

Radarweg 60
1043 NT Amsterdam

www.tno.nl

T +31 88 866 50 10

TNO-rapport

TNO 2022 P12555

Energietransitie & biodiversiteit

Datum	17 november 2022
Auteur(s)	Ruud van den Brink, Vera Rovers, Frank Lenzmann, Luuk Beurskens, Hein de Wilde
Review	Arjan Zwamborn, Sanne Huveneers
Aantal pagina's	69 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	7
Opdrachtgever	Intern
Projectnaam	Energy transition and biodiversity
Projectnummer	060.47819/01.06

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

Summary

For the transition towards a climate neutral energy system, an extensive new energy infrastructure will be built in the coming decades. The decision-making process concerning this transition currently focuses primarily on the amount of CO₂ reduction and the financial costs involved. The transition, however, will also affect environmental aspects, including biodiversity. As the amount and diversity of species are rapidly decreasing and ecosystems are struggling, the biodiversity crisis is a real and crucial component in decision making. Knowing the possible impacts new renewable energy projects may have on biodiversity and how to mitigate these is important for decision makers to avoid adverse effects. However, this knowledge is currently not easily accessible, if available.

The goal of this study is to develop a framework that provides an integrated and user-friendly overview of the effects of the energy transition on biodiversity. The study will propose topics for further research to increase our understanding of the impacts of technologies that are required for the energy transition. The findings of this research can later be translated into recommendations for Dutch policy makers and decision makers.

This study is explorative, and thus does not address all energy transition options. The impacts described in this report are not exhaustive and the analysis of biodiversity impacts is qualitative. A quantitative analysis would require more resources and could be part of future work on this topic.

Seven energy technologies were selected for an extensive literature review: Solar farms, onshore and offshore wind, heat pumps, lithium-ion batteries, electrolysers for green hydrogen production, biofuels and synthetic fuels. The resulting overview is presented in technology information sheets and structured around the four phases of the Life Cycle Analysis methodology and the five biodiversity threats of the Intergovernmental Platform for Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES 2019).

A major result of this study is the identification of an important, recurring issue: The adverse impact of electricity generation technologies. Some technologies and energy carriers – such as heat pumps, lithium-ion batteries, electrolysers and synthetic fuels – have a relatively small direct impact on biodiversity compared to alternatives that make use of fossil fuels, but they strongly increase the demand for electricity. As the demand for renewable energy increases this enhances the importance of electricity generation through technologies that minimize the effects on biodiversity. As solar and wind energy are expected to remain the most important technologies for sustainable electricity generation (PBL et al., 2021), building solar and wind parks should occur with due consideration to their effects on biodiversity.

Another finding of this study is that the impact of mining the resources for the energy technologies represents an overarching theme in papers researching the impact on biodiversity. Mining causes pollution and land use change, but mostly occurs outside the borders of the Netherlands. However, there are measures that

Dutch policy makers can take to decrease the detrimental effects of mining, for example by recycling materials.

A summary of this study will be published online, which forms the basis for offering insights and recommendations to support decision makers. In the next step of this research project, we will explore the applicability of these technology information sheets for decision makers. Furthermore, we will investigate options for widening the scope of the impacts described in the information sheets and the number of technologies analysed.

Inhoudsopgave

	Summary	2
1	Inleiding	5
1.1	Doel en aanleiding	5
1.2	Biodiversiteitscrisis	5
1.3	Biodiversiteit en de energietransitie.....	7
2	Aanpak	9
2.1	Selectie van energietechnologieën.....	9
2.2	IPBES Bedreigingsfactoren en levenscyclus fases	9
3	Resultaten	12
3.1	Effecten tijdens de productiefase	12
3.2	Effecten tijdens de constructiefase	12
3.3	Effecten tijdens de gebruiksfase.....	13
3.4	Effecten tijdens ‘einde levensduur’	15
3.5	Mijnbouw.....	15
3.6	Landgebruik	18
4	Algemene conclusies en aanbevelingen	20
4.1	Impact van de energietransitie op de biodiversiteit	20
4.2	Vervolgonderzoek.....	21
	Referenties.....	23

Bijlage(n)

- A Informatieblad PV parken
- B Informatieblad Wind (op land en zee)
- C Informatieblad Groene waterstof / elektrolyser
- D Informatieblad Warmtepompen
- E Informatieblad Lithium-ion batterijen
- F Informatieblad Biobrandstoffen
- G Informatieblad Synthetische brandstoffen

1 Inleiding

1.1 Doel en aanleiding

In de energietransitie is er veel aandacht voor de energie- en CO₂-besparing door het nemen van technische maatregelen en voor diens economische consequenties ('wat kost het?'). In mindere, maar wel toenemende, mate worden sociale factoren meegenomen, bijvoorbeeld rondom thema's als energiearmoede. De invloed van de transitie op het milieu en de biodiversiteit is echter onderbelicht. Er is veel informatie beschikbaar over effecten op biodiversiteit, maar tegelijkertijd zijn er ook nog veel kennishiaten en ontbreekt een samenhangend geheel van de inzichten. Deze verkenning is een eerste aanzet om een integraal inzicht te bieden in de impact van de energietransitie op de biodiversiteit. De keuze voor biodiversiteit als invalshoek komt voort uit de overweging dat hierin veel milieu-impacts integraal zijn verweven.

De huidige studie poogt met behulp van een literatuuronderzoek de beschikbare informatie over alle mogelijke effecten van duurzame energietechnologieën op biodiversiteit bij elkaar te brengen, van lokale tot mondiale effecten. Uit deze review komen in eerste instantie aanbevelingen voort voor vervolgonderzoek om de ontbrekende informatie over de impact van energietechnologieën verder aan te vullen. In een later stadium, wanneer de kennis is aangevuld en conclusies (beter) onderbouwd kunnen worden, kan besluitvorming worden ondersteund door de inzichten over de impact van de energietransitie op biodiversiteit gemakkelijk toegankelijk te maken voor beleidsmakers. Behalve het informeren over de impact kunnen te zijner tijd uit de studie aanbevelingen worden geformuleerd voor Nederlandse beleidsmakers om een technologie te implementeren met minder negatieve impact op de biodiversiteit.

De deze studie bespreken we zeven duurzame energietechnologieën (zie paragraaf 2.1) die naar verwachting allemaal cruciaal zijn voor de energietransitie in Nederland, zoals zonne- en windenergie. Omdat deze studie een verkenning is naar een framework waarin de effecten integraal kunnen worden weergegeven, zullen de beschreven effecten per technologie nog niet compleet zijn en zijn ze nu grotendeels kwalitatief beschreven. In een vervolgtraject zouden de effecten ook gekwantificeerd kunnen worden, bijvoorbeeld met een levenscyclusanalyse. Tevens zouden meerdere technologieën kunnen worden uitgewerkt.

1.2 Biodiversiteitscrisis

Biodiversiteit of biologische diversiteit is de graad van verscheidenheid aan levensvormen binnen een gegeven ecosysteem. Hierbij is een ecosysteem gedefinieerd als een systeem dat bestaat uit alle organismen en hun abiotische omgeving, welke in een bepaald gebied voorkomen, en diens onderlinge (netwerk-)interacties. Een ecosysteem kan op verschillende schaalniveaus gezien worden, van een individuele polder tot de aarde als geheel. Een veel gebruikte manier om biodiversiteit te meten is door het "tellen" van het aantal exemplaren en het aantal soorten binnen een groep levensvormen, zoals bijvoorbeeld dieren, planten en zwammen.

Biodiversiteit vormt een complex netwerk waarin elke soort en individu een rol speelt. Verschillende (groepen) soorten in een ecosysteem spelen een verschillende, unieke rol welke bijdraagt aan het functioneren en daarmee de 'gezondheid' van een ecosysteem – ook wel 'niches' genoemd. Bij het wegvallen van soort of groepen van soorten kunnen deze niches in gevaar komen. Bovendien hangt een hoge biodiversiteit samen met een hoge mate van flexibiliteit en weerbaarheid van een ecosysteem, en kan het daarmee beter omgaan met externe invloeden en veranderingen. Een grote biodiversiteit maakt de natuur dus veerkrachtiger.

De globale toestand van de biodiversiteit is echter al sinds enige tijd in hoogste mate zorgwekkend: er is sprake van een biodiversiteitscrisis. Dit kan geconcludeerd worden uit het recente rapport van het toonaangevende 'Intergovernmental Platform for Biodiversity and Ecosystem Services' (IPBES)¹ (IPBES 2019). Daarin wordt toegelicht dat er door de invloed van de mens in de afgelopen 50 jaar sprake is van een verval van de biodiversiteit, die ongekend is in de geschiedenis van de mens. 82 procent van de wilde zoogdieren is naar schatting van dit rapport (op "biomassabasis") al uitgestorven. Verder worden momenteel ongeveer 40 procent van de amfibieën, 30 procent van de rif-bouwende koralen en zeezoogdieren en 10 procent van de insecten met uitsterven bedreigd. Door klimaatverandering en andere bedreigingsfactoren voor de biodiversiteit ontstaan in toenemende mate zogenaamde "tipping points", waarbij de onomkeerbare ineenstorting van hele ecosystemen te verwachten is (bekende voorbeelden zijn het Amazonegebied in Zuid-Amerika en het Great Barrier Reef in Australië).

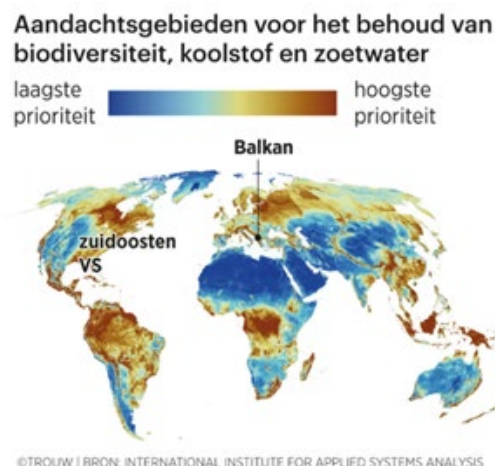
Het IPBES heeft de vijf belangrijkste bedreigingsfactoren voor biodiversiteit in kaart gebracht (in oplopende volgorde van belang):

- 1 Veranderingen in gebruik van land en zee
- 2 Directe uitbuiting van organismen
- 3 Klimaatverandering
- 4 Vervuiling
- 5 Invasieve soorten.

De eerste twee factoren, het veranderen van een gebied met hoge biodiversiteit in die met een lagere en het directe gebruik van de natuur, zijn verantwoordelijk voor meer dan de helft van de biodiversiteitsafname (Díaz et al., 2019). De industriële landbouw en de industriële visserij staan bovenaan op de lijst van de schadelijke activiteiten omtrent deze factoren.

Het is overigens goed om te beseffen dat niet alle gebieden op aarde even "waardevol" zijn voor (behoud van de) biodiversiteit. Recent onderzoek toont aan, dat ongeveer 30% van land en water van bijzonder hoge waarde zijn (Figuur 1).

¹ Het IPBES (Intergovernmental Platform for Biodiversity and Ecosystem Services) is een in 2012 opgerichte, onafhankelijke intergouvernementele organisatie omtrent biodiversiteit en ecosysteemdiensten. De rol en functie van het IPBES is vergelijkbaar met die van de meer breed bekende IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Het zij hier nog opgemerkt dat er in 2021 – naar aanleiding van de structurele samenhang tussen de biodiversiteitscrisis en klimaatverandering - een workshop plaats vond onder de titel "Biodiversity and climate change", gesponsord door zowel het IPBES en het IPCC.



Figuur 1 Wereldkaart die de waarde aangeeft van gebieden voor het behoud van biodiversiteit, koolstof en zoetwater. (Bron: IIASA (2021))

Nederland is een gebied dat een gemiddelde prioriteit heeft in het kader van het beschermen van biodiversiteit. Desalniettemin is het wel van belang te realiseren dat het hier slecht gaat met de aanwezige biodiversiteit. Sinds 1990 zijn wilde populaties dieren gemiddeld gehalveerd (Wereld Natuur Fonds, 2020), het aantal insecten is zelfs met 75% afgenomen en sinds 2020 staan haas, konijn en spitsmuis op de rode lijst van in Nederland bedreigde zoogdieren (Havermans, 2021). Hiervoor zijn er verschillende redenen, waar de intensieve landbouw - en onder meer de stikstofdepositie als gevolg ervan (Díaz et al., 2019) - een van de belangrijkste oorzaken is. Ruwweg de helft van totale oppervlakte in Nederland is agrarisch terrein en Nederland is de op een na grootste exporteur van agrarische producten in de wereld (CBS, 2021a.)

1.3 Biodiversiteit en de energietransitie

De energietransitie en duurzame energie technologieën bieden allereerst oplossingen voor de biodiversiteitscrisis, aangezien klimaatverandering één van de vijf bedreigingsfactoren voor biodiversiteit is. Een soortgelijke redenering is ook van toepassing voor een andere belangrijke bedreigingsfactor: vervuiling. Toxische emissies, die voortkomen uit verbranding door fossiele energieopwekking en mobiliteit, worden vermeden. Daarnaast worden ook andere vervuilingen als gevolg van de winning van de betreffende fossiele grondstoffen voorkomen wanneer duurzame alternatieven worden gerealiseerd. Om een iets duidelijker beeld ervan te geven hoe significant de baten van duurzame energie voor de biodiversiteit zijn, wordt hieronder de schade die door fossiele energietechnologie wordt veroorzaakt en die dus door de toepassing van duurzame energie wordt voorkomen, met een aantal voorbeelden benoemd:

- CO₂-uitstoot vanuit bijvoorbeeld kolen- en gascentrales, fossiele verbrandingsmotoren en winning van fossiele grondstoffen;
- Methaanemissies vanuit lekkage tijdens de winning en transport van aardgas via het mondiale pijpleidingen netwerk;
- Kwikemissies vanuit kolencentrales;
- Olielekkage uit pijpleidingen of olietankers;
- Bodemvervuiling door kolenmijnbouw;
- Stikstof en roetemissies bij het verbranden van olie in brandstofmotoren.

Het bieden van een alternatief voor fossiele brandstoffen is een belangrijke positieve bijdrage, maar het is belangrijk om te beseffen dat het toepassen van duurzame energie technologieën ook negatieve effecten op biodiversiteit kan hebben. Typisch zullen deze verband hebben met de bedreigingsfactor “veranderingen in gebruik van land en water” (ook wel: landgebruik), met habitatdestructie als gevolg. Dit komt voort uit de aanzienlijke behoefte voor land en wateroppervlakken in bijvoorbeeld biomassateelt en de aanleg van wind en zonneparken. Naast landgebruik wordt ook vervuiling in verband gebracht met grondstoffenwinning en fabrieken voor de productie van duurzame energieproducten, zoals PV-panelen, batterijen en warmtepompen. Deze negatieve effecten (Hoofdstuk 3) worden in dit rapport met behulp van een consistente aanpak (zie Hoofdstuk 2) en per duurzame energietechnologie (zie 2.1 voor de selectie van technologieën) behandeld. Hierbij worden ook mitigatiemaatregelen besproken (Hoofdstuk 4), die de negatieve effecten kunnen verkleinen, of – in de meest ideale gevallen– zelfs kunnen ombuigen naar positieve effecten.

2 Aanpak

2.1 Selectie van energietechnologieën

In deze verkennende studie wordt een beperkt aantal energietechnologieën geanalyseerd. Als eerste stap in de selectie van de technologieën is een lijst gemaakt van alle mogelijke, nu bekende duurzame technologieën. Om vervolgens tot een rangschikking te komen zijn de technologieën op een schaal van 1, geen of weinig, tot 5, zeer groot, gescoord op twee criteria:

- Marktaandeel en potentieel van de technologie in Nederland;
- Grootte van de impacts door de technologie in Nederland en wereldwijd op biodiversiteit (schatting).

Op deze manier werden zeven technologieën geselecteerd:

- Zonne-energie (grondgebonden PV-parken);
- Windenergie (op land en op zee);
- Groene waterstof (Elektrolyzers op duurzame stroom);
- Warmtepompen;
- Lithium-ion batterijen;
- Biobrandstoffen;
- Synthetische brandstoffen.

Deze technologieën kunnen ingedeeld worden naar de functies die zij vervullen in het energiesysteem, Tabel 1.

Tabel 1 Indeling van de voor deze studie geselecteerde technologieën naar hun functie in het energiesysteem

Energieproductie	Energiedrager	Energieconversie	Energieopslag
Windparken	Groene waterstof	Warmtepompen	Batterijen
Zonneparken	Biobrandstoffen		
	Synthetische brandstoffen		

2.2 IPBES Bedreigingsfactoren en levenscyclus fases

Dit rapport kan worden beschouwd als een literatuur-review. Als aanpak voor de structurering van de uit literatuur gevonden informatie is gekozen voor een indeling in twee onafhankelijke dimensies: de bedreigingsfactoren voor de biodiversiteit enerzijds en de levenscyclusfases van de behandelde technologieën anderzijds.

De vijf belangrijkste bedreigingsfactoren voor biodiversiteit zijn volgens het IPBES (in oplopende volgorde van belang):

1. Veranderingen in gebruik van land en zee
2. Directe uitbuiting van organismen
3. Klimaatverandering
4. Vervuiling
5. Invasieve soorten

Voor het beschouwen van de levenscyclusfases maken we gebruik van de terminologie die binnen het onderzoeksgebied van de levenscyclusanalyse (LCA²) gebruikelijk is. De LCA-terminologie maakt onderscheid in vier fases:

- Productie: mijnbouw en fabricage van onderdelen en producten;
- Constructie: de installatie van een product;
- Gebruik: de operationele fase van een product;
- Einde levensduur: demonteren en afvalverwerking.

Figuur 2 laat zien welke activiteiten onder de fases vallen.

Product Stage			Construction Process Stage		Use Stage							End-of-Life Stage			
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport to building site	Installation into building	Use/application	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction/demolition	Transport	Waste processing	Disposal
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4

Figuur 2 De vier levensfases in een LCA en de activiteiten die daaronder horen.

Expliciet aandacht besteden aan alle fases van de levenscyclus aanpak voegt extra waarde toe aan een literatuur review waarbij simpelweg de bestaande literatuur wordt geaggregeerd. Dit komt voort uit het gegeven dat het merendeel van de literatuur de biodiversiteitsaspecten van duurzame energietechnologie met een focus op de gebruiksfase beschrijft, waarbij andere fases onderbelicht blijven. Dit is ten onrechte: naast de gebruiksfase veroorzaakt juist ook de productiefase aanzienlijke biodiversiteitsimpacts. In dit rapport worden daarom alle levenscyclus fases vanaf mijnbouw tot “end-of-life” zo goed mogelijk in beschouwing genomen.

In deze studie zijn geen gedetailleerde LCA-berekeningen uitgevoerd, door de keuze de scope te beperken tot een kwalitatieve benadering. We maken louter gebruik van de indeling van de levenscyclusfases van de LCA-methodiek als opzet voor de structuur. Een andere beperking in de scope was dat niet alle fases voor elke technologie in hetzelfde niveau van detail zijn bestudeerd. Dit viel deels te wijten aan een gebrek aan beschikbare literatuur en deels aan imitaties in het budget van dit project. Met name aan de fase “einde levensduur”, en in mindere mate de subfase transport (die een integraal onderdeel zijn van alle levenscyclusfases), is minder aandacht besteed in deze studie.

De bedreigingsfactoren en levensfases zijn gepresenteerd in een matrix in Tabel 2. In het kader van transparantie willen we benadrukken dat in de gekozen matrixaanpak een aanzienlijk aantal van matrixvakken leeg blijven. Dit wordt veroorzaakt doordat simpelweg niet voor alle matrixelementen betreffende impacts zijn gevonden. Een voorbeeld hiervan is dat gedurende de gebruiksfase van een

² De LCA-methode wordt gebruikt om de milieu impacts van een product te berekenen. Daarbij wordt rekening gehouden met de complete levenscyclus van het betreffende product (vanaf mijnbouw tot “einde levensduur”).

PV-park er geen sprake is van directe uitbuiting van organismes. Een ander voorbeeld ter illustratie is dat gedurende de productiefase van een warmtepomp is er geen sprake van het introduceren van invasieve soorten.

Tabel 2 Matrix die de impact van technologieën weergeeft ingedeeld naar de levensfasen uit een LCA en de bedreigingsfactoren van het IPBES.

Levenscyclusfase	Productie	Constructie	Gebruik	Einde levensduur
Bedreigingsfactor				
Veranderingen in gebruik van land en water				
Directe uitbuiting van organismen				
Klimaatverandering				
Vervuiling				
Invasieve soorten				

Voor elke technologie is een informatieblad gemaakt, dat in bijlage A t/m G is te vinden. Een samenvatting van de diverse bevindingen over alle technologieën heen is per levensfase weergegeven in Hoofdstuk 3.

3 Resultaten

De effecten van elke technologie op de biodiversiteit worden gedetailleerd toegelicht in de diverse technologie-informatiebladen in de bijlagen (A t/m G). Hieronder volgt een meer globaal overzicht van deze effecten van de zeven bestudeerde technologieën per levensduurfase. Zoals eerder vermeld, zullen de beschreven effecten nog niet uitputtend zijn. Hiervoor is meer onderzoek en inzicht nodig (zie Hoofdstuk 4).

Sommige effecten zijn specifiek voor een bepaalde technologie. In dat geval is de technologie dikgedrukt om snel te herkennen op welke technologie het effect betrekking heeft. Andere effecten zijn van toepassing op meerdere technologieën. Twee impacts komen in de meeste technologieën herhaaldelijk en nadrukkelijk terug en worden daarom buiten het informatieblad ook nog als overkoepelend onderwerp apart behandeld: mijnbouw in de productiefase (3.5) en landgebruik in de gebruiksfase (3.6).

3.1 Effecten tijdens de productiefase

Type impact	Impact
Veranderingen in gebruik van land en water	De winning van grondstoffen en fabricage van materialen leidt over het algemeen tot (verandering in) landgebruik door mijnbouw en verwerkingsfabrieken
Directe uitbuiting van organismen	
Klimaatverandering	Afhankelijk van de energiebron kan het energiegebruik voor de winning van grondstoffen en fabricage leiden tot CO ₂ -emissies.
Vervuiling	De winning van grondstoffen en het fabricageproces kunnen leiden tot emissies naar lucht, bodem en water.
	Bij de winning en zuivering van zeldzame aardmetalen voor permanente magneten van windturbines kunnen zware metalen, zwavelzuur en radioactieve elementen vrijkomen.
	Bepaalde chemicaliën die gebruikt worden bij de CO ₂ -afvang voor synthetische brandstoffen kunnen leiden tot de emissie van milieugevaarlijke stoffen
Invasieve soorten	

3.2 Effecten tijdens de constructiefase

Type impact	Impact
Veranderingen in gebruik van land en water	Infrastructuur en bouwactiviteiten voor de constructie en transport van energietechnologieën vergen een bepaalde mate van landgebruik
	Tijdens de bouwfase van een windmolenpark op zee wordt de zeebodem verstoord en kunnen veranderingen van het watersysteem, zoals het mixen van waterlagen, sedimentverplaatsing en veranderende wind- en golfpatronen zorgen voor veranderende leefomstandigheden

Type impact	Impact
	Bouwactiviteiten van windmolens op land veranderen tijdelijk de leefomgeving, waar met name dieren gevolgen van kunnen ondervinden. Ook kunnen bestrating of rijplaten voor de hijskraan het bodemleven beïnvloeden.
Directe uitbuiting van organismen	
Klimaatverandering	Afhankelijk van de energiebron kan het energiegebruik voor transport en constructie leiden tot CO ₂ -emissies. De aanvoer van windturbine onderdelen vraagt bijvoorbeeld veel transportbewegingen.
Vervuiling	Afhankelijk van de energiebron kan het energiegebruik voor transport en constructie leiden tot emissies naar lucht, bodem en water. De aanvoer van windturbine onderdelen vraagt bijvoorbeeld veel transportbewegingen.
	Bij de aanleg van een bodemenergiesysteem voor een bodem warmtepomp kunnen watertypen van verschillende bodemlagen vermengen of verontreinigd raken
	Tijdens de bouwfase van een windmolenpark op zee kan vertroebeling en vervuiling door chemische stoffen optreden
	Geluidsoverlast onderwater tijdens de aanleg van een windmolenpark op zee kan het zeeleven beïnvloeden.
Invasieve soorten	

3.3 Effecten tijdens de gebruiksfase

Type impact	Impact
Veranderingen in gebruik van land en water	Een PV-park legt gedurende de gebruiksfase beslag op het landoppervlak en kan verandering, verlies of fragmentatie van habitats veroorzaken en een negatieve impact op de bodembiodiversiteit hebben vanwege de verminderde lichtinval, veranderde neerslagverdeling, verlaging van de gemiddelde bodemtemperatuur, bodemverdichting en vervuiling
	De aanwezigheid van een windpark kan leiden tot habitatverlies vanwege het ontwijken van de parken door dieren
	Een verharde weg naar een windmolen op land of rijplaten voor zwaar materieel dekken de bodem gedurende de gebruiksfase af wat het bodemleven kan beïnvloeden.
	Windmolens op zee en schepen voor onderhoud verstoren het leefgebied. Tegelijkertijd kan het voor bepaalde soorten een plek zijn om te herstellen omdat er niet gevisd wordt.
	Voor de productie van groene waterstof is zuiver water nodig wat bij droogte kan leiden tot negatieve effecten op de biodiversiteit
	Waterstofopslag in de ondergrond kan mogelijk een effect hebben op bodemorganismen

Type impact	Impact
	Een warmtebron voor een bodemwarmtepomp kan de temperatuur van de bodem veranderen wat het bodemleven en processen in de bodem kan verstoren
Directe uitbuiting van organismen	<p>Windmolens kunnen voor bepaalde soorten door aanvaring een direct gevaar vormen, zoals vogels, vlermuizen en insecten.</p> <p>Bepaalde diersoorten kunnen herstellen in windmolenparken op zee, omdat er niet gevist kan worden.</p>
Klimaatverandering	<p>De koudemiddelen die momenteel gebruikt worden in warmtepompen zijn een sterk broeikasgas wat deels weglegt tijdens gebruik en onderhoud</p> <p>Afhankelijk van de energiebron kan het energiegebruik van een warmtepomp leiden tot CO₂-emissies</p> <p>Bij de verbranding van bio- en synthetische brandstoffen in een brandstofmotor komt CO₂ vrij, die (deels) in het voortraject is gecompenseerd.</p> <p>Eventuele lekkage van waterstof kan mogelijk bijdragen aan het broeikas effect. De emissies door lekkage zijn echter naar verwachting zeer beperkt.</p> <p>Waterdamp die vrijkomt bij verbranding van synthetische brandstoffen in vliegtuigen, kan in hogere lagen van de atmosfeer bijdragen aan opwarming</p> <p>Door de productie van emissie-vrije elektriciteit in de gebruiksfase bieden zonnepanelen en windmolens een effectieve (deel-)oplossing voor het probleem van klimaatverandering</p>
Vervuiling	<p>Afhankelijk van de energiebron kan het energiegebruik van een warmtepomp leiden tot emissies naar lucht, bodem en water</p> <p>Bij de verbranding van bio- en synthetische brandstoffen in een brandstofmotor komen vervuilende stoffen vrij, waaronder NO_x en roetdeeltjes</p> <p>De verzinkte staaldragers in grondgebonden PV-systemen kunnen mogelijk leiden tot uitloging van zink naar de bodem</p> <p>Een bodemenergiesysteem voor een bodemwarmtepomp heeft een risico op vermenging van watertypen en verspreiding van verontreinigende stoffen.</p> <p>Luchtwarmtepompen en windturbines kunnen tot geluidshinder leiden, waaronder ook onderwatergeluid bij windmolens op zee. Er is nog weinig bekend over het effect daarvan op flora en fauna.</p> <p>De stroomkabels naar windturbines en zonneparken zenden elektromagnetische straling uit, evenals batterijen. Of en wat het effect voor de biodiversiteit is, wordt nog onderzocht.</p> <p>Indien batterijen oververhit raken en/of in brand vliegen kunnen giftige stoffen vrijkomen</p> <p>Mogelijk effect van waterstofopslag in de ondergrond op bodemorganismen</p>
Invasieve soorten	

3.4 Effecten tijdens ‘einde levensduur’

Type impact	Impact
Veranderingen in gebruik van land en water	Opslag van afval en fabrieken voor verwerking en terugwinning nemen over het algemeen land in beslag
	De in de grond gebrachte warmte of koude bij een bodemenergiesysteem voor een bodemwarmtepomp kan in sommige gevallen tot langdurige verandering van de ondergrondtemperatuur leiden
Directe uitbuiting van organismen	
Klimaatverandering	Afhankelijk van het verwerkingsproces en van de energiebron en kan de inzameling, verwerking en recycling leiden tot CO ₂ -emissie.
	De koudemiddelen die momenteel gebruikt worden in warmtepompen zijn een sterk broeikasgas wat deels weglekt tijdens verwerking of recycling
Vervuiling	Afhankelijk van het verwerkingsproces en van de energiebron en kan de inzameling, verwerking en recycling van de technologie leiden tot emissies naar lucht, bodem en water
	Bij recycling van PV-systemen met pyrolysetechnieken kunnen waterstoffluoride emissies ontstaan (vanuit de fluorhoudende backsheets van PV-panelen). Ook is er een risico op uitloging op de stortplaats naar de bodem van lood (in minieme hoeveelheden aanwezig in de elektrische contact patronen in PV-panelen)
	Bij beschadiging of verkeerde verwerking van batterijen bestaat het risico op lekkage van giftige stoffen. Tijdens het verwerkingsproces van batterijen komen giftige stoffen vrij die goed moeten worden behandeld. Recycling van de metalen in de batterij zorgt voor een reductie van de impact in de productiefase.
	Het bodemenergiesysteem blijft achter in de bodem om de waterscheidende lagen niet te beschadigen. Het is onbekend of dit een effect heeft op het bodemleven.
Invasieve soorten	

3.5 Mijnbouw

De technologieën voor de energietransitie zijn gemaakt uit materialen waarvoor de grondstoffen gewonnen worden uit mijnbouw, onderdeel van de productiefase volgens de levenscyclus methodiek. Het betreft zowel ‘klassieke’ materialen als materialen gekoppeld aan technologieën specifiek voor de energietransitie. ‘Klassieke’ materialen zijn bijvoorbeeld staal, koper en nikkel, welke dus ook vóór de energietransitie al breed toegepast werden. Specifiek aan de energietransitie gekoppelde materialen zijn bijvoorbeeld silicium, lithium en kobalt (Heading et al., 2021), die dus in het verleden beperkter en vooral in niche situaties werden toegepast. Het IEA (2021) benadrukt de grote mismatch tussen de mondiale klimaatambities en de beschikbaarheid van kritische materialen die nodig zijn voor de energietransitie (IEA 2021).

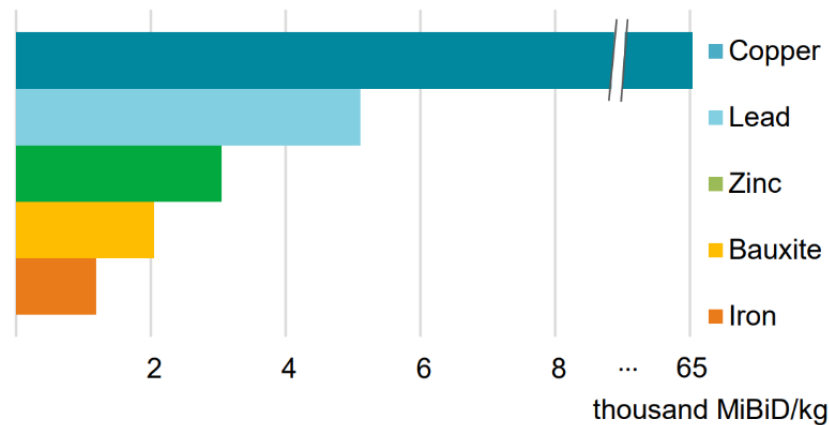
Het IEA waarschuwt dat indien de winning van de materialen niet goed wordt beheerd, dit onder andere kan leiden tot negatieve milieu-impacts zoals verandering in landgebruik, uitputting van water en watervervuiling, afval-gerelateerde vervuiling en luchtvervuiling. Kortom: dit kan leiden tot de versterking van veel van de bedreigingsfactoren die de biodiversiteitscrisis veroorzaken. Samen met andere effecten zoals broeikasgasemissies door energie-intensieve processen en mogelijke sociale impacts door corruptie en misbruik van overheidsgeld kan dit tot gevolg hebben dat het aanbod van materialen stremt en daarmee de energietransitie wordt vertraagd. Overheden hebben volgens het IEA dan ook een belangrijke rol in het stimuleren van verbeteringen in de milieu- en sociale impacts door de winning van grondstoffen.

De **impact** van materialen op biodiversiteit en milieu hangt onder andere af van:

1. Het type materiaal en bijbehorende, deels intrinsieke, mijnbouwkenmerken. De impact per materiaal verschilt aanzienlijk wat ook duidelijk wordt uit Figuur 3;
2. Waar en hoe het wordt gewonnen;
3. Hoeveel van het bewuste materiaal nodig is. Dit hangt ook samen met de snelheid waarmee het materiaal wordt gebruikt – ofwel de levensduur – en in hoeverre het materiaal gerecycled wordt aan het einde van de levensduur, zodat nieuwe winning voorkomen kan worden.

Hieronder zullen we op een aantal van deze aspecten ingaan en mogelijkheden beschrijven hoe Nederlandse beleidsmakers hierop in kunnen spelen.

Intensity of mining pressure on biodiversity for selected minerals



Figuur 3 De impact op biodiversiteit van een aantal mineralen. De MiBiD-index op de x-as is gedefinieerd als “A non-dimensional index based on data regarding land cover, protected areas and mining operations”. Figuur gekopieerd uit IEA (2021).

Diepzeemijnbouw

Een hele nieuwe vorm van mijnbouw is diepzeemijnbouw. Hierbij wordt geëxperimenteerd met het winnen van knollen van de zeebodem die mangaan, ijzer, koper, nikkel en kobalt bevatten (Down to Earth, 2021). De winning hiervan zal het leven in zee verstoren, maar hoe groot de impact zal zijn is niet bekend, ook omdat we nog niet veel weten over het leven in de diepe zee.

3.5.1 *Maximaliseren recycling*

De intensiteit van mijnbouw – en daarmee diens impacts – kan worden verlaagd door grondstoffen en materialen te recyclen en hergebruiken. In veel gevallen is het winnen van nieuwe grondstoffen via mijnbouw goedkoper dan recyclen. Een veel voorkomend voorbeeld hiervan is lithium uit batterijen (Castelvecchi, 2021), waarvoor recycling in Nederland ondersteund zou kunnen worden met wetgeving en/of stimuleringsbeleid. Vanwege het internationale karakter van de automobiel- en batterijen-industrie ligt een EU-brede (of mondiale) aanpak voor de hand. De Europese Commissie heeft bijvoorbeeld al vrij strikte eisen voorgesteld voor het recyclen van batterijen (Melin et al., 2021) en het voor het aandeel gerecyclede materialen in batterijen (EC, 2020).

Om recycling of hergebruik (beter) mogelijk te maken kan het ontwerp van producten worden aangepast, zodat materialen eenvoudiger te scheiden te zijn of dat componenten makkelijk te vervangen zijn (modulair). Een voorbeeld van eenvoudigere scheiding van materialen bij hergebruik én modulaire opbouw is batterijen uit een mobiele telefoon. Ook hier zou de overheid eisen aan kunnen stellen.

Tot slot is de recyclingcapaciteit nog een aandachtspunt. Er wordt in de toekomst een grote groei in het aanbod van afgedankte installaties en producten zoals zonnepanelen en lithium-ion batterijen verwacht. Om dit aanbod goed op te kunnen vangen en de grondstoffen te kunnen gebruiken is het raadzaam om de verwerkingscapaciteit op te schalen.

3.5.2 *Vermindering inzet belastende materialen*

Hoe minder van een milieubelastend materiaal gebruikt hoeft te worden, hoe beter. Door technische ontwikkelingen kunnen belastende materialen bijvoorbeeld worden vervangen door andere, minder milieubelastende materialen. De huidige generatie lithium-ion batterijen gebruikt bijvoorbeeld al minder kobalt. Bovendien wordt onderzoek gedaan naar de mogelijkheid om een lithium-lucht batterij te ontwerpen die weinig andere materialen dan lithium bevat.

Een andere optie is om te sturen op structuur- en besparingseffecten, zoals een kleinere capaciteit of een grotere efficiëntie van de technologie. Zo hebben windmolens een steeds hoger vermogen. Op Europese en nationale schaal zou de overheid onderzoek verbeterde of alternatieve technologieën kunnen aanjagen die minder inzet vergen van milieubelastende materialen. Ook zou ze eisen kunnen stellen het materiaalgebruik van technologieën en opschaling kunnen stimuleren.

3.5.3 *Vermindering impact belastende materialen*

Indien het nog niet mogelijk blijkt om minder of een ander, minder milieubelastend materiaal te gebruiken, kan worden gekeken hoe de belasting van het materiaal kan worden gereduceerd. De zorgvuldigheid van de mijnbouw ten aanzien van milieu-impacts kan aanzienlijk verschillen. Momenteel komen veel grondstoffen voornamelijk uit regio's waar deze tegen de laagste financiële kosten te winnen zijn (Verkade, 2017a), wat doorgaans betekent dat het effect op het milieu weinig aandacht krijgt. Lithium komt nu bijvoorbeeld voor 90% uit Zuid-Amerika, maar komt ook voor in bijvoorbeeld Australië en Noord-Amerika. Tesla heeft aangekondigd de grondstoffen voor batterijen alleen nog uit Noord-Amerika te willen halen (Verkade, 2017).

Ook kunnen andere technologieën om het materiaal te winnen zorgen voor minder impact, zoals winning van lithium uit het water van een geothermiebron (Scheyder, 2021). Sturing vanuit Nederland en Europa kan helpen om de impact van materialen te reduceren. De overheid zou bijvoorbeeld een standaard in kunnen stellen voor de maximale milieu-impact van producten. Een mogelijke barrière – waardoor op Europees niveau opereren vereist zou kunnen zijn – zijn mondiale handelsafspraken voor de uitsluiting van niet duurzame producten.

3.5.4 *Market-pull*

Een andere beleids optie is het aanjagen van een *market-pull* gericht op de duurzaamheid van producten en technologieën. Men zou het consumentenbewustzijn kunnen bevorderen in combinatie met de beschikbaarheid van duurzaamheidsinformatie die (ook) raakt aan biodiversiteit.

Zo is het voor levensmiddelen verplicht om de herkomst te vermelden en is aangegeven of het product een keurmerk heeft, zoals 'fair trade' of 'biologisch'. In de elektronicasector onderscheidt Fairphone zich bijvoorbeeld van andere mobiele telefoonmerken door in te zetten op duurzame materialen en vermeldt expliciet op de website waar de materialen vandaan komen (Fairphone, 2017). Fairphone doet dit nu vrijwillig, maar de overheid zou regelgeving kunnen formuleren welke het verstrekken van informatie over het materiaalgebruik in apparaten en installaties stimuleert of verplicht, zodat consumenten meer keuzemacht hebben om zelf het duurzamere alternatief te kopen.

3.6 Landgebruik

Zoals in sectie 1 beschreven zijn veranderingen van het gebruik van land en zee volgens de inzichten van het IPBES in het algemeen de meest belangrijke bedreigingsfactor voor de biodiversiteit. In de context van de energietransitie komt gebruik van land en zee met name bij biomassa en wind- en PV-parken nadrukkelijk terug. De installaties voor de grootschalige energieopwekking uit wind en zon worden gekenmerkt door een relatief lage energiedichtheid (ordegrootte 10 MW/km²), met daarom een relatief hoog specifiek landgebruik als gevolg.

Het landgebruik kan leiden tot verandering van habitatten en foerageergebieden³ voor zoogdieren – zoals vossen, reeën, hazen, konijnen – en sterfte door aanvaring met windmolens, zoals vogels, vleermuizen en insecten. In de constructie- en gebruiksfase bestaan echter diverse mogelijkheden om de impacts op de biodiversiteit te verminderen. In sommige gevallen zijn zelfs positieve impacts mogelijk, wanneer de betreffende installaties niet in natuurgebieden terecht komen, maar op laagwaardigere landoppervlakken. Hiervoor zijn er mogelijkheden met behulp van zogenaamde natuur-inclusieve ontwerpen. Een voorbeeld hiervoor zijn PV-park configuraties, waarbij ervoor gezorgd wordt dat er voldoende licht en water op de bodem terecht blijft komen, zodat vegetatie en bodembiodiversiteit zo goed mogelijk kunnen gedijen.

De problematiek van natuurinclusieve zonneparken wordt geadresseerd door het nationaal consortium Zon in Landschap [<https://www.zoninlandschap.nl>]. Thema's

³ Foerageren is het zoeken en vinden van voedsel door dieren.

die bestudeerd worden betreffen bodemleven, biodiversiteit, inpassing in de lokale omgeving, esthetiek, de combinatie met landbouw, innovatieve ontwerpen en inpassing in het elektriciteitsnetwerk. Natuurinclusief ontwerpen heeft echter nog niet altijd de aandacht van ontwikkelaars, te meer omdat deze manier van ontwerpen in de meeste gevallen ook een prijs kent: extra uitgaven, minder opbrengsten, meer inspanning. Om die reden kunnen projecten waarmee grootschalig opgewekte elektriciteit uit zonne- en/of windenergie ruimtelijk goed ingepast wordt in aanmerking komen voor de subsidie Demonstratie Energie- en Klimaatinnovatie (DEI+) (RVO, 2021d). Bij deze projecten moeten de volgende kenmerken centraal staan: aandacht voor draagvlak, landschappelijke waarden (waaronder natuurinclusiviteit), het optimaal benutten van de beschikbare ruimte, en het voorkomen van hoge maatschappelijke kosten voor netaansluitingen. De bekendere SDE++ subsidieregeling stimuleert de productie van hernieuwbare energie, maar deze regeling vergoedt geen kosten voor landschapsinpassing en natuurinclusiviteit. De informatiebladen voor zonne- (A) en windparken (B) geven een aantal opties voor natuurinclusief ontwerpen.

4 Algemene conclusies en aanbevelingen

Deze studie is een verkenning naar effecten van duurzame energietechnologieën op biodiversiteit met als doel een toegankelijk overzicht voor beleidsmakers en andere beslissers in de energietransitie te bieden. We hebben ons beperkt tot een aantal belangrijke duurzame energietechnologieën en energiedragers: PV-parken, windenergie, warmtepompen, waterstof, Li-ion-batterijen en synthetische en biobrandstoffen. Voor deze duurzame energieopties hebben we door middel van literatuuronderzoek een eerste inschatting gemaakt van de belangrijkste effecten op biodiversiteit (zie de informatiebladen in de bijlage).

Dit hoofdstuk geeft een samenvatting van de impacts van de bestudeerde energietechnologieën op biodiversiteit (4.1), gerichte aanbevelingen voor lokale en nationale beleidsmakers om impact op dit gebied (4.2) en onderzoeksvragen voor kennis- of technologieontwikkeling (4.3). In de informatiebladen in bijlagen A t/m G wordt dieper ingegaan op deze aspecten.

4.1 Impact van de energietransitie op de biodiversiteit

Naast de klimaatcrisis is er ook sprake van een biodiversiteitscrisis: afname van aantallen dieren en planten, het uitsterven van soorten tot en met het verlies van ecosystemen. De oorzaken voor de afname van biodiversiteit zijn onder andere het verstoren of vernietigen van leefgebieden, milieuvervuiling en klimaatverandering. De oude, op steenkool, olie en gas gebaseerde energievoorziening, draagt sterk bij aan het verlies van biodiversiteit door haar bijdrage aan met name klimaatverandering, maar ook aan vervuiling en habitatverlies, bijvoorbeeld bij de winning van steenkool en olie.

De energietransitie heeft als doel om een schoon, CO₂-neutraal energiesysteem te realiseren. Het beperken van klimaatverandering is cruciaal voor het behoud van biodiversiteit, dus de energietransitie is ook een noodzakelijke stap voor het oplossen van de biodiversiteitscrisis. Ook duurzame energietechnologieën hebben echter effecten op de biodiversiteit. Negatieve effecten zijn bijvoorbeeld directe sterfte van dieren door windturbines, landgebruiksverandering door grootschalige zonneweides en biomassaplantages, en milieuvervuiling en habitatverlies door de winning van de benodigde grondstoffen. Een aantal duurzame technieken en energiedragers, zoals warmtepompen, batterijen, groene waterstof en synthetische brandstoffen, heeft zelf een relatief beperkt effect op de biodiversiteit in vergelijking met fossiele brandstoffen, maar zorgen wel voor een sterke toename van de vraag naar elektriciteit met de daarbij behorende impact op de biodiversiteit.

Het belangrijkste aandachtspunt voor beleidsmakers is om bij het maken en implementeren van beleid voor de energietransitie, integraal te kijken en dus ook rekening te houden met biodiversiteit. Daar zijn mogelijkheden voor en er wordt in Nederland al rekening mee gehouden bij diverse technologieën, maar deze hebben vaak ook een prijs. Zonneparken kunnen zo ontworpen worden dat ze biodiversiteit bevorderen vergeleken met bijvoorbeeld intensieve landbouw. Windturbines kunnen door locatiekeuze en technische maatregelen botsingen met vogels en vleermuizen beperken. Benodigde grondstoffen voor de duurzame energietechnieken met een grote impact op de biodiversiteit kunnen vervangen worden door alternatieve

materialen met een kleinere impact of door materialen te recyclen, zodat ze niet gewonnen hoeven te worden.

Helemaal voorkomen van impact op biodiversiteit van de energietransitie is echter onmogelijk. Het is daarom ook essentieel om te blijven werken aan energiebesparing. Dat kan door technische maatregelen, zoals efficiëntere elektrolyzers en woningisolatie, maar ook door het verminderen van de consumptie van energie-intensieve diensten en producten.

Voor de onderzochte technieken zijn specifieke aandachtspunten verzameld en beschreven in de informatiebladen in de bijlage van dit rapport.

4.2 Vervolgonderzoek

Uit het literatuuronderzoek voor deze studie blijkt dat er nog diverse kennishiaten zijn. De meeste onderzoeksvragen betreffen het ontbreken van kennis over een kwantitatief verband tussen een technologie en de impact op biodiversiteit. Het verkrijgen van inzicht hierin is arbeidsintensief en complex, maar noodzakelijk om onderbouwde verbeteringen aan te brengen in de impact op biodiversiteit door energietechnologieën. Hieronder volgen een aantal voorbeelden van onderzoeksvragen en suggesties voor technologieontwikkeling.

Vergroten van de kennis naar effecten van duurzame energietechnologieën

- Meer inzicht in de impact op de biodiversiteit van bestaande en alternatieve methodes van het winnen van diverse grondstoffen
- Verzamelen van meer praktijkresultaten over de impact van PV-parken op biodiversiteit, zodat statistisch meer betrouwbare kennis ontstaat.
- Verdiepend onderzoek naar oplossingen voor natuur-inclusieve configuraties van zonne-parken
- Wat zijn natuurlijke vliegbewegingen van vogels, vleermuizen en insecten en wat is de invloed van windturbines op vlieggedrag?
- Wat is de impact van geluidshinder (door windturbines op land en zee en warmtepompen) op de biodiversiteit? Denk hierbij ook aan het effect van (laagfrequent) geluid.
- Wat is de impact van elektromagnetische straling door stroomkabels en elektrische componenten, zoals batterijen en omvormers op de biodiversiteit en in hoeverre kunnen maatregelen, zoals een afschermd mantel om de kabel of deze dieper begraven, dit voorkomen?
- Wat is het effect van lekkage van waterstof op opwarming van de aarde?
- Wat is de impact van ondergrondse waterstofopslag en bodemenergiesystemen op bodembiodiversiteit? Goede technieken ontbreken om effecten bij een bodemenergiesysteem te controleren en monitoren.
- Wat zijn de biodiversiteitseffecten van verschillende technieken om direct CO₂ uit de lucht af te vangen?
- Wat is de impact van alternatieve of natuurlijke koudemiddelen op de biodiversiteit?

Beperken van negatieve effecten op biodiversiteit

- Onderzoek of het direct of indirect gebruik van zeewater voor elektrolyse gebruikt kan worden, zodat het zoetwatergebruik kan worden beperkt.
- Kan het rendement van de elektrolyser vergroot worden?
- Kan de lekkage van het koudemiddel in warmtepompen verder worden teruggebracht?
- Kan een niet-toxische en compacte technologie ontwikkeld worden om CO₂ uit de lucht af te vangen?
- Hoeveel batterijen komen in de verkeerde afvalstroom terecht en hoe kan de inzameling verbeterd worden?
- Met welke technieken kunnen we de terugwinning van grondstoffen verbeteren van met als doel een zo hoogwaardig mogelijke kwaliteit en zo minimale impact op de biodiversiteit?
- Kan de hoeveelheid metalen in de elektrodes van elektrolyzers verder teruggebracht worden, met name het schaarse en (zeer) dure platina en iridium?
- Hoe kunnen technologieën opgeschaald worden om brandstof te maken uit grondstoffen van de REDII Bijlage IX-A? Het gaat hierbij om “uitdagende” grondstoffen van vooral “hout-” en grasachtige origine.
- Onderzoek naar E-fuels en mogelijkheden voor versnelde implementatie
- Onderzoek, ontwikkeling en opschaling van nieuwe aandrijftechnologieën en distributie van bijbehorende energiedragers.
- Verder verbeteren van certificeringssystemen en bijbehorende controle voor duurzaamheid van biomassa.
- Nauwkeurig monitoren van de gevolgen van een toenemend biomassagebruik.
- Het ontwikkelen van synthetische brandstoffen die tot een lage emissie van NO_x en deeltjes leiden bij het gebruik.
- Welke (gedrags)maatregelen kunnen worden ingezet om bedrijven en consumenten te helpen om minder energie te gebruiken.

Referenties

- Alterra (2008). *Ecologische en natuurbeschermingsrechtelijke aspecten van windturbines op land*. J.E. Winkelman, F.H. Kistenkas, M.J. Epe, Alterra, Wageningen, 2008, Alterra-rapport 1780, <https://edepot.wur.nl/2061>
- Alterra (2018). *Kwetsbare soorten voor energie-infrastructuur in Nederland*. Buij, Ralph; Jongbloed, Ruud; Geelhoed, Steve; Jeugd, Henk van der; Klop, Eric; Lagerveld, Sander; Limpens, Herman; Meeuwssen, Henk; Ottburg, Fabrice; Schippers, Peter; Tamis, Jacqueline; Verboom, Jana; Wal, Jan Tjalling van der; Wegman, Ruut; Winter, Erwin; Schotman, Alex, Alterra, Wageningen, 2018, Alterra-rapport 2883, <https://edepot.wur.nl/449804>
- Babbitt, C.W. (2020). *Sustainability perspectives on lithium-ion batteries*. *Clean Technologies and Environmental Policy* (2020) 22:1213–1214. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01890-3>
- Bax & Company (2019). *Het batterijenlandschap - Onderwerpen, bedreigingen en kansen voor beleidsdoelen*.
- Breyer, C., et al (2020). *Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: a new type of energy system sector coupling*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9847-y>.
- Castelvecchi, D. (2021). *Electric cars and batteries: how will the world produce enough?*. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02222-1>.
- CBD (2012). *Geoengineering in relation to the Convention on Biological Diversity: Technical and regulatory matters*. In CBD Technical Series (Issue 66), 152 pages. .
- CBS. (2021a). *Minder landbouw, meer natuur*. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2016/23/nederland-tweede-landbouwexporteur-ter-wereld>.
- CBS. (2021b). *Hernieuwbare elektriciteit; productie en vermogen*. <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/82610NED>.
- De Correspondent (2016). *Factcheck: Windmolens kosten meer energie dan ze opleveren en helpen het klimaat niet*. <https://decorrespondent.nl/4256/factcheck-windmolens-kosten-meer-energie-dan-ze-opleveren-en-helpen-het-klimaat-niet/470456652512-9b612b13>.
- De Jong S. (2018). *Green Horizons - On the production costs, climate impact and future supply of renewable jet fuels* (PhD thesis), Sierk De Jong (2018). Thesis Utrecht University.
- Dena (2017). *The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU*. Siegemund, S., Trommler, M., Schmidt, P., Weindorf, W., Zittel, W., Raksha, T., & Zerhusen, J. 1–176, november 2017.
- Delpierre, M., Quist, J., Mertens, J., Prieur-Vernat, A., & Cucurachi, S. (2021). *Assessing the environmental impacts of wind-based hydrogen production in the Netherlands using ex-ante LCA and scenarios analysis*. *Journal of Cleaner Production*. .

- Derwent (2018). *Hydrogen for heating: atmospheric impacts. A literature review*. BEIS Research Paper, 21, oktober 2018.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/760538/Hydrogen_atmospheric_impact_report.pdf
- Detz, R.J., et al. (2018). The future of solar fuels: When could they become competitive? *Energy Environ. Sci.*, 2018, 11, 1653-1669.
- Detz, R.J., et al. (2020). *Hydrogen in the Netherlands: A review of recent Dutch scenario studies*, juli 2020. TNO 2020 M10971.
- Deutz, S. et al. (2018). *Cleaner production of cleaner fuels: wind-to-wheel environmental assessment of CO2-based oxymethylene ether as a drop-in fuel*, *Energy Environ. Sci.*, 2018, 11, 331.
- Díaz, S., et al. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. In *Science*.
<https://doi.org/10.1126/science.aax3100>.
- Dooley, K. et al. (2021). *Carbon-dioxide Removal and Biodiversity: A Threat Identification Framework*, Global Policy Volume 12 . Supplement 1 . April 2021.
- Dopffel et al. (2021). *Microbial side effects of underground hydrogen storage. Knowledge gaps, risks and opportunities for successful implementation*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021) 8594-8606.
- Down to Earth (2021). *De schat op de bodem van de zee*. Jaargang 12, nr. 66, augustus 2021.
- EC (2020). *Vragen en antwoorden over de verordening inzake duurzame batterijen*. December 2020.
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/nl/qanda_20_2311
- EC (2021). *Voluntary schemes* | Energy (europa.eu) website geraadpleegd december 2021.
- ETIP Bioenergy (2021). Website geraadpleegd december 2021. fame-fact-sheet.pdf (etipbioenergy.eu)
- ETIP (2021a). *Report on Eco-design & Energy Labelling for PV modules, inverters and systems in the EU*. <https://etip-pv.eu/news/other-news/new-report-on-eco-design-energy-labelling-for-pv-modules-inverters-and-systems-in-the-eu/>
- ETIP Bioenergy (2021b). *Hydrotreatment to HVO* (etipbioenergy.eu)
- ETIP Bioenergy (2021c) *Biomass to liquids (BTL) via Fischer Tropsch*. Biomass to liquids (btl) via fischer - tropsch a brief review (etipbioenergy.eu)
- EZK (2021). *Stand van zaken uitvoering motie zwarte wiek*, Brief van 23 november 2021,
<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/kamerstukken/2021/11/23/stand-van-zaken-uitvoering-motie-zwarte-wiek/stand-van-zaken-uitvoering-motie-zwarte-wiek.pdf>
- Fairphone (2017). *Zooming in on 10 materials and their supply chains*.
<https://www.fairphone.com/en/2017/05/04/zooming-in-10-materials-and->

their-supply-chains/.

- Fernández-DaCosta C. et al. (2019). *Potential and challenges of low carbon energy options: Comparative assessment of alternative fuels for the transport sector*. Applied Energy 236, 590-606.
- Frankel, Todd C and Peter Whoriskey (2016). *Tossed aside in the 'white' gold rush - Indigenous people are left poor as tech world takes lithium from under their feet*. Washington post.
- Fraunhofer ISE (2019). Fraunhofer ISE: *Photovoltaics Report*.
- Fraunhofer ISE (2021). Fraunhofer ISE: *Photovoltaics Report*.
- Gasparatos, A., Doll, C. N. H., Esteban, M., Ahmed, A., & Olang, T. A. (2017). Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (70). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.030>.
- Geelen, Charles & René van Gerwen (2021). *Natuurlijke koudemiddelen in warmtepompen*.
- Globiom (2015). *The land use change impact of biofuels consumed in the EU. Quantification of area and greenhouse gas impacts*. Final Report_GLOBIOM_publication.pdf (europa.eu).
- Hauck, M. (Mara), Niessink, R. (Robin), de Simon, L. (Lia), Spiekman, M. (Marleen), Zwamborn, A. (Arjan) (2020). *Technology Insights - Integrated Life Cycle Impacts and Costs Analysis of Heat Pumps*. Rapport niet openbaar.
- Havermans, O. (2021). *In dit tempo is Nederland binnenkort wereldkampioen soortenverlies*. Trouw. <https://www.trouw.nl/duurzaamheid-natuur/in-dit-tempo-is-nederland-binnenkort-wereldkampioen-soortenverlies~b6eaf940/?referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>.
- Heading, S., Dhawan, R., Walrecht, A., & Hasdell, J. (2021). *Resourcing the Energy Transition: Making the World Go Round*. Geographical and geopolitical constraints to the supply of resources critical to the energy transition call for a circular economy solution. March, 14, 2021. <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/xx/pdf/2021/03/resourcing-the-energy-transition.pdf>.
- Tsuyoshi Hoshino (2015). *Innovative lithium recovery technique from seawater by using world-first dialysis with a lithium ionic superconductor*. Journal of Desalination 2015 Vol.359 pp.59-63 ref.15.
- IEA (International Energy Agency) (2019). *The Future of Hydrogen – Seizing Today's opportunities*. IEA Publications.
- IEA (International Energy Agency) (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. IEA Publications, 283.
- IenW (2021). *Kamerbrief over Besluit energie vervoer (RED II) kalenderjaren 2022 t/m 2030* (8 oktober 2021).
- IIASA (2021). *Meeting biodiversity, climate, and water objectives through integrated strategies*. <https://iiasa.ac.at/web/home/about/210819-terrestrial-biodiversity.html>

- Infomil (2021). *Windturbine*, 2021, <https://www.infomil.nl/onderwerpen/integrale/activiteitenbesluit/activiteiten/installaties/windturbine>
- IPA (n.d.) *The primary production of platinum group metals (PGMs)*, International Platinum Group Metals Association, Paris.
- IPBES (2019). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*.
- Jeltes, Tom (2020). *How do you deal with noise nuisance?* <https://www.cursor.tue.nl/en/news/2020/december/week-3/prof-talk-how-do-you-deal-with-noise-nuisance/>
- Lee, D.S. et al (2021). *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018*, Atmospheric Environment 244 (2021) 117834.
- Michelle Lewis (2021). *Scientists have cost-effectively harvested lithium from seawater*. Elektrec. <https://electrek.co/2021/06/04/scientists-have-cost-effectively-harvested-lithium-from-seawater/?s=03>
- Liu, C. M., Sandhu, N. K., McCoy, S. T., & Bergerson, J. A. (2020). *A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fischer-Tropsch fuel production*. Sustainable Energy and Fuels, 2020, 4, 3129.
- Maboeta et al. (2006). *The effects of platinum mining on the environment from a soil microbial perspective*. Water, Air, and Soil Pollution (2006) 175: 149–161.
- Melin, H. E., Rajaeifar, M. A., Ku, A. Y., Kendall, A., Harper, G., & Heidrich, O. (2021). *Global implications of the EU battery regulation*. In *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.abh1416>.
- Milieu Centraal. (2020). *Notitie CO₂-emissiefactoren stroom*. 1–5. <https://www.co2emissiefactoren.nl/wp-content/uploads/2020/05/CO2-emissiefactoren-stroom-Milieu-Centraal-25-februari-2020.pdf>.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) (2020). *Verkennd Onderzoek Inzameling Lithium-Ion Batterijen in Nederland*.
- Minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) (2008). *Regeling beheer batterijen en accu's 2008*.
- Minke et al. (2021). *Is iridium demand a potential bottleneck in the realization of large-scale PEM water electrolysis?*, International Journal of Hydrogen Energy 46, 23581-23590.
- Natuurmonumenten (2021). *Windenergie*, 2021. <https://www.natuurmonumenten.nl/standpunten/windenergie>
- NBG (2021). *Brancheorganisatie Netwerk Groene Bureaus, Vleermuisprotocol 2021*, <https://www.netwerkgroenebureaus.nl/werken-aan-kwaliteit/vleermuisprotocol>.
- NEa (2021). Nederlandse emissieautoriteit. *Rapportage Energie voor Vervoer in Nederland 2020*.
- NRC (2020). *Waterstoffabrieken vragen veel elektriciteit*, 1 december 2020.
- Nugenta, D, Benjamin K. Sovacool (2014). *Assessing the lifecycle greenhouse gas*

- emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey*. February 2014, Energy Policy 65:229–244, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048>
- Nu.nl (2021). *Recyclen van accupakketten elektrische auto's niet altijd nodig, wel noodzakelijk*. 25 oktober 2021. <https://www.nu.nl/auto/6164112/recyclen-van-accupakketten-elektrische-autos-niet-altijd-nodig-wel-noodzakelijk.html>
- NWEA (2020). *Zeldzame metalen in windturbines*, 2020, <https://www.nwea.nl/wp-content/uploads/2020/03/NWEA-Factsheet-Zeldzame-metalen-windturbines-08-2018.pdf> (PDF van 2020).
- Oudes, D., & Stremke, S. (2021). *Next generation solar power plants? A comparative analysis of frontrunner solar landscapes in Europe*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111101>.
- Overheid (2022). *Regeling Groenprojecten 2022*. <https://wetten.overheid.nl/BWBR0046599/2022-06-01> (geraadpleegd op 24-8-2022)
- Pandyan et al. (2019). *Review of solid oxide electrolysis cells: a clean energy strategy for hydrogen generation.*, *Nanomaterials and Energy* 8(1): 2–22.
- PBL studie (2020). *Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden duurzame biomassa* (Verslag van een zoektocht naar gedeelde feiten en opvattingen).
- PBL, TNO, CBS en RIVM (2021). *Klimaat- en Energieverkenning 2021*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- PBL (2022). *Eindadvies basisbedragen SDE++ 2022*.
- RED II (2021). *Herziening_richtlijn_betreffende_hernieuwbare_energie*. EUR-Lex - 52021PC0557 - EN - EUR-Lex (europa.eu). In de tekst wordt met name gerefereerd aan Bijlage IX A en B.
- Renouvelle.be (2018). *Duurzame energie zal zich ontwikkelen zonder “zeldzame aardmetalen”*, 2018, <https://www.renouvelle.be/nl/duurzame-energie-zal-zich-ontwikkelen-zonder-zeldzame-aardmetalen>.
- Rijksoverheid (2021a). *Windopzee.nl*, 2021, <https://windopzee.nl/onderwerpen/effect-op/natuur/kansen>.
- Rijksoverheid (2021b), *Besluit omgevingsrecht*, Hoofdstuk 3, Afdeling 3.2, § 3.2.3, artikelen 3.13 - 3.15 (augustus 2021), <https://wetten.overheid.nl/BWBR0027464/2021-07-01> , diepe link https://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2021-07-01/#Hoofdstuk3_Afdeling3.2_Paragraaf3.2.3.
- Ripson & van 't Noordende (2020). *Integration of gigawatt scale elektrolyser in five industrial clusters*, Institute for Sustainable Process Technology (ISPT), June 18th, 2020.
- RIVM (2020). *Health effects related to wind turbine sound: an update*, 2021 <https://www.rivm.nl/publicaties/health-effects-related-to-wind-turbine-sound-update> .
- RIVM (2020a). *Factsheet Laagfrequent Geluid*, 2020, <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2020->

09/Factsheet%20laagfrequent%20geluid.pdf

RIVM (2021). *Factsheet gezondheidseffecten van windturbinegeluid*, 2021,
<https://www.rivm.nl/sites/default/files/2021-08/Factsheet-windturbines.pdf>

Rijksoverheid (2021a), Besluit omgevingsrecht, Hoofdstuk 3, Afdeling 3.2, § 3.2.3, artikelen 3.13 - 3.15 (augustus 2021),
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0027464/2021-07-01>, diepe link
https://wetten.overheid.nl/BWBR0022762/2021-07-01/#Hoofdstuk3_Afdeling3.2_Paragraaf3.2.3 Januari 2008, 191.

RVO (2014). *Routekaart Hernieuwbaar gas*.pdf (rvo.nl)

RVO (2019). *Slagschaduw en windturbines*, RVO, Publicatienummer: RVO-004-1901/FS-DUZA,
<https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/03/Slagschaduw%20en%20windturbines.pdf>

RVO (2021a). *Geluid en windmolens – algemeen*, 2021,
<https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-land/milieu-en-omgeving/geluid-en-windmolens/geluid-en-windmolens-algemeen>

RVO (2021b). *Soortenbescherming bij windprojecten*, 2021,
<https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-land/milieu-en-omgeving/natuur-en-ecologie/soortenbescherming>

RVO (2021c). *Slagschaduw - windenergie op land*, 2021,
<https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernemen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-land/milieu-en-omgeving/slagschaduw-0>

RVO (2021d). *Thema's Demonstratie Energie- en Klimaatinnovatie (DEI+) 2021*.
<https://www.rvo.nl/subsidie-en-financieringswijzer/demonstratie-energie-en-klimaatinnovatie-dei/themas-dei-2021>.

Sauciuc A. (2011). *Synthetic diesel from biomass by Fischer-Tropsch synthesis*.
328-sauciuc (icrepq.com)

Saunders (2020). *Land Use Requirements of Solar and Wind Power Generation: Understanding a Decade of Academic Research*, 2020,
<https://www.researchgate.net/publication/345638945>.

SBK (2012). *Meer met bodemenergie*.

SBK (2013). *Bodemenergie – Warm aanbevolen*.

Scheyder, E. (2021). *GM shakes up lithium industry with California geothermal project*. Reuters.
https://mobile.reuters.com/article/amp/idUSKCN2E8189?__twitter_impression=true&s=03.

SER Advies. *Biomassa in balans*. Advies Duurzaamheidskader biograndstoffen | SER

Schotman, A, F.F. van der Zee, G. Hazeu, J. Bloem, J. Sluijsmans & M. Vittek, (2021). *Verkenning van bodem en vegetatie in 25 zonneparken in Nederland*; Eerste overzicht van de ligging van zonneparken in Nederland en stand van de kennis over het effect van zonneparken op de

bodemkwaliteit. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3061.

SolarPower Europe (2020a). *EU Market Outlook for Solar Power 2020-2024*.

SolarPower Europe (2020b). *Global Market Outlook for Solar Power 2020-2024*. 140–167. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4607-9.ch006>.

Stichting de Noordzee (2018). *Windparken op de Noordzee: kansen en risico's*, 2018, https://vistikhetmaar.nl/app/uploads/2018/02/2018_Stichting-De-Noordzee_Windparken-op-de-Noordzee-kansen-en-risicos_HR.pdf

Stichting Natuur en Milieu (2021) <https://www.natuurenmilieu.nl/blog/windmolens-en-het-leven-eromheen>,
<https://www.natuurenmilieu.nl/themas/energie/projecten-energie/windenergie-op-land>,
<https://www.natuurenmilieu.nl/themas/energie/projecten-energie/windenergie-op-land/het-effect-van-windmolens-op-vogels-en-natuur>

Teije, Stefan ten (2021). *Nederlands bedrijf lanceert energiezuinige airco zonder broeikasgassen*. <https://www.nu.nl/wonen/6136039/nederlands-bedrijf-lanceert-energiezuinige-airco-zonder-broeikasgassen.html>

The Royal Society (2009). *Geoengineering the Climate: Science, Governance and Uncertainty*. RS Policy document 10/09. The Royal Society, London.

TKI Urban Energy. (2021). *Ruimtelijk potentieel van zonnestroom in Nederland*. 100.

TNO (2019). *Factsheet emissies en depositie van stikstof in Nederland*, TNO, oktober 2019.

TNO (2020). *Hydrogen in the Netherlands A review of recent Dutch scenario studies*. <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A83e918c3-4d9e-4319-ae82-bd3729726cdf>.

TNO (2021). *Factsheets windenergie*, te verschijnen op <http://www.energy.nl>

TNO (2021a). *Net zero pathways to 2050: all transport modalities*, TNO report R12360, December 2021.

TNO (2021b). *Op weg naar een groene toekomst: deel 2: hoe we grondstoffenschaarste kunnen voorkomen en onze ambities voor groene waterstof kunnen verwezenlijken*.

TNO (2021c). *Fully recyclable solar panels on the horizon*. <https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/renewable-electricity/solar-energy/pv/solar-modules-recycling/>.

TNO (2021d). *Towards nature inclusive east-west orientated solar parks*. September.

TNO webpage: <https://www.tno.nl/en/focus-areas/energy-transition/roadmaps/renewable-electricity/solar-energy/pv/solar-modules-recycling/>

TNO webpage [2]: <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/techtransfer/spin-offs/blue-heart-energy-nieuw-type-warmtepomp/>

- TNO webpage [3]: <https://www.tno.nl/nl/aandachtsgebieden/techtransfer/spin-offs/leydenjar-revolutionair-type-anode-in-batterij/>
- Uslu, A. (2021). *Assessment of biofuels in 2030 - Support to KEV 2021*. TNO 2021 P12023. <https://publications.tno.nl/publication/34638891/m8106w/TNO-2021-P12023.pdf>
- Uslu, A., et al. (2021). *Conceptadvies SDE++ 2022 Geavanceerde hernieuwbare brandstoffen* | PBL Planbureau voor de Leefomgeving
- Van der Valk et al (2020). *Inventory of risks associated with underground storage of compressed air (CAES) and hydrogen (UHS), and qualitative comparison of risks of UHS vs. underground storage of natural gas (UGS)*, TNO2020 R12005, 30 augustus 2020.
- Verkade, T. (2017a). *Hoe Tesla in Amerika aan een mijn bouwt waar auto's uit komen*. De Correspondent, januari 2017. <https://decorrespondent.nl/6090/hoe-tesla-in-amerika-aan-een-mijn-bouwt-waar-autos-uit-komen/308474145210-333689f9>.
- Verkade, T. (2017b). *Batterijen schadelijk voor het milieu? Ze gaan het redden!*. De Correspondent. <https://decorrespondent.nl/6039/batterijen-schadelijk-voor-het-milieu-ze-gaan-het-redden/305890864191-6fc3a812>
- Volkskrant (2020). *Echt groene energie laat natuur in haar waarde*, opinie van Fred Wouters (Vogelbescherming Nederland), Marc van den Tweel (Natuurmonumenten) en Hank Bartelink (LandschappenNL), 8 september 2020, <https://www.volkskrant.nl/columns-opinie/echt-groene-energie-laat-natuur-in-haar-waarde~b9de940d>
- Voor de wereld van morgen (2019). *Hoe onduurzaam zijn batterijen?* <https://www.voordewereldvanmorgen.nl/artikelen/hoe-onduurzaam-zijn-batterijen>
- Wageningen University & Research (2019). *Zonneparken natuur en landbouw*. Wageningen Environmental Research.
- Wageningen University & Research (2018). *Kwetsbare soorten voor energie-infrastructuur in Nederland*, Overzicht van effecten van hernieuwbare energie-infrastructuur en hoogspanningslijnen op de kwetsbaarste soorten vogels, vleermuizen, zeezoogdieren en vissen, en oplossingsrichtingen voor een natuurinclusieve energietransitie, Wageningen Environmental Research, mei 2018, Rapport 2883, <https://edepot.wur.nl/449804>
- Weeda & Segers (2020). *The Dutch hydrogen balance, and the current and future representation of hydrogen in the energy statistics*, TNO 2020 P10915, juni 2020.
- Wereld Natuur Fonds. (2020). *Living Planet Report Nederland*. Natuur en landbouw verbonden.
- Wikipedia (2021). *Underwater acoustics*, 2021: https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_acoustics
- Williamson, P. (2016). *Emissions reduction: Scrutinize CO2 removal methods*. Nature 530, 153–155.
- Wiser, R., Z. Yang, M. Hand, O. Hohmeyer, D. Infield, P. H. Jensen, V. Nikolaev, M. O'Malley, G. Sinden, A. Zervos, (2011). Wind Energy. In *IPCC Special*

Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, https://www.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Ch07.pdf

Witteveen+Bos (2020). *Catalogus voor ontwerp van natuurinclusieve offshore windparken* (Nature-Inclusive Design: a catalogue for offshore wind infrastructure), Wageningen Marine Research, June 2020, <https://www.wur.nl/nl/show/Catalogus-voor-ontwerp-van-natuurinclusieve-offshorewindparken.htm>

WWF (2021). *Rol en standpunten WWF*, 2021 <https://www.wwf.nl/wat-wedoen/waar-zijn-we-actief/nederland/noordzee/windenergie-op-de-noordzee>.

A Informatieblad PV-parken

A.1 Beschrijving

Er is steeds meer consensus in de wetenschappelijke wereld dat PV-technologie samen met windenergie naar verwachting de ruggengraat van het toekomstige energiesysteem zal zijn. Aangezien zonne-energie overal in grote hoeveelheden aanwezig is, is het potentieel zeer groot. Voor Nederland wordt het potentieel van PV in zijn totaliteit op ~ 100–200 GW geschat (TKI Urban Energy, 2021), waarbij zonneparken – afhankelijk van maatschappelijke/politieke keuzes – een aandeel van rond 10% zal voorstellen (TKI Urban Energy, 2021). Bij “PV-parken” gaat het om grote grondgebonden PV-installaties van in ieder geval tientallen MW vermogen. Voor deze grote installaties is dan ook het gebruik van aanzienlijke landoppervlakken nodig, die snel in de ordegrootte van enkele km² terecht kunnen komen (wat het gevolg is van de relatief lage energiedichtheden van typisch ~ 30 – 50 MW/km² voor PV parken (Oudes & Stremke, 2021).

Globaal gezien zijn PV-parken het grootste en belangrijkste segment van de tegenwoordige PV-markt. Het aandeel is ongeveer 60% tegenover 40% marktaandeel van PV dak-installaties (SolarPower Europe, 2020). In Nederland is de markt historisch iets anders gegroeid dan de mondiale markt. Weliswaar is er ook hier sprake van een groeiend marktaandeel van PV parken, maar het marktaandeel is met 20% aanzienlijk kleiner (SolarPower Europe, 2017). Het kenmerk van de tegenwoordige Nederlandse PV markt is dan ook de aanhoudende dominantie van PV dak-installaties. Toch zijn PV-parken ook in Nederland een belangrijk – en wat betreft vraagstukken omtrent biodiversiteit zeer zeker het meest relevante – segment van de PV-markt. Dit komt voort vanuit de algemene consensus dat PV dak-installaties geen relevante implicaties voor de biodiversiteit met zich mee brengen. Een uitzondering hierop zijn eventueel PV-installaties op groene daken, maar dit is vooralsnog een verwaarloosbaar klein marktsegment.

A.1.1 *Actualiteit & misvattingen*

In het kader van de actuele Regionale Energie Strategieën (RES) speelt PV op land een zeer belangrijke rol in de verduurzamingsplannen van de energie regio's – in veel van de RES-plannen is het de technologie met de hoogste opwekcapaciteit. Voor de vermindering van de broeikasgasemissies in Nederland is PV op land op die manier een effectieve en belangrijke technologie. Met een totaal geïnstalleerd vermogen van ruim 10 GWp (per einde 2020) wordt door PV in Nederland elk jaar een broeikasgas emissiereductie van ongeveer 5 Mt CO₂-equivalenten bereikt, op basis van een gemiddelde koolstofintensiteit van de 'grijze' elektriciteitsmix in Nederland van actueel rond 550 g CO₂-eq/kWh, die dan in dit geval wordt vervangen door emissievrije PV elektriciteit (Milieu Centraal, 2020). Door de plannen voor de verdere uitrol van zonneparken ontstaat er ondertussen echter ook aanzienlijke maatschappelijke weerstand. Die heeft meestal te maken met landconcurrentie, vooral met boeren, maar er komen hierbij ook deels zorgen omtrent biodiversiteit langs vanuit de milieuorganisaties.

Een belangrijke misvatting over PV-parken in verband met biodiversiteit is de breed aanwezige perceptie dat de effecten op de biodiversiteit exclusief negatief kunnen zijn. Dit is niet altijd het geval. Recent onderzoek toont aan dat er met behulp van natuurinclusieve ontwerpen en rekening houdend met aandachtspunten omtrent de locatie voor de bouw van zonneparken ook positieve effecten realiseerbaar zijn.

A.1.2 *Afbakening*

Dit informatieblad is beperkt op de biodiversiteitseffecten van PV-parken en richt zich wat betreft de gebruikte PV-technologie op de zogeheten wafer-gebaseerde kristallijne silicium technologie. Op specifieke effecten, die eventueel geassocieerd zijn met dunne film PV-technologie wordt hier dus niet verder ingegaan, aangezien het marktaandeel met ~ 5% vrij klein is. Verder worden de biodiversiteitseffecten in eerste instantie kwalitatief beschreven met een onderverdeling in de verschillende levenscyclus fases van de installatie.

A.2 Impacts

Onderzoek naar biodiversiteitseffecten van zonneparken is nog zeer nieuw. De hieronder gepresenteerde inzichten moeten dus met enige nuance worden geïnterpreteerd, aangezien deze deels nog behoorlijk onzeker zijn.

A.2.1 *Productie*

Levenscyclus analyse (LCA) studies geven als inzicht dat verreweg de meest schadelijke factor in de productiefase het maken van hoog gezuiverd silicium en vervolgens silicium wafers. Dit heeft te maken met verschillende factoren. Allereerst is landtransformatie en landoccupatie in verband met mijnbouw van belang, maar spelen ook schadelijke emissies vanuit fabrieken een rol, die ecotoxische effecten op bodems en zeewater veroorzaken. Daarnaast gaat de productiefase in het huidige energiesysteem natuurlijk ook nog gepaard met broeikasgasemissies, die vooral voortkomen uit de voor de productie gebruikte, vaak nog “grijze”, elektriciteit. De energierugverdiensijd⁴ van PV systemen is ondertussen door de continue verbeteringen van de productietechnieken gedaald naar rond 1,2 jaar in Noord-Europa (Fraunhofer, 2019).

Wat betreft deze fase kan opgemerkt worden dat de Europese Commissie bezig is met het implementeren van een initiatief omtrent eco-design & eco-labelling voor PV panelen en -systemen (ETIP, 2021). De betreffende indicaties met betrekking tot de 'eco-kwaliteit' van de diverse marktproducten zou dus gebruikt kunnen worden voor de keuze van lagere impacts.

A.2.2 *Constructie*

Er is weliswaar ook discussie over de milieueffecten en hierdoor impliciet ook biodiversiteitseffecten, die te maken hebben met het wereldwijde transport van vooral in Zuidoost-Azië geproduceerde PV-panelen via de internationale scheepvaart. Toch is het aandeel van transport bij deze effecten erg gering in

⁴ De tijd die het kost om de geïnvesteerde energie in het systeem 'terug te verdienen' door de geproduceerde energie. Een PV-systeem heeft in 1,2 jaar evenveel energie opgewekt als het kost om deze te maken.

vergelijking met de productiefase, typisch in de orde grootte van slechts 1%. Daarom wordt op het aspect transport hier niet in verder detail ingegaan.

A.2.3 *Gebruik*

Onderzoek naar biodiversiteitseffecten van zonneparken in de constructie- en gebruiksfase (en ook in het algemeen) is nog erg nieuw. In de gebruiksfase is het gebruik van grote landoppervlakken een van de belangrijkste factoren. In recent onderzoek (Gasparatos et al., 2017) (WUR, 2019) wordt de mogelijkheid van negatieve effecten benoemt. Hierbij wordt er echter genoemd dat er weinig peer-reviewed bewijs is voor deze effecten, die grotendeels meer op speculatieve overwegingen gebaseerd zijn en samenvattend als volgt kunnen worden weergegeven.

Een voorbeeld van recente inzichten omtrent de ontwikkeling van biodiversiteitsvriendelijke configuraties is dat de biodiversiteit door een ecologische inrichting van een zonnepark met extensief beheerde flora (verschralen bodem door maaien en afvoeren maaisel) verrijkt kan worden (WUR 2019, Schotman et al 2021). Echter, dat is alleen mogelijk, als de PV-park op landbouwgrond wordt aangelegd, waar de biodiversiteit extreem laag is (als gevolg van bemesting en gebruik van bestrijdingsmiddelen). Op andere locaties, waar het uitgangspunt van de biodiversiteit beter is, moet ervan worden uitgegaan dat de aanleg van een PV-park doorgaans een achteruitgang in biodiversiteit betekent. Een van de aspecten van cruciaal belang in biodiversiteitsvriendelijke configuraties is ook dat voldoende licht en water op de bodem terecht blijft komen en dat er deskundig beheer wordt toegepast.

TNO heeft in recente jaren onderzoek uitgevoerd naar de lichtinval op de bodem, voor diverse PV-park configuraties, zoals zuid-oriëntatie en oost-west oriëntatie. Dit onderzoek levert de aanbeveling om grotere afstanden tussen de panelen te bewaren bij plaatsing en preferentieel gebruik te maken van bifaciale, semitransparante panelen. Deze aanbevelingen werden door de Nederlandse autoriteiten overgenomen voor de configuratie voor concrete, actuele PV-park projecten in de provincie Flevoland (Westerveermeerdijk, Noordoostpolder) (TNO, 2021d). Ook zijn er indicaties dat zonneparken nieuwe nestlocaties bieden voor met sommige soorten Europese vogels (Kneu, Witte Kwikstaart, Zwarte Roodstaart, Grauwe Klauwier, Kramsvogel) (WUR_2019).

Verlies of fragmentatie van habitats

Verlies en fragmentatie van habitats kunnen onder andere ontstaan als hekken rondom PV op land installaties worden toegepast, waardoor dan de toegang tot de habitat met name voor zoogdieren volledig afgesloten wordt. Dit zou dan in Nederland vooral negatieve implicaties hebben voor migratie, schuilplaatsen, voedsel- en jacht territoria van bijvoorbeeld hazen, konijnen, vossen en reeën.

Risico's voor bodembiodiversiteit

Verder wordt er gespeculeerd dat zonneparken een negatieve impact kunnen hebben op de bodembiodiversiteit vanwege verminderde lichtinval, veranderde neerslagverdeling en verlaging van de gemiddelde bodemtemperatuur. Verdere aandachtspunten in verband met de bodembiodiversiteit zijn risico's van

bodemverdichting tijdens de aanleg van de zonneparken en vervuiling van de bodem met zink via verzinkte palen voor de zonnetafelconstructies. Verdiepend onderzoek uit (WUR, 2019) toont tegelijkertijd aan dat het mogelijk is om negatieve effecten te reduceren en dat er zelfs positieve effecten bereikt kunnen worden (zie A.3).

A.2.4 *Einde levensduur*

Aangezien PV-parken pas sinds ongeveer 10 jaar substantieel zijn gaan toenemen, is de end-of-life fase nog volop in ontwikkeling. Stichting OPEN verwacht ook dat de kosten voor recycling van PV en van de inzamelstructuur zullen gaan stijgen (PBL, 2022). 'In de Regeling afgedankte elektrische en elektronische apparatuur' (AEEA) is opgenomen dat deze kosten zullen worden doorberekend in de kostprijs.

Specifieke effecten van deze fase op de biodiversiteit zijn bij ons weten nog niet onderzocht en kunnen daarom hier niet besproken worden. Hier moet worden vermeld dat de Europese WEEE richtlijn recycling van PV stimuleert. Hierin wordt opgeroepen de impacts van mijnbouw te verminderen en het dumpen op stortplaatsen te vermijden. Vuilstort brengt in het algemeen het risico met zich mee dat materialen in het milieu terecht komen en hierdoor ook schade voor de biodiversiteit kunnen veroorzaken. Onderzoek op het gebied van PV recycling en design voor recycling krijgt wereldwijd steeds meer aandacht, ook bij TNO (TNO, 2021c). Een andere ontwikkeling is dat de voorwaarden voor een groenverklaring⁵ vanaf 1-1-2024 veranderen, waarbij deze alleen nog maar wordt afgegeven als de cellen en platen demontabel zijn en apart kunnen worden gerecycled, en als er een materialenpaspoort bij het PV-paneel wordt geleverd (Overheid, 2022).

A.3 Samenvatting

Alle levenscyclusfasen van PV-parken kunnen in grotere of mindere mate bedreigingen voor de biodiversiteit veroorzaken. De huidige stand van kennis suggereert dat de productiefase en de gebruiksfase in die context het meest belangrijk zijn. Wat betreft de productiefase, kan verondersteld worden dat de betreffende risico's vanuit de mijnbouw en de fabrieken vooral buiten Nederland ontstaan. Dit gezien het feit dat Nederland in de mondiale markt van PV-productie geen significante rol speelt.

Wat betreft de gebruiksfase spelen de risico's, die voortkomen uit de beslaglegging en verandering van aanzienlijke landoppervlakken, daarentegen zich volledig in Nederland af. Daarom is de gebruiksfase in het kader van nationale beleidsperspectieven bijzonder van belang. Een van de aspecten van cruciaal belang in biodiversiteitsvriendelijke configuraties is dat er voldoende licht en water op de bodem terecht blijft komen en dat er deskundig beheer wordt toegepast. Recent onderzoek toont aan dat door zogeheten natuurinclusieve configuraties van PV-parken ervoor gezorgd kan worden dat risico's voor de biodiversiteit in de

⁵ "Een groenverklaring wordt aangevraagd door en afgegeven aan een groenfonds die voornemens is in belangrijke mate bij te dragen aan het verstrekken van kredieten ten behoeve van een project dan wel het direct of indirect beleggen van vermogen in bedoeld project" (Overheid 2022).

gebruiksfase geminimaliseerd kunnen worden en ten opzichte van gebruik als landbouwgrond een verbetering voor de biodiversiteit kan betekenen. In andere gevallen moet ervan worden uitgegaan dat de aanleg van een PV-park doorgaans een achteruitgang in biodiversiteit betekent.

A.4 Vervolgonderzoek

Uit het literatuuronderzoek voor deze studie blijkt dat er nog kennislücken zijn. We benoemen hier een aantal onderwerpen waar verder onderzoek naar kan worden gedaan:

- Er is een behoefte voor meer praktijkresultaten over de impact van PV-parken op biodiversiteit, zodat statistisch meer betrouwbare kennis ontstaat.
- Er kan verdere verdieping van het onderzoek plaatsvinden naar oplossingen voor natuurinclusieve configuraties
- Kennis ontwikkelen over recycling van PV-panelen.

B Informatieblad Wind (op land en zee)

B.1 Beschrijving

Windturbines oogsten bewegingsenergie uit de lucht en zetten die om in elektriciteit. Windturbines op land komen het meeste voor, maar vanaf ongeveer het jaar 2000 wordt wind ook op zee ontwikkeld, waar hogere windsnelheden gelden. Eind 2020 bedroeg de realisatie voor wind op land in Nederland 4159 MW, wat neerkomt op een genormaliseerde elektriciteitsproductie in 2020 van 8960 GWh. Voor wind op zee was dat eind 2020 2460 MW, en dus een genormaliseerde elektriciteitsproductie in 2020 van 4985 GWh (CBS, 2021b). Het potentieel voor wind op land is 15 GW in 2050, wat maar liefst 45 TWh is voor een genormaliseerd jaar. Voor wind op zee in 2050 is dat 72 GW, 325 TWh voor een genormaliseerd jaar, tot 180 GW (TNO, 2021).

B.1.1 *Actualiteit & misvattingen*

Bij de huidige discussie over de energietransitie in Nederland is biodiversiteit een thema. Uit de dertig regionale energiestrategieën (RESsen) die recent opgesteld zijn volgt dat windenergie (en ook zon-PV) uit de directe woonomgeving gedrongen wordt, in de richting van natuurgebieden. Dit betreft bijvoorbeeld het IJsselmeer en het Markermeer, de Deltawateren, de Veluwe en het Waddengebied. Volgens natuurbeschermers is in deze gebieden de limiet in termen van verstoring van planten, dieren en ook mensen al bereikt. Voor mensen betreft dit natuurbeleving, ontspanning, sport en toerisme (Volkskrant, 2020).

Hoewel de impact van windenergie op biodiversiteit vaak negatieve aandacht krijgt, zijn natuurbeschermingsorganisaties ook constructief. Natuurmonumenten geeft duidelijk aan voorstander te zijn van windenergie, maar vraagt wel nadrukkelijk aandacht voor natuur en landschap bij de locatiebepaling van windmolens. (Natuurmonumenten, 2021). Ook Stichting Natuur en Milieu (2021) ziet voordelen: ze schrijft bijvoorbeeld dat wind op land en op zee onmisbaar is voor de toekomstige, duurzame energievoorziening. WWF zet zich wereldwijd in voor de transitie naar 100% hernieuwbare energie en ondersteunt de ontwikkeling van windenergie op zee, mits deze klimaatoplossing niet ten koste gaat van biodiversiteitsherstel. Daarvoor geeft ze een aantal voorwaarden (WWF, 2021).

Een veelgehoorde opvatting over windenergie is dat tijdens de productie van de turbines zoveel energie gebruikt wordt dat een windturbine eigenlijk niks oplevert. In werkelijkheid bedraagt de gemiddelde energierugverdiensdijd voor wind op land ruim 23 weken, bijna een half jaar. Voor wind op zee is het langer, maar meestal toch binnen een jaar. (Nugenta 2014, Wiser 2011). Een ander idee is dat er onacceptabel veel vogelslachtoffers vallen door aanvaringen met de turbinebladen. Dat er vogelslachtoffers vallen is inderdaad het geval, maar door zorgvuldige plaatsing in de omgeving en eventuele maatregelen te nemen blijft het aantal botsingen binnen acceptabele grenzen (zie B.2.3).

B.1.2 *Afbakening*

In dit informatieblad wordt voornamelijk de gebruiksfase van windenergie besproken, omdat deze naar verwachting de grootste impact op biodiversiteit heeft. Daarnaast komt de winning van zeldzame aardmetalen kort aan bod onder 'productie'. Een uitgebreidere toelichting op de impact van mijnbouw staat in het gelijknamige hoofdstuk.

B.2 Impacts

B.2.1 *Productie*

In dit informatieblad gaan we niet uitgebreid in op de impact van materialen die in een windmolen gebruikt worden (zie het hoofdstuk 'mijnbouw' voor een meer algemene toelichting op materiaalgebruik), maar willen we wel het gebruik van zeldzame aardmetalen kort benoemen.

Zeldzame aardmetalen zoals Neodymium, Dysprosium, Praseodymium en Terbium (NWEA, 2020) worden toegepast in permanente magneten in synchrone generatoren. Naar schatting betreft dit 23% van de operationele windturbines, de overige 77% zijn uitgerust met een elektromagnetisch geïnduceerd magneetveld, gebruikmakend van elektromagneten, gemaakt van koper en ijzer.

De winning en de zuivering van de zeldzame aardmetalen vereist hydro-metallurgische processen en zuurbaden die zware metalen, zwavelzuur en radioactieve elementen (uranium en thorium) afgeven. Naast mogelijke bodem- en waterverontreiniging bij onzorgvuldige verwerkingsprocessen kan radioactieve straling een direct effect hebben op de biodiversiteit in de omgeving. In China is een radioactiviteit gemeten in de dorpen van Binnen-Mongolië nabij de zeldzame aardmetalen van Baotou die 32 keer hoger is dan normaal (Renouvelle.be (2018)).

B.2.2 *Constructie*

B.2.2.1 Mogelijke impacts

Geluidshinder

Tijdens de aanleg van het windmolenpark op zee is de tijdelijke geluidsoverlast de grootste zorg voor vissen en zeezoogdieren (Natuur en Milieu, 2021). Voor de communicatie en de voortplanting ervan in het water zijn zeezoogdieren, maar ook vissen, afhankelijk van geluid. Extra geluid kan leiden tot fysieke schade, gedragsverandering, ontwijking van het gebied, maskering van achtergrondgeluid, (tijdelijk) habitatverlies, effecten op larven en voortplanting.

Verandering van land of zee

Tijdens de bouwfase van een windmolenpark op zee kan vertroebeling van het water en verstoring van de zeebodem optreden. Dit kan leiden tot (tijdelijk) habitatverlies, ontwijking van het gebied, verminderde overleving of directe sterfte. Ook kunnen er veranderingen plaatsvinden in het watersysteem, zoals het mixen van waterlagen, sedimentverplaatsing en veranderende wind- en golfpatronen, wat leidt tot veranderende leefomstandigheden. Tot slot kan verstoring van de

oppervlakte door de aanwezigheid van schepen tijdens de bouw leiden tot tijdelijk habitatverlies, ontwijking van het gebied en aanvaringen.

Doorgaans worden in de constructiefase van een windmolen op land rijplaten gebruikt voor het plaatsen van een kraan, zodat deze bij het hijsen niet wegzakt in de grond. Hierdoor wordt de grond tijdelijk afgedekt, wat het bodemleven beïnvloedt.

Klimaatverandering en vervuiling naar bodem, lucht en water

Het aanvoeren van de windturbineonderdelen en de hijskraan geeft veel transportbewegingen waar CO₂-emissies en vervuilende stoffen vrijkomen, waaronder NO_x en roetdeeltjes.

B.2.2.2 Opties om de impact te reduceren

Algemeen

Natuurmonumenten (2021), de stichting Natuur en Milieu (2021) en de stichting Noordzee (2018) geven aan dat windmolens in of dichtbij ecologisch belangrijke gebieden zoveel mogelijk vermeden moeten worden. Indien daar toch plannen voor zijn, ook gezien de urgentie van de energietransitie, moet worden beoordeeld of significante negatieve effecten zo volledig mogelijk uitgesloten kunnen worden en anders moet worden onderzocht wat de alternatieven zijn. Langs de windrijke kusten met veel vogeltrek kan dit bijvoorbeeld betekenen dat er wel windmolens komen, maar een kilometer landinwaarts en niet één lange lijn maar met voldoende ruimte tussen de windmolens.

Een andere aanpak waarover gesproken wordt, is de één procentnorm. Deze schrijft voor dat bij beschermde soorten niet meer dan één procent extra sterfte per jaar mag optreden als gevolg van windmolens. Er zijn echter aanwijzingen dat er een cumulatief effect is, waardoor, ondanks dat de één procentnorm wordt gehandhaafd, over een aantal jaren bezien toch voor grotere schade kan zorgen.

Een andere mogelijkheid is het compenseren van aangetaste ecologische waarde door het verbeteren van bestaande of het creëren van nieuwe habitat, door ecologische verrijking en door het vervangen van verstoorde ecosysteemcomponenten (Stichting de Noordzee (2018); Stichting Natuur en Milieu (2021)). Natuurmonumenten (2021) stelt verder voor om windmolens te clusteren, zodat cultuur- en natuurlijke landschappen elders gespaard kunnen worden.

Offshore

Offshore windparken zouden natuurinclusief kunnen worden ontworpen. Onder natuurinclusief ontwerpen wordt in dit geval verstaan dat de beoogde maatregelen moeten bijdragen aan de ecologie van inheemse soorten in de Noordzee, met extra aandacht voor herstellende soorten. Niet-inheemse soorten zouden daarbij geen stimulans moeten krijgen, waarbij er wel ruimte is voor het kweken ervan voor consumptie. De kavelbesluiten voor de windparken die vanaf 2020 op zee komen te staan bevatten voorschriften voor de windparkeigenaar om zich in te spannen voor ontwikkeling van onderwaternatuur.

Zo moeten de gebruikte materialen, zoals steen en beton, die de funderingspalen van de windturbines beschermen tegen erosie, voorzien worden van kleine en grote holen en spleten waarin zich planten en dieren kunnen vestigen. Ook mag de vergunninghouder van het windpark actief platte oesters introduceren of aan andere vormen van natuurbouw doen (Rijksoverheid, 2021a). In een rapport van Witteveen & Bos (2020) worden speciale kooi of beschermingsconstructies beschreven die op drie manieren een gunstig effect zouden moeten hebben op de ecologie: ze bieden een habitat, gaan erosie van de bodem tegen en bieden bescherming voor de kabels.

Andere suggesties voor het voorkomen, verkleinen of verkorten van de impact van offshore turbines in de constructiefase zijn (stichting de Noordzee, 2018):

- Vermijd het bouwen van windmolens tijdens migratie- en broedseizoen;
- Voor het beperken van elektromagnetische straling kunnen maatregelen genomen worden bij het kabelontwerp en kunnen ze op de juiste manier begraven worden;
- Het onderwatergeluid kan verminderd worden door technische maatregelen. In de bouwfase kan dit bijvoorbeeld met bellengordijnen rondom de palen, het langzaam opvoeren van het heivermogen en akoestische afschrikmiddelen.

B.2.3 Gebruik

B.2.3.1 Mogelijke impact

Geluidshinder

De draaiende rotorbladen van windturbines veroorzaken het meeste geluid, het zogenaamde aerodynamische geluid. De hoeveelheid geluid van dit type is vooral afhankelijk van de rotordiameter, het toerental en de vormgeving van de rotorbladen. Op het moment dat een rotorblad de mast passeert verandert de 'klankkleur'. De bewegende delen in de gondel, zoals de generator en de tandwielkast, veroorzaken mechanisch geluid. Of en hoeveel geluid die onderdelen maken, hangt af van het type turbine. Bij moderne turbines is dit geluid ondergeschikt (RVO, 2021).

In hoeverre het geluid van een windmolen een effect heeft op flora en fauna is echter niet bekend. Bij mensen is hinder het meest beschreven en bewezen effect van windturbinegeluid. Op indirecte wijze kan deze geluidshinder mogelijk weer andere gezondheidsklachten veroorzaken, maar onderzoeken hiernaar zijn niet eenduidig of vinden onvoldoende bewijs (RIVM, 2020).

Voor dieren kan extra geluid kan leiden tot fysieke schade, gedragsverandering, ontwijking van het gebied, maskering van achtergrondgeluid, (tijdelijk) habitatverlies, effecten op larven en voortplanting. Er zijn echter geen of weinig onderzoeksresultaten naar het effect van windturbinegeluid op dieren. Windturbines produceren ook laagfrequent geluid dat op relatief grote afstand ervaren kan worden (RIVM, 2021). Op zee kan geluid van meer natuurlijk voorkomende, hogere frequenties al heel ver dragen door het water, terwijl laagfrequent geluid minder geabsorbeerd wordt door water en zodoende het verste draagt (Wikipedia, 2021).

Voor de communicatie in het water zijn zeezoogdieren, maar ook vissen, afhankelijk van geluid.

Elektromagnetische straling

De kabels waarmee de opgewekte elektriciteit vervoerd wordt hebben een stralingsveld om zich heen, wat lokaal mogelijk kan leiden tot vermijding, aantrekking, desoriëntatie, gedragsverandering en verminderde overleving van flora en fauna.

Verandering van land of zee

De aanwezigheid van het windpark kan leiden tot habitatverlies, zoals minder vliegroutes, broed- en rust- en fourageergronden, en in het door dieren ontwijken van deze parken door verandering in vliegpatroon en migratieroutes als gevolg van barrièrewerking.

Het landgebruik voor windturbines betreft de plek zelf, waaronder een verhard pad naar de turbine toe. Dit is bedoeld om zwaar materieel overheen te laten rijden, nodig voor bepaalde onderhoudswerkzaamheden. Deze rijplaten dekken de bodem gedurende de gebruiksfase af, wat het bodemleven beïnvloedt.

Bij parken op zee kan de aanwezigheid van schepen voor onderhoud ook leiden tot verstoring. (Stichting Noordzee). Tegelijkertijd kunnen bepaalde diersoorten zich herstellen in windparken op zee omdat daar geen vissers meer mogen zijn die over de zeebodem gaan met sleepnetten.

Slagschaduw

Bij omwonende van de windturbine is bekend dat zij de slagschaduw vaak als hinderlijk ervaren. De mate van hinder wordt onder meer bepaald door de blootstellingsduur, de intensiteit van de wisselingen in lichtsterkte en de frequentie van het passeren (Infomil, 2021). Er zijn dan ook beperkingen gesteld aan de berekende duur van de slagschaduw. Deze bedraagt maximaal 17 dagen per jaar en maximaal 20 minuten per dag. In hoeverre de slagschaduw een effect heeft op flora en fauna is echter onbekend.

Aanvaring

Windmolens kunnen voor bepaalde soorten een direct gevaar vormen, zoals vogels, vleermuizen en insecten. De bescherming van planten- en diersoorten ligt vast in de Wet Natuurbescherming. De Europese Vogel- en Habitatrichtlijn is verwerkt in deze nationale wetgeving. De wet stelt hoge eisen: elke verstoring of doding van individuen van beschermde soorten en het verstoren van rustplaats, nest of eieren is verboden. Dit geldt voor bijna duizend beschermde diersoorten. Bij windprojecten bestaat dat risico op verstoring of doding. In een milieueffectrapportage wordt dit uitgebreid onderzocht, voornamelijk voor vogel- en vleermuissoorten. Wanneer uit onderzoek blijkt dat er mogelijk meer dan incidentele slachtoffers vallen, is een ontheffing vereist.

Vogels

Om de effecten van windturbines op vogels te onderzoeken, is kennis over natuurlijke vliegbewegingen en de invloed van windturbines op vlieggedrag noodzakelijk. Een veldonderzoek brengt in kaart welke vogelsoorten op welke manier gebruikmaken van het gebied en wat de te verwachten aanvaringsaantallen per soort zijn. Veldonderzoek wordt doorgaans uitgevoerd in het voor- en najaar. De stichting Natuur en Milieu (2021) schrijft dat voor wind op zee 0,01% van de langs vliegende vogels in aanvaring komt met de turbinebladen, wat ze voor de meeste populaties geen bedreigend verlies acht. Naar aanleiding van ervaringen in Noorwegen met het zwart kleuren van één rotorblad is er in Nederland een proef gaande in Groningen.

Vleermuizen

Windturbines kunnen ook een negatief effect hebben op vleermuispopulaties, waarvan diens echolocatie niet is ingesteld op een rotorblad dat met een snelheid van 200 km/uur van boven komt. Verandering van landschappelijke kenmerken maken locaties meer of minder risicovol voor vleermuizen. De meeste vleermuislachtoffers vallen in de nazomer en herfst, tijdens de migratie van trekkende soorten, en in gebieden waar structuren zijn die vleermuizen gebruiken.

Bij iedere ingreep waarbij mogelijk effecten op vleermuizen te verwachten zijn, moet het vleermuisprotocol worden toegepast. Het doel van dit protocol is om het belang van de functies van gebieden voor soorten vleermuizen vast te stellen voor de Wet Natuurbescherming (RVO, 2021b). Het is een hulpmiddel voor deskundige vleermuisonderzoekers en de beoordelaars van vleermuisonderzoek om te bepalen wat een juridisch redelijke onderzoeksinspanning is voor een specifieke locatie (NBG, 2021).

Insecten

Naar sterfte onder insecten door invloed van windturbines is momenteel nog weinig onderzoek gedaan. Echter, er zijn anekdotische aanwijzen dat deze invloeden wel bestaan, zoals bijvoorbeeld het feit dat migrerende vliegende insecten hoge en snelle luchtstromen opzoeken en zo in grote aantallen geraakt worden door wieken van windmolens (Stichting Natuur en Milieu, 2021).

B.2.3.2 Opties om de impact te reduceren

Om het aantal aanvaringen met rotorbladen te beperken kan een aantal maatregelen genomen worden, al is het effect in sommige gevallen nog onvoldoende duidelijk (Alterra, 2008, 2018). Deze maatregelen hebben in sommige gevallen invloed op de elektriciteitsopbrengst.

Aanpassingen zonder invloed op de opbrengst:

- zorgvuldige locatiekeuze, namelijk het mijden van natuurgebieden en andere belangrijke leefgebieden van vogels, maar ook grotere afstand tussen de turbines of juist clustering. Maak de turbine locatie onaantrekkelijk voor vogels: liever een PV-park om de turbines heen plaatsen dan natuurontwikkeling;

- vergroten van de zichtbaarheid van de turbines. Overdag kan dit met het kleuren van de rotorbladen en het 's nachts verlichten van de mast (met continue verlichting of de inzet van pulserende knipperlichten met afgestemde lichtintensiteit, kleur en pulsduur);
- ontwerpkeuzes; een open mast (vakwerkmast) zou meer vogelsoorten aantrekken dan een gesloten mast;
- grotere windturbines maken in principe ook méér slachtoffers, maar omdat ze meer elektriciteit opwekken zijn er minder van nodig: in absolute aantallen per turbine neemt het aantal slachtoffers toe, maar relatief gezien neemt het af (per hoeveelheid elektriciteitsopbrengst).

Aanpassingen met een negatieve invloed op de opbrengst:

- verhogen startwindsnelheid, zodat turbines langer stil staan bij weinig wind;
- verlagen van de draaisnelheid door aanpassing van de positie van de rotorbladen;
- vogelwaarschuwingssystemen die automatisch turbines tijdelijk stilzetten;
- voor vogels problematische turbines verwijderen.

B.2.4 *Einde levensduur*

In dit project hebben we geen aandacht besteed aan deze fase, maar te denken valt aan vervuiling en verstoring tijdens de ontmanteling. Ook kan door hergebruik en recycling van materialen de impact in de productiefase voorkomen worden. Na ontmanteling zou de omgeving naar de staat van vóór de installatie kunnen worden teruggebracht of de biodiversiteit verrijkt kunnen worden, bijvoorbeeld door extra natuurontwikkeling.

B.3 Samenvatting

Wat betreft de impact van windturbines op biodiversiteit is met name gekeken naar de gebruiksfase en daar blijken nog veel onzekerheden te zijn in de mogelijke effecten. Het is bijvoorbeeld bekend dat er sterfte optreedt van vogels, insecten en vleermuizen die in aanvaring komen met de turbine, maar in hoeverre dit populaties aantast en of bepaalde diersoorten windparken vermijden door habitatverlies of een barrièrewerking wordt nog onderzocht. Voor een aantal mogelijke effecten is onduidelijk of en in hoeverre deze invloed hebben op de flora en fauna, zoals geluidshinder, elektromagnetische straling van elektriciteitskabels en de slagschaduw.

In het algemeen raden diverse natuurorganisaties aan om windmolens niet in of dichtbij gebieden met ecologische waarde te plaatsen en significante negatieve effecten zoveel mogelijk te voorkomen. Op het niveau van de windmolen kunnen ook maatregelen worden genomen om aanvaringen te voorkomen, zoals de zichtbaarheid van de molen te verbeteren, waarvan niet altijd bekend is wat het effect van de maatregel is.

B.4 Vervolgonderzoek

Er zijn nog veel onduidelijkheden over de effecten van windturbines op flora en fauna. Denk bijvoorbeeld aan het effect van (laagfrequent) geluid, elektromagnetische straling of de slagschaduw en het nog beperkte inzicht in de sterfte door aanvaringen of verlies van (kwaliteit van de) habitat. Meer onderzoek hiernaar en beter inzicht in de effectiviteit van maatregelen zou kunnen helpen bij het beperken van biodiversiteitsverlies.

C Informatieblad Groene waterstof / elektrolyser

C.1 Beschrijving

Groene waterstof betreft de productie van waterstof door middel van elektrolyse uit duurzaam opgewekte elektriciteit. Deze waterstof wordt vervolgens getransporteerd, eventueel opgeslagen en gebruikt. Naast groene waterstof wordt er ook gesproken over grijze waterstof (productie uit aardgas) en blauwe waterstof (grijze waterstof waarbij de CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen). Hierbij verschilt de productiewijze van die van groene waterstof, maar zijn transport en opslag gelijk.

De huidige productie van groene waterstof is momenteel nog verwaarloosbaar klein met minder dan 1 PJ per jaar in Nederland (Weeda & Segers, 2020). Vrijwel alle waterstof wordt nu nog geproduceerd uit aardgas of olie. In veel toekomstscenario's volgens (TNO, 2020) wordt een grote rol voor groene waterstof verwacht, met 500 tot 1000 PJ per jaar in 2050, als energiedrager in een duurzaam energiesysteem voor Nederland. De meeste studies zien een belangrijke rol voor waterstof in de industrie. Over het gebruik van waterstof in sectoren als mobiliteit en de gebouwde omgeving zijn de meningen verdeeld. Groene waterstof heeft namelijk een aantal belangrijke voordelen. Allereerst is het gemakkelijker te transporteren en op te slaan dan elektriciteit, er kan mogelijk gebruikt worden gemaakt van het bestaande aardgastransportleidingen en het kan het gebruik van zonne- en windenergie voor de productie van brand- en grondstoffen mogelijk maken. Nadelen zijn omzettingsverliezen bij de productie van waterstof, waardoor er meer hernieuwbare elektriciteit geproduceerd moet worden. Ook zijn er onzekerheden in de opschaling van betaalbare technologieën voor productie, opslag en gebruik van groene waterstof.

C.1.1 *Actualiteit & misvattingen*

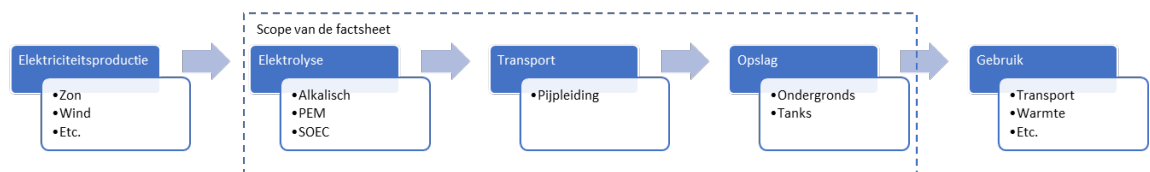
Er is momenteel discussie over dat de opschaling van de productie van waterstof door elektrolyzers zal zorgen voor een grote toename van de vraag naar elektriciteit (NRC, 2020). Op korte termijn kan de toename van de capaciteit van zonne- en windenergie de plannen voor elektrolyse mogelijk niet bijhouden, waardoor er in dat geval tijdelijk meer grijze stroom geproduceerd zal worden. Dit kan op korte termijn leiden tot een hogere CO₂-emissie. Dit valt buiten de scope van dit informatieblad.

Er is nog veel onbekend over de bijdrage van waterstof zelf aan klimaatverandering (BEIS, 2018). Waterstof is weliswaar zelf geen broeikasgas, maar reageert in de atmosfeer tot waterdamp en waterdamp in hogere lagen van de atmosfeer is wel een broeikasgas. Verder kan waterstof de afbraak van andere broeikasgassen, zoals methaan, in de atmosfeer vertragen. De bijdrage van waterstof aan het broeikaseffect (de Global Warming Potential of GWP) wordt geschat tussen 0 en 9,8 Mton CO₂-equivalenten per Mton waterstofemissie met een gemiddelde GWP van 4,3. Ter vergelijking: de GWP van CO₂ is 1 en die van methaan 25 (Derwent, 2018). De emissie van waterstof naar de atmosfeer is alleen afkomstig uit lekkage en daarmee veel kleiner dan de uitstoot van CO₂. Het effect van waterstof op

klimaatverandering wordt als klein ingeschat (BEIS, 2018). Over biodiversiteitsaspecten is weinig tot geen discussie.

C.1.2 Afbakening

Dit informatieblad gaat alleen over de biodiversiteitseffecten van groene waterstof en alleen over productie, transport en opslag van waterstof (Figuur 5). De productie van duurzame elektriciteit wordt in de informatiebladen over zonne- en windenergie besproken (A en B).



Figuur 4 Overzicht van de levenscyclusfasen en afbakening van dit informatieblad

Voor de productiestap van de levenscyclus van waterstof worden verschillende typen elektrolyzers onderzocht, de momenteel meest gebruikte alkalische elektrolyser en de PEM- en SOEC-elektrolyzers die nog in ontwikkeling zijn.

C.2 Impacts

C.2.1 Productie

De productie van groene waterstof vindt plaats in een elektrolyser, waarin gedemineraliseerd water met behulp van elektriciteit wordt omgezet in waterstof en zuurstof. Voor elke kilogram waterstof is ongeveer 9 liter zuiver water nodig. Het watergebruik voor groene waterstof is ongeveer twee keer zo groot als voor grijze waterstof (IEA, 2019). In droge periodes en in droge gebieden zou het onttrekken van water tot negatieve effecten voor de biodiversiteit kunnen leiden.

De totale footprint van een groene waterstoffabriek van 1 GW, inclusief randapparatuur is 8 tot 17 ha per GW (Ripson & van 't Noordende, 2020).

Uitgaande van een elektrolyser capaciteit van 50 GW in 2050, zou dit een totaal ruimtebeslag van 400 tot 850 ha betekenen. Dit zijn relatief beperkte oppervlaktes, die eenvoudig in te passen zijn in bestaande industriegebieden (Ripson & van 't Noordende, 2020). De directe effecten van groene waterstofproductie door landgebruik zijn dus beperkt.

De drie belangrijkste types elektrolyser zijn:

Alkalisch

De alkalische elektrolyser is momenteel het meest gebruikte type elektrolyser. Naast de gebruikelijke constructiematerialen zoals staal, wordt nikkel als elektrodemateriaal gebruikt en kaliumhydroxide als elektrolyt. Nikkel is een zwaar metaal en de winning van nikkel geeft risico's voor biodiversiteitsverlies (Tovar Sanchez, 2018). In een LCA-analyse wordt geconcludeerd dat de effecten van de elektrolyser op zaken als landgebruik en eutrofiëring zeer klein is vergeleken met de impact van de elektriciteit (opgewekt met windenergie) die gebruikt wordt voor de elektrolyser (Delpierre et al., 2021).

PEM

In een Proton Exchange Membrane (PEM) elektrolyser wordt gebruik gemaakt van platina en iridium als elektrodemateriaal en een polymeer als elektrolyt. Met name iridium is een zeer schaars metaal en er zijn zorgen dat de winning ervan een belangrijke bottleneck wordt in de opschaling van PEM-elektrolyse (Minke et al., 2021). Ook voor de winning van platina en iridium (iridium is een bijproduct van de winning van platina-groep metalen) worden negatieve effecten op biodiversiteit gemeld (Maboeta, 2006), maar ook hier geldt dat de hoeveelheden platina en iridium die worden gebruikt in een elektrolyser zeer klein zijn. De totale productie van platina is ca. 200 ton per jaar, waarvan het meer dan de helft in Zuid-Afrika (Minke et al. 2021). Uit een LCA-studie blijkt dat de CO₂-emissies veroorzaakt door elektriciteitsproductie de belangrijkste bijdrage levert aan de milieu-impact (IPA, n.d.). Ook voor PEM geldt dat de impact van de benodigde elektriciteit veel groter is dan die van de elektrolyser zelf (Delpierre et al., 2021).

SOEC

Een solid-oxide elektrolyser (SOEC) is een hoge-temperatuur elektrolyser met een hoger rendement dan de eerste twee types. Dit concept is nog in ontwikkeling en er worden nog verschillende elektrodematerialen gebruikt (Pandyan, 2019). Veel gebruikte metalen zijn Nikkel, Lantaan, Strontium, Cobalt en IJzer, waarvan sommige toxisch zijn en daarmee een negatieve impact op biodiversiteit kunnen hebben in het geval dit vrij zou komen in natuurlijke ecosystemen.

C.2.2 *Constructie*

Transport van waterstof zal naar verwachting plaatsvinden met behulp van pijpleidingen, waarbij in sommige gevallen aardgastransportleidingen gebruikt kunnen worden, in andere gevallen schepen. De leidingen bevinden zich ondergronds en de impact op biodiversiteit is beperkt. Waterstof is een zeer vluchtig gas, dus ook eventuele lekkage van waterstof zal geen directe effecten op de biodiversiteit hebben.

De opslag van waterstof zal kleinschalig plaatsvinden in tanks en grootschalig in ondergrondse zoutcavernes en (lege) gasvelden. Met name in gasvelden is er een enorme biodiversiteit aan micro-organismen (bacteriën en archaea) (Dopffel et al. (2021)). Gezien het feit dat moleculair waterstof niet van nature voorkomt in de ondergrond, zal de opslag van waterstof een effect hebben op het ondergrondse ecosysteem. De reactie omzetting van waterstof door de micro-organismen kan leiden tot een aantal ongewenste effecten, zoals de vorming van waterstofsulfide (H₂S), verstopping en lekkage. Er is nog veel onbekend over de interactie van waterstof met micro-organismen en het onderzoek dat gedaan wordt richt zich op de veiligheidsaspecten van de omzetting van waterstof door micro-organismen (van der Valk, 2020). Over het omgekeerde effect, dat van waterstofopslag op de ondergrondse biodiversiteit, wordt weinig tot geen onderzoek gedaan.

C.2.3 *Gebruik*

In dit project hebben we verder geen aandacht besteed aan deze fase, zie de afbakening in C.1.2.

C.2.4 *Einde levensduur*

In dit project hebben we verder geen aandacht besteed aan deze fase, zie de afbakening in C.1.2.

C.3 Samenvatting

De directe impact op biodiversiteit van de productie, transport en opslag van groene waterstof is beperkt, hoewel hierbij moet worden opgemerkt dat, aangezien grootschalige groene waterstofproductie nog niet voorkomt, er weinig bekend is over de effecten op biodiversiteit, zoals van de opslag van waterstof in gasvelden. Het gebruik van water bij de elektrolyse en van metalen in de elektrolyser leveren potentieel een bijdrage aan biodiversiteitsverlies. Uit LCA-studies blijkt dat de grootste impact van groene waterstof zit in de productie van de benodigde duurzame elektriciteit. Er gaat ongeveer 30% van de energie verloren in de vorm van warmte bij de omzetting van elektriciteit in waterstof en er is energie nodig om waterstof geschikt te maken voor transport naar de gebruikers. Er zijn dus meer zonnepanelen en windturbines nodig als er waterstof gebruikt wordt, dan als de elektriciteit direct gebruikt wordt. De effecten hiervan worden toegelicht in de informatiebladen A en B.

C.4 Vervolgonderzoek

Uit het literatuuronderzoek voor deze studie blijkt dat er nog kennishiaten zijn. We benoemen hier een aantal onderwerpen waar verder onderzoek naar kan worden gedaan:

- Onderzoek het direct of indirect gebruik van zeewater voor elektrolyse.
- Onderzoek naar het verminderen van de hoeveelheid metalen in de elektrodes van elektrolyser. Minder materiaalgebruik betekent dat er minder winning van de metalen nodig is (TNO, 2021b).
- Doe onderzoek naar de interactie van waterstof bij transport en opslag op biodiversiteit (met name micro-organismen) van de ondergrond.
- Zet in op onderzoek naar het verhogen van het rendement van elektrolyzers, zodat er minder duurzame elektriciteit nodig is om waterstof te produceren.

D Informatieblad Warmtepompen

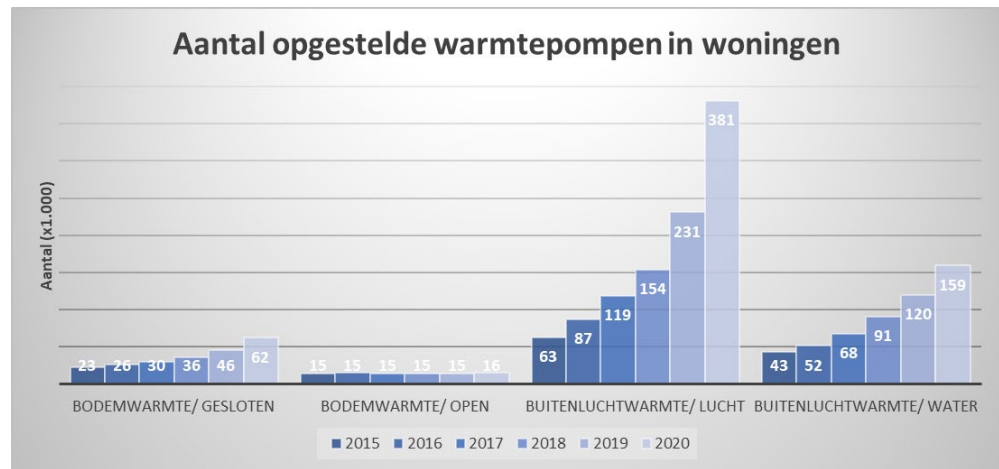
D.1 Beschrijving

Ruwweg kunnen twee typen warmtepompen onderscheiden worden: een luchtwarmtepomp en een bodemwarmtepomp. Een luchtwarmtepomp haalt warmte uit de buitenlucht en geeft deze binnen af via de lucht (een lucht-luchtwarmtepomp) of via een watersysteem zoals vloerverwarming of radiatoren (lucht-waterwarmtepomp). Een bodemwarmtepomp onttrekt warmte aan het grondwater bijvoorbeeld via een bodemwarmtewisselaar (gesloten systeem) of een warmte- en koudeopslag (WKO) systeem (open systeem), en geeft deze vaak af aan een watersysteem in het gebouw (een water-waterwarmtepomp), maar de warmte kan ook aan de lucht afgegeven worden (water-luchtwarmtepomp). Een warmtepomp kan ook in combinatie met een gasketel gebruikt worden, de zogenaamde hybride pompen.

Zowel lucht- als bodem warmtepompen hebben een vergelijkbare technische configuratie en functioneren volgens een vergelijkbaar principe. Er zijn echter relevante verschillen. Zo is een bodemwarmtepomp efficiënter en heeft naar verwachting een wat langere levensduur, 20 in plaats van 15 jaar⁶. Warmtepompen kunnen volgens hetzelfde principe als voor verwarming ook voor koeling zorgen. Een luchtwarmtepomp kan in oriëntatie van warmteverplaatsing worden omgedraaid en als airconditioner functioneren. Een lucht-luchtwarmtepomp wordt hoofdzakelijk als airconditioner gebruikt. Een warmtepomp met een bodembron kan in veel gevallen koel water oppompen met een verkoelend effect als gevolg.

In de energietransitie kunnen warmtepompen een grote rol spelen. Warmtepompen kunnen echter, anders dan aardgas, niet in elke context toegepast worden. Voor een warmtebron in de bodem is bijvoorbeeld ruimte in de ondergrond nodig en bij een luchtwarmtepomp moet rekening worden gehouden met geluidsoverlast voor de burens. Een warmtepomp kan om die redenen niet altijd een oplossing bieden in dichtbebouwd gebied. Ook moet het gebouw voldoende geïsoleerd zijn om met een warmtepomp goed te kunnen worden verwarmd, al kan een hybride warmtepomp hier een uitkomst bieden tot het benodigde isolatieniveau bereikt is. In Figuur 6 is te zien dat het aantal warmtepompen in woningen de afgelopen jaren is toegenomen, met name de lucht-luchtwarmtepompen (airco's).

⁶ TNO Technology factsheets. <https://energy.nl/>



Figuur 5 Trend van de afgelopen jaren in het aantal warmtepompen in woningen in Nederland (bron: CBS)

D.1.1 Afbakening

De installatie van een warmtepomp kan betekenen dat ook andere aanpassingen aan het gebouw of de infrastructuur moeten worden gedaan. Het gebouw moet namelijk door het nemen van alléén isolatiemaatregelen een energielabel gelijkwaardig aan label B hebben en heeft een afgiftesysteem nodig om met lage temperatuur verwarmd te kunnen worden. Tapwater verwarming moet in veel gevallen worden voorzien via een aparte installatie en wellicht moet de kookplaat vervangen worden om te kunnen koken zonder gas. Op verschillende plaatsen moet ook het elektriciteitsnet verzaamd worden door de verhoogde elektriciteitsvraag. De effecten van deze aanpassingen zijn hier niet meegenomen.

D.2 Impacts

D.2.1 Productie

Het hoofdstuk 'Mijnbouw' (4.5) geeft in meer algemene zin een beschrijving van de impact van de winning van grondstoffen op biodiversiteit. Hier lichten we kort de bevindingen van een levenscyclusanalyse (LCA) van warmtepompen toe **Error! Bookmark not defined.** In warmtepompen wordt onder andere koper en staal gebruikt. Uit de LCA blijkt dat met name koper een effect heeft op bodem en zoutwater ecotoxiciteit en zoetwater vermisting. Daarnaast heeft de productie van staal invloed op de terrestrische ecotoxiciteit. Verder dragen beide materialen bij aan de uitputting van minerale grondstoffen.

D.2.2 Constructie

Warmtebron

Een bodemwarmtepomp maakt gebruik van een warmtebron. Het aanleggen van bodemenergiesystemen kan een impact hebben op de bodem en het grondwater. Er moet daarom altijd melding worden gemaakt van de aanleg of een vergunningsprocedure worden gestart om het systeem te toetsen. De

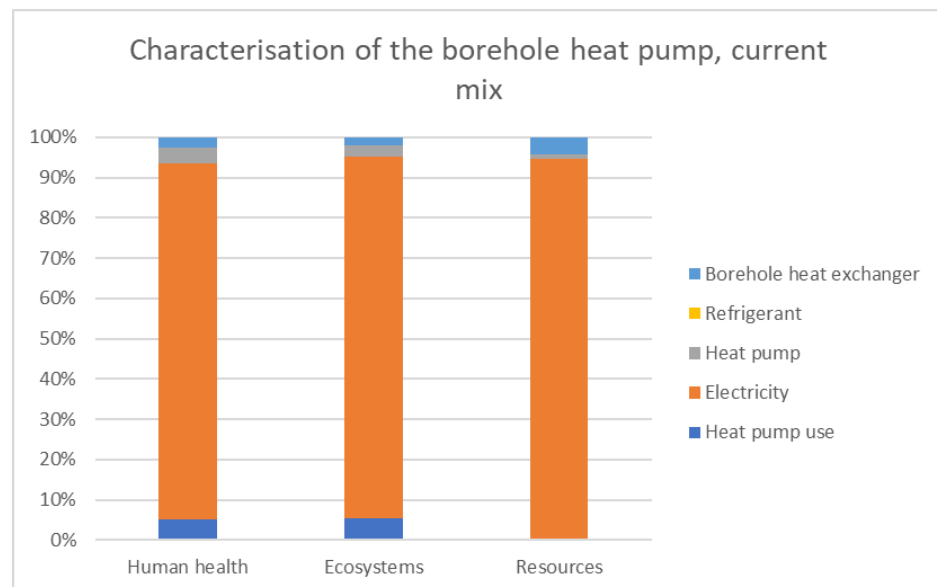
werkzaamheden moeten worden uitgevoerd door een gecertificeerd bedrijf. Bodemenergie kan in deze fase op de volgende manieren een effect op de biodiversiteit hebben (SBK, 2013):

- Menging van verschillende watertypen van verschillende bodemlagen, verzilting, eventueel met verontreinigingen. Dit kan worden voorkomen door de scheidende werking te herstellen na doorboring;
- Risico op lekkage van verontreinigende stoffen. Een gesloten systeem moet voor oplevering getoetst worden op waterdichtheid, zodat het medium in de leidingen – water met antivriesmiddel – niet gaat lekken, en wordt uitgerust met lekdetectie en lekbeveiliging;
- Vervuiling door lozing van boor- en spoelwater.

D.2.3 Gebruik

Elektriciteit

De impact van het elektriciteitsgebruik van de warmtepomp is de belangrijkste factor in de levenscyclusanalyse (Hauck et al, 2020). Figuur 7 laat het effect van een bodemwarmtepomp zien op de menselijke gezondheid, ecosystemen en materiaalbeschikbaarheid⁷ waarbij ervan uit is gegaan dat de warmtepomp gebruik maakt van de huidige elektriciteitsmix in Nederland. Een duurzamere elektriciteitsproductie heeft daarmee een direct effect op de impact van een warmtepomp.



Figuur 6 De bijdragen van verschillende onderdelen van een warmtepomp aan menselijke gezondheid, ecosystemen en materiaalbeschikbaarheid (Hauck et al, 2020)

⁷ Op basis van geaggregeerde 'endpoints' volgens de impact assessment methode ReCiPe 2016.

Koudemiddel

In warmtepompen wordt een koudemiddel gebruikt wat makkelijk condenseert en verdampt. Vaak zijn dat fluorkoolwaterstoffen (HFK's), wat sterke broeikasgassen zijn. Het koelmiddel kan tijdens de levensduur van de warmtepomp gaan lekken. Bovendien komt er koudemiddel vrij tijdens onderhoud en reparaties. Geelen (2021) schat dat dit laatste voor de meeste stationaire toepassingen in Nederland waarin koudemiddel wordt gebruikt ruim beneden de 10% ligt en houdt bij berekeningen 2% jaarlijkse lekkage aan voor kleine huishoudelijke warmtepompen.

Het gebruik van HFK's met een groot broeikasgaseffect moet worden gereduceerd volgens de Europese F-gassen verordening. Er worden alternatieve koelmiddelen verkend, zoals HFK's met een lager broeikasgehalte en natuurlijke koudemiddelen, zoals propaan, isobutaan, koolstofdioxide en ammoniak (Geelen, 2021). Het rendement van warmtepompen met natuurlijke koudemiddelen is gelijk of beter dan dat van synthetische koudemiddelen. Met uitzondering van ammoniak zijn koudemiddelen laag-giftig, waardoor bij ammoniak ook met dit aspect rekening moet worden gehouden. TNO heeft een thermo-akoestische warmtepomp ontwikkeld dat helium als alternatief medium gebruikt (TNO [2]). Tot slot zijn er ontwikkelingen rond koudemiddelvrije concepten, waaronder Nederlands bedrijf dat een airco heeft ontwikkeld die in plaats van een koelvloeistof water gebruikt (Teije, 2021). Het proces zou bovendien veel efficiënter zijn en 80% minder energie gebruiken.

Geluid

Een luchtwarmtepomp produceert een aanzienlijke hoeveelheid geluid. Recente wetgeving vanaf 1 januari 2021 bepaalt dat het geluid maximaal 40 dB mag zijn op de erfgrens. Een belangrijk aspect dat de geluidsproductie bepaald is een goede installatie van de warmtepomp. Als deze niet goed aan de gevel wordt bevestigd, kan de gevel gaan trillen en zelfs als resonator gaan fungeren (Jeltes, 2020). Er zijn ontwikkelingen om het geluid geproduceerd door luchtwarmtepompen verder te reduceren, zoals de eerdergenoemde thermo-akoestische warmtepomp die helemaal stil is. Het is vooralsnog onbekend wat het effect van warmtepompgeluid is op de biodiversiteit.

Bodemenergiesysteem

Bij de ingebruikname van de bodemwarmtebron kan de temperatuur rond de bronnen veranderen. Dit kan het bodemleven, de snelheid van chemische en biologische processen, mineraalevenwichten en de dichtheidsstroming verstoren.

Zo zijn er bij labtesten bij temperaturen rond de 30 °C effecten gevonden in de activiteit van micro-organismen, boven de 30 °C ook in de samenstelling van de organismen (SBK, 2013). De functies die deze microben verzorgden bleken wel behouden te blijven, omdat andere organismen ze overnamen. In veldtesten zijn geen aanwijzingen gevonden voor een toe- of afname van de biodiversiteit. Om leven in de bodem niet te verstoren, gelden er regels voor de maximale infiltratietemperatuur voor open systemen op 25°C gesteld en voor de maximale retourtemperatuur voor gesloten systemen op 30°C. Om bevriezing van de grond te voorkomen geldt voor gesloten systemen ook een minimumtemperatuur

van het medium van -3°C (SBK, 2012 & 2013). De meeste toegepaste open systemen zijn een lagetemperatuuropslag en hebben een temperatuur tussen 6°C en 16°C .

Voor gesloten systemen vormen menging van verschillende grondwatertypen door slecht afgedichte scheidende lagen en lekkage van het circulatiemiddel de belangrijkste risico's (STOWA 2020). Voor open systemen zijn menging van verschillende grondwatertypen en de verspreiding van bestaande verontreinigingen de belangrijkste risico's. Open systemen kunnen mogelijk nog een invloed hebben op de grondwaterstand, met name als er een grote afstand tussen de bronnen is.

D.2.4 *Einde levensduur*

Koudemiddel

Belangrijk in deze fase is een goede verwerking of recycling van het koudemiddel. Momenteel schat Geelen (2021) dat 20% van het terug te nemen koudemiddel in deze fase vrijkomt. Behalve dat het een broeikasgas is, kunnen HFK's onder andere afgebroken worden tot het toxische trifluorazijnzuur, wat zich kan ophopen in waterige milieus. Ook als nieuwe warmtepompen vanaf nu met een alternatief koudemiddel worden gevuld, blijft de verwerking van al in gebruik genomen warmtepompen voorlopig een aandachtspunt.

Bodemenergiesysteem

Het bodemenergiesysteem mag na de levensduur niet worden verwijderd om de waterscheidende lagen niet te beschadigen en blijft achter in de bodem. Open bronnen worden aangevuld en in een gesloten systeem wordt het medium vervangen door water. Het resterende risico zit dan in mogelijke menging van verschillende grondwatertypen en de verspreiding van verontreinigingen bij slecht afgedichte scheidende lagen **Error! Bookmark not defined..**

Na stopzetting van een bodemenergiesysteem kan de in de grond gebrachte warmte en/of koude nog een tijd blijven hangen. Met name in situaties waar weinig of geen grondwaterstroming is schatten scenarioberekeningen dat de temperatuur rond de bron nog zo'n 100 jaar warmer of kouder kan zijn dan voordat de bron werd aangelegd (SBK, 2012).

D.3 Samenvatting

Momenteel is het elektriciteitsgebruik de belangrijkste impact van de warmtepomp. Verduurzaming van de elektriciteitsmix en energiebesparing door het beperken van de warmte- en koudevraag verkleinen daarmee direct de impact.

Verder zijn de huidige gebruikte koudemiddelen sterke broeikasgassen waarvan een deel vrijkomt tijdens het gebruik en ontmanteling van de warmtepomp. Er zijn alternatieve koudemiddelen of warmtepompconcepten zonder koudemiddelen in ontwikkeling.

Tot slot kunnen bodemenergiesystemen een invloed hebben op de bodem(water)kwaliteit en het bodemleven. Er is een meldings- (< 70 kW) of

vergunningsplicht (>70 kW) en er zijn voorschriften om ongewenste impact te voorkomen, maar goed inzicht in de risico's en monitoring ontbreekt nog. Om beter inzicht te krijgen in gemaakte fouten en risico's beveelt STOWA (2020) aan om beter toezicht te houden en de administratie van systemen en incidenten te verbeteren.

D.4 Vervolgonderzoek

Uit het literatuuronderzoek voor deze studie blijkt dat er nog kennishiaten zijn. We benoemen hier een aantal onderwerpen waar verder onderzoek naar kan worden gedaan:

- Voor bodemenergiesystemen geeft STOWA (2020) aan dat er onvoldoende inzicht is in onder andere de risico's op menging van watertypen en verspreiding van verontreinigingen. Goede technieken om effecten bij de bron te controleren ontbreken nog en monitoring is noodzakelijk.
- Bij luchtwarmtepompen is het effect van geluid op de biodiversiteit nog onbekend.

E Informatieblad Lithium-ion batterijen

E.1 Beschrijving

Lithium is een licht en reactief metaal, wat het geschikt maakt voor energieopslag in toepassingen waar het gewicht van de batterij een rol speelt, bijvoorbeeld bij mobiele toepassingen. Lithium-ion batterijen zijn momenteel hét type batterijen dat voor elektrisch vervoer en smartphones gebruikt wordt. Het aandeel lithium-ion batterijen in draagbare toepassingen, zoals telefoons, laptops, camera's, fietsaccu's en gereedschap, is de laatste jaren toegenomen van bijna 14% naar 20% van het totaalgewicht aan batterijen.

E.1.1 *Actualiteit & misvattingen*

Vanuit de EU is er een nieuwe Richtlijn Batterijen die eisen stelt aan de duurzaamheid in de hele levenscyclus van alle soorten batterijen (EC, 2020). Het laat bijvoorbeeld enkel recyclingprocessen toe die meer dan 50 procent van het gewicht herwinnen. Ook heeft de Europese Commissie voor 2030 een minimaal deel aan gerecyclede materialen vastgesteld voor lithium-ion batterijen, zoals 12% voor kobalt en 4% voor lithium en nikkel.

E.1.2 *Afbakening*

We bevinden ons in de 2^e generatie lithium-ion batterijen. In de 1^e generatie bevatte de kathode alleen kobalt, maar dat is nu grotendeels (voor 80%) vervangen door nikkel en mangaan. De ontwikkelingen in batterijtechniek gaan snel. Er wordt bijvoorbeeld onderzocht of grafiet aan de anode kant kan worden vervangen door silicium wat de energiedichtheid met 50% kan doen toenemen (TNO [3]). Een andere ontwikkeling is dat het elektrolyt als vloeistof vervangen kan worden door een 'solid state' batterij die veiliger is, lichter, sneller oplaadt en een langere levensduur zou hebben. Op de langere termijn is de lithium-lucht batterij zelfs mogelijk een optie, waar nog maar weinig andere grondstoffen in zitten dan het lithium zelf. Dit informatieblad beperkt zich echter tot de impacts van huidige 2^e generatie lithium-ion batterijen.

E.2 Impacts

E.2.1 *Productie*

De huidige lithium-ion batterij bestaat uit de grondstoffen lithium, kobalt, mangaan, nikkel, grafiet, koper en aluminium die tijdens de winning diverse effecten kunnen hebben op de biodiversiteit. Het hoofdstuk 'Mijnbouw' (3.5) geeft in meer algemene zin een beschrijving van de impact van de winning van grondstoffen op biodiversiteit. Hieronder gaan we alleen wat verder in op de impact van lithium als hoofdbestanddeel van de lithium-ion batterij. Behalve grondstoffen voor batterijen te winnen, kunnen metalen uit batterijen worden hergebruikt (zie ook 'Einde levensduur').

Lithium

Momenteel wordt 90% van het lithium gewonnen in de 'Lithium driehoek' in Chili, Argentinië en Bolivia. Via diepe gaten wordt water (pekkel) naar de oppervlakte gebracht waar het verdampt in de zon. Het zout en lithium blijft achter. Dit proces onttrekt en verbruikt veel water in een van de droogste gebieden ter wereld (Voor de wereld van morgen, 2019). Dit kan leiden tot het slinken van waterreservoirs en daling van bodemwater, maar in het is nog onduidelijk in hoeverre dat ook gebeurt. Het kan ook zo zijn dat de waterbron van pekkel voor lithiumextractie een geïsoleerde bron is en geen invloed heeft op de waterbronnen die de bevolking gebruikt. Een aantal zoutmeren in de regio lijkt in oppervlakte af te nemen en dat kan gevolgen hebben voor de natuur, maar het is niet duidelijk of mijnbouw de oorzaak is. De milieueffecten van lithiummijnbouw zijn dan ook onzeker en onbekend (Frankel et al, 2016).

Lithium kan ook op andere plekken en op andere manieren gewonnen worden. In steengroeves in Australië kan het metaal bijvoorbeeld uit kleisedimenten worden gewonnen. In Nevada is een vergelijkbare lithiummijn als in Bolivia, maar daar wordt nu onderzocht of het lithium op een andere, snellere manier kan worden gewonnen uit het opgepompte water en het schone restproduct weer terug in de aarde kan worden gestopt (Frankel et al, 2016). Ook wordt onderzocht of lithium uit zeewater kan worden geëxtraheerd (Lewis, 2021; Hoshino, 2015).

Tesla heeft aangegeven op zoek te gaan naar andere lithiumreserves en de grondstoffen voor batterijen alleen nog maar uit in Noord-Amerika te willen halen (Verkade, 2017a). Ook General Motors (GM) heeft aangekondigd in lithiumproductie in California te investeren (Scheyder, 2021). Hier wordt gekeken of lithium kan worden onttrokken uit het water van een geothermiebron die voor elektriciteitsproductie wordt ingezet (Voor de wereld van morgen, 2019).

E.2.2 Constructie

Er is in deze studie hebben we geen aandacht besteed aan deze fase. Zoals eerder beschreven wordt onderzocht of grondstoffenwinning ook op andere plekken, dichterbij de batterijproductie, kunnen plaatsvinden, waardoor de effecten van grondstoffentransport af zullen nemen.

E.2.3 Gebruik

Vervuiling

Lithium-ion batterijen kunnen oververhit raken en ontbranden, bijvoorbeeld bij verkeerd opladen, met een niet originele lader of door overladen, of beschadiging door laten vallen. Dit zorgt voor brandgevaar, waarbij er giftige stoffen vrij kunnen komen. Hoe vaak dit in de praktijk voorkomt en hoeveel impact dit heeft is nog onbekend.

Elektromagnetische straling

Batterijen zenden elektromagnetische straling uit wat mogelijk een effect (op de lange termijn) kan hebben op mens en milieu. Er is onderzoek gaande naar het effect van straling door batterijen, gecoördineerd door Kennisplatform 'ElectroMagnetische Velden' (Bax & company, 2019).

E.2.4 *Einde levensduur*

De impact op biodiversiteit in deze fase is erg afhankelijk van de manier waarop met de batterijen wordt omgegaan. Indien ze op een verantwoorde manier worden verwerkt, dan kan de impact beperkt zijn. Batterijen kunnen echter in de verkeerde afvalstroom terecht komen of verkeerd worden verwerkt, waardoor ze kunnen ontbranden en er giftige stoffen in het milieu terecht kunnen komen, zoals lood en mangaan. Batterijen die worden gestort kunnen gaan lekken en zo bodem en water vervuilen. Een goede verwerking begint bij een goede inzameling.

Inzameling

Producenten van (producten met) batterijen en accu's hebben de wettelijke plicht om te zorgen dat afgedankte batterijen en accu's in kunnen worden verzameld en gerecycled (Ministerie van VROM, 2008). Producenten van elektrische apparatuur en elektronica moeten volgens de WEEE-richtlijn (Waste Electrical and Electronical equipment) minstens 65% van het verkochte volume inzamelen. In Nederland zorgen Weee Nederland en WeCycle voor inleverpunten van e-waste waarna de batterijen en accu's in de apparaten bij Stibat terecht komen voor verwerking. Verkopers van elektrische fietsen moeten de mogelijkheid bieden om fiets accu's in te leveren, vaak regelt Stibat de inzameling hiervan. De inzameling van auto accu's gebeurt meestal door Auto Recycling Nederland (ARN). Vaak worden afgedankte auto accu's overigens eerst nog gebruikt voor stationaire toepassingen, zoals de opslag van duurzame energie. Volgens Babbitt (2020) levert hergebruik van accu's voor energie-opslag ('cascadering') de meeste milieuvoordelen op.

Het is lastig om vast te stellen wat het percentage ingezamelde batterijen en accu's is, omdat niet bekend is wanneer de batterijen aan het einde van hun levensduur zijn. Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2020) heeft hier onderzoek naar laten uitvoeren. De berekeningswijze voor het inzamelpercentage is gebaseerd op wat er gemiddeld de afgelopen 3 jaar op de markt is gebracht versus wat er is ingezameld. Omdat de levensduur van lithium-ion batterijen veel langer is komt de potentiële inzamelhoeveelheid niet overeen met de werkelijke hoeveelheid die beschikbaar is voor inzameling. Naar schatting wordt 55% van de fietsbatterijen ingezameld en 25% van de draagbare lithium-ion batterijen (voor consumentengoederen). 0,04% van het huishoudelijk restafval bestaat uit batterijen, een fractie daarvan zijn lithium batterijen, en 1,1% bestaat uit elektronica, wat (lithium) batterijen kan bevatten. 4% van de fietsaccu's komt in het huishoudelijk afval terecht.

Het rapport komt met een aantal suggesties voor een beter inzameling van lithium-ion batterijen en het voorkomen van brand:

- Verbeteren van de bewustwording van de consument en van verwerkers betreft de gevaren van lithium-ion batterijen, van de noodzaak van een correcte inzameling van elektrische apparaten en batterijen en van de juiste manier van inzamelen, bijvoorbeeld door de lithium-ion batterijen niet in plastic zakjes doen;
- Inzamelcontainers voorzien van een hittesensor en een ingebouwd blussysteem, kunststof in plaats van metalen containers, en aangepaste inwerpopeningen zodat risicobatterijen op bepaalde locaties (zoals scholen) kunnen worden vermeden;

- Selectieve inzameling van elektrische apparaten en elektronica waar mogelijk een batterij in kan zitten;
- Goed doordachte financiële of niet-financiële retourpremiestystemen bieden mogelijk een uitkomst.

Recycling

De aanwezige metalen in batterijen kunnen worden teruggewonnen, wat een impact in de productiefase voorkomt. Voor een auto accu is het wettelijk verplicht om minstens 50% van het gewicht te recyclen. Volkswagen kan in de eigen recyclingfabriek momenteel 72% van het materiaal recyclen en wil toe naar 97%. Volgens Tesla kunnen de accupakketten nu al voor 100% worden gerecycled (nu.nl 2021).

Een voorbeeld van een recyclingfabriek is Umicore in Antwerpen. Daar wordt zo'n 95 procent van de kobalt, nikkel en koper uit de batterijen in pure vorm teruggewonnen (Verkade, 2017b). Uit lithium, mangaan en aluminium worden korrels geoxideerd metaal gemaakt die in constructiematerialen zoals beton kunnen worden verwerkt. Er wordt nu onderzoek gedaan in hoeverre ook het lithium weer uit dit geoxideerde metaal kan worden herwonnen. Het grafiet en plastic worden verbrand en dienen als brandstof voor de oven waar de batterijen in worden gesmolten. Bij die verbranding ontstaat naast CO₂ ook fluorgas dat zeer giftig is. Een deel van het fluorgas komt vrij komt en een deel wordt tot een vaste stof gemaakt en kan worden gestort.

In de komende 10-15 jaar komen er heel veel afgeschreven batterijen vrij. De EU verwacht een stijging van een factor 700 in het aantal lithium-ion batterijen dat gerecycled moet worden. Gezien het feit dat een goed recyclingproces cruciaal is om milieu-impact te voorkomen, is het belangrijk om de recyclecapaciteit mee te laten groeien.

E.3 Samenvatting

Indien het recycleproces goed wordt aangepakt en de capaciteit voldoende is, zit de milieu-impact van lithium-ion batterijen hoofdzakelijk in de productiefase. Opties om de effecten van de winning van grondstoffen terug te brengen of de hoeveelheid van de winning zelf, door recycling, bieden kansen om de impact van de productiefase te reduceren.

In Nederland liggen vooral mogelijkheden in de afvalverwerkingsfase. Lithium-ion batterijen worden bijvoorbeeld nog niet altijd goed ingezameld, met name batterijen in draagbare toepassingen komen nog in de verkeerde afvalstroom terecht. Verbetering van de bewustwording van (het belang van goede) inzamelmethodes kan dit helpen voorkomen. Verder is het belangrijk om een goed recyclingproces op te zetten van lithium-ion batterijen met voldoende capaciteit voor de groeiende afvalstroom.

E.4 Vervolgonderzoek

Uit het literatuuronderzoek voor deze studie blijkt dat er nog kennishiaten zijn. We benoemen hier een aantal onderwerpen waar verder onderzoek naar kan worden gedaan:

- Meer inzicht in de impact op de biodiversiteit van bestaande en alternatieve methodes van het winnen van de grondstoffen voor batterijen.
- Verder verbeteren van de terugwinning van grondstoffen uit afgedankte batterijen met een zo hoogwaardig mogelijke kwaliteit.

F Informatieblad Biobrandstoffen

F.1 Beschrijving

Biomassa voor biobrandstoffen komt uit gewassen, bomen en planten en dierlijke producten. De technieken hiervoor staan in de kinderschoenen. De opschaling en van technologie voor productie van geavanceerde biobrandstoffen vraagt om een helder, langjarig en consequent overheidsbeleid waar bedrijfsleven en wetenschap op in speelt. De SER (2020) geeft aan dat de toekomst van biomassa grondstoffen ligt bij de hoogwaardige inzet ervan als grondstof voor de chemie en materialen. De inzet van biomassa grondstoffen voor laagwaardig gebruik, in het bijzonder voor verwarming van gebouwen, wordt afgeraden.

Biobrandstoffen zullen preferent ingezet worden in marktsegmenten waar elektrificatie (nog) niet mogelijk is. Biobrandstof is bijvoorbeeld voorlopig nodig bij zwaar transport⁸ en lucht- en scheepvaart. Elektrische vrachtwagens en synthetische kerosine gemaakt uit duurzame energie en CO₂ zijn er nog niet. Biobrandstoffen zijn bijzonder geschikt voor lucht- en scheepvaart omdat deze, net als fossiele brandstoffen en synthetische brandstoffen, een hoge energiedichtheid hebben. Biomassa grondstoffen uit Annex IX B van de Richtlijn Hernieuwbare Energie (met name gebruikte oliën en vetten) kunnen hier een overbruggingsoplossing zijn. In het SER-advies 'Biomassa in balans' wordt benadrukt dat een zorgvuldige, snelle ombouw essentieel is en het tempo van deze ombouw omhoog moet (SER, 2020).

Voor personen- en licht vrachtvervoer over de weg wordt elektrisch vervoer als de belangrijkste manier gezien om de CO₂-emissies te beperken. Bovendien is het de verwachting, afgaande op huidige trends, dat zwaar wegverkeer op termijn vrijwel geheel zal worden geëlektrificeerd⁹ (TNO, 2021a).

Biobrandstoffen tellen mee voor het halen van de klimaatdoelen voor de transportsector. De op de markt toegelaten biobrandstoffen mogen namelijk volgens de RED-II¹⁰ criteria boekhoudkundig tellen als volledig klimaatneutraal (CO₂-vrij) op grond van internationale afspraken in Europees en VN-verband (IPCC). Ondanks het feit dat de daadwerkelijke well-to-tank CO₂-reductie van veel biobrandstoffen in de praktijk aanzienlijk lager ligt (RED-II).

⁸ Recent wordt steeds duidelijker dat het lange afstandstransport over de weg sneller en verdergaand geëlektrificeerd zal gaan worden. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/10/202210_TNO_-_techno_economic_uptake_potential_of_zero_emission_trucks_in_Europe.pdf

⁹ Naast batterij-elektrische aandrijving zal een deel van de zwaardere nul-emissievoertuigen waarschijnlijk ook door waterstof aangedreven gaan worden (KEV, 2021).

¹⁰ De REDII bevat bepalingen die minimum- of juist maximumwaarden voorschrijven voor verschillende categorieën biobrandstoffen (REDII, 2021; Uslu, 2021). Bij de nationale implementatie van de REDII hebben de lidstaten zelf enige sturingsruimte op de mix van typen biobrandstoffen die zal worden ingezet tussen nu en 2030, mits de nationale wetgeving tegelijkertijd óók aan de criteria van de REDII voldoet. In Nederland verloopt de implementatie van de REDII in nationale wetgeving middels een wijziging van de wet milieubeheer (IenW, 2021).

Biobrandstoffen moeten voldoen aan bepaalde duurzaamheidseisen. De gehele productieketen van biobrandstoffen moet gecertificeerd zijn door een duurzaamheidssysteem dat is erkend door de Europese Commissie (EC, 2021). Deze productieketen begint bij de teelt van grondstoffen en eindigt bij de levering aan vervoer (NEa, 2021).

Er worden verschillende soorten biobrandstoffen ingezet in transport, ter vervanging fossiele diesel, benzine of aardgas. Sommige soorten biobrandstoffen, die net iets andere eigenschappen hebben dan hun fossiele alternatief, kunnen maar gedeeltelijk worden bijgemengd aan fossiele brandstoffen. Daarnaast zijn er ook soorten biobrandstoffen die wel in hoge concentraties kunnen worden bijgemengd aan fossiele brandstoffen, omdat ze nagenoeg dezelfde eigenschappen hebben. Dit zijn de zogenaamde drop-in biobrandstoffen.

De momenteel belangrijkste biobrandstoffen zijn de benzinevervanger ethanol, de dieselvevanger biodiesel, de kerosinevervanger biokerosine en de aardgasvervanger 'hernieuwbaar' gas. Biokerosine en hernieuwbaar gas worden momenteel nog maar beperkt ingezet.

Ethanol kan zonder aanpassing van het voertuig worden bijgemengd aan benzine tot ongeveer 10% (NEa, 2021). Biodiesel bestaat in verschillende kwaliteiten. Het type FAME (Fatty Acid Methyl Esther) kan zonder voertuigaanpassingen worden bijgemengd tot ongeveer 7% (NEa, 2021). Daarnaast bestaat biodiesel ook in een drop-in kwaliteit: HVO (Hydrotreated Vegetable Oil). Hernieuwbaar gas is wat betreft samenstelling vrijwel identiek aan aardgas. Daarom kan het worden ingezet in transport als drop-in vervanger van aardgas of in de vorm van bio-LNG als vervanger van fossiel-LNG.

Ethanolproductie

Ethanol, wordt al eeuwenlang middels vergisting geproduceerd uit suiker- en zetmeel houdende gewassen. Deze gewassen kunnen ook gebruikt worden als voedsel of diervoeder. Vergisting, ook wel fermentatie, is een proces waarbij de (vrijgemaakte) glucose uit de gebruikte grondstoffen wordt omgezet in ethanol en CO₂.

Daarnaast bestaat er ook "geavanceerde" ethanolproductie, waarbij het ethanol met een ander, complexer proces wordt geproduceerd uit hout- en grasachtige grondstoffen – ook vaak aangeduid als lignocellulose houdende biomassa. Deze technologie is nog niet economisch competitief met de hierboven genoemde conventionele productiewijze van ethanol. Daarom is deze technologie dus ook nog niet op grote schaal beschikbaar (Uslu et al, 2021). De productie van geavanceerde ethanol uit hout- en grasachtige grondstoffen betekent dat deze productieroute niet direct concurreert met menselijke of dierlijke voedselvoorziening. Daarom staat de categorie hout- en grasachtige biomassa op de lijst van geavanceerde grondstoffen, waarvan de Europese Commissie vindt dat ze gestimuleerd moeten worden (bijlage IX A van de Richtlijn hernieuwbare energie (REDII, 2021)).

Biodieselproductie

De biodiesel soort FAME wordt middels het chemische proces verestering gemaakt uit al dan niet gebruikte, dierlijke en plantaardige oliën en vetten. (Etipbioenergy, 2021).

De biodiesel soorten HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) en HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) worden eveneens gemaakt uit al dan niet gebruikte, dierlijke en plantaardige oliën en vetten. Hierbij worden de als grondstof gebruikte oliën en vetten behandeld met waterstof om zuurstof uit de biomassa te onttrekken. Zo ontstaat een mengsel van lineaire, paraffine koolwaterstof moleculen, water en CO₂ (Etipbioenergy, 2021b). Biodiesel en biokerosine zijn fysisch-chemisch verwant, waarbij kerosine een wat "lichtere" brandstof is, vanwege de kortere koolstofketen (C12-C15) ten opzichte van diesel (C15-C18). Met name HEFA is ook geschikt als biokerosine (De Jong, 2018).

Indien FAME of HVO/HEFA gemaakt wordt uit ongebruikte spijsolie of vetten is sprake van conventionele biodiesel of kerosine. Als gebruikte oliën of vetten worden ingezet als grondstof is sprake van geavanceerde biodiesel omdat in dat geval voldaan wordt aan de REDII grondstoffeneis zoals geformuleerd in bijlage IX B van de Richtlijn hernieuwbare energie (REDII, 2021).

Daarnaast kunnen biodiesel en -kerosine ook gemaakt worden uit onder andere houtachtige biomassa middels het proces van vergassing gekoppeld aan het Fischer-Tropsch proces (Sauciuc A. (2011)). Deze technologie kent nog de nodige uitdagingen en is nog niet beschikbaar op commerciële schaal (Etipbioenergy, 2021c). Ook in dit geval is sprake van geavanceerde biodiesel, omdat de grondstof houtachtige biomassa genoemd wordt in bijlage IX A van de Richtlijn hernieuwbare energie (REDII, 2021).

Hernieuwbaar gas productie

Hernieuwbaar gas kan uit verschillende grondstoffen worden gemaakt via vergisting (biologisch) of vergassing (chemisch) (RVO et al., 2014). Dit informatieblad beperkt zich tot de productieroute door vergisting van natte biomassastromen zoals groente fruit en tuinafval, mest, riool- en afvalwaterzuiveringsslib. Deze natte biomassastromen vallen ook onder bijlage IX A van de Richtlijn hernieuwbare energie (REDII, 2021) en zijn daarmee een extra grondstofoptie voor de productie van geavanceerde biobrandstof.

F.1.1 Actualiteit & misvattingen

Maatschappelijke en wetenschappelijke controverse

De inzet van biomassa voor biobrandstoffen en andere toepassingen leidt tot veel maatschappelijke en wetenschappelijke discussie. Klimaatwetenschappers kijken bijvoorbeeld anders naar de inzet van bepaalde vormen van biomassa dan ecologen, die biodiversiteit in hun onderzoek centraal stellen (SER, 2020). In lijn hiermee concludeert het PBL (2020) dat de veelvormige complexiteit van het thema een eenduidig wetenschappelijk oordeel onmogelijk maakt. Zo zijn bijvoorbeeld de

in de literatuur genoemde ranges voor biomassabeschikbaarheid vaak groot. Dit hangt in belangrijke mate af van de bijbehorende aannames en gekozen scenario's (CE-Delft, 2020).

De voorstanders vinden biomassa aantrekkelijk omdat zij beredeneren dat de bij inzet van biobrandstoffen uitgestoten koolstofdioxide (CO₂) kan worden gecompenseerd met nieuwe bomen en planten. Anderzijds is in een evenzo brede kring de vrees dat een toenemende industriële benutting van biologische grondstoffen, naast de toenemende behoefte aan voedsel, onvermijdelijk zal leiden tot een nog verdergaande aanslag op de natuur. Een verdergaande inzet van biomassa zal leiden tot een verdergaande aantasting van de biodiversiteit. Die biodiversiteit staat al onverantwoord onder druk, met alle consequenties van dien, ook voor de voedselvoorziening (PBL, 2020). Ook vrezen tegenstanders van biobrandstoffen dat de CO₂-compensatie door nieuwe aanplant niet genoeg (kort-cyclisch) zal plaatsvinden waardoor de daadwerkelijke CO₂-reductie slechter uit zal pakken.

Het belang van de duurzaamheidsaspecten welzijn, natuur, biodiversiteit en welvaart wordt door alle stakeholders onderschreven, maar er zijn verschillen van inzicht in hoeverre concurrentie met voedselvoorziening, schending van mensenrechten en aantasting van biodiversiteit vermeden kunnen worden (PBL, 2020).

F.1.2 *Afbakening*

Biobrandstof is een verzamelnaam voor brandstof die is gemaakt uit de grondstof biomassa. De impact van biobrandstoffen op de biodiversiteit - en de maatschappelijke en wetenschappelijke discussie daarover - wordt in zeer belangrijke mate bepaald door het type en de herkomst van de gebruikte biomassa (PBL, 2020). Dit informatieblad richt zich daarom grotendeels op de voor de productie van biobrandstof gebruikte grondstoffen en besteedt geen specifieke aandacht aan de impact van transport en productieprocessen.

F.2 **Impacts**

De mate van duurzaamheid van de inzet van biobrandstoffen wordt uiteindelijk bepaald door de keten van productie tot en met toepassing. Het betreft een veelheid aan aspecten zowel op sociaaleconomisch als op ecologisch gebied. Voorbeelden van ecologische factoren zijn waterbeschikbaarheid, biodiversiteit, schadelijke emissies, bodemkwaliteit en koolstofvoorraad. (SER, 2020).

Biomassateelt en met name teelt van gewassen voor conventionele biobrandstoffen kan op twee manieren leiden tot extra CO₂-uitstoot en verlies van biodiversiteit (Globiom, 2015):

- Direct, wanneer bestaand niet-landbouwgebied, zoals bijvoorbeeld bos, ontgonnen wordt en in gebruik wordt genomen voor de teelt van grondstoffen voor biobrandstoffen. Hierbij gaat de biodiversiteitswaarde van het oorspronkelijke gebied (grotendeels) verloren;
- Indirect, wanneer bestaande landbouwgrond in gebruik wordt genomen voor de teelt van grondstoffen voor biobrandstoffen. De weggevallen

oorspronkelijke landbouwproductie uit dit gebied leidt vervolgens tot een vraag naar nieuwe productie elders met als gevolg uitbreiding van nieuw landbouwareaal ten koste van gebieden die eerder een andere functie hadden (ILUC, indirect land use change).

Directe en indirecte veranderingen in landgebruik zijn in de praktijk met elkaar verweven. Het ILUC-effect verschilt per gewas. Zo hebben de meeste suiker- en zetmeelgewassen een aanzienlijk lager ILUC-effect dan de meeste oliehoudende gewassen (Globiom, 2015). EU-regelgeving (o.a. REDII) beperkt het risico op ILUC. Desalniettemin concludeert PBL (2020) dat deze regelgeving de kans op ILUC weliswaar verkleint, maar dat toch waakzaamheid nodig is voor ILUC bij een sterke groei van de vraag naar biomassa.

Het PBL geeft dan ook het volgende advies: "Ondanks de eisen zoals die zijn gesteld in de huidige (EU-) wetgeving (zie paragraaf "actualiteit" (F.1.1)) is verlies van biodiversiteit door gebruik van biomassa een reëel risico. Daarom is het van groot belang dat de gevolgen van een toenemend biomassagebruik nauwkeurig worden gemonitord en dat in beleid een zorgvuldige afweging wordt gemaakt tussen vermindering van klimaatverandering en biodiversiteitsverlies" (PBL, 2020).

Vanwege de complexiteit de uiteenlopende wetenschappelijke resultaten ten aanzien van de mate waarin biodiversiteitsverlies optreedt worden in dit informatieblad de impacts niet nader gekwantificeerd.

F.3 Samenvatting

De inzet van biomassa voor biobrandstoffen heeft tot nog toe geleid tot veel maatschappelijke en wetenschappelijke discussie. Voorstanders benadrukken dat biobrandstoffen in mobiliteit bijdragen aan CO₂-reductie omdat zij redeneren dat de bij de verbranding uitgestoten CO₂ kan worden gecompenseerd met nieuwe bomen en planten. Tegenstanders vrezen dat inzet van biomassa onvermijdelijk ook leidt tot een verdergaande aantasting van biodiversiteit en zetten vraagtekens bij de mate van CO₂-reductie.

Het belang van de duurzaamheidsaspecten, waaronder natuur en biodiversiteit, wordt breed onderschreven, maar er zijn verschillen van inzicht in hoeverre aantasting van biodiversiteit vermeden kan worden (PBL, 2020).

De impact van biobrandstoffen op de biodiversiteit - en de maatschappelijke en wetenschappelijke discussie daarover - wordt in zeer belangrijke mate bepaald door het type en de herkomst van de gebruikte biomassa (PBL, 2020). Biomassateelt kan op twee manieren leiden tot extra CO₂-uitstoot en verlies van biodiversiteit (Globiom, 2015). Ten eerste direct: wanneer nieuw landbouwgebied ontgonnen wordt, ten koste van bijvoorbeeld bos, voor de teelt van biomassa grondstoffen. Ten tweede indirect: wanneer bestaande landbouwgrond wordt gebruikt voor teelt van biomassa grondstoffen, terwijl tegelijkertijd de oorspronkelijke landbouwfunctie verschuift naar nieuw ontgonnen (natuur-)gebieden elders.

Om deze negatieve effecten op biodiversiteit te beperken moeten biobrandstoffen voldoen aan een duurzaamheidssysteem dat is erkend door de Europese

Commissie (EC, 2021). Ondanks deze EU-wetgeving acht onder andere het PBL (2020) verlies van biodiversiteit door gebruik van biomassa een reëel risico. Veel van de biograndstoffen met de laagste biodiversiteitsimpact zijn (nog) moeilijk om te zetten in biobrandstoffen. Dit vergt nog R&D en opschaling.

F.4 Vervolgonderzoek

De onderzoeksvragen zijn geformuleerd in het licht van twee factoren. De eerste factor is de verwachte sterk groeiende vraag naar biobrandstoffen met name in scheep- en luchtvaart (TNO, 2021a). De tweede factor is dat de wereldwijde beschikbaarheid van duurzame biomassa grondstoffen beperkt is en Nederland daar geen onevenredig groot beslag op mag leggen (SER, 2020). Dit leidt tot de volgende onderzoeksvragen, die bijdragen aan vermindering van impact op biodiversiteit:

- Beperking van (de toekomstige groei van) inzet van biobrandstoffen door:
 - Enerzijds voor bestaande aandrijflijnen met verbrandingsmotor het stimuleren van onderzoek naar E-fuels en versnelde implementatie daarvan als vervanger van biobrandstoffen;
 - Anderzijds - en kwantitatief nog belangrijker - gaat het om onderzoek, ontwikkeling en opschaling van nieuwe aandrijftechnologieën en distributie van bijbehorende energiedragers die de toekomstige inzet van biobrandstof kunnen vervangen. Dit betekent dus maximale elektrificatie aangevuld met waterstof en daarnaast voor scheepvaart ook ammoniak (TNO, 2021a).
- Maximaliseren van de inzet van de meest geavanceerde en zo duurzaam mogelijke biobrandstoffen. In het bijzonder door onderzoek naar en opschaling van technologieën om brandstof te maken uit grondstoffen van de REDII Bijlage IX-A. Het gaat hierbij om “uitdagende” grondstoffen van vooral “hout-” en grasachtige origine;
- Het verder verbeteren van certificeringssystemen en bijbehorende controle voor duurzaamheid van biomassa;
- Het nauwkeurig monitoren van de gevolgen van een toenemend biomassagebruik en daarbij een zorgvuldige afweging blijven maken tussen vermindering van klimaatverandering en biodiversiteitsverlies (PBL, 2020). Hierbij aansluitend concludeert de SER (2020) dat het essentieel is dat continue verbetering onderdeel uitmaakt van het verduurzamingsproces op het gebied van biomassa.

G Informatieblad Synthetische brandstoffen

G.1 Beschrijving

Dit informatieblad heeft betrekking op synthetische transportbrandstoffen, geproduceerd uit duurzame elektriciteit en CO₂. De meest voorkomende route van productie is er een waarbij de duurzame stroom via elektrolyse wordt omgezet in waterstof dat vervolgens reageert met afgevangen CO₂ tot gasvormige of vloeibare brandstoffen (Detz, RJ; Reek, JNH, Van der Zwaan, 2018). Er zijn ook andere routes in ontwikkeling, zoals directe reactie van CO₂ met zonlicht en water of de omzetting van CO₂ tot CO en reactie met water of H₂ (Detz, RJ; Reek, JNH, Van der Zwaan, 2018). De omzetting van CO₂ naar een brandstof kost veel energie. Dit valt te verklaren door de wet van behoud van energie: de verbranding van een koolwaterstof atoom levert energie en produceert CO₂ en water, het omgekeerde proces, dus de productie van een koolwaterstof atoom uit CO₂ en water kost evenveel energie dan het omgekeerd opleverde.

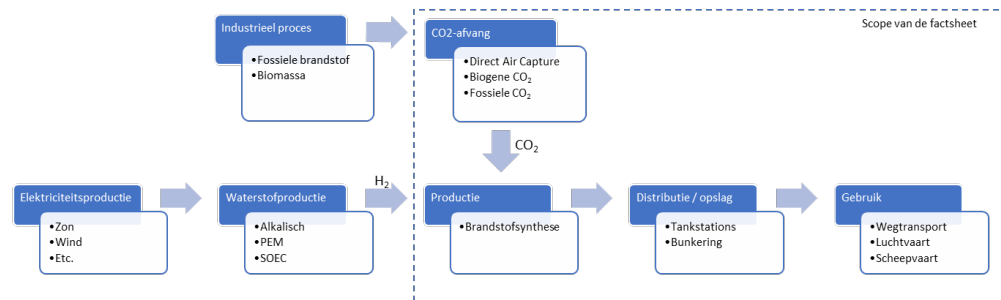
De bron van de CO₂ is een belangrijke factor, omdat hoewel in de productie van synthetische brandstoffen weliswaar CO₂ wordt vastgelegd, komt deze vrijwel onmiddellijk weer vrij als de brandstof gebruikt wordt in een transportmiddel. Bij gebruik van CO₂ afkomstig van een fossiele bron is de broeikasgas emissiereductie beperkt of zelfs negatief (Fernandez – da Costa, 2019). Bij CO₂ afkomstig van een biogene bron, zoals bijvoorbeeld biogas productie, of directe CO₂-afvang uit de lucht – ook wel Direct Air Capture – wordt vaak wel gesproken van klimaat neutrale brandstoffen.

G.1.1 *Actualiteit & misvattingen*

Voor personen- en licht vrachtvervoer over de weg wordt elektrisch rijden als de belangrijkste manier om de CO₂-emissies te beperken gezien. Voor scheepvaart en luchtvaart is elektrificatie en grotendeels waterstof voor de komende decennia nog geen optie (Siegemund et al., 2017). Voor die sectoren wordt veel verwacht van CO₂-neutrale synthetische brandstoffen. De grootschalige productie van synthetische brandstoffen is niet nieuw, maar het gebruik van waterstof en CO₂ als bron gebeurt alleen nog op kleine schaal. Hoewel het afvangen van CO₂ uit fabrieken reeds gebeurt op grote schaal, is Direct Air Capture nog in de opschalingsfase.

G.1.2 *Afbakening*

Dit informatieblad gaat alleen over de biodiversiteitseffecten van de productie, distributie en gebruik van synthetische brandstoffen (Figuur 8). Ook de CO₂ afvang wordt hierin meegenomen. De productie van duurzame elektriciteit (zon (A) en wind (B)) en van waterstof (C) wordt in de betreffende informatiebladen van deze studie besproken.



Figuur 7 Overzicht van de levenscyclusfases en de afbakening in dit informatieblad

G.2 Impacts

G.2.1 Productie

CO₂

Voor de afvang van de benodigde CO₂ zijn verschillende technologieën in gebruik of in ontwikkeling, zoals chemische solvents, sorbentia en membranen. Bepaalde chemicaliën die als solvent gebruikt worden kunnen leiden tot de emissie van milieugevaarlijke stoffen, zoals nitroso-amines, die veel water gebruiken, maar ook een negatief effect kunnen hebben op biodiversiteit (Dooley, 2021)(Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2012).

Direct Air Capture wordt een van de meest milieuvriendelijke opties voor grootschalige CO₂-verwijdering genoemd (Williamson, 2016). Specifiek voor Direct Air Capture geldt dat de lage concentratie CO₂ in de lucht (0,04% tegen 4 tot 10% in industriële rookgassen) vrij grote installaties vereist (Dooley, 2021). Hiervoor is ruimte nodig en dat kan ten koste gaan van biodiversiteit. In een studie naar een zeer grootschalige DAC-installatie in de Maghreb-regio, is het ruimtebeslag voor de gehele DAC-installatie berekend voor de afvang van 1 Gton CO₂, wat gelijk staat aan ongeveer een kwart van de uitstoot van de hele EU, op ongeveer 500 km². Het ruimtebeslag voor de opwekking van de benodigde zonne- en windenergie is veel groter dan die van de DAC-eenheden zelf: het totale landgebruik van het systeem is 5244 km² (Breyer et al., 2020).

Synthetische brandstof

De productie van de synthetische brandstoffen zelf gebeurt in chemische fabrieken met katalysatoren waarin ijzer, chroom, kobalt en ruthenium verwerkt is. In recente LCA-studies wordt alleen aandacht besteed aan de broeikasgasbalans, waaruit voorzichtig geconcludeerd kan worden dat de overige milieueffecten relatief beperkt zijn (Deutz, 2018) (Liu et al., 2020).

G.2.2 Constructie

Transport van synthetische brandstoffen naar de eindgebruiker kan op verschillende manieren, afhankelijk van de productielocatie. Er zijn ideeën om grote installaties voor synthetische brandstofproductie te bouwen in delen van de wereld waar de condities voor zonne- of windenergie erg goed zijn (Dena, 2017). De

geproduceerde brandstoffen worden vervolgens per tanker naar bijvoorbeeld Nederland gebracht. De effecten op biodiversiteit zijn in dat geval vergelijkbaar met het transport van olie, die er vooral zijn bij lekkage van leidingen of tankers. Het transport van olie heeft bij ongelukken of lekkage geleid tot grootschalige sterfte van zeedieren. Bij synthetische brandstoffen zal geen ruwe olie, maar bijvoorbeeld synthetische diesel of kerosine vervoerd worden. Lekkage daarvan zal ook effecten op de biodiversiteit hebben, maar andere dan bij ruwe olie. Bij productie van de brandstoffen dicht bij de gebruiker kan de brandstof per pijpleiding of over de weg vervoerd worden.

G.2.3 *Gebruik*

Synthetische brandstoffen worden net als fossiele brandstoffen gebruikt in verbrandingsmotoren. Daarbij komen naast CO₂ ook andere milieuvervuilende stoffen vrij, zoals NO_x en roetdeeltjes. NO_x draagt bij aan de stikstofproblematiek en daarmee aan biodiversiteitsverlies door onder andere verhoogde stikstofdepositie en als gevolg daarvan eutrofiëring (TNO, 2019). Echter, bepaalde synthetische brandstoffen kunnen de stikstofuitstoot verminderen, in vergelijking met fossiele benzine en diesel (Deutz, 2018).

Het gebruik in vliegtuigen is een van de belangrijkste toepassingen van duurzame synthetische brandstoffen, vanwege een gebrek aan alternatieven – naast biobrandstoffen – op korte en middellange termijn. Bij verbranding komen naast CO₂ nog andere stoffen vrij die in de hogere lagen van de atmosfeer bijdragen aan Global Warming Potential, zoals waterdamp en NO_x. Sterker nog, meer dan de helft (66%) van de bijdrage van luchtvaart aan klimaatverandering komt door niet-CO₂ broeikasgassen (Lee et al, 2021). Dus zelfs als de brandstof zelf geheel klimaatneutraal is, levert het gebruik ervan in vliegtuigen nog steeds een belangrijke bijdrage aan de opwarming van de aarde.

G.2.4 *Einde levensduur*

In dit project hebben we verder geen aandacht besteed aan deze fase, zie de afbakening in G.1.2.

G.3 **Samenvatting**

De directe impact van de productie, transport en gebruik van synthetische brandstoffen op biodiversiteit zit met name in het ruimtebeslag van CO₂ Air Capture installaties, de stikstofuitstoot en de bijdrage aan opwarming van de aarde in de gebruiksfase door verbranding. De belangrijkste impact op biodiversiteit viel echter buiten de scope van dit informatieblad, maar is wel degelijk relevant: voor de productie van de benodigde waterstof en CO₂ is veel energie nodig. Er is tot zes keer zoveel duurzame energie nodig voor synthetische brandstoffen dan als de elektriciteit direct gebruikt zou worden voor het transport (Dena, 2017). De belangrijkste verliezen zitten in de productie van waterstof, de omzetting van CO₂ en het relatief lage rendement van verbrandingsmotoren. Grootschalige toepassing van synfuels heeft dan ook grote gevolgen voor onder andere het ruimtebeslag voor zonne- en windenergie (Dena, 2017). Technische maatregelen kunnen die impact verkleinen. Het verlagen van de vraag naar lucht- en scheepvaart is een andere optie.

G.4 Vervolgonderzoek

Uit het literatuuronderzoek voor deze studie blijkt dat er nog kennishiaten zijn. We benoemen hier een aantal onderwerpen waar verder onderzoek naar kan worden gedaan

- Het ontwikkelen van synthetische brandstoffen die tot een lage emissie van NO_x en deeltjes leiden bij het gebruik.
- Ook elders in de keten (buiten de scope van dit informatieblad) is vervolgonderzoek nodig. Zie daarvoor informatiebladen waterstof, zonne-energie, windenergie.
- Doe onderzoek naar het verlagen van de vraag naar lucht- en scheepvaart. Dat kan enerzijds door alternatieven te bieden zoals treinen en door reizen en transport te voorkomen, bijvoorbeeld door het stimuleren van telewerken en het consumeren van lokaal geproduceerde goederen.