoogwerkers, speciale voertuigen).	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Wens om kennis te gebruiken, die is opgedaan bij incidenten. Daarom niet alleen registreren, maar ook analyseren. Hele levenscyclus van een zonnepaneel volgen. Op dit moment geen traceerbaar kenmerk op panelen.			

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Kernenergie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<p>Bij SMR's zou certificering van een bepaald ontwerp kunnen helpen in een kostenreductie wanneer er een tweede, vergelijkbare reactor wordt gebouwd. Die is immers al gecertificeerd, waardoor het ontwerp minder controlestappen behoeft. Is certificering daarom wenselijk?</p> <p>Huidige normen zullen niet altijd afdoende zijn bij ontwikkeling van nieuwe SMR's: voor nu alleen doelstellende regelgeving hiervoor.</p> <p>Van nieuwe types small modular reactors (SMR) is nog te weinig kennis over bijvoorbeeld afval. Denk aan zoutgekoelde reactoren of Thorium-reactoren.</p>	<p>Er moeten beleidskeuzes gemaakt worden in welke richtingen NL zich wil voorbereiden: welke typen SMR's bijvoorbeeld? Als je ver vooruit probeert te plannen, hoe kun je dan een goede kosten-batenanalyses maken? Heeft Nederland de keuze om te wachten op de mogelijkheid om andere typen reactoren te bouwen?</p> <p>Welke eisen worden er gesteld aan het elektriciteitsnet: dat moet altijd werken, want koeling is de belangrijkste schakel in de veiligheid. Hoe om te gaan met economische effecten bij rampen met straling (bijvoorbeeld export ligt stil)?</p> <p>Kernenergie ook in andere regio's dan de huidige:</p>	<p>Adviesrol</p> <p>Veiligheidsregio's: vastleggen hoe en wanneer die betrokken worden bij vergunning-verlening.</p>	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Kernenergie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
			vergunningverlening moet rekening houden met omliggende industrieën, toestroom personeel en ruimtelijke ordening in de toekomst. Er is dus een brede impactanalyse nodig van de bouwfase van een reactor (op infrastructuur, huisvesting, omringende bedrijven enzovoort). Ontwikkeling van schepen op kernenergie: richtlijnen nodig in de toekomst?		
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethodiek, handreiking, et cetera</i>				
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>		Kennisontwikkeling is gewenst bij andere VR's dan Zeeland. Multidisciplinaire oefeningen van crisisscenario's vraagt om betrokkenheid van gemeenten bij deze oefeningen.	Vergunningverlening valt of staat met beschikbaarheid van kennis (en mensen): enorme operatie om alles gecertificeerd te krijgen en daardoor ontstaat een continuïteitsrisico.	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Kernenergie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
			nazorg (ook langere termijn) zou meer aandacht moeten krijgen bij oefeningen. Afvalopslag is nu afdoende geregeld, maar kan wellicht in de toekomst tegen grenzen oplopen. Wat betekent dat voor het veilig opslaan? Transport van radioactief afval zal toenemen bij extra centrales. Wat heeft dit voor consequenties?*	kernenergie ook in andere regio's dan de huidige: verantwoordelijke overheden dienen zich voor te bereiden op eventuele crisis-scenario's. In de operationele fase is er minder afstemming rondom incidentbestrijding. Er bestaat een wens om hierin meer kennisontwikkeling bij de te realiseren en training op het gebied van incidentbestrijding bij scenario's met nucleaire straling.	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>				

* Perceptie is een belangrijk onderwerp bij kernenergie. En: er zou ook meer gekeken moeten worden naar energiebesparing.

** Transport gaat door België, naar de afvalverwerker in Frankrijk, en dan weer terug naar Nederland voor opslag bij de COVRA. Stel dat er een incident zou plaatsvinden tijdens dit transport, wat zou dat dan voor consequenties kunnen hebben? Wat als België dan bijvoorbeeld zegt: op deze manier geen transport meer, er zijn aanvullende maatregelen nodig of het transport wordt tijdelijk stilgelegd?

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Geothermie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	Vereist de introductie van geothermie en de bijkomende risico's een harmonisatie met andere (industriële en publieke) activiteiten? Zo ja, hoe dan? In hoeverre kan ruimtelijke ordening stapeling van risico's voorkomen? Hoe om te gaan met het feit dat water geen gevaarlijke stof is (en dus geen milieubelastende activiteit), maar dat er wel degelijk risico's zijn? Leren van lessen uit andere landen. Bijvoorbeeld Duitsland, waar geothermie al vaker wordt toegepast dan in Nederland. wat gebeurt er met een put als een project klaar is?	Wie krijgt voorrang op levering van warmte? Hoe om te gaan met kwetsbare groepen in geval van een incident?	Gemeenten moeten meer regie op de ondergrond pakken: wat is hiervoor nodig? Wie bepaalt de leveringszekerheid van het warmtenet? Wie is bevoegd gezag bij een storing? Wie is verantwoordelijk bij een aardbeving in een gebied met meerdere putten?	Ministeries/ Vergunningverleners denken in privaat en openbaar terrein, maar in de ondergrond loopt dat door elkaar. Hoe daarmee om te gaan? Waarborgen drinkwater-kwaliteit: duidelijk vastleggen van boringsvrije zones. Heeft geothermie een plek in het Besluit Activiteiten Leefomgeving en hoe moet deze technologie (als geheel) gezien worden in het licht van het bestaande beleid en de onderliggende regelgeving over gevaarlijke stoffen?

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Geothermie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>		Wens om integraal overzicht te hebben: hoe gaat geothermie samen met andere energievormen?		
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Nog veel onzekerheid over door menselijke activiteit geïnduceerde seismiciteit bij geothermie.	Welke alternatieven zijn er beschikbaar als een geothermieput uitvalt? Kennis verbeteren bij de VR's op gebied van incidentbestrijding (lekkages, et cetera).	Is er voldoende capaciteit bij de VR in geval van een incident?	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Wens om incidenten te registreren en te evalueren. Ook nodig om modellering te blijven verbeteren.		Hoe, door wie uitgevoerd en bij wie (met welk mandaat) kunnen rapportages over monitoring van geïnduceerde seismiciteit worden neergelegd? En met welke consequenties?	

* Perceptie is belangrijk bij geothermie; gezondheidseffecten hangen onder andere af van hoe mensen betrokken zijn.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Biomassa		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<p>Het actief volgen van nieuwe ontwikkelingen (overheid loopt altijd achter bij de markt). EU-normering voor luchtkwaliteit is streng. Kunnen we wel meer biomassa gaan verbranden en toch onder die normen blijven? Biomassa-installaties zijn kleiner dan conventionele installaties en daardoor meer over het land verspreid; dat geldt dus ook voor de bijbehorende risico's. Wat betekent dit voor harmonisatie tussen verschillende (industriële) activiteiten? Hoe de risico's van voor- en natraject mee te wegen? waaronder het risico bij transport en opslag van biomassa. installatie van CO₂-melders en thermometers verplicht stellen bij installaties met/opslag van biomassa? Kan helpen bij het tijdig</p>	<p>Centraliseren van biomassa-installaties overwegen om aantal risicobronnen te verkleinen. Wens voor de invoering van een APK-achtige keuring van installaties. betere normering voor kleine verbranders en houtkachels; op dit moment geen vergunning nodig en minder strenge eisen aan emissies.*</p>		<p>Een agrariër, die op z'n eigen terrein een installatie bedrijft, valt niet onder de Arboret. Moeten voor deze situatie aanvullende eisen gesteld worden?</p>

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Biomassa		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		signaleren van broei, wat de belangrijkste oorzaak is van brand. Praktijkennis over vergassing is beperkt. Er zijn nog geen installaties in bedrijf, maar er liggen initiatieven voor.			
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>				
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Toewerken naar een expliciete afweging van financiën versus gedoogconstructies bij wettelijke normen voor toezicht, handhaving en strafnormen. wat is er geregeld voor de afvalstroom?	Installatiebeheerders beschikken over weinig vakkennis; ook bijscholing van incidentbestrijders is nodig, want ze beschikken niet altijd voldoende kennis over procesinstallaties (ontzwavelingsproces bij productie van CNG)		
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Inventarisatie van kleine biomassa-installaties (houtkachels en kleine vergisters) ontbreekt Incidentenonderzoek zou nu door leveranciers gedaan moeten worden, maar dat			

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Biomassa		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		gebeurt nauwelijks. Wens om, net als in Duitsland, door een onafhankelijk instituut, incidenten te laten onderzoeken en ervan te leren. Dat bevordert ook meer openheid rondom (leren van) incidentanalyses.			

* Zou je een katalysator op je houtkachel kunnen installeren om emissies te reduceren? En wat zijn hiervan dan eventueel de risico's (brandgevaar bijvoorbeeld)?

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Elektrificatie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	Leveringszekerheid is vanuit het oogpunt van crisisbeheersing belangrijk; hoe vertaalt zich dat in normen aan de voorkant? Sommige risico's (bijvoorbeeld van EOS'en) zijn nog niet volledig in kaart gebracht. Is de huidige normering voor thuisbatterijen adequaat? Zo nee, wat is er nog nodig (afhankelijk van schaalgrootte)?	Welke vormen van voorzorg zijn toepasbaar bij vergunningverlening als de risico's nog niet volledig in kaart zijn gebracht? als we het veiligheidsniveau in Nederland gemiddeld genomen gelijk houden, dan zijn er toch plekken in Nederland waar de veiligheid lokaal wat minder wordt. Hoe gaan we daarmee om?***	Geen causaal verband hoogspanning versus gezondheidsproblemen; verantwoordelijkheid van beleidsmakers om rekening te houden met onzekerheden. Als er nog geen wet- en regelgeving is voor een bepaalde activiteit, durf dan risicogericht te kijken (versus regelgericht).	Er bestaat een wens om incidentbestrijding op te nemen in vergunning-verlening.
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>		Er is behoefte aan meer safe-by-design qua bestrijdbaarheid van bijvoorbeeld brand bij incidenten (vooral voertuigbranden). Er is behoefte aan handvatten hoe om te gaan met de locatie van EOS'en en batterijen. Die kunnen overal staan (dak, kelder, parkeergarage) en dat	Behoeft om meer samen te werken tussen verschillende regio's, zodat er onderlinge afstemming is (en er kennisuitwisseling plaatsvindt).	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Elektrificatie		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
			stelt specifieke eisen aan crisisbeheersing.		
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Bij branden met batterijen ontstaat vervuild bluswater. Steeds vaker plaatst men (indien mogelijk) schermen en laat de brand uitbranden. Vraag is wat milieutechnisch gezien beter is: blussen of uit laten branden. In hoeverre kunnen zwerfstromen (i.r.t. EOS-en en de afstand tot gasleidingen) corrosie veroorzaken aan gasleidingen?	Er is behoefte aan meer kennis over de verscheidenheid aan batterijen, die gebruikt wordt in voertuigen. Hoe om te gaan met het voorzorgsprincipe in relatie tot transformatorhuisjes, die er al staan, vaak dicht bij bebouwing?	Behoefte aan landelijke coördinatie van vraagstukken rondom EOS'en (zoals bij hoogspanning). OD's hebben behoefte aan handvatten hoe om te gaan met EOS'en. Er spelen ook capaciteitsproblemen.	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Behoefte om incidenten goed vast te leggen**, maar ook bijna-incidenten. Dit zou bij een partij neergelegd moeten worden, inclusief de inspanning om te leren van deze (bijna-)incidenten.			

* Voor de ontwikkeling van nieuwe technieken zou je een soort societal readiness level willen inbouwen: is de samenleving klaar voor deze ontwikkeling? Analoog aan het technology readiness level. Beleving is een heel belangrijk aspect bij de energietransitie in het algemeen.

** De volgende incident-database werd tijdens de beleidssessie genoemd: [BESS Failure Event Database - EPRI Storage Wiki](#). Battery Energy Storage System Failure Incident Database. Opggericht in 2021, bevat tot nu toe (juli 2024) 88 incidenten uit Noord-Amerika, Europa, Azië en Australië.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Waterstof		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<p>Accepteren van risico's tegen welke baten: in hoeverre willen en kunnen wij aan de energievraag (ook van bijvoorbeeld Duitsland) voldoen? Welke risico's levert dit op voor delen van Nederland? Zouden er dan ergere major events kunnen zijn dan nu en zo ja, welke? En welke andere/huidige risico's vallen weg?</p> <p>Stel dat men de keuze maakt om waterstof niet ondergronds op te slaan/te vervoeren: hebben we dan voldoende de afweging op orde voor zowel de risico's/veiligheid als het ruimtebeslag?</p> <p>Hebben we de stapeling van risico's voldoende in beeld? Hoe vertaalt zich dat in de normen?</p> <p>Pilots met nieuwe technieken zijn essentieel om tijdig de nodige ervaring op te doen.</p>	<p>Er is behoefte aan een duidelijke visie op waterstofdragers: stel dat we via vlagfaciliteiten en transporteren (import/export) van energie (H₂-)dragers vanuit Nederland gaan leveren. Doen we dat dan per buisleiding, binnenvaart, over de weg of per spoor?</p> <p>Risk appetite en maatschappelijke acceptatie is lager voor nieuwe ontwikkelingen; hoe hiermee om te gaan, ook bij het creëren van ruimte (ook fysiek!) voor pilots?</p> <p>Industrie loopt voorop: hun ervaringskennis zou beleidsmakers kunnen helpen.</p>	<p>Het vrijhouden van ruimte voor de energietransitie vraagt om landelijke regie. Behoefte aan een landelijk narratief om per project op terug te kunnen vallen. Want niet elk project scoort positief voor de omwonenden, maar het moet wel altijd voldoen aan het basisveiligheidsniveau. Dat kan allemaal in dit narratief worden opgenomen. Dat zorgt voor eenduidige uitleg en risicocommunicatie. Gemeenten hebben behoefte aan een regiefunctie van het Rijk voor ontwikkelingen rondom waterstof; wat is de taak van mijn organisatie op dit onderwerp?</p>	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Waterstof		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>		Bevoegd gezag mag niet meewegen wat een bepaalde aanvraag voor een activiteit bij een Seveso-bedrijf bijvoorbeeld betekent voor transportbewegingen naar andere delen van het land. Hoe hiermee om te gaan? VR heeft vanuit crisisbeheersing behoefte aan een handreiking met basisscenario's, die zouden kunnen optreden vanwege de waterstoftechnologie. -	Omdat we nu werken met aandachtsgebieden, geeft aardgas ook ineens een groot effectgebied. Toch beschouwen we dit in het verleden als veilig. In de risicocommunicatie wekt dat verwarring. Hoe hiermee om te gaan?	
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Wat zijn de mogelijke rampscenario's, zodat men de crisisbeheersing hierop kan inrichten. Bijvoorbeeld, welke specifieke eisen aan crisisbeheersing vloeien voort uit eventueel vervoer van ammoniak door Nederland?	Behoeft aan gelijktrekken kennisniveau (bijvoorbeeld gemeenten, OD's) over aandachtsgebieden	Voor vergunningverlening zou het helpend zijn als er binnen gemeenten een sparringspartner is, die kennis heeft van omgevingsveiligheid. Wens om niet alleen de waterstofbackbone, maar ook alle op- en afritten in het systeem,	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen*		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
Waterstof		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
				aan één partij over te laten, zodat er één partij over het geheel gaat en het niet versnipperd raakt. Nagaan of de verantwoordelijkheden overal toereikend geregeld zijn. Hele ketens veranderen (bijvoorbeeld hogedruk waterstof naar lagedruk). Vallen er geen gaten in de verantwoordelijkheden?	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Behoeftte aan monitoring van de ondergrond en de integriteit van zoutkoepels. Behoeftte om ook te monitoren in hoeverre verschillende gevulde zoutcavernes elkaar wellicht beïnvloeden/ interferentie vertonen.			

* Algemeen: meer inzicht in de veiligheid van de verschillende opties binnen de energietransitie. Waar gaan we op vooruit en waar op achteruit? En: Risicoperceptie is belangrijk bij waterstof.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
CCS		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<p>Behoeftte aan kaders om te bepalen of een veld geschikt is voor CO₂-opslag, inclusief een eenduidige definitie van lekkage en een opslagcomplex.</p> <p>Hebben we de risico's van grootschaliger verwerking van CO₂ (superkritisch, wellicht met meer onzuiverheden, hoge druk) voldoende in beeld?</p> <p>Hoeveel lekkage door scheurvorming (en op welke tijdsschaal) kan optreden?</p> <p>Normen voor vrijkomen van ZZS (amines) bij CO₂-afvang (er is een ISO-norm in de maak)?</p> <p>hoe zit het met corrosie in leidingen (die sneller gaat dan in theorie verwacht werd)?</p> <p>Is er voldoende kennis over eventuele bodemdaling en over interactie van CO₂ (of vervuilingen, die aanwezig zijn in de CO₂) met de bodem?</p>	<p>Wat is acceptabel als het gaat over de hoeveelheid lekkage, vrijkomen van ZZS en corrosietempo?</p> <p>Vooralsnog ontbreekt harmonisatie in normstelling tussen verschillende landen.</p>	<p>Bevoegd gezag is versnipperd over de CCS-keten: wat betekent dit voor de verantwoordelijkheden van verschillende partijen (toezichthouder/gemeente bijvoorbeeld)?</p> <p>Is de rol van de VR's voldoende meegenomen in de vergunning-verlening?</p> <p>Voorbereid zijn op nieuwe ontwikkelingen: bijvoorbeeld tijdelijke bovengrondse opslag vanuit schepen die hun eigen CO₂ afvangen en in de haven willen lozen. Of bedrijven die hun CO₂ afvangen en transporteren. Is hiervoor voldoende geregeld?</p>	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
CCS		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijkheden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		Welke maatregelen hebben hoeveel effectreductie? Bijvoorbeeld inbouwen van kleppen in leidingen of het bouwen van een muur rond een buisleiding.			
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>		Behoeft aan duidelijke handvatten waar op te beoordelen wanneer er een vergunning moet worden verleend. Bij het verlenen van een vergunning moet al nagedacht zijn over het afsluiten na gebruik en de monitoring: wens om nu al duidelijk te hebben waarop gemonitord moet worden.		
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Wanneer is een buisleiding op een paar meter boven de grond een betere oplossing is dan onder de grond?		Meer inzicht verkrijgen in de crisisbeheersing als er iets mis zou gaan op de Noordzee. Hoe is dat geregeld?	
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Wat is het handelingsperspectief voor bijsturing naar aanleiding van resultaten uit de monitoring? Mocht er	Om eventuele bodemdaling/lekkages te monitoren, zou je nu al moeten beginnen met monitoren.		

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatievraagstuk	Juridisch vraagstuk
CCS		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		lekkage gesignaleerd worden, wat kan er dan nog gedaan worden om zo'n lek te dichten?			

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Binnenmilieu		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
Beleid en regelgeving	<i>Normen</i>	<p>Wat is nodig om de huidige regelgeving afdoende dekkend te maken voor gebruik van waterstof in een woning?</p> <p>Welke eisen stellen we aan (de plaatsing van) batterijen in woningen?</p> <p>Hittenormen: hoe warm mag een huis zijn in de zomer? En wat is de samenhang tussen hitte en isolatie van woningen, inclusief zonwering?</p> <p>Welke maatregelen zijn effectief om voldoende ventilatie te borgen?</p> <p>Risico-aannames bij de crisisbeheersing gaan uit van bouwwerken van steen en beton. Hoe veranderen deze aannames bij gebruik van duurzame (wellicht brandbare) materialen?</p> <p>Wat betekenen de introductie van waterstof, warmtepompen en andere nieuwe energiebronnen voor de gezondheid binnenshuis?</p>	<p>Gedrag van bewoners heeft grote invloed op het binnenmilieu. Hoe hiermee om te gaan? Alleen voorlichting blijkt niet voldoende.</p> <p>In plaats van capaciteitseisen stellen aan (bijvoorbeeld) ventilatie, kan ook overwogen worden om operationele eisen te stellen (CO₂-gehalte, fijnstofgehalte). Dit stelt bewoners in staat om te monitoren en gedrag aan te passen. Hoe om te gaan met deze optie? Hoe zorgen we dat een geïsoleerd huis niet te warm wordt, goed geventileerd blijft en dat niet iedereen airconditioning gaat installeren?</p> <p>Omgang met niet aangetoonde effecten en de toch terugkomende zorg hieromtrent</p>		Bouwbesluit stelt op dit moment geen eisen aan ventilatie: raam open is voldoende.

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Binnenmilieu		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		synergie en uitsluiting van innovatieve technieken in huis? Effect van toename van Elektromagnetische velden (EMV) en van het gebruik van elektronica in de woon-en werkomgeving?	(bijvoorbeeld de niet-wetenschappelijk aangetoonde associatie van EMV van hoogspanningslijnen met het ontstaan van leukemie bij kinderen).		
Doorwerking en instrumenten	<i>Rekenmethode, handreiking, et cetera</i>	Behoeftte aan een betere manier (dan de huidige rekenmethode over hitterisico) om klachten en gebreken in de warmteregulering vast te stellen.			
Uitvoering	<i>Inclusief toezicht en handhaving</i>	Is het mogelijk om te regelen dat ventilatie in woningen zonder interventie van de bewoners bij een incident in de omgeving kan worden uitgezet? Weten we voldoende van brandveiligheid in relatie tot bijvoorbeeld alternatieve (duurzame) bouwmaterialen? Weten we ook voldoende van de combinatie van materialen en wat dat doet met de brandveiligheid?		Hoe om te gaan met energie-armoede (en daardoor minder ventileren/ meer houtstook) en wie regelt wat? Is de capaciteit en het materieel van de VR voldoende toegerust voor brandbestrijding bij duurzaam (wellicht brandbaarder) bebouwing?	

Overzicht opgehaalde beleidsvragen		Kennis-vraagstuk	Praktisch vraagstuk	Organisatie-vraagstuk	Juridisch vraagstuk
Binnenmilieu		<i>Is dat zo?</i>	<i>En hoe werkt dat in de praktijk?</i>	<i>Wie kan wat? Taken, rollen en verantwoordelijk-heden</i>	<i>Formeel vastgelegd?</i>
		Behoeftte aan herwaardering sprinklers: metalen worden negatief gewaardeerd bij circulair bouwen, maar sprinklers hebben waarschijnlijk minder milieu-impact dan een afgebrand gebouw. Wens om met een lifecycle analyse hiernaar te kijken.			
Evaluatie	<i>Monitoring</i>	Monitoring van gebruik en klachten over PUR-schuim wenselijk. Hoe (kosten)effectief zijn inspecties in huurwoningen in vergelijking met reageren op klachten van bewoners?			

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

april 2026

De zorg voor morgen
begint vandaag