

CML

Centrum voor Milieuwetenschappen

Productgroepanalyse hernieuwbare energietechnologie

Werkpakket 6: Aangrijpingspunten voor beleid

A. de Koning[#], R. Elzinga[§], R. Balkenende[&], F. van Heusden[%], R. Kleijn[#]

In samenwerking met:

C. Bakker[&], J. Joustra[&], S. Aghaeian[&]

[#] Universiteit Leiden

[§] Universiteit Utrecht

[&] TU Delft

[%] RIVM

CML-rapport 206

Afdeling Industriële Ecologie



**Universiteit
Utrecht**



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



Universiteit Leiden

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie 2019-2024. Dit werkprogramma is een samenwerkingsverband van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML), het Centraal Planbureau (CPB), het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), RVO.nl, Rijkswaterstaat, TNO en de Universiteit Utrecht (UU) onder leiding van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL). Het kabinet streeft naar een volledig circulaire economie in 2050. Het doel van het werkprogramma is om de door het kabinet uitgezette koers naar 2050 te kunnen monitoren en te evalueren en de overheid te voorzien van de kennis die nodig is voor de vormgeving of bijsturing van beleid. Meer informatie over het Werkprogramma Monitoring en Sturing Circulaire Economie is te vinden op <https://www.pbl.nl/monitoring-circulaire-economie>.



Monitoring en Sturing Circulaire Economie

© Centrum voor Milieuwetenschappen (UL-CML), Leiden, 2024

Productgroepanalyse hernieuwbare energietechnologie

Werkpakket 6: Aangrijpingspunten voor beleid

Leiden, Augustus 2024

Inhoudsopgave

INHOUDSOPGAVE	4
LIJST MET AFKORTINGEN	6
LIJST MET FIGUREN	8
LIJST MET TABELLEN	10
SAMENVATTING	12
1 INLEIDING	16
2 METHODE	17
2.1 SCOPE	17
2.1.1 AFBAKENING GRONDSTOFFEN SCENARIO ANALYSE	18
2.1.2 AFBAKENING INNOVATIESYSTEEM ANALYSE	18
2.1.3 AFBAKENING ONTWERP ANALYSE	19
2.1.4 BEPERKTE ANALYSE VAN HET TRANSPORT- EN DISTRIBUTIENETWERK	19
2.2 DEFINITIES	19
2.3 IDENTIFICATIE AANGRIJPINGS-PUNTEN	21
3 HUIDIGE RICHTING INNOVATIESYSTEEM	24
3.1 INTERACTIE TUSSEN DE KLIMAATMISSIE EN DE CE-MISSIE	24
3.2 LANGE COMPLEXE KETENS	27
3.3 REFLECTIE OP DE TRANSITIE PER TECHNOLOGIE	29
3.3.1 WIND	30
3.3.2 ZON	34
3.3.3 BATTERIJEN	37
4 CIRCULAIRE ONTWERPMOGELIJKHEDEN	41
4.1 WIND	42
4.2 ZON	44
4.3 BATTERIJEN	47
5 POTENTIËLE EFFECTEN	51
5.1 ENERGIE IN HET BASELINE EN CIRCULAIR GRONDSTOFFEN SCENARIO	51
5.2 MATERIALEN IN HET BASELINE EN CIRCULAIR GRONDSTOFFEN SCENARIO	52
5.3 BASELINE GRONDSTOFFEN SCENARIO	55

5.3.1	WIND.....	55
5.3.2	ZON.....	57
5.3.3	BATTERIJEN.....	57
5.3.4	OVERZICHT	59
5.4	CIRCULAIR GRONDSTOFFEN SCENARIO.....	60
5.4.1	WIND.....	60
5.4.2	ZON.....	61
5.4.3	BATTERIJEN.....	61
5.4.4	OVERZICHT	62
6	CONCLUSIES DEEL 1: BARRIÈRES, INTERVENTIEPUNTEN EN POTENTIEEL EFFECT	65
6.1	WIND.....	66
6.2	ZON PV.....	70
6.3	BATTERIJEN	73
7	CONCLUSIE DEEL 2: AANGRIJPINGS-PUNTEN VOOR BELEID	75
8	DISCUSSIE	79
	REFERENTIES	80

Lijst met afkortingen

AC	Alternating Current
ARN	Auto Recycling Nederland
BCC	Battery Competence Cluster
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CE	Circulaire Economie
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide
c-Si	kristallijn Silicium
DC	Direct Current
DD-PMG	Direct Drive Permanent Magnet Generator
EV	Elektrisch Voertuig
EVB	Elektrische Voertuigen Batterijen
HS	High Speed
ICER	Integrale Circulaire Economie Rapportage
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
LFP	Lithium Iron Phosphate
MIS	Missie-gedreven InnovatieSysteem
MS	medium Speed
NGF	Nationaal GroeiFonds
NGO	Non-Governmental Organisation
NMC	Nickel Manganese Cobalt
NPCE	Nationaal Programma Circulaire Economie
NZIA	Net Zero Industry Act
PGA	ProductGroep Analyse
PMG	Permanent Magnet Generator
PU	PolyUrethane
PV	PhotoVoltaics
PV/T	PhotoVoltaic Thermal (collectors)
TCTF	Temporary Crisis and Transition Framework
TRL	Technology Readiness Level

UPV	Uitgebreide Producenten Verantwoordelijkheid
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
ZZS	Zeer Zorgwekkende Stoffen

Lijst met figuren

Figuur 1: Een schematisch overzicht van het hernieuwbare energietechnologie systeem in ogenschouw genomen voor deze studie.	17
Figuur 2: Integratie van de analyse van technische en ontwerp mogelijkheden, analyse van het innovatiesysteem en de berekening van het potentieel effect om de aangrijpingspunten voor het beleid te kunnen identificeren.	22
Figuur 3: De energie technologieën worden gestuurd door zowel de klimaatmissie (blauw) als de CE-missie (groen). De klimaatmissie is hierin sterk dominant waardoor actoren gestimuleerd worden om in te zetten op hierbij passende innovatiestrategieën (geel).	25
Figuur 4: Overzicht van de EVB keten. Actoren zijn weergegeven in groen, instituties in blauw en belangrijke infrastructuur in paars	27
Figuur 5: Overzicht van de PV keten. Actoren zijn weergegeven in groen, instituties in blauw en belangrijke infrastructuur in paars	28
Figuur 6: Overzicht van de windturbine keten. Actoren zijn weergegeven in groen, instituties in blauw en belangrijke infrastructuur in paars	28
Figuur 7: Scores voor de innovatiesysteem functies voor de circulaire strategieën binnen de windsector. Een functie met een score van 1 werkt sterk belemmerend en een score van 5 impliceert een goed presterende en versnellende functie.....	30
Figuur 8: Scores voor de innovatiesysteem functies voor de circulaire strategieën voor zonnepanelen. Een functie met een score van 1 werkt sterk belemmerend en een score van 5 impliceert een goed presterende en versnellende functie.....	34
Figuur 9: Scores voor de innovatiesysteem functies voor de circulaire strategieën voor autobatterijen. Een functie met een score van 1 werkt sterk belemmerend en een score van 5 impliceert een goed presterende en versnellende functie.....	37
Figuur 10: Schematische weergave van de hoofdonderdelen van een windpark. Figuur overgenomen uit Lobregt et al. (2021).	42
Figuur 11: Schematische weergave van de hoofdonderdelen van een PV-installatie. Figuur overgenomen uit het Installatie Journaal (2024).....	45
Figuur 12: Schematische weergave van de hoofdonderdelen van een batterijsysteem, waarin, cel, module, pack en managementsysteem onderscheiden kunnen worden. Figuur overgenomen uit Bielewski (2021).	47
Figuur 13: Finale energievraag in Nederland volgens de 4 verschillende Netbeheer scenario's in 2040 en 2050 vergeleken met de finale energievraag in 2019 (REF). DEC = Decentrale initiatieven, NAT = Nationaal leiderschap, EUR = Europese integratie, INT = Internationale handel. Gegevens overgenomen uit Netbeheer Nederland (2023).	51
Figuur 14: Opgesteld hernieuwbaar vermogen in Nederland volgens de 4 verschillende Netbeheer scenario's in 2040 en 2050 vergeleken met opgesteld vermogen in 2019 (REF) DEC = Decentrale initiatieven, NAT = Nationaal leiderschap, EUR = Europese integratie, INT = Internationale handel. Gegevens overgenomen uit Netbeheer Nederland (2023).....	52
Figuur 15: Schematische opzet berekening van het materiaalgebruik en de milieueffecten samenhangend met hernieuwbare energie technologieën.....	53
Figuur 16: Schematische weergave van het raamwerk waarmee het materiaalgebruik van een energiesysteem (instroom) en het vrijkomen van materialen uit afgedankte componenten van het energiesysteem worden gemodelleerd. De materialen uit de afgedankte componenten kunnen vervolgens closed loop worden gerecycled of kunnen verloren gaan of kunnen terechtkomen in een slapende voorraad.....	54

Figuur 17: Cumulatief totaalgewicht van materialen nodig voor de opbouw van de windturbine-systemen tot aan 2050 en de uitstroom van deze zelfde materialen voor en na 2050 en het verlies van materialen in voor en na 2050.....	56
Figuur 18: Land transformatie indicator samenhangend met de cumulatieve instroom van materialen in de de windturbines tot en met 2050. Overige materialen, gedomineerd door Balsa, hebben een belangrijke bijdrage aan de landtransformatie.....	56
Figuur 19: Cumulatief totaalgewicht (links) van materialen nodig voor de opbouw van PV-systemen tot aan 2050 en de uitstroom van deze zelfde materialen voor en na 2050 en het verlies van materialen in voor en na 2050. Rechts is hetzelfde getoond maar dan alleen voor zilver.	57
Figuur 20: Cumulatief totaalgewicht van materialen nodig voor de opbouw van Li-ion batterij systemen tot aan 2050 en de uitstroom van dezelfde materialen voor en na 2050 en het verlies van materialen voor en na 2050.....	58
Figuur 21: Gewichtsandaal van de verschillende metalen noodzakelijk voor de opbouw van Li-ion batterij capaciteit tot aan 2050. Anode materialen zoals grafiet en silicium en de plastics gebruikt voor het maken van een batterijverpakking zijn buiten beschouwing gelaten. Let op de eenheid van de linker verticale as is in kiloton, rechts is de eenheid in ton.....	58

Lijst met tabellen

Tabel 1: Knoppen, circulaire principes en circulaire strategieën. Het conceptueel raamwerk gebruikt in deze studie.	20
Tabel 2: Functies zoals gedefinieerd in het MIS-raamwerk. Gebaseerd op Elzinga et al. (2023). In de tekst worden functies genoemd (F-nummers) om bijbehorende dynamieken te markeren en te duiden.	29
Tabel 3: Barrières uit de MIS-analyse voor circulaire windenergie.	31
Tabel 4: Barrières uit de MIS-analyse voor circulaire zonnepanelen.	34
Tabel 5: Barrières uit de MIS-analyse voor circulaire autobatterijen.	37
Tabel 6: Samenvatting technologische en ontwerp mogelijkheden ten behoeve van effectberekeningen. Overzicht voor windenergie van de technologische en ontwerp mogelijkheden, gegroepeerd per knop, en mogelijke effecten op het circulaire scenario in termen van grondstoffengebruik, levensduurverlenging en recycling.	44
Tabel 7: Samenvatting technologische en ontwerp mogelijkheden ten behoeve van effectberekeningen. Overzicht voor PV-systemen van de technologische en ontwerp mogelijkheden, gegroepeerd per knop, en mogelijke effecten op het circulaire scenario in termen van grondstoffengebruik, levensduurverlenging en recycling.	47
Tabel 8: Samenvatting technologische en ontwerp mogelijkheden ten behoeve van effectberekeningen. Overzicht voor batterijsystemen van de technologische en ontwerp mogelijkheden, gegroepeerd per knop, en mogelijke effecten op het circulaire scenario in termen van grondstoffengebruik, levensduurverlenging en recycling.	50
Tabel 9: Materialen meegenomen in de studie.	55
Tabel 10: De verandering van de totale hoeveelheid materiaal dat instroomt, uitstroomt en in voorraad is in de verschillende systemen in het baseline scenario. Er is gekozen voor de factor verandering tussen 2020 en 2050 i.p.v. een percentage verandering, omdat de veranderingen vele ordes van grootte kunnen zijn. Het percentage [%] verlies van materiaal over de gehele levensduur van de systemen die tot aan 2050 worden geplaatst, staat in de meest rechter kolom.	59
Tabel 11: De verandering van de milieueffecten samenhangend met de winning en productie van materialen gebruikt in de verschillende systemen in het baseline scenario. Er is gekozen voor de factor verandering tussen 2020 en 2050 i.p.v. een percentage verandering, omdat de veranderingen vele ordes van grootte kunnen zijn.	60
Tabel 12: Vergelijking van de parameters gebruikt in het baseline en circulair grondstoffen scenario voor windturbines en de technische en design opties die aangeven hoe vermindering van grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop verwerking bewerkstelligd zou kunnen worden.	60
Tabel 13: Vergelijking van de parameters gebruikt in het baseline en circulair grondstoffen scenario voor PV-panelen en de technische en design opties die aangeven hoe vermindering van grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop verwerking bewerkstelligd zou kunnen worden.	61
Tabel 14: Vergelijking van de parameters gebruikt in het baseline en circulair grondstoffen scenario voor batterijen en de technische en design opties die aangeven hoe vermindering van grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop verwerking bewerkstelligd zou kunnen worden.	61

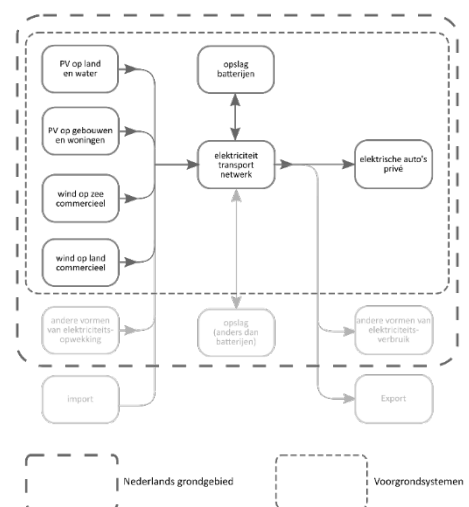
Tabel 15: Relatieve verschillen tussen baseline en circulair grondstoffen scenario. Verschil in omvang van het systeem en de effectiviteit van een lager cumulatief materiaalgebruik tot aan 2050 onder invloed van het circulaire principe “vermindering” is weergegeven.	62
Tabel 16: Overzicht van het verschil tussen het baseline- en circulaire grondstoffen scenario. Let op de percentages verandering per circulaire principe tellen niet op tot het percentage verandering van de toepassing van alle circulaire principes tegelijkertijd in het circulaire grondstoffen scenario. Circulaire oplossingen toegepast om een zeker circulair principe praktisch vorm te geven kunnen andere circulaire principes positief of negatief beïnvloeden.	64
Tabel 17: Interventiepunten gebaseerd op innovatiesysteem analyse, technische/design mogelijkheden en potentieel materiaal/milieueffect van de circulaire strategieën voor windturbines.	66
Tabel 18: Interventiepunten gebaseerd op innovatiesysteem analyse, technische/design mogelijkheden en potentieel materiaal/milieueffect van de circulaire strategieën voor PV-installaties.	70
Tabel 19 Interventiepunten gebaseerd op innovatiesysteem analyse, technische/design mogelijkheden en potentieel materiaal/milieueffect van de circulaire strategieën voor batterijen in elektrische auto’s, huis- en wijkbatterijen.	73

Samenvatting

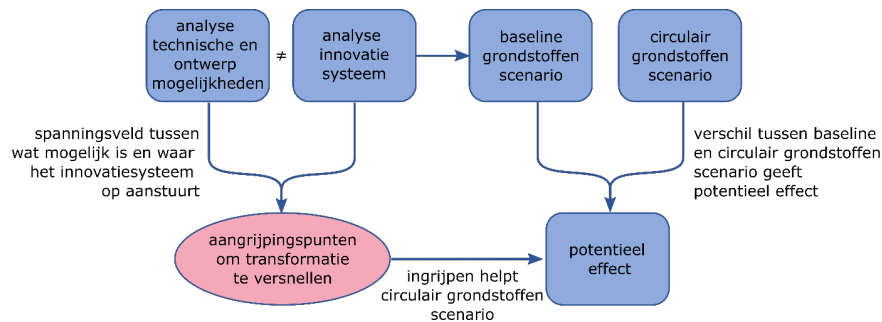
Het hernieuwbare energietechnologie systeem zit in een fase van snelle uitbreiding. Hier zijn veel materialen voor nodig. Zonder additionele circulaire economie maatregelen zal de jaarlijkse instroom van materialen nodig voor het hernieuwbare energietechnologie systeem tussen 2020 en 2050 enkele malen groter worden. Een circulaire economie transitie, zoals beschreven in het NCPE 2023 (IenW, 2023)de zou kunnen bijdragen het materiaalgebruik ten behoeve van de opbouw van het hernieuwbare energietechnologie systeem te verminderen.

Doel van deze studie is het in kaart brengen van de kansen en belemmeringen van een circulaire economie transitie in het hernieuwbare energietechnologie systeem, wat het materiaal- en milieueffect van deze transitie zou kunnen zijn en het **formuleren van aangrijpingspunten voor beleid** om de circulaire economie transitie te versnellen.

Drie hernieuwbare energie technologieën zijn in beschouwing genomen: **PV-panelen, windturbines en Li-ion batterijen** in EVs, thuisbatterijen en wijkbatterijen. De **instroom, uitstroom en verlies van materialen** in deze systemen zoals geplaatst in Nederland worden gevolgd tot aan 2050. Vier verschillende milieueffecten samenhangend met de winning van de materialen worden in ogenschouw genomen: **klimaat effect, metaaldepletie, humane toxiciteit en land transformatie**. Effecten samenhangend met de gebruikte materialen worden cradle-to-gate berekend. Het **voorkomen van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS)** in de hernieuwbare energietechnologieën is als apart milieurisico geïventariseerd.

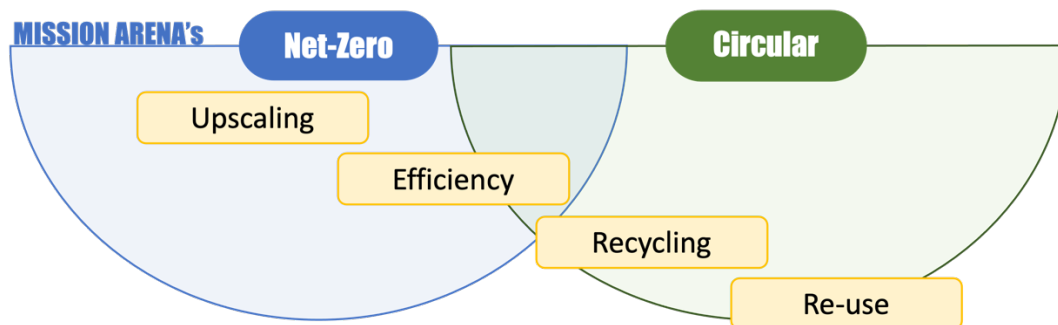


Er zijn drie analyses in samenhang nodig om de aangrijpingspunten voor beleid te identificeren. Het eerste element is een **identificatie van de kansen en belemmeringen in de transitie naar een Circulaire Economie**. Dit aspect wordt onderzocht met de missie-gedreven innovatiesysteem (MIS) analyse. Het tweede element is een **analyse van de circulaire oplossingen vanuit het technisch en ontwerp perspectief**, inclusief een analyse van het effect op materiaalintensiteit van de producten, levensduur van producten en recycling percentages. Het technisch en ontwerp perspectief geeft een beeld van wat potentieel gedaan kan worden tot aan 2050 om de circulaire economie vorm te geven. Er kunnen overeenkomsten maar ook verschillen zijn tussen de technische en ontwerpmogelijkheden en de circulaire oplossingen die in de MIS-analyse worden genoemd. Deze verschillen en overeenkomsten vormen een basis voor de identificatie van de aangrijpingspunten voor beleid. Het derde element is de **beoordeling van het effect van de voorgestelde circulaire maatregelen** op materiaalgebruik, verlies van materialen, het milieu en het voorkomen van ZZS. Voor de effect berekening worden twee grondstoffen scenario's uitgewerkt: een baseline- en een circulair grondstoffen scenario. Beide scenario's beschrijven de ontwikkeling van het materiaalgebruik ten behoeve van het hernieuwbare energietechnologie systeem in Nederland tot en met 2050. Het baseline scenario is een scenario waarin klimaatbeleid en reguliere technologieontwikkeling tot veranderingen in de hernieuwbare energietechnologie systemen leiden zowel in capaciteit als de specifieke technologieën die toegepast worden. Er worden geen additionele circulaire economie



maatregelen genomen. In het circulaire grondstoffen scenario wordt de circulaire oplossingsroute geïmplementeerd welke bestaat uit een groot aantal verschillende circulaire oplossingen zoals geïdentificeerd in de technisch en ontwerp analyse. Het verschil tussen het baseline en circulaire scenario geeft het potentiële effect weer van de circulaire oplossingen.

Uit de MIS-analyse van de innovatiesystemen blijkt dat binnen de sector de **ontwikkelingen rondom circulariteit ondergeschikt zijn aan de energietransitie** en circulariteit momenteel geen prioriteit is. Zo wordt de klimaatmissie (elektrificatie van Nederland) beter ondersteunt vanuit beleid en is de markt ingericht op het stimuleren van de doelen gesteld in de klimaatmissie. Onderstaan diagram illustreert hoe de energie technologieën worden gestuurd door zowel de klimaatmissie (blauw) als de CE-missie (groen). De klimaatmissie is hierin sterk dominant waardoor actoren gestimuleerd worden om in te zetten op hierbij **passende innovatiestrategieën: opschalen energieproductie en efficiëntie (geel)**. **Recycling en hergebruik** lijken hieraan ondergeschikt.



De circulaire ontwerp en technische analyse maken de potentiële effecten en dilemma's van de circulaire maatregelen zichtbaar per energie technologie. Leidraad daarbij zijn vermindering grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop recycling. Bekeken is welke technische en ontwerp ontwikkelingen op afzienbare termijn een wezenlijke bijdrage kunnen leveren aan de circulariteit van de bestudeerde energiesystemen. Als beperking is daarom opgenomen dat ontwikkelingen **realiseerbaar moeten zijn en naar verwachting een significante impact op de markt kunnen hebben voor 2050**, dat wil zeggen dat voornamelijk ontwikkelingen met een **hoog TRL-niveau** zijn beschouwd (TRL 8-9). Enkele vaker voorkomende circulaire maatregelen zijn productpaspoorten, ontwerp voor lange levensduur, efficiënter materiaalgebruik en inzet van geavanceerdere recycling methoden om meer materialen terug te winnen uit Li-ion batterijen en PV-panelen. Met deze maatregelen in gedachten zijn schattingen gemaakt over de verlenging van de levensduur, de toename van het closed loop recyclingpercentage en de vermindering van gebruikte materialen die worden gebruikt voor het schatten van de effecten van het circulaire grondstoffen scenario.

In onderstaande tabel worden de effecten van het circulaire grondstoffen scenario gegeven ten opzichte van het baseline grondstoffen scenario. De percentages verandering gelden voor de totale inzet van circulaire maatregelen i.e. vermindering en levensduurverlenging en meer closed loop recycling.

Systeem		Zonnepanelen	Batterijen	Wind
		[%]	[%]	[%]
Verlies	Alle materialen	-38	-87	-40
	Strategisch materialen	n.a. [#]	-90	n.a. [§]
	Kritieke materialen	-54	-84	n.a. ^{&}
Instroom materialen		-38	-33	-19
Effecten	Klimaat effect	-38	-40	-7
	Metaal depletie	-38	-48	-12
	Humane toxiciteit	-37	-32	-12
	Land transformatie	-44	-42	-15
	Instroom strategische materialen	-42	-47	-11
	Instroom kritieke materialen	-54	-41	-15

Voor zonnepanelen bestaat het verlies van strategische materialen uit koper. Koper wordt verondersteld volledig gerecycled te worden. Er is dus geen enkel verlies. § Voor windturbines bestaat het verlies van strategische materialen uit koper. Koper wordt verondersteld volledig gerecycled te worden. Er is dus geen enkel verlies. & Voor windturbines bestaat het verlies van kritieke materialen uit aluminium en neodymium. Beide metalen worden verondersteld volledig gerecycled te worden. Er is dus geen enkel verlies in deze berekening.

Vanuit de confrontatie van de barrières zoals deze nu door de actoren worden geïdentificeerd en de potentiële ontwerp- en technische mogelijkheden zijn een groot aantal aangrijpingspunten voor beleid/interventies geïdentificeerd. De belangrijkste is de noodzaak om CE-innovaties in samenhang met energie innovaties te ontwikkelen omdat deze laatste op dit moment zo sterk leidend is.

Wij concluderen dat de klimaatmissie dominant is als het gaat om de ontwikkeling van het materiaalgebruik binnen het hernieuwbare energietechnologie systeem. Het materiaalgebruik en de impact van materiaalgebruik gaan vanwege de klimaatmissie toenemen. Als uitzondering op deze regel gaat het klimaateffect van het gebruik van materialen afnemen, vanwege de wereldwijde klimaatmissie. Circulaire maatregelen kunnen potentieel de toename van het gebruik van materialen met 19 tot 38 procent reduceren over de gehele levensduur van de hernieuwbare energietechnologie systemen die geplaatst worden tot aan 2050. De dynamiek van de instroom en uitstroom van de materialen zorgt ervoor dat maatregelen die nu genomen moeten worden om de levensduur te verlengen pas na 2050 volledig zichtbaar worden. Dit maakt bemoeilijkt het nemen van CE-maatregelen.

In de hernieuwbare energietechnologieën worden allerlei stoffen gebruikt, waaronder stoffen die schadelijk zijn voor mens of milieu. Het gaat bijvoorbeeld om lood in zonnepanelen of oplosmiddelen in batterijen. Er is nog geen compleet beeld van de aanwezigheid van ZZS in energietechnologieën, en daarmee ook niet van de risico's die deze ZZS kunnen veroorzaken in de gehele levenscyclus. De aanwezigheid van ZZS kan de circulaire economie belemmeren doordat ZZS bij recycling in het

recycleert terecht komen. Het is daarom belangrijk om bij de ontwikkeling van energietechnologieën niet alleen aandacht te hebben voor klimaat, maar ook voor andere duurzaamheidsaspecten als chemische veiligheid

Er liggen kansen om de energietransitie in lijn te laten lopen met de Europese ambitie voor een nontoxic environment. Bij het ontwerp van nieuwe producten of energietechnologieën kunnen ZZS en andere gevaarlijke stoffen vervangen of geëlimineerd worden of producten zodanig worden ontworpen dat gedurende de volledige levenscyclus emissies voorkomen worden. Hiervoor biedt het

Safe and Sustainable by Design-principe (SSbD) kansen. Er zijn bijvoorbeeld al mogelijkheden om zonnepanelen zonder lood en PFAS te ontwikkelen, of batterijen zonder kobalt.

1 Inleiding

De recente ICER-rapportage (Hanemaaijer, et al. 2023) concludeert dat een halvering van het Nederlands grondstoffengebruik in 2030 met huidige trends niet mogelijk is en een versnelling van de transitie naar een circulaire economie waarin primair materiaalgebruik wordt terugdrongen niet kon worden vastgesteld. Dat is zorgelijk gezien de ambities om in 2030 “...een (tussen)doelstelling te realiseren van 50% minder gebruik van primaire grondstoffen (mineraal, fossiel en metalen)” (EZ & IenM, 2016). De transitie naar een circulaire economie (CE) wordt gezien als de manier om aan deze doelstelling te voldoen.

In de ICER-rapportage wordt vastgesteld dat circulariteitsstrategieën zoals benoemd in de NPCE (I&W, 2023) die gericht zijn op het afzien of delen van producten en het verlengen van de levensduur van producten achterblijven, terwijl deze als belangrijk worden gezien om het primair materiaalgebruik te verminderen (Hanemaaijer, et al. 2023). Daarnaast worden deze strategieën als belangrijk gezien om een bijdrage te leveren aan het klimaatbeleid, vergroten van de leveringszekerheid van materialen en het verlagen van de emissie van vervuilende stoffen.

Een probleem bij het formuleren van concreet CE-beleid gericht op het versnellen van de transitie en het behalen van de geformuleerde doelen is de complexiteit en diversiteit van productketens. Vele verschillende beleidsdomeinen hebben invloed op deze productketens. Tegen deze achtergrond wordt in het huidige werkprogramma Circulaire Economie 2023-2024 (PBL, 2023) voorgesteld om drie productgroepanalyses (PGAs) uit te voeren. De productgroep hernieuwbare energietechnologie is één van deze productgroepen naast de productgroepen kunststofverpakkingen en woningen. Middels de PGAs wordt in de gehele productie- en consumptieketen gekeken naar de stand van zaken van de transitie, de voortgang, mogelijke belemmeringen en kansen om de transitie te versnellen.

Dit rapport focust zich op de productgroep hernieuwbare energietechnologie welke van specifiek belang is vanwege de klimaatwet waarin de afspraak is opgenomen om Nederland uiterlijk in 2050 klimaatneutraal te maken. Deze afspraak betekent dat de opwekking van elektriciteit vanuit hernieuwbare bronnen sterk moet toenemen. Eerdere studies (Tang et al., 2021; Metabolic, 2021, 2023; Oorschot et al., 2022) laten zien dat het gebruik van materialen en metalen zeer sterk zal stijgen als gevolg van de energietransitie. Dit staat haaks op de circulaire doelstelling om in 2030 een halvering te bereiken van het gebruik van abiotische grondstoffen. Achterliggende doelen van dit beleid zijn het tegengaan van klimaatverandering, verlies aan biodiversiteit, milieuvervuiling en het vergroten van leveringszekerheid. Daarom is het juist in deze productgroep belangrijk om te onderzoeken hoe de voorziene toename in gebruik of toekomstig verlies van materialen zo klein mogelijk kan worden gehouden met de inzet van circulaire principes.

Het uiteindelijke doel van de PGA is het in kaart brengen van de kansen en belemmeringen die er zijn in deze transitie, wat het materiaal- en milieueffect van deze transitie zou kunnen zijn en het formuleren van aangrijpingspunten voor beleid om de circulaire economie transitie te versnellen. Deze aangrijpingspunten voor beleid worden in dit rapport beschreven op basis van zes achterliggende studies (Balkenende et al., 2024; De Koning & Kleijn, 2024a, 2024b, 2024c; Elzinga, 2024; Van Heusden & De Boer, 2024) die zijn uitgevoerd binnen de PGA hernieuwbare energietechnologie. Dit rapport is een samenvatting en integratie van deze zes studies.

Voordat we de aangrijpingspunten voor het beleid presenteren geven we een kort overzicht van de scope en aanpak van deze PGA.

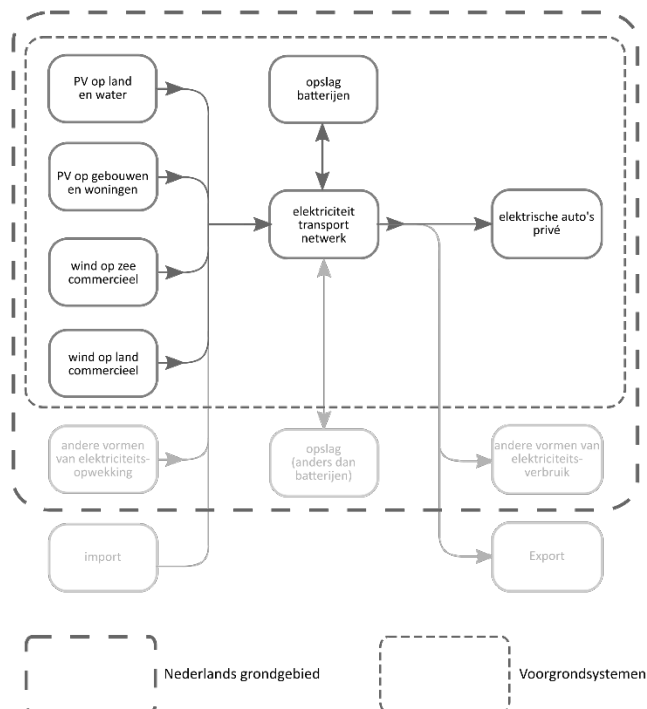
2 Methode

Dit rapport is gebaseerd op een integratie van zes achterliggende studies (Balkenende et al., 2024; De Koning & Kleijn, 2024a, 2024b, 2024c; Elzinga, 2024; Van Heusden & De Boer, 2024) die zijn uitgevoerd binnen de PGA hernieuwbare energietechnologie.

2.1 Scope

De PGA richt zich op de hernieuwbare energietechnologieën die een belangrijke rol spelen in het elektriciteitssysteem: windturbines, PV-panelen, batterijen als onderdeel van het elektriciteit transport- en opslag distributienetwerk. Het transportnetwerk, ook wel hoogspanningsnetwerk genoemd, is bedoeld voor transport van elektriciteit tussen de regio's in Nederland en het buitenland en is onder beheer van Tennet. Het distributienetwerk, ook wel midden- en laagspanningsnetwerk genoemd, brengt de elektriciteit vanaf het hoogspanningsnetwerk naar de eindgebruiker en zijn onder beheer van de regionale netbeheerders. Bij batterijen worden de batterijen in elektrische auto's, wijkbatterijen en thuisbatterijen bedoeld. Op dit moment veelal Li-ion batterijen.

De ontwikkelingen in deze systemen kunnen niet onafhankelijk van elkaar beoordeeld worden. Aanbod en vraag naar elektriciteit, opwekkingsvormen en de noodzakelijke mate van flexibiliteit in het systeem hangen met elkaar samen. Daarom gaan we in de productgroepenanalyse altijd uit van scenario's waarin de omvang van de vier systemen bij elkaar passen. Een schetsmatig beeld van de scope is gegeven in Figuur 1. Er zijn een aantal hernieuwbare energietechnologieën die relevant zijn, maar niet worden meegenomen in deze studie. Een deel is zichtbaar in Figuur 1. Zo worden warmtepompen, stadsverwarming, waterstofproductie, waterstofdistributienetwerken en grootschalige energieopslag (bv "pumped storage") niet meegenomen in deze studie.



Figuur 1: Een schematisch overzicht van het hernieuwbare energietechnologie systeem in oenschouwen genomen voor deze studie.

2.1.1 Afbakening grondstoffen scenario analyse

In het voorgrondstelsel Figuur 1 wordt een inventarisatie gemaakt van het verloop van de instroom van materialen en de voorraad materialen gemaakt tot aan 2050. De uitstroom en het verlies aan materialen wordt berekend over de gehele levensduur van de hernieuwbare energietechnologieën die tot aan 2050 zijn geplaatst. Vanwege de lange levensduur van de technologieën in het hernieuwbaar energiesysteem, veelal enkele decennia, vindt de uitstroom van materialen na einde gebruiksduur grotendeels na 2050 plaats. De manier waarop we ons energiesysteem nu inrichten en de keuzes ten aanzien van CE die we daar nu in meenemen hebben dus grote gevolgen voor de materiaalstromen van na 2050. Voor elk van de drie technologieën (wind, zon en batterijen) proberen we zo goed mogelijk de bulkmaterialen maar ook de in kleine hoeveelheid aanwezige materialen in kaart te brengen. Er wordt specifiek gekeken naar het gebruik van kritieke en strategische materialen. Dit zijn materialen waarvan de leveringszekerheid niet gegarandeerd is, nu of in de toekomst.

Naast de op volume gebaseerde materiaalindicatoren worden ook vier milieueffecten samenhangend met de productie van materialen **over de gehele keten** berekend. Deze keten indicatoren zijn:

- Klimaatteffect
Een indicator voor de potentiële¹ broeikasgasemissies in de keten van materiaalproductie.
- Metaaldepletie
Een indicator voor de mate waarin de productie van de materialen potentieel bijdraagt aan de depletie van de primaire grondstoffen
- Landtransformatie
Een indicator voor de mate waarin de productie van de materialen potentieel bijdraagt aan verandering van landgebruik. Omdat verandering van landgebruik een belangrijke factor is in biodiversiteitsverlies kan deze indicator als proxy voor biodiversiteitsverlies worden gezien
- Humane toxiciteit
Een indicator voor de potentiële emissies van toxische stoffen met invloed op de volksgezondheid.

Deze vier milieueffect indicatoren geven geen compleet beeld van alle milieueffecten die kunnen optreden, maar zijn voldoende divers om te illustreren dat materialen die geen groot klimaatteffect hebben wel belangrijk kunnen zijn op andere milieuthema's.

2.1.2 Afbakening Innovatiesysteem analyse

De missie-gedreven innovatiesysteem analyse (door Universiteit Utrecht, Elzinga et al. (2024)) focust zich ook op het voorgrondstelsel zoals afgebakend in Figuur 1. Hiervoor wordt gekeken naar actoren betrokken bij de productie, distributie en gebruik van deze technologieën gekeken met een focus op het Nederlandse systeem. Verder wordt wet- en regelgeving en belemmeringen dan wel kansen voor circulaire strategieën gericht op de genoemde technologieën (zon, wind, EV batterijen en het netwerk) in kaart gebracht.

¹ We spreken van potentiële emissies en potentiële effecten omdat we tijd en plaats van de emissies in de keten niet kennen.

2.1.3 Afbakening ontwerp analyse

In WP3 - circulaire technologische en ontwerp mogelijkheden (TU Delft, 2024) is onderzoek gedaan naar nieuwe en opkomende innovaties in het circulair ontwerpen van de technologieën binnen het voorgrondstelsel (Figuur 1). Hierbinnen is voornamelijk gekeken naar innovaties, die een grote kans te hebben materiaalstromen voor 2050 wezenlijk te beïnvloeden (TRL 8-9). Verder is voornamelijk gekeken vanuit een technologisch perspectief en veel mindere mate vanuit het perspectief, bedrijven, organisaties en consumenten, aangezien dit al in belangrijke mate onderdeel is van de analyse van het innovatiesysteem.

Bij de keuze voor specifieke technologieën en organisaties is niet gestreefd naar volledigheid, maar was het voornaamste doel om een scala aan mogelijkheden te tonen, die betrekking hebben op verschillende knoppen (zie Tabel 1) en leiden tot duidelijke verschillende effecten, zoals wezenlijk langere levensduur of verschuiving in aard van benodigde materialen.

2.1.4 Beperkte analyse van het transport- en distributienetwerk

Bij de uitvoer van de studie bleek het dat er te weinig tijd was om een volledige analyse te maken van het elektriciteit transport- en distributienetwerk om zo tot een gefundeerde identificatie van aangrijpingspunten voor beleid te komen. We bespreken het transport en distributienetwerk daarom niet verder in deze rapportage en richten ons alleen op PV, windturbines en batterijen. Er is wel een analyse gemaakt van het materiaalgebruik in het transport- en distributienetwerk volgens het baseline grondstoffen scenario. Dit is te vinden in het baseline grondstoffen scenario rapport, één van de achterliggende rapportages binnen de PGA (De Koning, A., E.G.M. Kleijn (2024b)).

2.2 Definities

In het NPCE (I&W, 2023) worden er vier “knoppen” genoemd waaraan gedraaid zou kunnen worden om het grondstoffengebruik meer circulair te maken. Deze “knoppen” komen overeen met de overkoepelende circulaire principes waarmee materiaalgebruik verminderd zou kunnen worden: ‘narrowing the loop’, ‘slowing the loop’ en ‘closing the loop’. De vierde knop is de mogelijkheid om een materiaal te vervangen door een minder milieubelastend materiaal ook wel ‘substitution’ genaamd.

De “knoppen” geven niet direct aan hoe een materiaalkringloop gesloten kan worden of hoe materialen langer in gebruik kunnen blijven. De zogenaamde circulaire strategieën zoals geformuleerd door de Ellen MacArthur Foundation (2013) geven al wat meer duiding over de manieren waarop invulling gegeven kan worden aan de overkoepelende circulaire principes.

Vervangen heeft binnen het raamwerk van de Ellen MacArthur Foundation nadruk gekregen om de ontwikkeling van de bio-economie als zelfstandige circulaire strategie te kunnen indelen. Vervangen van materialen door biomaterialen in het hernieuwbare energiesysteem heeft een minder belangrijke rol. Vervangen van materialen in het hernieuwbare energiesysteem is juist een middel om vermindering, levensduur en/of closed loop verwerking te ondersteunen. Een voorbeeld is de verandering van de batterijchemie om de batterijopslag capaciteit per gewichtseenheid van de batterij te vergroten. Daarom is het in deze studie zinniger om de circulaire strategie vervangen onder te brengen bij de andere 3 knoppen. Het raamwerk dat wij gebruiken staat in Tabel 1. In de analyse zullen we zo goed mogelijk proberen om circulaire oplossingen in te delen naar de effecten op de 3 circulaire principes maar niet altijd is een eenduidige indeling mogelijk.

Tabel 1: Knoppen, circulaire principes en circulaire strategieën. Het conceptueel raamwerk gebruikt in deze studie.

Knoppen	Circulair principe	Circulaire strategie	Uitleg
Vermindering grondstoffen	Narrowing the loop	Afwijzen	Een product niet aanschaffen of gebruiken, door van de functie af te zien of de functie op een andere manier te vervullen
		Heroverwegen	Het gebruik van een product intensiveren door delen met anderen of door het product meer functies te geven
		Verminderen	Een product efficiënter fabriceren door minder grondstoffen en materialen te verwerken en efficiënter maken in gebruik
		Vervangen	Primaire grondstoffen vervangen door andere materialen waardoor minder materiaal nodig is.
Levensduur verlenging	Slowing the loop	Verduurzamen	Een product zodanig ontwerpen en construeren dat de intrinsieke levensduur zeer lang is
		Hergebruiken	Hergebruik van een product in dezelfde functie door een andere gebruiker
		Repareren	Repareren en onderhouden van een kapot product om het te gebruiken in zijn oude functie
		Opknappen	Opknappen of moderniseren van een oud product
		Herfabriceren	Onderdelen van een afgedankt product gebruiken in een nieuw product met een andere functie
		Herbestemmen	Een product, of onderdelen ervan, gebruiken in een nieuw product met een andere functie
		Vervangen	Primaire grondstoffen vervangen door andere materialen waardoor materialen langer in gebruik kunnen blijven.
Closed loop verwerking	Closing the loop	Recyclen	Materialen verwerken tot een nieuw product van dezelfde (closed loop) of, indien niet mogelijk, mindere (laagwaardige) kwaliteit
		Vervangen	Primaire grondstoffen vervangen door andere materialen waardoor materialen makkelijker closed loop zouden kunnen worden gerecycled

Het technisch of economisch concept, proces of product wat ingezet kan worden om een circulaire strategie te ondersteunen noemen we een circulaire oplossing of optie. Een batterijpaspoort waarin de status van een batterij en de materiaalinhoud van de batterij is geregistreerd zou (een deel van) een circulaire oplossing kunnen zijn om de circulaire strategieën repareren, hergebruiken en recyclen makkelijker te maken. Dit op zijn beurt valt dan binnen de circulaire principes levensduurverlenging en closed loop verwerking. Voor ieder(e) product(groep) zijn er waarschijnlijk meerdere circulaire oplossingen voor te stellen die aangeven op welke praktische manier aan de knoppen gedraaid kan worden. De combinatie van deze circulaire oplossingen die in de loop van de tijd verschillend ingezet worden, noemen we de circulaire oplossingsroute. De term oplossingsroutes is ook gekozen om het dynamische karakter van innovatie te benadrukken.

Tabel 1 suggereert dat circulaire strategieën en oplossingsroutes netjes zijn in te delen zijn naar circulaire principes, echter circulaire strategieën kunnen overlappen. Ook kunnen verschillende circulaire strategieën vaak niet onafhankelijk van elkaar gezien worden. Zo kan een circulaire oplossing zoals 'ontwerpen voor reparatie' zowel reparatie, opknappen, en herfabriceren ondersteunen omdat het de ontmanteling van een product in afzonderlijke onderdelen en materialen vergemakkelijkt. Circulaire strategieën kunnen elkaar ook tegenwerken, zo kan recyclen

bemoelijk wordt door betere reparatiebaarheid, samenhangend met de aard van gebruikte verbindingen en de verschillende processen die gebruikt worden voor al dan niet destructieve demontage. Hoe in de praktijk bijvoorbeeld de levensduur van een product verlengd kan worden door een combinatie van hergebruik, reparatie en herbestemmen, is afhankelijk van het product en de context waarin dit product zijn functie vervult. Voor ieder(e) product(groep) moet deze analyse apart gemaakt worden.

2.3 Identificatie aangrijpingspunten

Er zijn drie analyses in samenhang nodig om de aangrijpingspunten voor beleid te identificeren. Het eerste element is een **identificatie van de kansen en belemmeringen** in de transitie naar een Circulaire Economie (zie ook rapport Elzinga, R. 2024). Wordt bijvoorbeeld de sturing vanuit de overheid als duidelijk genoeg ervaren? Worden de circulaire businessmodellen als economisch levensvatbaar gezien of zijn er technologische uitdagingen? Dit aspect wordt onderzocht met de missie-gedreven innovatiesysteem (MIS) analyse. De resultaten van deze analyse worden besproken in Hoofdstuk 3. Deze MIS analyse laat zien welke circulaire oplossingen door de belanghebbenden als kansrijk worden ervaren en welke mogelijke belemmeringen er worden gezien voor de transitie naar een circulaire economie.

Het tweede element is een analyse van de circulaire **oplossingen vanuit het technisch en ontwerp** perspectief, inclusief een analyse van het effect op materiaalintensiteit van de producten, levensduur van producten en recycling percentages (zie ook rapport Balkenende et al., 2024). Welke recycling technologieën zijn al dusdanig ontwikkeld dat zij in de periode tot aan 2050 kunnen worden toegepast en hoe kunnen producten worden ontworpen zodat ze minder (kritieke) materialen bevatten of makkelijker hergebruikt en gerecycled kunnen worden? Welke mogelijkheden zijn er om de levensduur van producten te verlengen? De combinatie en de inzet in de loop van de tijd van de circulaire oplossingen passend binnen een circulair principe noemen we de *circulaire oplossingsroute*. Het technisch en ontwerp perspectief geeft een beeld van wat potentieel gedaan kan worden tot aan 2050 om de circulaire economie vorm te geven. De resultaten van de technische en ontwerp mogelijkheden worden besproken in Hoofdstuk 4.

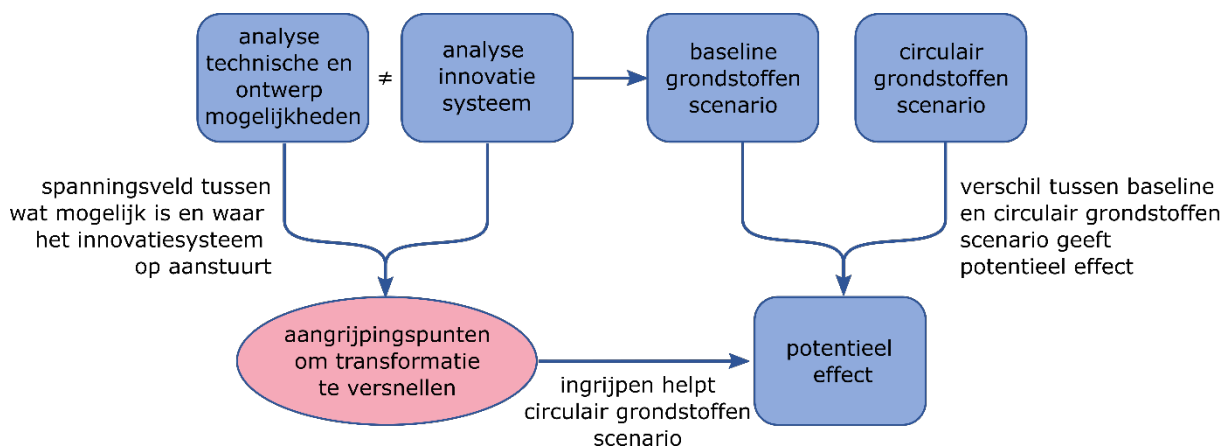
Er kunnen overeenkomsten maar ook verschillen zijn tussen de technische en ontwerp mogelijkheden (besproken in Hoofdstuk 4) en de circulaire oplossingen waaraan het innovatiesysteem nu aandacht besteedt (uit Hoofdstuk 3). Deze verschillen en overeenkomsten vormen een basis voor de identificatie van de aangrijpingspunten voor beleid.

Het derde element is de beoordeling van het **effect van de voorgestelde circulaire oplossingsroute** op materiaalgebruik, verlies van materialen en het milieu (zie ook rapport De Koning, A., E.G.M. Kleijn 2024c). Voor de effect berekening worden twee grondstoffen scenario's uitgewerkt: een baseline- en een circulair grondstoffen scenario. Beide scenario's beschrijven de ontwikkeling van het materiaalgebruik ten behoeve van het hernieuwbare energietechnologie systeem in Nederland tot en met 2050. Het *baseline scenario* is een scenario waarin klimaatbeleid en reguliere technologieontwikkeling tot veranderingen in de hernieuwbare energietechnologie systemen leiden, zowel in capaciteit als de specifieke technologieën die toegepast worden. Er worden geen additionele circulaire economie maatregelen genomen. In het *circulaire grondstoffen scenario* wordt de circulaire oplossingsroute geïmplementeerd welke bestaat uit een groot aantal verschillende circulaire oplossingen zoals geïdentificeerd in de technisch en ontwerp analyse. Het verschil tussen het baseline en circulaire scenario geeft het potentiële effect weer van de circulaire oplossingen. Hierbij wordt ook geanalyseerd welke draai aan een "knop" het grootste effect heeft naast het totale

effect van de circulaire oplossingsroute. Naast de potentiële effecten op materialen en milieu is er ook gekeken naar de aanwezigheid van Zeer Zorgwekkende Stoffen (ZZS) in hernieuwbare energietechnologieën en of deze vrijkomen bij de productie, het gebruik of de verwerking van de materialen en producten. De resultaten van deze effect analyse staan beschreven in Hoofdstuk 5.

De identificatie van de aangrijpingspunten van beleid die een circulaire transitie kunnen versnellen, gebruikmakend van de drie bovenstaande elementen is samengevat in Figuur 2. Tussen de technische analyse en ontwerpmogelijkheden en de richting waarin het innovatiesysteem zich beweegt kan een spanningsveld zitten. Bijvoorbeeld dat het innovatiesysteem aanstuurt op (laagwaardige) recycling (gestimuleerd door massa gebaseerde recycling targets) terwijl er veel ontwerpmogelijkheden zijn om de levensduur van een product te verlengen en/of het product tweedehands in te zetten. In dit spanningsveld kunnen we identificeren wat aangrijpingspunten zouden kunnen zijn om het innovatiesysteem te bewegen om de transformatie naar een circulaire economie welke hogere CE-strategieën nastreeft te versnellen.

De effect analyse laat zien wat de materiaal-behoefte en -verlies zou zijn wanneer we de technische analyse en ontwerpmogelijkheden uitbuiten om tot een circulaire oplossingsroute komen (i.e. een combinatie van circulaire economie oplossingen in de loop van de tijd). De aangrijpingspunten zouden kunnen helpen om dat circulaire scenario werkelijkheid te laten worden of tenminste kansrijker te maken (zie ook De Koning, A., E.G.M. Kleijn 2024c).



Figuur 2: Integratie van de analyse van technische en ontwerp mogelijkheden, analyse van het innovatiesysteem en de berekening van het potentieel effect om de aangrijpingspunten voor het beleid te kunnen identificeren.

De integratie van de drie aspecten en de identificatie van de aangrijpingspunten voor beleid staat beschreven in Hoofdstuk 6. De overkoepelende conclusies en aangrijpingspunten voor beleid worden gepresenteerd in Hoofdstuk 7. Tenslotte reflecteren we in Hoofdstuk 8 op het raamwerk wat gebruikt is voor de identificatie van de aangrijpingspunten wat mogelijk onderbelicht is gebleven en hoe dat de conclusie beïnvloedt.

Zes achterliggende rapporten beschrijven in meer detail de resultaten die gebruikt zijn bij de identificatie van de aangrijpingspunten voor beleid. Het eerste rapport, de definitiestudie (De Koning & Kleijn, 2024a), is een verdere verantwoording van het analyse raamwerk gebruikt in deze studie. Het tweede rapport geeft een uitgebreide beschrijving van de methode en resultaten van de MIS-analyse (Elzinga, 2024). Het derde rapport is een inventarisatie van de circulaire oplossingen vanuit het technisch en ontwerp perspectief, inclusief een analyse van het effect op materiaalintensiteit van

de producten, levensduur van producten en recycling percentages (Balkenende et al., 2024). Het vierde rapport beschrijft de potentieel aanwezige ZZS in hernieuwbare energietechnologieën en of deze kunnen vrijkomen bij de productie, het gebruik of de verwerking van de materialen en producten (Van Heusden & De Boer, 2024). De laatste twee rapporten geven een beschrijving van het baseline grondstoffen scenario (De Koning & Kleijn, 202b) en het circulair grondstoffen scenario (De Koning & Kleijn, 2024c).

3 Huidige richting innovatiesysteem

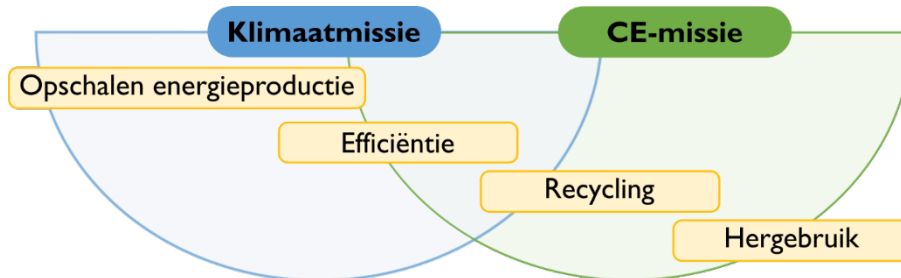
Dit rapport is gebaseerd op een integratie van zes achterliggende studies (Balkenende et al., 2024; De Koning & Kleijn, 2024a, 2024b, 2024c; Elzinga, 2024; Van Heusden & De Boer, 2024) die zijn uitgevoerd binnen de PGA hernieuwbare energietechnologie. Hoofdstuk 3 is gebaseerd op de missie-gedreven innovatiesysteem (MIS) analyse (Elzinga, 2024). Een MIS, bestaat uit de actoren en regels die gezamenlijk bijdragen aan het realiseren van een maatschappelijke missie, bijvoorbeeld de ambitie om in 2050 volledig circulair te opereren (vermeld in het NPCE'23). Aan de hand van een MIS analyse wordt in kaart gebracht welke karakteristieken van het innovatiesysteem bijdragen dan wel afbreuk doen aan de transitie richting circulair. Deze analyse is gedaan aan de hand van literatuuronderzoek en een serie aan interviews en workshops met experts. Een gewenste transitie vindt enerzijds plaats door het ontwikkelen en realiseren van nieuwe wenselijke oplossingsroutes (zoals technologische innovaties en nieuwe businessmodellen). Anderzijds dienen bestaande praktijken die het behalen van de missie in de weg staan afgebouwd te worden. Er wordt in een MIS-analyse ook gekeken naar hoe de verschillende oplossingen interacteren, elkaar aanvullen of juist verhinderen

In een MIS analyse wordt als eerste gekeken naar de missie en oplossingsroutes (*Probleemoplossing Diagnose*). Vervolgens worden de belangrijkste structurelementen zoals regelgeving actoren en infrastructuur in kaart gebracht (*Structurele analyse en Missie Arena*) (beschreven in sectie 2.1). Het functioneren van het systeem wordt beoordeeld met het scoren van verschillende zogenaamde *innovatiesysteemfuncties*, zie Elzinga (2024) (beschreven in sectie 2.2).

3.1 Interactie tussen de Klimaatmissie en de CE-missie

De huidige (innovatiesysteem) analyse focust zich op de transitie naar een circulaire economie van verschillende energie technologieën aan de hand van het Rijksbrede programma Circulaire Economie om de economie te veranderen naar een duurzame, volledig circulaire economie in 2050, zuiniger om te gaan met energie en slimmer met grondstoffen, producten en diensten. De CE-missie is echter niet de enige missie met een sturend effect op deze technologieën. De ambitie tot elektrificatie van Nederland stimuleert de plaatsing, ontwikkeling en verbetering van zonnepanelen, windparken en autobatterijen en het zo snel mogelijk opbouwen van het energiesysteem. Deze doelen, zoals omschreven in de klimaatmissie, blijken sterker sturing te geven dan de missie en doelen gesteld voor circulariteit. Kort gezegd zou gesteld kunnen worden dat de klimaatmissie een doel is, terwijl circulariteit een middel is om o.a. het klimaatdoel te bereiken.

Uit de analyse van de innovatiesystemen blijkt dat de ontwikkelingen rondom circulariteit ondergeschikt zijn aan deze energietransitie en circulariteit momenteel geen prioriteit is binnen de sector. Zo wordt de klimaatmissie beter ondersteunt vanuit beleid en is de markt ingericht op het stimuleren van de doelen gesteld in de klimaatmissie. In de verschillende analytische stappen binnen de innovatiesysteem analyse zullen deze dynamieken verder worden uitgewerkt en geïllustreerd. Dit heeft belangrijke implicaties voor de oplossingsrichtingen die vanuit het innovatiesysteem worden ondersteund. Zo zijn instituties voornamelijk gericht op het opschalen van de energie technologieën en worden middelen geïnvesteerd in het verbeteren van de prestatie (energieopwekking). Dit heeft vaak een belemmerende werking de circulariteit van de geanalyseerde productgroepen.



Figuur 3: De energie technologieën worden gestuurd door zowel de klimaatmissie (blauw) als de CE-missie (groen). De klimaatmissie is hierin sterk dominant waardoor actoren gestimuleerd worden om in te zetten op hierbij passende innovatiestrategieën (geel).

Voorbeeld Windturbines

Om de klimaatdoelen te halen zullen de komende jaren vele windturbines geplaatst moeten worden. “Een windturbine per dag” volgens geïnterviewde actoren (uit interview met windturbine producent). Vanuit de klimaatmissie zijn het reduceren van CO₂-emissies en het verminderen van het gebruik van fossiele grondstoffen de dominante problemen om op te lossen. Daarvoor is het nodig dat alternatieve en hernieuwbare energie technologieën kunnen concurreren met fossiele energie. Mede daarom staat het opschalen van deze hernieuwbare energie technologieën centraal om de *Levelized Cost of Energy* zo laag mogelijk te maken. Dit heeft een “wedloop” gecreëerd waarin producenten zo snel als technologisch en economisch haalbaar zo groot mogelijke turbines willen plaatsen. Grotere turbines zijn efficiënter en rendabeler. Een gevolg hiervan is de noodzaak tot continue uitbreiding en aanpassing van de infrastructuur (installatieschepen, kranen) en productiecapaciteit (grotere productiehallen en machinerie) welke moeilijk terugverdiend kunnen worden. Circulariteit wordt hierdoor grotendeels buiten beschouwing gelaten doordat middelen elders worden geïnvesteerd en aanbestedingen niet om circulariteit vragen maar om zo veel mogelijk geproduceerde Megawatt tegen zo laag mogelijke kosten.

Voorbeeld Zonnepanelen

Energie opgewekt door middel van zonnepanelen moet volgens de energiemixscenario's 30% van de energiemix gaan vervullen. Om deze doelen te halen zullen nog veel nieuwe panelen geplaatst moeten worden. Het (innovatie)beleid rondom zonnepanelen is dan ook voornamelijk gefocust op het opschalen van de hoeveelheid zonnepanelen in Nederland. Zo heeft de Nederlandse PV-sector in het SolarNL plan (niet wettelijk vastgelegd) doelen gesteld om efficiëntere panelen te maken en nieuwe oppervlaktes te voorzien van panelen (denk aan integratie van zonnecellen in dakpannen en gevels). Beide doelen volgen de logica om zo veel mogelijk energie op te wekken per oppervlak. Circulariteit functioneert slecht binnen deze logica: panelen worden vroegtijdig vervangen voor nieuwere met een betere efficiëntie en hergebruik is altijd ongewenst aangezien lagere efficiëntie panelen langer operationeel blijven.

Binnen de PV-sector staat leveringszekerheid hoog op de agenda. Zo heeft de snelle overname, dan wel verplaatsing, van de productieketen naar met name China veel stress en onzekerheid gecreëerd in Europa en vrezende actoren voor een tekort aan materialen en producten. Leveringszekerheid is een materiaal georiënteerd probleem en wordt zo ook benoemd in de missie voor een circulaire economie. In de perceptie van actoren echter, is leveringszekerheid een onzekerheid die de energietransitie in de weg staat: een tekort aan materialen en producten kan leiden tot het niet halen van klimaatdoelen. Daarom worden verschillende pogingen ondernomen binnen de PV-sector (en ook voor de autobatterijen-sector) om een lokale keten op te zetten. Ook wordt gewerkt aan nieuwe innovaties die de prestatie van de technologieën dusdanig verbeteren dat andere landen deze innovaties ook zullen willen benutten. Op deze manier wordt gehoopt een wederzijdse afhankelijkheid te kunnen creëren.

Voorbeeld Batterijen

De afgelopen jaren is het beleid omtrent CO₂-neutrale mobiliteit, en daarmee EVB, voornamelijk gefocust op het stimuleren van de adoptie van elektrische mobiliteit. Voorbeelden hiervan zijn investeringen in infrastructuur zoals laadpalen, innovaties in batterijchemie om de actieradius van elektrische auto's te vergroten, en subsidievoordelen voor elektrisch rijden zoals een verminderde bijtelling. Het stimuleren van de adoptie van elektrische mobiliteit heeft echter ook geleid tot een toename van het materiaalgebruik, zo ook in de vorm van autobatterijen. Recentelijk heeft het vernieuwde Battery Directive (EU, 2023) de klimaatdoelen weten te verbinden aan de circulaire doelstellingen. Zo zijn doelen geformuleerd op het reduceren van CO₂-emissies, het verbeteren van batterijprestatie en het reduceren van materiaalgebruik. Hierdoor is het in de batterijsector ook merkbaar dat de missies op het gebied van klimaat en circulaire economie minder met elkaar lijken te concurreren.

Wanneer oplossingsrichtingen samenvallen ontstaat synergie en versnelling

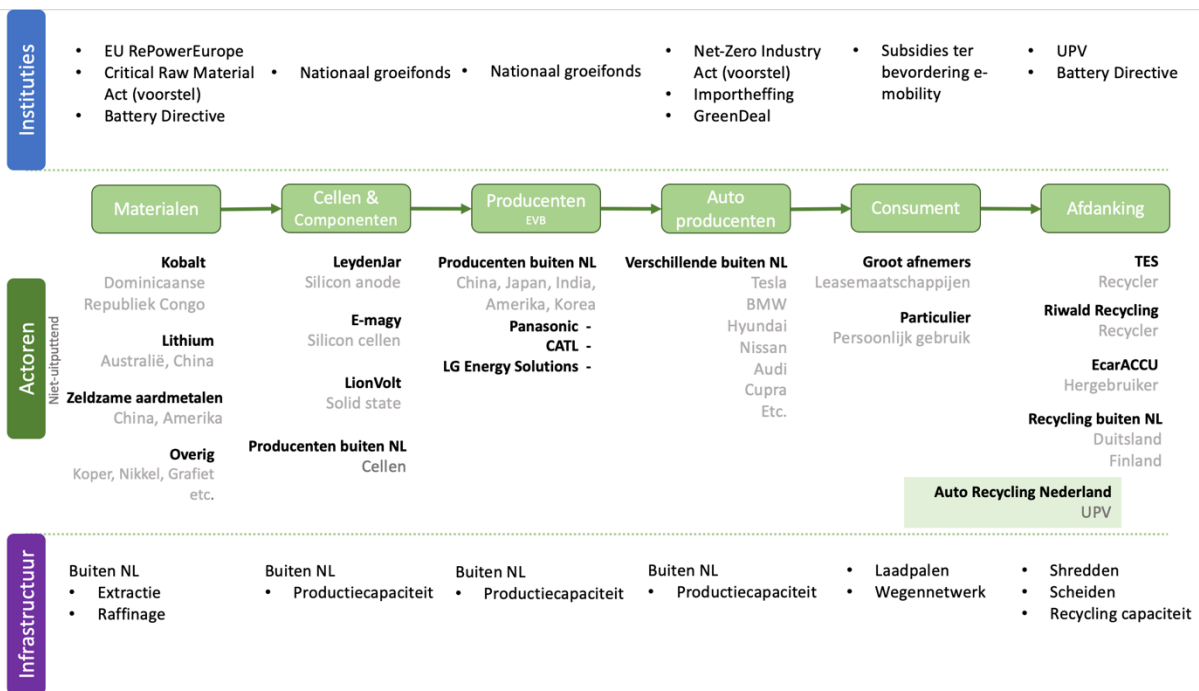
Wanneer circulaire oplossingsrichtingen in de perceptie van de actoren hand-in-hand gaan met de energietransitie, ontstaan sturende synergiën. Beide missies creëren legitimiteit en stellen middelen beschikbaar wat actoren uitnodigt tot innovatie. De circulaire oplossingsstrategie verminderen is hier een voorbeeld van. Het stimuleert actoren tot innovaties die efficiëntie of energieopwekking van de energie-technologieën verbeteren, terwijl er minder materialen nodig zijn om de energie-technologieën te produceren. Deze logica overlapt met zowel de CE-missie, omdat minder materialen worden gebruikt, als met de klimaatmissie, omdat de prestatie en efficiëntie van de technologie wordt verbeterd. Denk hierbij aan PV-panelen met een hogere opbrengst (minder materiaal per hoeveelheid opgewekte elektriciteit over de levensduur van de panelen) of goedkopere Li-ion batterijen die minder dure metalen bevatten.

Vaak resulteert het reduceren van het materiaalgebruik in een prijsdaling. Echter zorgt een reductie in kosten van de producten van bijvoorbeeld de panelen of batterijen in extra vraag naar de producten, waardoor juist meer materialen worden gebruikt. Dit wordt ook wel een reboundeffect genoemd. Hierdoor ontstaat een paradoxale dynamiek tussen de twee missies waarin het streven tot verminderen van materialen en prijsreductie uiteindelijk leidt tot een toename in materiaalgebruik. Deze dynamiek is zichtbaar in het circulaire strategie vermindering die streeft naar het reduceren van materiaalgebruik waardoor de prijs van de technologie afneemt. Hierdoor kan meer van de technologie geïnstalleerd worden om energie op te wekken voor de klimaatmissie, maar wordt het circulair principe vermindering tegengewerkt. Ook deze dynamiek illustreert de prioritering van de klimaatmissie over circulariteit.

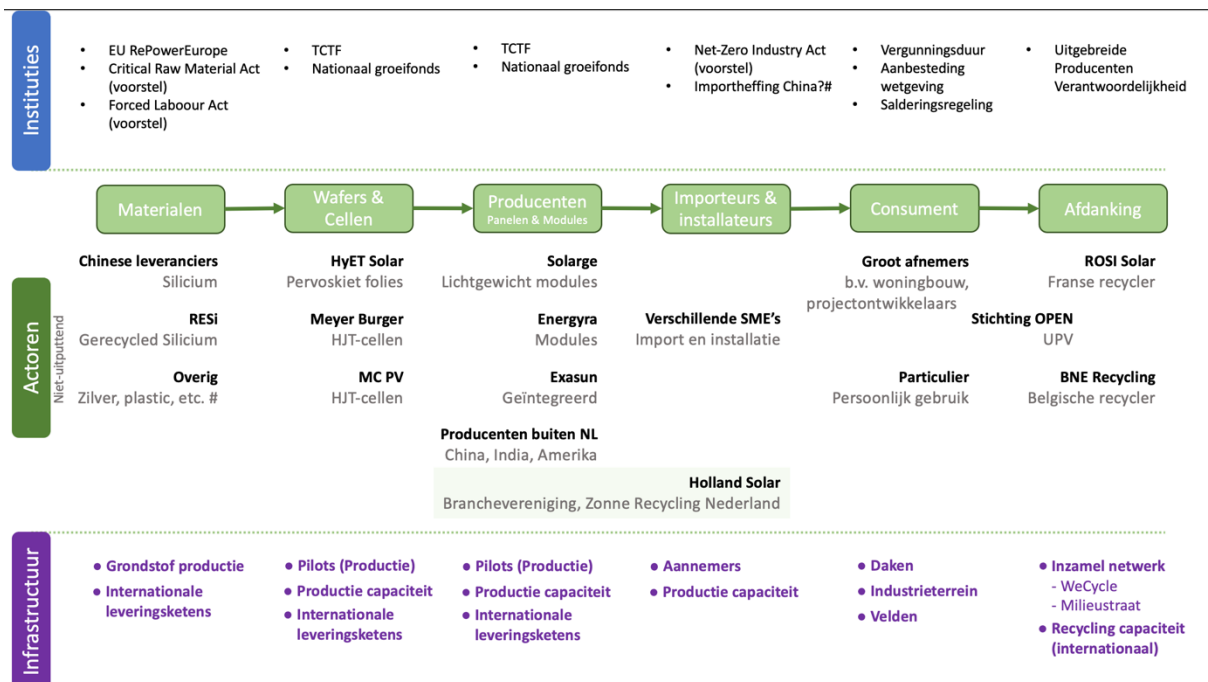
3.2 Lange complexe ketens

Nederlandse actoren geven aan weinig tot geen invloed te hebben in het ontwerp en de productie van de verschillende hernieuwbare energie technologieën. In Nederland is maar weinig infrastructuur aanwezig om (auto)batterijen, PV-panelen en windturbines te produceren en te recyclen. Materiaal extractie, materiaal raffinage en productie vindt buiten Nederland, en veelal zelfs buiten Europa, plaats. Door deze beperkte invloed wordt gevreesd voor grote afhankelijkheid van externe landen voor het mogelijk maken van de energietransitie.

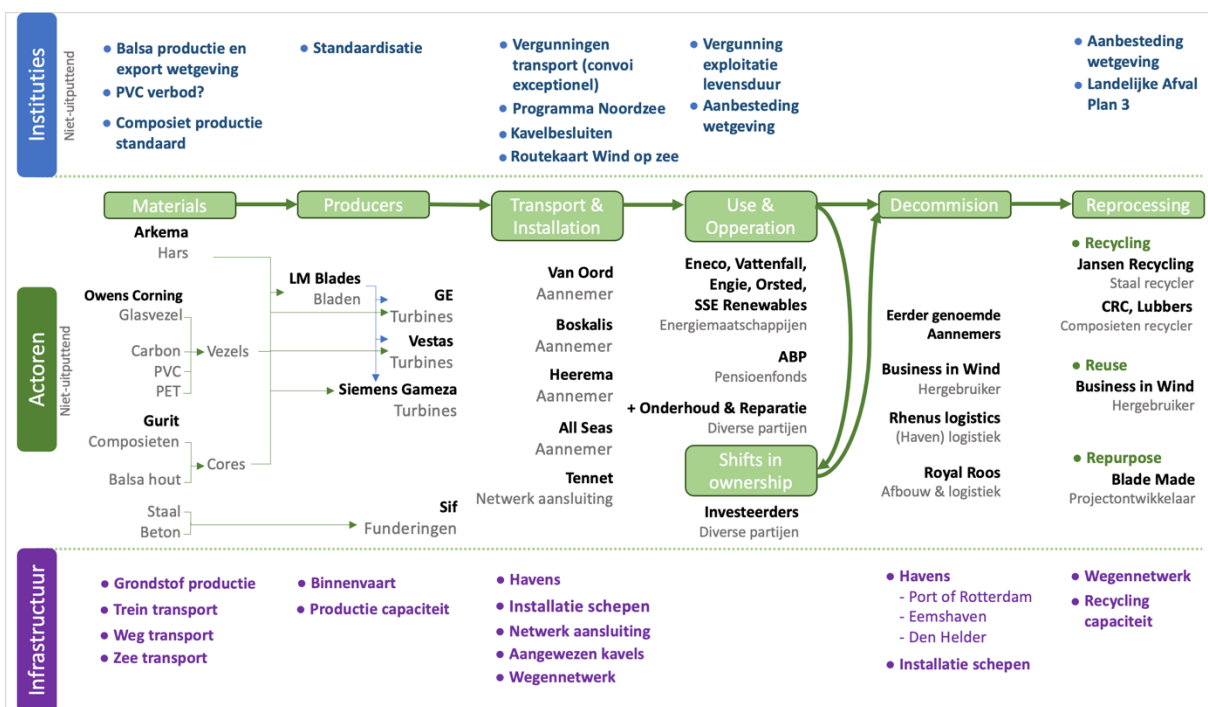
Echter zijn binnen Nederland enkele actoren begonnen met het opschalen van productiecapaciteit voor PV-panelen (figuur 5) en zijn plannen gemaakt voor het recyclen van lithium (figuur 4). Ook zijn er veel verschillende partijen gespecialiseerd in het installeren dan wel opbouwen van zonneparken en windturbine installaties (figuur 6). Het collectiesysteem voor afgedankte batterijen in Nederland zeer goed georganiseerd en wordt in Europa gezien als vooruitstrevend (figuur 4). Voor PV-panelen wordt gewerkt aan het opschalen en verbeteren van het collectiesysteem. Het succes van de Nederlandse windsector is mede toe te wijzen aan de goede fysieke infrastructuur in Nederland, zoals de vele grote havens. Ook spelen meer Nederlandse en lokale actoren een rol in windsector (figuur 6).



Figuur 4: Overzicht van de EVB keten. Actoren zijn weergegeven in groen, instituties in blauw en belangrijke infrastructuur in paars



Figuur 5: Overzicht van de PV keten. Actoren zijn weergegeven in groen, instituten in blauw en belangrijke infrastructuur in paars



Figuur 6: Overzicht van de windturbine keten. Actoren zijn weergegeven in groen, instituten in blauw en belangrijke infrastructuur in paars

3.3 Reflectie op de transitie per technologie

Deze sectie identificeert op hoofdlijnen de kansen en belemmeringen in de transitie naar een Circulaire Economie. De MIS-analyse laat zien welke circulaire oplossingen door de belanghebbenden als kansrijk worden ervaren en waar belemmeringen zorgen voor vertraging.

Binnen een MIS-analyse wordt het functioneren van het systeem beoordeeld met het scoren van verschillende zogenaamde **innovatiesysteemfuncties** (Tabel 2). Deze functies vertegenwoordigen sleutelprocessen die noodzakelijk zijn om innovatie voorspoedig te laten verlopen. Hiermee is het goed functioneren (de sleutelprocessen worden goed vervuld) essentieel voor het volbrengen dan wel versnellen van de transitie. Wanneer functies slecht vervuld worden (en dus laag scoren) kan dit duiden op systemische barrières. Zie Elzinga et al. (2023; 2024) voor verdere uitleg en uitwerking van de functies. Op basis van deze analytische stappen is het mogelijk om aanbevelingen te formuleren: waar kan ingegrepen worden om de transitie te versnellen en wat is hiervan de impact op het systeem? De functies worden geplot in spindiagrammen.

De komende sectie laat enkele highlights zien van de MIS-analyse uit WP5. Voor de verschillende analytische stappen uit het MIS-raamwerk worden de meest toonaangevende dynamieken beschreven en geïllustreerd. Op basis van deze analytische stappen is het mogelijk om aanbevelingen te formuleren: waar kan ingegrepen worden om de transitie te versnellen en wat is hiervan de impact op het systeem?

Tabel 2: Functies zoals gedefinieerd in het MIS-raamwerk. Gebaseerd op Elzinga et al. (2023). In de tekst worden functies genoemd (F-nummers) om bijbehorende dynamieken te markeren en te duiden.

Functie	Beschrijving - indicatoren
F1. Ondernemerschap	Ondernemers ontwikkelen, experimenteren met, schalen en investeren mogelijke circulaire oplossingen.
F2. Kennisontwikkeling	Kennisontwikkeling over nieuwe technologieën, producten, regels en de markt zijn nodig om te kunnen innoveren.
F3. Kennisverspreiding	Kennis moet uitgewisseld worden tussen partijen die geïnteresseerd zijn in het versnellen van oplossingen.
F4. Directionaliteit	Innovatie is per definitie onzeker, maar wordt vergemakkelijkt als er een eenduidige visie is omtrent het maatschappelijke probleem en eenduidige verwachtingen over hoe de verschillende oplossingsrichtingen een bijdrage zullen leveren aan het oplossen hiervan.
F5. Marktformatie	Het creëren van stimuleren en weghalen van belemmerende marktprikkels voor circulariteit. Denk aan wet- en regelgeving, standaarden, businessmodellen en aanbestedingscriteria.
F6. Mobiliseren van middelen	Actoren dienen werk te verzetten om middelen beschikbaar te krijgen in het innovatiesysteem. Denk hierbij aan financiële, materiële, menselijke en infrastructurele middelen om de ontwikkeling en opschaling van innovaties te realiseren en versnellen.
F7. Legitimiteit creëren	Vernieuwing kan weerstand oproepen en commerciële belangen pogen de status quo in stand te houden. Door het creëren van een ondersteunende socio-institutionele omgeving kan legitimiteit en draagvlak voor innovatie worden gecreëerd.
F8. Coördinatie	Coördinatie van, en tussen, de oplossingsrichtingen is essentieel zodat deze gezamenlijk de missie kunnen volbrengen. Deze coördinerende rol kan vervuld worden door overheden, bedrijven, NGO's, brancheverenigingen of een consortium van actoren.
F9. Regime destabiliseren	In een transitie moet ruimte worden gecreëerd voor nieuwe innovaties en actoren. Naast de gevestigde orde, het regime, moeten startups kansen worden geboden en regimespelers worden uitgedaagd om te breken met oude gewoontes en de business-as-usual.

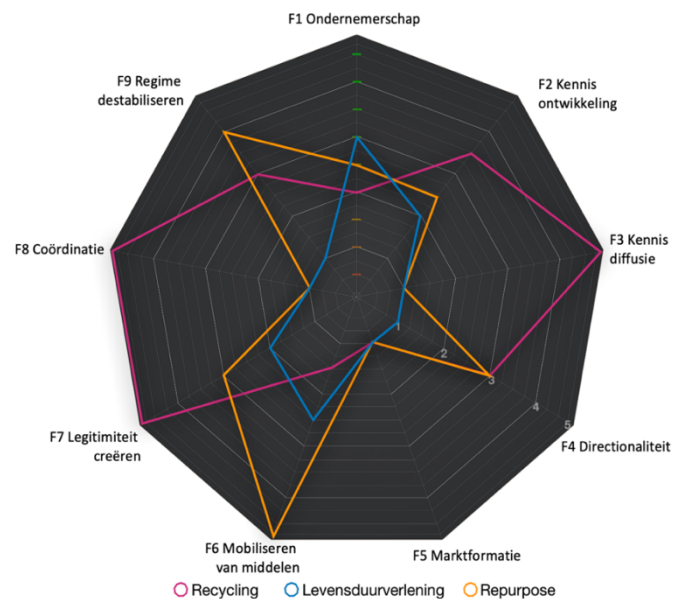
3.3.1 Wind

Binnen het innovatiesysteem voor circulaire windenergie scoort de Recycling-route goed, maar Levensduurverlenging en Repurpose-route juist niet.

Opmerkelijk is het slecht functioneren van de innovatiesysteem functie *F5 Marktformatie* voor alle circulaire strategieën (minimale score voor alle circulaire oplossingsroutes). De windsector wordt sterk gedreven door het aanbestedingsbeleid wat voornamelijk gefocust is op het zo goedkoop mogelijk maximaliseren van energieproductie. Deze manier van aanbesteden werkt stimulerend voor de klimaatmissie, maar is zeer belemmerend voor de circulaire strategieën. Daarnaast is er geen additioneel beleid om CE te stimuleren. Ook worden actoren verward door het inconsistente afvalbeleid.

Er is een verbod op het verbranden van windturbine bladen wat circulariteit, en specifiek recycling, zou moeten stimuleren. Echter mogen composieten toch verbrand worden als alternatieve verwerking duurder is dan €200/ton. Recycling kost tussen de €1200 en €1500 per ton waardoor het businessmodel voor recycling sterk ondermijnt wordt en verbrandings-vergunningen worden uitgegeven.

Recycling staat vaak centraal op evenementen (*F3 Kennisverspreiding*) en er zijn veel coalities en afstemmingsopgericht die mogelijkheden voor de recyclings-route bespreken en delen (*F8 Coördinatie*). Voor de andere routes, Levensduurverlenging en Repurpose, zijn kennisverspreiding en coördinatie essentieel voor het goed functioneren van de routes maar scoren de functies zeer slecht. Kennis is nodig om te kunnen bepalen welke secundaire toepassingen mogelijk zijn met de afgedankte windturbines en componenten. Deze kennis wordt niet gecoördineerd gedocumenteerd en gedeeld.



Figuur 7: Scores voor de innovatiesysteem functies voor de circulaire strategieën binnen de windsector. Een functie met een score van 1 werkt sterk belemmerend en een score van 5 impliceert een goed presterende en versnellende functie.

Tabel 3: Barrières uit de MIS-analyse voor circulaire windenergie.

Barrière / Dynamiek	Analytische stap	Oorzaak
Sector-breed		
Afgedankte windturbines vormen een steeds grotere afvalstroom. Vanuit de missie voor een circulaire economie is dit een dominant probleem. Vooral de turbine bladen, waar tot op heden nog geen goede verwerkingsmethodiek voor is, zijn een aandachtspunt.	Probleem - Oplossing Diagnose	Geïnterviewde actoren geven aan dat de noodzaak voor circulariteit in de sector evident werd toen berichten verschenen in de media over de dumping en het begraven van turbinebladen in de woestijn. Echter vindt er geen tot weinig sturing plaats op het voorkomen van het afvalprobleem. Instituties zijn gericht op het opschalen van de windsector en niet op circulariteit. Binnen de sector dient geëvalueerd te worden hoe circulariteit beter op de agenda te krijgen en circulaire experimentatie te faciliteren.
De toenemende afhankelijkheid van China wordt door de sector gezien als een probleem waar circulariteit aan kan bijdragen. De beschikbaarheid en leveringszekerheid van kritieke materialen, zoals het neodymium gebruikt in magneten in de turbine, wordt gezien als een serieus probleem en potentiële belemmering onder actoren door heel Europa.	Probleem-Oplossing Diagnose	Vanuit de Europese Commissie wordt hier beleid op gevoerd in de vorm van bijvoorbeeld het Critical Raw Material Act wat Europese producenten minder afhankelijk moet gaan maken van de zeldzame aardmetalen veelal gewonnen in China. Nu de windsector subsidievrij is en de concurrentie gevoerd wordt op prijs, zien zij het risico ingehaald te worden door Chinese producenten. Chinese producenten genieten namelijk nog wel (grote hoeveelheden) overheidssteun wat een oneerlijk markt kan creëren. Actoren vragen om regelgeving die nationaal of Europees geproduceerde en circulaire producten competitief kan maken over alternatieven.
De infrastructuur van de sector wordt momenteel beschreven als één van de grootste problemen in de sector. Actoren zijn niet in staat investeringen terug te verdienen omdat voortdurend nieuwe investeringen worden gevraagd in de opschaling van de infrastructuur.	Structurele analyse	De focus van aanbesteding op prijs en het doel om subsidie-vrij te worden heeft een "race" voor de turbine met het grootste vermogen en daarmee de grootste turbine gecreëerd. Het produceren en installeren van een windturbine vergt een groot arsenaal aan materieel zoals productiehallen, transportschepen en installatiekranen. De (te) snel toenemende grootte van de turbines zorgt ervoor dat investeringen gemaakt moeten blijven worden in de infrastructuur en de terugverdientijd op gedane investeringen niet gehaald wordt. (Tijdelijke) standaardisatie van de gevraagde afmetingen voor turbines kan actoren helpen langer gebruik te maken van

		gemaakte investeringen. Belangrijk hierbij is dat standaardisatie van circulariteitscriteria ook meegenomen moeten worden om de sector sturing te beïden.
Recycling - Functies		
Turbine bladen worden gemaakt uit (onder andere) composiet vezels en harsen om deze vezels te binden. Er wordt geëxperimenteerd met verschillende type harsen (waarvan de meeste niet recyclebaar zijn). Hierdoor is shredden noodzakelijk en verliezen de bladen hun waarde.	Functionele analyse: F2 Kennisontwikkeling	Experimenten focussen zich onder andere op het ontwikkelen van een nieuw type hars om de recyclebaarheid te verbeteren. Door harsen te gebruiken die (door specifieke behandeling) weer te ontbinden zijn, kunnen de composiet vezels teruggewonnen worden zonder deze te shredden. Op lange termijn zal innovatie in het gebruik van harsen essentieel zijn voor de recyclebaarheid van de turbinebladen. Op de korte termijn zullen producenten experimenteren met verschillende type hars wat closed loop recycling zal compliceren door een verscheidenheid aan chemische structuren in turbine bladen. Een lange termijnvisie kan helpen experimentatie te bundelen en te sturen tot standaarden.
Marktformatie wordt gezien als de grootste belemmering. Er is geen businesscase voor recycling.	Functionele analyse: F5 Marktformatie	Het Landelijke Afval Plan (LAP3) stelt dat storten en verbranden van composieten verboden is tenzij alternatieve verwerking duurder is dan €200/ton. Het recyclen van composieten uit turbinebladen is gemiddeld €1400/ton. Hierdoor worden bladen vaak verbrand en bijgemengd in asfalt of blijven in opslag liggen wachtend op alternatieve verwerkingsmethode
Levensduurverlenging - Functies		
Momenteel worden veel (oudere generatie) windturbines op land hergebruikt. Echter geven actoren aan dat het hergebruik model zal verdwijnen door veranderingen in wetgeving.	Functionele analyse: F5 Marktformatie	Veel windparken (vooral op land) hebben een vergunning voor exploitatie van rond de 20-25 jaar. Echter is de economische en technologische levensduur 35 jaar. Landen met een minder ver ontwikkeld institutioneel raamwerk voor windenergie zetten nog aanbestedingen uit waarvoor de nieuwste turbines te groot of te krachtig zijn. De turbines die in Nederland worden afgeschreven en vervangen, kunnen in deze buitenlandse institutionele niches nog rendabel worden ingezet. Naar verwachting zullen deze niches verdwijnen als landen opschalen in hun energietransitie en aanbestedingscriteria gaan hanteren die

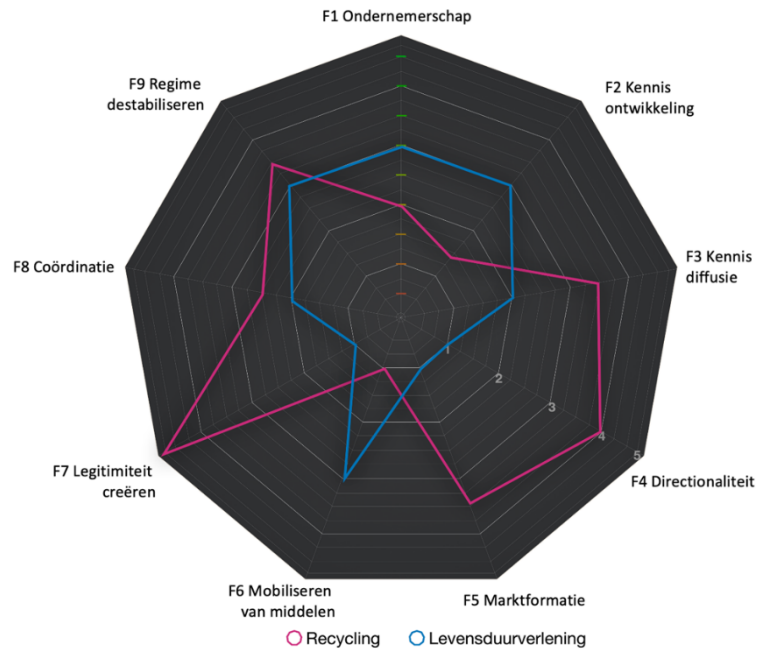
		wel passen bij de nieuw geproduceerde turbines.
	Functionele analyse: F6 Mobiliseren van middelen	Doordat turbines steeds groter worden, zijn de afzonderlijke onderdelen vaak ook te groot om te vervoeren over de weg. Rotondes, bruggen en transportwetgeving maakt wegtransport (en dus hergebruik) vaak complex, langdurig en duur.
Repurpose - Functies		
Een beperkt aantal ondernemers experimenteert met het ombouwen van turbine bladen tot fietsenstallingen, bruggen en speelplaatsen. Deze projecten genieten veel legitimiteit omdat hiermee wordt aangetoond te werken aan het toenemende afvalprobleem van de energietransitie. De grote uitdaging binnen deze strategie is het gebrek aan schaalbare toepassingen, zeker in relatie tot het snelgroeiende aantal afgedankte bladen.	Functionele analyse: F5 Marktformatie	Binnen de huidige afvalwetgeving worden bladen nauwelijks gerecycled maar vaker verbrand of gestald. Hierdoor is een overschot aan laden beschikbaar voor Repurpose. Echter, nadat de bladen een tweede leven hebben gehad in een repurpose-toepassing, bestaat dezelfde onzekerheid over hoe de bladen af te danken. Deze onzekerheid belemmert de legitimiteit van de repurpose-route, omdat er wederom afval over blijft waarmee actoren niet goed weten wat te doen.
	Functionele analyse: F3 Kennisverspreiding	Ook is meer en betere informatie over de bladen nodig om te kunnen bepalen wat de meest geschikte secundaire toepassing is. Systemen en platformen om deze data op te halen en te delen ontbreken.

3.3.2 Zon

Voor zonnepanelen, functioneert zowel de recycling-route als de levensduurverlenging-route matig. Opmerkelijke verschillen zitten in *F7 Legitimiteit creëren* en *F5 Marktformatie*. Actoren achten de circulaire oplossingsroute Repurpose niet relevant voor zonnepanelen.

De legitimiteit van de recyclingroute is hoog waar die voor levensduurverlenging juist laag scoort. Actoren zien recycling als een essentiële strategie om aan de circulariteit van zonnepanelen te werken. De recyclingroute is ook beter geïnstitutionaliseerd in de UPV (*F5 Marktformatie*) dan levensduurverlenging. Het

hergebruiken van zonnepanelen wordt veelal gezien als een minder geschikte strategie. Beter is om nieuwe panelen te installeren die een beter prestatie leveren en zo meer bijdragen aan de (sturende) klimaatdoelen.



Figuur 8: Scores voor de innovatiesysteem functies voor de circulaire strategieën voor zonnepanelen. Een functie met een score van 1 werkt sterk belemmerend en een score van 5 impliceert een goed presterende en versnellende functie.

Tabel 4: Barrières uit de MIS-analyse voor circulaire zonnepanelen.

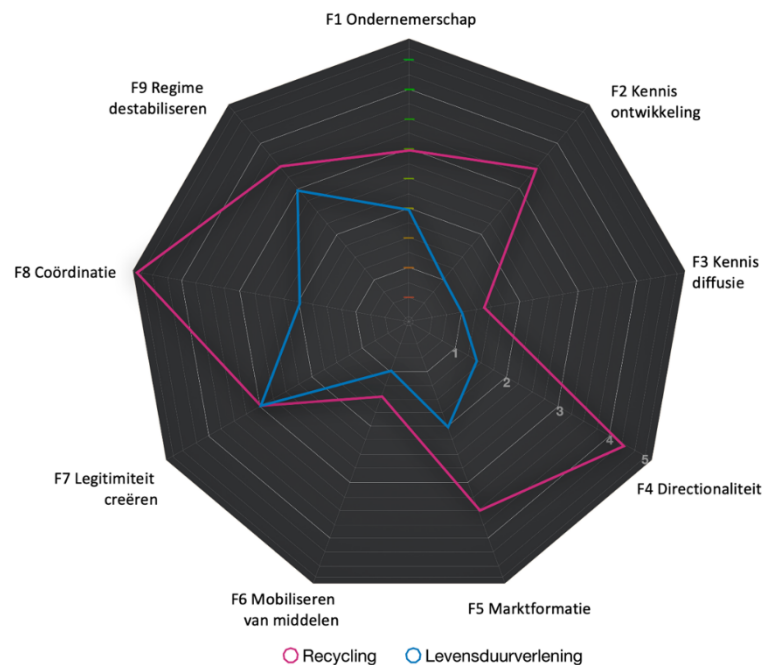
Barrière / Dynamiek	Analytische stap	Oorzaak
Sector-breed		
Geen sturing op CE. Wel veel gestuurd op opschaling van het aantal geplaatste panelen en verbeteren van de prestatie van panelen. Denk aan betere panelen, minder kritieke materialen, nieuwe oppervlaktes gebruiken (geïntegreerd en lichtgewicht).	Probleem-Oplossing Diagnose	Zonnepanelen worden geclassificeerd als elektrisch en elektronisch afval en vallen daarom onder het Europese WEEE Directive. Het Directive stelt verschillende inzameling en verwerkingsdoelstellingen voor elektrisch en elektronisch afval, ondergebracht in een UPV-regeling. Echter geldt er een uitzondering voor zonnepanelen omdat het afgedankte volume nog onvoldoende is. Verder zijn er geen officiële CE-doelen (ook naast recycling) die richting geven aan de sector. Bijvoorbeeld het NZIA, TCTF, IPCEI, CBAM en het NGF spreken niet tot nauwelijks over circulaire economie. Desondanks staat het wel op de agenda. Zo draagt het SolarNL plan de titel "Circulaire geïntegreerde hoog rendement zonnepanelen" maar wordt

		circulariteit verder nauwelijks genoemd in het plan zelf.
Nederlandse actoren geven aan weinig tot geen invloed te hebben in het ontwerp en de productie van zonnepanelen en vrezen voor grote afhankelijkheid van externe landen voor het mogelijk maken van de energietransitie. Circulair ontwerp is noodzakelijk, maar lastig te bewerkstelligen in de lange en niet-transparante keten	Structurele analyse	De productie van zonnepanelen wordt gedomineerd door China. India en de VS nemen toe in marktaandeel. Hierdoor heerst het gevoel dat vanuit Nederland moeilijk gestuurd kan worden op (circulair) ontwerp van de panelen. Er zijn verschillende kleinere ondernemingen in Nederland. Zij werken bijvoorbeeld aan de productie van zonnepanelen en het vervaardigen van silicium. Veel van deze ondernemingen verkeren in zwaar weer.
Recycling		
Zonnepanelen worden niet closed loop gerecycled.	Functionele analyse: F1 Ondernemerschap	Innovatie is voornamelijk gericht op het verbeteren van de prestatie van zonnepanelen, niet op circulariteit. Zonnepanelen worden niet circulair ontworpen (verlijming en het gebruik van toxische stoffen) en de recycling-technologie is nog niet ver ontwikkeld. Het volume aan afgedankte zonnepanelen is volgens sommige actoren nog niet hoog genoeg om rendabel te kunnen recylen. Vanuit de Europese Unie kan hierop gestuurd worden.
Actoren die zonnepanelen op de markt brengen, moeten garant staan voor de inzameling van deze panelen na afdanking. Deze producenten - verantwoordelijkheid is ondergebracht bij Stichting OPEN. Echter wordt hier nog niet op geacteerd.	Functionele analyse: F5 Marktformatie	Vanuit het Europese WEEE Directive geïmplementeerd in Nederland, dient 65% van de op de markt gebracht elektrische en elektronische apparaten bij afdanking ingezameld en verwerkt te worden, zo ook zonnepanelen. Echter wordt gedoogd dat zonnepanelen niet aan deze doelstelling hoeven te voldoen omdat zonnepanelen momenteel in grote getalen in de handel worden gebracht, maar nog niet of nauwelijks afgedankt en ingezameld worden. Daarom is een put-on-market doelstelling lastig te realiseren. Gevolg hiervan is dat de opgestelde instituties (ondergebracht in de UPV) niet sturend werken.
De huidige recyclingcapaciteit is niet in staat het aankomende volume zonnepanelen te verwerken.	Functionele analyse: F6 Mobiliseren van middelen	Er komen nog weinig panelen terug uit de markt, wat het verdienmodel van recycling moeilijk maakt. Hierdoor zijn onvoldoende investeringen gedaan in het opschalen van de recyclingcapaciteit. Recentelijk is de afvalbijdragen verhoogd om deze kosten (deels) te compenseren.
Levensduurverlenging		

<p>Reparatie van zonnepanelen is bijna nooit economisch rendabel. Actoren proberen levensduur te verlengen door operationele kosten te minimaliseren.</p>	<p>Functionele analyse: F1 Ondernemerschap</p>	<p>Reparatie van zonnepanelen wordt bemoeilijkt doordat panelen niet ontworpen zijn op repareerbaarheid. De kritieke modules bevinden zich meestal diep in het paneel waardoor reparatie complex of onrendabel wordt. Vanuit de Europese Unie kan hierop gestuurd worden.</p>
		<p>Ook wordt reparatie minder aantrekkelijk door de snelle ontwikkeling van nieuwe panelen. Vervanging door een nieuw model met een betere prestatie is vaak economisch aantrekkelijker.</p>
		<p>Partijen die zonnepanelen in leaseconstructies aanbieden creëren een businessmodel dat levensduurverlenging stimuleert. Het leasen van zonnepanelen is interessant wanneer de operationele kosten minimaal zijn. Hiervoor is binnenshuis expertise ontwikkeld over welke panelen weinig onderhoudt behoeven en lang meegaan. Ook komen marktplaatsen op voor tweedehands panelen.</p>
<p>Er is veel kritiek op het exporteren van gebruikte (industriële) panelen.</p>	<p>Functionele analyse: F7 Legitimiteit creëren</p>	<p>Industriële panelen, gebruikt in zonneweides, worden vaak vroegtijdig afgeschreven door het aflopen van vergunningen. Export van deze panelen naar regio's met veel zonuren is economisch interessant omdat de technologische en economische levensduur nog aanzienlijk is. Sommige actoren zijn bang voor slechte afvalverwerking na export. Omdat er internationaal minder gecoördineerde controle en monitoring is, wordt gevreesd voor dumping van de panelen na gebruik.</p>

3.3.3 Batterijen

Binnen het innovatiesysteem voor circulaire EV-batterijen presteert de Recycling-route goed, maar de Levensduur-verlening slecht. Actoren binnen beide routes geven aan behoefte te hebben aan beter inzicht in de (samenstelling van de) stromen nodig te hebben met als gevolg een slechte score voor *F3 Kennisverspreiding*. Ook *F6 mobiliseren van middelen* presteert slecht. De Levensduurverlenging-route kampt met een tekort aan kwalitatief goed herbruikbare batterijen en de recycling-route worstelt met het ontbreken van lokale recycling capaciteit.



Figuur 9: Scores voor de innovatiesysteem functies voor de circulaire strategieën voor autobatterijen. Een functie met een score van 1 werkt sterk belemmerend en een score van 5 impliceert een goed presterende en versnellende functie.

Grote verschillen zitten in de mate van *F4 Directionaliteit*, *F5 Marktformatie* en *F8 Coördinatie*. Oorzaak is de uitwerking van het Battery Directive. De doelen en verplichtingen uit het Directive zijn voornamelijk recycling georiënteerd. Bijvoorbeeld de verplichting tot het verwerken van op de markt gebrachte batterijen mobiliseert de sector, via producentenverantwoordelijkheid, om zich te coördineren. De doelen werken sturend en creëren een markt voor recycling.

Tabel 5: Barrières uit de MIS-analyse voor circulaire autobatterijen.

Barrière / Dynamiek	Analytische stap	Oorzaak
Sector-breed		
Het Battery Directive (gelanceerd in 2006 en geüpdatet in 2023) heeft een sterk sturende werking op de sector en verbindt doelen binnen de energietransitie aan circulariteit. Het Directive streeft naar het reduceren van CO ₂ -emissies, het bevorderen van elektrische mobiliteit en het verhogen van leveringszekerheid.	Probleem-Oplossing Diagnose	Het reduceren van afhankelijkheid blijft complex en creëert onzekerheid maar ook wil tot handelen binnen de Europese Unie. De raffinage en winning van materialen voor EV-batterij productie bevindt zich buiten NL, vaak zelfs buiten de EU. Er is geen Nederlandse keten voor recycling en het opnieuw toepassen van de gerecyclede materialen.
Een sturende methodiek binnen de sector is het Nationale Groeifonds Material	Structurele analyse	Het Groeifonds is pas recentelijk goedgekeurd en wordt getrokken door het Battery Competence Cluster wat een

<p>Independence & Circular Batteries wat getrokken wordt door het Battery Competence Cluster (BCC). Met een totaalbudget van €296 miljoen in het project wordt samenwerking gezocht op duurzame materiaalvoorziening, ontwikkelen en opschalen van duurzame batterijtechnologie, en circulaire batterijsystemen voor vervoerstoepassingen en netstabiliteit.</p>		<p>jonge en nog sterk ontwikkelde organisatie/initiatief is. Tijd en middelen vanuit het Groeifonds zullen geïnvesteerd moeten worden in de coördinatie van het project.</p>
<p>Er zijn meerdere partijen die een coördinerende rol (kunnen) vervullen in de transitie naar een circulaire economie, namelijk ARN vanuit de UPV, het BCC of de Nederlandse overheid. Echter geven geïnterviewde actoren aan een centraal sturende partij te missen.</p>	<p>Structurele analyse: Missie Arena</p>	<p>Deze organisaties profileren zichzelf als faciliterende, niet als sturende actoren. Zo wordt momenteel veel naar elkaar gewezen door de actoren die deze rol zouden kunnen dragen. Op deze manier is het dus onduidelijk welke organisatie uiteindelijk sturing geeft in de transitie naar een circulaire keten voor autobatterijen. Geïnterviewde actoren geven aan dat het Nationale Groeifonds partijen in de keten heeft aangezet tot samenwerking wat stimuleert tot coördinatie.</p>
<p>Recycling</p>		
<p>In Nederland vindt geen tot nauwelijks recycling van EVB plaats. Recentelijk hebben een aantal ondernemers de ambitie geuit om te investeren in de eerste stap van de recyclingketen, namelijk het shredden van batterijen.</p>	<p>Functionele analyse: F1 Ondernemerschap</p>	<p>Vaak gaan nieuwe initiatieven snel weer failliet of worden geplande investeringen uitgesteld dan wel geannuleerd. Een rede hiertoe is de matige businesscase voor recycling. Daarnaast varieert de businesscase sterk voor verschillende batterijtype. Zo zijn batterijen met een hoog volume nikkel en kobalt veel aantrekkelijker dan lithiumbatterijen. Het teruggewonnen lithium kan de recyclingkosten niet dekken omdat het materiaal in zichzelf minder waard is.</p>
<p>Actoren geven aan dat er nog verbeteringen mogelijk zijn voor de huidige schreddings- en nascheidingstechnologie en dat hiervoor kennis nodig zal zijn.</p>	<p>Functionele analyse: F3 Kennisverspreiding</p>	<p>De variërende businesscase van black Mass wordt mede veroorzaakt door een gebrek aan overzicht van de batterijen in het recyclingproces. Het shredden van verschillende batterij types in variërende samenstellingen creëert een grote heterogeniteit aan kwaliteit van Black Mass. Daarmee is het onduidelijk welke materialen nog teruggewonnen kunnen worden. Ook blijkt dat nog veel materiaal verloren gaat in het nascheidingsproces.</p>

<p>Het Battery Directive stelt dat 70% van het volume van de afgedankte batterijen gerecycled moet worden. Daarnaast moet 80%-90% van de lithium aanwezig in de afgedankte batterij gerecycled worden. Soortgelijke doelstellingen gelden voor kobalt, koper, nikkel en lood. Ook wordt verplicht gesteld dat gerecyclede materialen worden gebruikt in de productie van nieuwe EVB (16% voor kobalt, 85% voor lood, 6% voor lithium en 6% voor nikkel). Het Battery Directive verplicht bedrijven om garant te staan voor de verwerking ervan bij afdanking. De UPV is ondergebracht Bij ARN.</p>	<p>Functionele analyse: F5 Marktformatie</p>	<p>Om te kijken hoe en of deze doelen gehaald kunnen worden is veel onderzoek nodig naar de hydrometallurgische recycling en de organisatie van de keten.</p>
<p>Levensduurverlenging</p>		
<p>Meerdere circulaire strategieën zijn nodig om Levensduurverlenging mogelijk te maken. Hierdoor is het hergebruiken van batterijen complex, duur en vraagt veel expertise en arbeid van ondernemers.</p>	<p>Functionele analyse: F1 Ondernemerschap</p>	<p>De batterij moet eerst doorgemeten worden om te identificeren welke onderdelen vervangen (Refurbish) en gerepareerd (Repair) moeten worden. Ook zal de software van het batterijen pakket herschreven moeten worden om het in andere toepassingen dan een auto te kunnen gebruiken (Remanufacture). Direct hergebruik in mobiliteit toepassingen (Re-use) komt niet voor.</p>
<p>Hergebruik van batterijen is moeilijker geworden door de afnemende kwaliteit van afgedankte batterijen.</p>	<p>Functionele analyse: F1 Ondernemerschap</p>	<p>Reden hiertoe zijn een groeiende expertise van ondernemers op het gebied van reparatie waardoor de batterijen die afgedankt worden vaak ook (economisch) onherstelbaar kapot zijn, een vermindering in productiefouten en betere integratie van batterijen in het frame van de auto waardoor demontage bemoeilijkt wordt. Deze ontwikkelingen worden veroorzaakt doordat ondernemers werken aan andere levensduur verlengende mogelijkheden voor batterijen, maar deze bemoeilijken hergebruik.</p>
<p>Ondernemers geven echter aan een sterke behoefte te hebben aan toegankelijke en gestructureerde gegevens over de levenscyclus, de</p>	<p>Functionele analyse: F3 Kennisverspreiding</p>	<p>Voor de route van levensduurverlenging zijn weinig tot geen concrete doelstellingen vastgesteld en valt daarom buiten de UPV. Hierdoor zijn de monitoringssystemen ook niet gericht op</p>

gezondheidstoestand en de resterende capaciteit van batterijen, om te kunnen beoordelen of hergebruik mogelijk is.		het meten van hergebruik, noch op de indicatoren die hergebruik kunnen faciliteren.
Producenten van batterijen vrezen dat zij aansprakelijk worden gesteld wanneer een batterij (afkomstig uit hun auto's) problemen veroorzaakt in een nieuwe toepassing.	Functionele analyse: F5 Marktformatie	Op dit moment ontbreekt het volledig aan stimulerende wet- en regelgeving. Momenteel ontbreken er bijvoorbeeld standaarden waaraan een batterij moet voldoen voor verschillende circulaire toepassingen, evenals standaarden voor het doormeten van batterijen voor het bepalen van de resterende capaciteit.

4 Circulaire ontwerpmogelijkheden

Dit rapport is gebaseerd op een integratie van zes achterliggende studies (Balkenende et al., 2024; De Koning & Kleijn, 2024a, 2024b, 2024c; Elzinga, 2024; Van Heusden & De Boer, 2024) die zijn uitgevoerd binnen de PGA hernieuwbare energietechnologie. Hieronder worden circulaire ontwerpmogelijkheden besproken voor de verschillende hernieuwbare energietechnologieën. Voornaamste bron is literatuuronderzoek, voor 'wind' ook ondersteund door interviews met experts. Hierbij wordt eerst geschetst welke technische aangrijpingspunten onderscheiden worden. Vervolgens wordt aangegeven welke ontwikkelingen op het gebied van technologie en ontwerp aangewend kunnen worden om tot circulariteit te komen. Ontwerp wordt hierbij breed gezien, dit betreft niet uitsluitend het fysieke product, maar ook de context waarin dit wordt gebruikt, gedrag van stakeholders en maatregelen die kunnen bijdragen aan verwezenlijking.

De technologische en ontwerp mogelijkheden zijn opgezet om richting te geven aan de analyses van materiaalgebruik en milieueffecten. Deze analyses beogen de potentiële effecten en dilemma's van circulaire oplossingsroutes zichtbaar te maken. Doel is dus om een algemeen en een breed beeld te krijgen, niet compleetheit en een hoog detailniveau, dat zou slechts leiden tot schijnzekerheid en een te grote focus op details. Daarom is gekozen om een beperkt aantal technische en ontwerp ontwikkelingen mee te nemen in de analyse, alhoewel een zeer groot aantal ontwikkelingen (van uiteenlopend TRL-niveau) uitgewerkt zou kunnen worden tot een hoog detailniveau. Leidraad daarbij zijn de knoppen (vermindering grondstoffen, levensduurverlenging, closed loop recycling) geweest. Bekeken is welke technische en ontwerp ontwikkelingen op afzienbare termijn een wezenlijke bijdrage kunnen leveren aan de circulariteit van de bestudeerde energiesystemen. Als beperking is daarom opgenomen dat ontwikkelingen realiseerbaar moeten zijn en naar verwachting een significante impact op de markt kunnen hebben voor 2050, dat wil zeggen dat voornamelijk ontwikkelingen met een hoog TRL-niveau zijn beschouwd (TRL 8-9).

Naast mogelijkheden die ingegeven worden door technologische ontwikkelingen, kan ook gedacht worden aan een circulaire oplossing waarin de binnenlandse behoefte aan energiebronnen lager is dan in het basisscenario. Een dergelijk optie kan op verschillende manieren uitgewerkt worden. Hier hebben we gekozen voor het al goed beschreven Internationale handel scenario van Netbeheer Nederland. Nederland streeft daarin naar ontwikkeling van de eigen economie door maximaal in te zetten op de internationale wereldwijde energie- en grondstoffenketens. Klimaatneutrale energiedragers worden geïmporteerd uit landen waar deze relatief gunstig te produceren zijn. De industrie verduurzaamt dankzij elektrificatie en inzet van waterstof (ook als grondstof). Door de wereldwijde handelsketens verdwijnt een deel van de energie-intensieve industrie naar het buitenland. Dit is slechts een voorbeeld van een model waarin sprake is van een vermindering van de behoefte aan energiebronnen. Andere keuzen dan in het Internationale Handel scenario kunnen gemaakt worden voor de verhouding tussen de verschillende energiebronnen. Dit scenario moet dan ook vooral gezien worden als een illustratie van de effecten van een dergelijke strategie, maar niet als de enige specifieke mogelijkheid.

Het accent ligt hier op technische mogelijkheden. De mate van implementatie en de wijze van gebruik worden echter in grote mate bepaald door handelen van bedrijven en gedrag van afnemers/consumenten en wordt op hun beurt weer bepaald worden door bijvoorbeeld infrastructuur, regelgeving en cultuur. Deze aspecten worden hier soms aangestipt, maar zijn voor de meest direct betrokken stakeholders uitgewerkt in de vorige sectie.

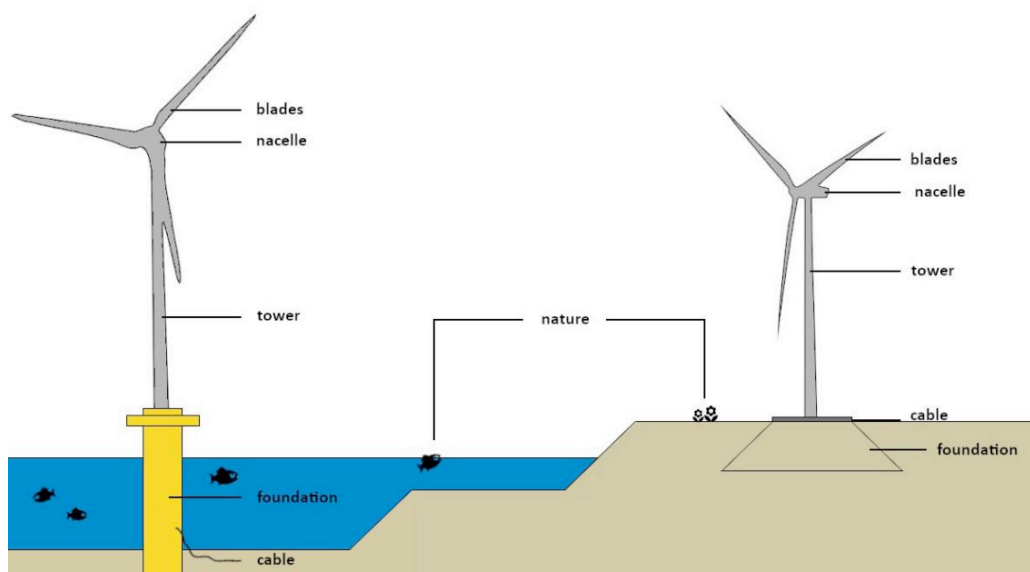
De besproken circulaire oplossingen laten zien hoe een oplossingsroute /circulaire strategie verwezenlijkt kan worden. Uit deze oplossingsroute wordt geschat hoe dit het baseline grondstoffen

scenario beïnvloedt. Hoe gaat het vermogen/capaciteit zich ontwikkelen, welke technologieën gaan toegepast worden, hoe verandert de materiaalintensiteit en levensduur van de technologieën of hoe verandert de toepassing van de closed loop recycling methoden. De combinatie van alle oplossingsroutes is het circulaire grondstoffen scenario. De schatting van de veranderingen t.o.v. het baseline grondstoffen zijn niet gebaseerd op de een evaluatie van de afzonderlijke technische en ontwerp mogelijkheden (dat zou te tijdrovend zijn en in te veel detail op specifieke effecten van bepaalde opties inzoomen), maar op een samengesteld grondstoffen scenario dat de effecten van meerdere opties gezamenlijk beschrijft.

Hieronder worden bestudeerde mogelijkheden voor de energiesystemen wind, PV en batterijen kort beschreven om de basis voor de effectberekeningen in het volgende hoofdstuk te introduceren. Een uitgebreidere beschrijving is te vinden in Balkenende et al. (2024). De beschrijving hieronder is ingedeeld per energiesysteem (wind, PV, batterijen). Binnen deze energiesystemen is, na een korte introductie, de beschrijving van technische en ontwerpmogelijkheden weergegeven per knop.

4.1 Wind

Binnen windenergie onderscheiden we installaties op land (onshore) en op zee (offshore). De belangrijkste onderdelen van een windturbine zijn: de bladen, nacelle (gondel), toren en fundering. Bekabeling in een windpark (inter-array), verbinding met substations en land (export) vallen onder “netwerken” en blijven hier buiten beschouwing. Het grootste milieueffect wordt gemaakt in de productie van de toren, fundering, nacelle met generator en bladen.



Figuur 10: Schematische weergave van de hoofdonderdelen van een windpark. Figuur overgenomen uit Lobregt et al. (2021).

De fundering van offshore windturbines bestaat doorgaans uit een monopile en een transition piece. Onshore wordt meestal een betonnen fundering gestort (ECHT, 2021). Monopiles worden de bodem ingetrild tot een diepte van ca. 50 meter, hoewel nieuwe ontwikkelingen zich richten op dieptes tot 100 meter (Duwind, persoonlijke communicatie, juli '23). De toren bestaat voornamelijk uit staal.

Windturbinebladen zijn gemaakt van composietmaterialen, met name glasvezel met polyester, epoxy of vinylester. Daarnaast worden nog allerlei extra materialen toegevoegd ter bevestiging (staal, lijmsorten), bescherming tegen erosie (PU-coatings, tapes) en bliksemafleiding. De composieten

zorgen voor efficiënte productie en hoge prestaties, maar zijn moeilijk recyclebaar. De behuizing van de gondel is ook gemaakt van glasvezel-composiet en biedt zodoende grotendeels dezelfde uitdagingen als de windturbinebladen.

De nacelle bevat de generator en andere elektrische componenten. Hoewel de massa van de nacelle slechts een fractie is van de overige delen van een windturbine, zijn hier juist de meeste kritieke materialen te vinden in de elektronica en de magneten.

Windturbines hebben een operationele levensduur van 20 tot 30 jaar. Het grootste milieueffect over de levensduur vindt plaats tijdens de productiefase. Gebruik, onderhoud en bijvoorbeeld vervanging van onderdelen dragen bij voor minder dan 5%. De recycleerbaarheid van een turbine (exclusief fundering) is groter dan 85%, vooral door het gebruik van vooral staal, aluminium en koper. Hoewel dit geïnterpreteerd zou kunnen worden als een hoge circulariteit, betekent niet dat dit materiaal daadwerkelijk wordt teruggewonnen en in hoeverre gebruik wordt gemaakt van al eerder gerecycled materiaal. Verliezen treden met name op in composietmaterialen (plastics, glasvezels).

Knop 'Vermindering grondstoffen'

Alternatieve constructie fundering. Voor besparing van staal in de funderingen wordt uitgegaan van vakwerkfundering in plaats van de nu gebruikelijke monopile met transition piece. Het marktaandeel van conventionele stalen vakwerkfundering groeit op korte termijn naar een marktaandeel van 50%. Effect: 25% minder staalgebruik voor funderingen van offshore turbines op basis van vakwerkconstructies (jackets). Op lange termijn nemen we een sterke groei van vakwerk met composietverbindingen aan. Effect: op lange termijn: 50% minder staal gebruik en een kleine toename van composietgebruik voor fundering offshore op basis van composiet-vakwerk (Jacket-composiet).

Generator magneten. High speed (HS) en medium speed (MS) permanent magnet generator (PMG) combineren permanente magneten met een gearbox en gebruiken aanzienlijk minder magneten (HS ca. 80kg/MW, MS ca. 160 kg/MW) dan een Direct Drive (DD-PMG) generator (650 kg/MW). Het marktaandeel van deze generatoren neemt toe van 20-30% nu naar circa 80%.

Knop 'Levensduurverlenging'

Fysieke duurzaamheid. De fysieke levensduur van een windturbine wordt beperkt door slijtage op lagers, erosie van bladen, en vermoeiing van toren en bladen. Door andere materiaalkeuzes kan de levensduur verlengd worden. Zo kan leading edge erosie verminderd worden door verbeterde coatings en slagvaste materiaalconfiguraties. Vermoeiing in toren (staal) kan worden tegengegaan door vergroten van de veiligheidsmarge en vermoeiing in bladen (composiet) kan worden tegengegaan door schadebestendig ontwerp met composieten. De levensduur kan door op deze duurzaamheid gerichte aangepaste ontwerpeisen op 40 jaar worden gebracht.

Tussentijdse vervanging van enkele turbine-onderdelen. Sommige onderdelen zijn meer aan veroudering en slijtage onderhevig dan andere. Vervangen en upgrades zijn potentieel zinvol voor bladen en generator. Vaste onderdelen zoals de fundering, bekabeling en toren blijven staan voor de gehele levensduur. Bij upgrades moet wel rekening worden gehouden met de bestaande vergunning en moet de verandering plaatsvinden in de algemene opzet van het windpark, zoals tip- en hubhoogte (WindEurope, 2017). De levensduur kan worden verlengd tot 60 jaar. Dit verdubbelt het materiaalgebruik voor gearbox en bladen over de gehele levensduur van de windturbine, maar

vermindert materiaalgebruik als de gehele windturbine in ogenschouw wordt genomen doordat fundering, toren en nacelle langer meegaan.

Standaardisatie van tiphoogte. De ontwikkelingen in windturbines volgen elkaar snel op. Daardoor is in de afgelopen twee decennia een sterke toename van grootte en efficiëntie van windturbines te zien geweest. Op systeemniveau leidt dit echter ook tot inefficiënties, omdat series klein zijn en de infrastructuur steeds andere voorzieningen vergt. Door vaststellen van een maximale tiphoogte, is er minder reden om te blijven streven naar grotere turbines. Dit kan tot grotere series van eenzelfde type en schaalvoordelen door een grotere basis voor uitwisseling van componenten, verlenging levensduur van infrastructuur en funderingen – als deze geschikt is om meerdere generaties turbines te ondersteunen.

Knop ‘Closed loop verwerking’

Ontwerp voor recycling. De huidige composietmaterialen zijn moeilijk te recyclen doordat zij gebaseerd zijn op thermohardende polymeren. In tegenstelling tot thermoharders kunnen thermoplasten vervormen onder verwarming, wat helpt bij nabewerking en recycling.

Verbeterde processing van windturbine bladen. Op dit moment worden bladen verwerkt door co-processing in een cementoven, pyrolyse of mechanische verwerking (shredding). De teruggewonnen materiaalkwaliteit is laag of afwezig. Hoogwaardiger recycling van composieten behoudt de materiaaleigenschappen van de composiet door structureel hergebruik als platen en balken. Door in te zetten op introductie van nieuwe recyclingtechnologieën en het opzetten van waardeketens voor hergebruik en recycling van composietmaterialen kan het recyclingpercentage oplopen van 0% tot 50% (glasfibers) of zelfs 75% (plastics).

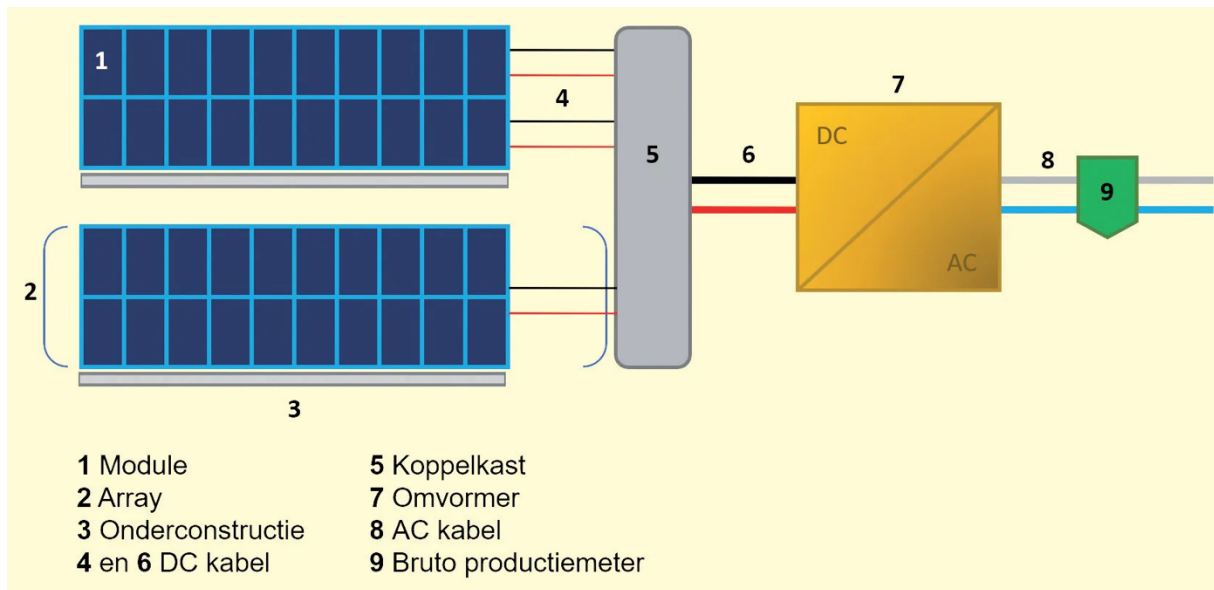
Tabel 6: Samenvatting technologische en ontwerp mogelijkheden ten behoeve van effectberekeningen. Overzicht voor windenergie van de technologische en ontwerp mogelijkheden, gegroepeerd per knop, en mogelijke effecten op het circulaire scenario in termen van grondstoffengebruik, levensduurverlenging en recycling.

Knoppen	Technische design opties	Circulair grondstoffen scenario
Vermindering grondstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Internationale Handel scenario Netbeheer. • Alternatieve constructie fundering • Minder gebruik magneten • Tiphoogte van offshore windturbines blijft na 2030 gelimiteerd tot 300 meter 	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteit opbouw volgens internationaal NetBeheer scenario. Dit resulteert in 12% lager opgesteld vermogen in 2050. • Toename gebruik van jacket i.p.v. monopiles voor offshore windturbines vanaf 2025. • Toename van HSPMG-generatoren voor onshore windturbines in 2025. • Toename van MSPMG-generatoren voor offshore windturbines vanaf 2025 •
Levensduurverlenging	<ul style="list-style-type: none"> • Extra lange levensduur door vervanging van tandwielkast en bladen 	<ul style="list-style-type: none"> • Onshore windturbines hebben een gemiddelde levensduur die toeneemt tot 60 jaar in 2050. • Offshore windturbines hebben een gemiddelde levensduur die toeneemt tot 60 jaar in 2050.
Closed loop verwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Closed loop hergebruik composieten 	<ul style="list-style-type: none"> • Uit de windturbinebladen wordt 75% van het plastic, 50% van de glasvezel en 50% van het kunststofhars closed loop gerecycled.

4.2 Zon

PV-systemen bestaan uit PV-panelen, omvormers, installatie-elektronica en de bevestigingsconstructie. De hier beschreven technologische en ontwerp mogelijkheden richten zich primair op de PV-panelen. Enerzijds is dit omdat daar de meeste ontwikkeling te verwachten en

nodig is, anderzijds omdat in de voor effectberekeningen benodigde data omvormer en paneel moeilijk te scheiden zijn.



Figuur 11: Schematische weergave van de hoofdonderdelen van een PV-installatie. Figuur overgenomen uit het Installatie Journaal (2024).

Figuur 11 geeft de elementen van het PV-systeem weer. De basis voor energieopwekking zijn de PV-cellen waaruit een PV-paneel is opgebouwd. In de meeste panelen wordt zeer zuiver kristallijn silicium (c-Si) gebruikt als lichtgevoelig element. Dit maakt circa 5% van het gewicht van een paneel uit. Metalen als aluminium, koper, zilver en tin dragen voor circa 1.5% bij, plastics circa 13%, glas 80% (Frischknecht, 2020). De elektronica (koppelkast, omvormer) kan gezien worden als conventionele elektronica, waarvan de impact vooral bepaald wordt door de IC's (geïntegreerde schakelingen). De constructie bestaat doorgaans vooral uit aluminium en heeft een van ongeveer 20% van de panelen. Het klimaateffect wordt voor circa 70% bepaald door de PV-panelen, 10% door omvormer en 20% door de aluminium constructie (Santoyo-Castelazo, 2021).

Vanuit circulaair oogpunt zijn zowel de PV-panelen zelf als de bijbehorende elektronica een punt van aandacht. De PV-panelen vormen een nieuwe technologie, waarvoor hergebruik en recycling nog nauwelijks ontwikkeld zijn. De elektronica is grotendeels conventioneel, maar zowel inzameling als daadwerkelijke recycling hebben een relatief lage opbrengst (CBS et al., 2024). Om tot effectieve circulaire strategieën te komen, moet ook de context waarin de technologie gebruikt wordt, meegenomen worden. Hier spelen businessmodellen, gebruikersgedrag en regelgeving een rol. Bij PV-installaties kunnen we onderscheid maken tussen particulier geplaatste zonnepanelen op daken enerzijds en zonneparken, terreinen met zeer veel zonnepanelen, waar grootschalig energie wordt opgewekt, anderzijds. Dit is waar relevant meegenomen bij de circulaire mogelijkheden die hier voor de verschillende knoppen besproken worden.

Knop 'Vermindering grondstoffen'

Alternatieve materialen. De verwachting is dat kristallijn Si dominant zal blijven (marktaandeel nu circa 90%), omdat andere systeem moeilijk kunnen concurreren met de al geïnstalleerde productiecapaciteit en de daarmee gepaarde grote investeringen in performance verbetering. Maar alternatieve panelen op basis van CIGS (koper indium gallium selenide) zouden vanuit het oogpunt

van materiaalbeheer interessant kunnen zijn. We kijken naar de effecten van CIGS panelen met een marktaandeel van 30%.

Panel efficiëntie. De efficiëntie van PV-panelen neemt naar verwachting toe met circa 1.4% per jaar. Door het stimuleren van intensief onderzoek naar verbeteringen kan dit mogelijk verdubbeld worden. Dit leidt op termijn tot een afname in de behoefte aan PV-systemen.

Knop 'Levensduurverlenging'

Veroudering. De efficiëntie van PV-panelen gaat in gebruik achteruit met 0.4-0.6% per jaar. Door de voornaamste degradatiemechanismen te onderdrukken kan dit worden teruggebracht tot 0.2% per jaar. Dit verdubbelt de functionele levensduur. Een levensduurverlenging van 25 naar 35 lijkt reëel.

Hergebruik. PV-systemen die vervangen worden hebben doorgaans nog een capaciteit van 80% van hun oorspronkelijke waarde. Dergelijke systemen kunnen nog 10-20 jaar nut hebben op plaatsen in Nederland waar de energiebehoefte kleiner is, waar nog voor dit doel ongebruikte beschikbare ruimte is, of op plaatsen elders waar de zonnestraling intensiever is.

PV/T combinatie van PV-paneel met thermische collector. De opbrengst van PV-panelen daalt bij hogere temperatuur. De meeste PV-systemen worden luchtgekoeld, maar ook worden systemen ontwikkeld die via een koelblok met vloeistof gekoeld worden (PV/T-systemen). Een dergelijk koelsysteem kan dan ook als zonnecollector gebruikt worden en via warmtewisseling extra energie te winnen, waardoor een systeemefficiëntie van circa 40% behaald kan worden (vergeleken met circa 25% voor PV).

Garantieperiode gelijk aan verwachte levensduur. Voor gebruikers is garantie een sterke drijfveer om een product te laten herstellen (of vervangen), terwijl garantie bedrijven juist stimuleert degelijker producten op de markt te brengen. Om bij producten met een zeer lange levensduur, zoals PV-systemen, deze effecten effectief te maken, moet de garantieperiode de te verwachten levensduur van de panelen beslaan.

PV-product paspoort. Een product paspoort leidt niet direct tot circulaire strategieën, maar is een belangrijk ondersteunend element. In het ideale geval bevat een paspoort niet alleen informatie over de aanwezige materialen (full material declaration, inclusief informatie over potentieel zorgwekkende stoffen), maar ook over de locatie en toegankelijkheid van materialen in het product (naast levensduurverlenging ook van belang voor recycling) en de gebruikshistorie van het product. Dit faciliteert het bepalen van resterende potentiële levensduur en het vaststellen van de optimale circulaire strategie gedurende of aan het eind van een gebruiksfase.

Knop 'Closed loop verwerking'

Verplichte inzameling van PV-systemen bij einde levensduur. Nog slecht weinig PV-systemen worden afgedankt, maar het sterk toenemende gebruik zal op een termijn van 15-20 jaar een grote stroom PV-panelen beschikbaar komen voor recycling en/of hergebruik. Essentieel zijn dan effectieve inzamelingsystemen, waarbij volledige inzameling verplicht wordt gesteld.

Ontwerp voor recycling. Veel materiaal gaat verloren omdat het tijdens recycling niet gescheiden kan worden van andere materialen. Door in de ontwerpfase van PV-panelen en bijbehorende componenten rekening te houden met de wijze waarop recyclingprocessen worden uitgevoerd, kunnen producten gemaakt worden die tijdens de gangbare recyclingprocessen in hoge mate uiteenvallen in grotendeels homogene fragmenten. Door (verplichte) gerichte inzameling in een toegespitste verwerkingsstroom, kan maximaal en op de juiste wijze worden ingezameld en indien

nodig verder gescheiden op basis van type. De opbrengst van materialen zoals koper, aluminium en staal wordt hierdoor verhoogd van 45% naar 95%.

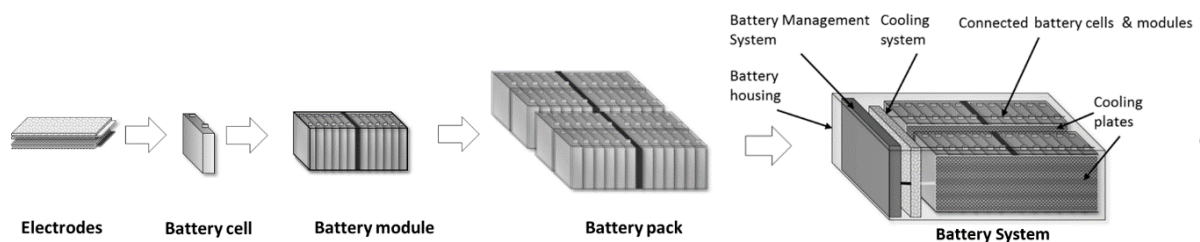
Verbeterde (hydrometallurgische) processen. Veel materialen gaan verloren in recycling van PV-panelen omdat materialen als indium en zilver in kleine hoeveelheden worden aangebracht op grote glasoppervlakken. Door effectieve verwerking van panelen om juist de kleinere maar waardevolle materialen terug te winnen in plaats van het glas en de ontwikkeling van (hydrometallurgische) processen om deze metalen effectief terug te winnen, kunnen materialen zoals zilver, indium, koper en tin worden teruggewonnen met een opbrengst van circa 75%.

Tabel 7: Samenvatting technologische en ontwerp mogelijkheden ten behoeve van effectberekeningen. Overzicht voor PV-systemen van de technologische en ontwerp mogelijkheden, gegroepeerd per knop, en mogelijke effecten op het circulaire scenario in termen van grondstoffengebruik, levensduurverlenging en recycling.

Knoppen	Technische & design opties	Circulair grondstoffen scenario
Vermindering grondstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Internationale Handel scenario Netbeheer • Toename panel efficiëntie • Alternatieve materialen: aandeel CIGS stijgt naar 30% 	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteit opbouw volgens internationaal NetBeheer scenario. Dit resulteert in 31% minder capaciteit in 2050. • Ontwikkeling efficiëntie van PV-paneel versnelt en volgt optimistische verwachting van Carrara et al. (2020) • Aandeel CIGS stijgt naar 30% in 2050.
Levensduurverlenging	<ul style="list-style-type: none"> • Vertraagde veroudering • Verlengen gebruiksfase door hergebruik • Levenslange garantie • Product paspoort 	<ul style="list-style-type: none"> • Gemiddelde leeftijd van panelen op particuliere daken stijgt naar 35 jaar in 2050. • Gemiddelde leeftijd van panelen in zonneparken stijgt naar 35 jaar in 2050.
Closed loop verwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Verbeterde hydrometallurgische recyclingprocessen • Ontwerp PV-paneel voor recycling • Effectief inzamelingssysteem 	<ul style="list-style-type: none"> • Closed loop recycling van zilver, indium, en tin worden tot 75% teruggewonnen in 2050. • Staal, aluminium en koper worden volledig closed loop gerecycled.

4.3 Batterijen

De groeiende vraag naar elektrische voertuigen stimuleert de vraag naar Li-ion batterijen en de daarin aanwezige kritieke mineralen. De batterijen in EV's bestaan uit een complexe mix van (onder meer) kritieke materialen, waarvan de extractie en verwijdering aanzienlijke ecologische en economische uitdagingen met zich meebrengen.



Figuur 12: Schematische weergave van de hoofdonderdelen van een batterijsysteem, waarin, cel, module, pack en managementsysteem onderscheiden kunnen worden. Figuur overgenomen uit Bielewksi (2021).

Van alle onderdelen in een lithium-ion-batterij hebben de kathodes momenteel de grootste invloed op de energiedichtheid van de batterij door het gebruik van verschillende kritieke materialen en zijn ze de belangrijkste kostenbepalende factor (Manthiram, 2020). Daarom zijn veel circulaire innovaties gericht op de batterij cellen en met name de kathodes. Daarnaast kan voor levensduurverlenging worden gekeken naar hergebruik of reparatie op het niveau van cellen en modules. Om dit mogelijk

te maken moet op het niveau van het batterijsysteem voldoende informatie beschikbaar zijn, terwijl systeem, pack en eventueel ook module demontage en re-assemblage mogelijk moet zijn.

Knop 'Vermindering grondstoffen'

Lagere capaciteit EV-batterijen. De capaciteit van EV-batterijen is relatief hoog en er is een trend te zien naar steeds hogere capaciteit, vooral in verband met het bereik van EV's. In 95% van de gevallen is een 40 kWh batterij (ruim) voldoende voor de dagelijks afgelegde afstand. Dit betekent dat de capaciteit van batterijen grotendeels onderbenut blijft en vooral dient om een en niet vaak benodigd maximaal bereik te halen. Dit vereist een gedragsverandering die echter niet makkelijk te verwezenlijken zal zijn. Een vereiste is dat een fijnmazige, betaalbare infrastructuur van snelladers. Een bijdrage hieraan zou ook geleverd kunnen worden door langeafstandsritten met andere middelen te stimuleren, bijvoorbeeld goed openbaar vervoer of het incidenteel huren van een auto met grotere capaciteit.

Smart battery management. Door "slim" dynamisch opladen van EV's en netwerk-services die belasting van het elektriciteitsnetwerk naar een ander moment kunnen verschuiven, kan het benodigde piekvermogen verlaagd worden. Dit zorgt voor een verlaging van de benodigde maximale capaciteit. Bij bepaalde batterijtypes is smart battery management ook nuttig voor het verlengen van de levensduur, door laadcapaciteit af te stemmen op gebruik en de laadsnelheid afhankelijk te maken van de batterijlading. Smart battery management is ook een noodzakelijk onderdeel van de Vehicle-to-X strategie.

Vehicle-to-X. EV's worden gemiddeld slecht 4% van de tijd gebruikt voor verplaatsing. In de periode dat EV's stil staan (en aangesloten zijn op het net) kan de batterij gebruikt worden om elektriciteit op te slaan en op piekmomenten terug te leveren aan het net. EV-batterijen worden dan gebruikt voor andere doeleinden dan transport, terwijl ze in het voertuig zitten. Zelfs met conservatieve schattingen zou de capaciteit die EV's in het voertuig-naar-net-systeem in de EU kunnen leveren, voldoende zijn om de vraag naar netbatterijen tegen 2050 te dekken. Samen met de capaciteit voor tweede gebruik van EV-batterijen, zou de geleverde capaciteit voldoende zijn om al in 2030 te voldoen aan de vraag naar netwerkbatterijen. Hiervoor is battery management nodig, niet alleen op het niveau van laden en ontladen van individuele EV's, maar ook op systeemniveau.

LFP-batterijen. Het type batterij dat wordt gebruikt bepaald de benodigde grondstoffen. De meeste EV-batterijen zijn van NMC-type, met een kathode gemaakt van nikkel, mangaan en kobalt. Deze batterijen hebben een hoge energiedichtheid en een betere benutting van de capaciteit bij lage temperaturen, wat ze aantrekkelijk maakt voor mobiele applicaties. Door een verschuiving naar LFP-batterijen (met een lithium-ijzer-fosfaat kathode) wordt het gebruik van de kritieke materialen kobalt en nikkel vermeden. Nadeel van LFP-batterijen is dat de energiedichtheid slechts 40% is van die van NMC-batterijen. Maar voordelen zijn een lagere prijs, geringer risico op brand, beter bestand tegen hoge temperaturen, en minder snelle degradatie (dubbele aantal laadcycli en minder kritisch bij volledig op- en ontladen). LFP-batterijen worden bijvoorbeeld al gebruikt in de standaardrange Tesla M3, terwijl in de long-range een NMC-batterij wordt gebruikt.

Knop 'Levensduurverlenging'

EV-batterijen voor langer gebruik of stationaire hergebruik. EV-batterijen die worden ontmanteld, hebben nog ongeveer 80% van hun oorspronkelijke capaciteit. Ze worden dan niet langer beschouwd voor gebruik in EV's, omdat het maximale bereik van de auto dan met 20% is teruggelopen. Onder de knop 'Vermindering van grondstoffen' is al besproken dat er mogelijkheden zijn om met een lagere batterijcapaciteit om te gaan. Dit is in principe ook geldig voor langer gebruik van een batterij.

Daarnaast kan gedacht worden aan hergebruik in andere applicaties, waarvoor de capaciteit nog wel toereikend is, zoals stationaire energieopslag. Een dergelijke secundaire toepassing kan de levensduur van de batterijen aanzienlijk verlengen. De gemiddelde levensduur van de EV-batterijen neemt toe tot 20 jaar. Als na 10-12 jaar gebruik in EV's batterijen stationair worden hergebruikt, kan de capaciteit van tweedehands EV-batterijen de vraag naar netwerkbatterijen in principe dekken. Voorwaarde is dat het EV-batterijsysteem zodanig is ontworpen, dat het batterijsysteem als geheel of na demontage op cel- of moduleniveau weer herbruikbaar is. Potentieel nadeel van gebruik van het EV-systeem als geheel is dat de prestatie bepaald wordt door de slechtste cellen. De mogelijkheid om op cel- of moduleniveau te repareren (of herfabriceren) biedt dus in principe een prestatievoordeel.

Batterijreparatie. Een batterij-pack bestaat uit cellen en modules die niet even snel verouderen. Door reparatie, waarbij slecht functionerende cellen of modules worden geïdentificeerd en vervangen blijft een batterij langer in gebruik. Repareerbaarheid wordt ondersteund door een modulair ontwerp en geavanceerde diagnosemethoden. De gemiddelde levensduur van EV-batterijen kan dan tot 20 jaar toenemen, hier staat een geringe toename van materialen voor reparatie of herfabricage tegenover.

Batterij als service. Dit is een optie dat ondersteunend kan zijn voor andere technologische en ontwerp mogelijkheden. Het beheer van batterijen gedurende en aan het einde van hun levensduur kan beter gecontroleerd worden als een serviceleverancier verantwoordelijk is voor en belang heeft bij een lange levensduur van de batterijen en gebruik van (EV-)batterijen als systeemopslag in bijvoorbeeld Vehicle-to-X.

Batterij paspoort. Als beschreven voor het PV-product paspoort, leidt een batterij paspoort niet direct tot circulaire strategieën, maar is een belangrijk ondersteunend element. Informatie over de aanwezige materialen, hun locatie en toegankelijkheid en de gebruikshistorie van het product kunnen helpen bij het bepalen van resterende potentiële levensduur en het vaststellen van de optimale circulaire strategie gedurende of aan het eind van een gebruiksfase.

Knop 'Closed loop verwerking'

Hydrometallurgisch recycling proces. Het voorstel voor de Europese Batterijenverordening stelt een recyclingefficiëntie van 35% voor lithium in 2025 en 70% in 2030 voor, en van 90% en 95% voor zowel nikkel als kobalt. Met pyrometallurgie, een gebruikelijke wijze van processen van metalen, alleen kunnen lithium en mangaan niet of nauwelijks worden teruggewonnen. Hydrometallurgische processen maken het mogelijk om ook deze metalen te recyclen. Daarvoor is extra ontwikkeling nodig, omdat de processen nu energie-intensief zijn met relatief lage opbrengst, terwijl relatief veel vloeibaar afval wordt geproduceerd. Het kan zelfs betwijfeld kan worden of de huidige recyclingprocessen wat betreft kosten en CO₂-emissie concurrerend zijn met mijnbouw (Etxandi-Santolaya, 2023). Directe recycling, waarbij de materiaalstructuur van bijvoorbeeld de kathodes intact blijft, is niet meegenomen, omdat dit naar verwachting niet op grote schaal toegepast zal kunnen worden voor 2040.

Tabel 8: Samenvatting technologische en ontwerp mogelijkheden ten behoeve van effectberekeningen. Overzicht voor batterijsystemen van de technologische en ontwerp mogelijkheden, gegroepeerd per knop, en mogelijke effecten op het circulaire scenario in termen van grondstoffengebruik, levensduurverlenging en recycling.

Knoppen	Technische design opties	Circulair grondstoffen scenario
Vermindering grondstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Internationale Handel scenario Netbeheer. • Smart battery management • Vehicle-to-X • LFP Li-ion batterij in EVs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteit opbouw volgens internationaal NetBeheer scenario. Dit resulteert in 21% minder opslagcapaciteit in 2050. • LFP-batterij in EVs heeft een marktaandeel dat groeit van 6% in 2020 tot 40% in 2030 en blijft vervolgens constant (LFP blijft dominant in stationaire toepassingen).
Levensduurverlenging	<ul style="list-style-type: none"> • Hergebruik van mobiele batterijen in stationaire toepassingen. • Opladen van batterijen onder hun maximale capaciteit. • Reparatie batterijpack waarbij de levensduur wordt verlang door het identificeren en vervangen slechte en niet werkende individuele batterij modules. • Batterij als service, waarbij de leverancier belang heeft bij een lange levensduur. • Batterij paspoort 	<ul style="list-style-type: none"> • Gemiddelde leeftijd van batterijen in mobiele en stationaire toepassingen stijgt van 16 jaar naar 20 jaar in de periode 2020 – 2025 en blijft vervolgens constant.
Closed loop verwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Introductie European Battery Regulation • Hydrometallurgische processen worden de norm in batterij recycling. 	<ul style="list-style-type: none"> • Staal, aluminium en koper worden volledig closed loop gerecycled. • Nikkel en kobalt recycling neem toe van 70% in 2020 tot 95% in 2050. • Lithium en Mn recycling neemt toe vanaf 0% in 2020 tot 35% 2025 en 70% in 2030.

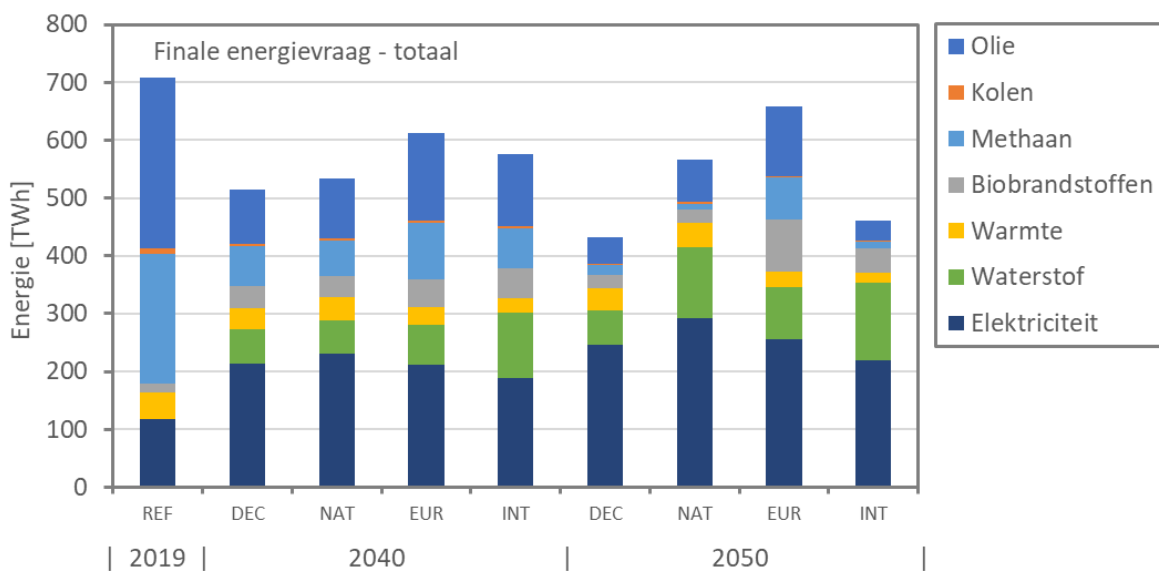
5 Potentiële effecten

Dit rapport is gebaseerd op een integratie van zes achterliggende studies (Balkenende et al., 2024; De Koning & Kleijn, 2024a, 2024b, 2024c; Elzinga, 2024; Van Heusden & De Boer, 2024) die zijn uitgevoerd binnen de PGA hernieuwbare energietechnologie.

5.1 Energie in het baseline en circulair grondstoffen scenario

De potentiële effecten van de introductie van de circulaire oplossingsroutes wordt berekend als een verschil tussen een baseline en circulaire grondstoffen scenario. Het materiaalgebruik en het verlies van materiaal in het baseline en circulair grondstoffen scenario is gebaseerd op de energie scenario's zoals ontwikkeld door Netbeheer Nederland (2023) in de Integrale Energiesysteemverkenning 2030-2050. Hierbij zijn alle benodigde vormen van energie-infrastructuur integraal in kaart gebracht. De toekomstige vraag naar elektriciteit is een belangrijke factor voor de ontwikkeling van capaciteit of vermogen van de hernieuw hernieuwbare energietechnologieën en daarmee de materialen die gebruikt worden in de hernieuwbare energietechnologieën. Daarom bespreken we eerst de Netbeheer scenario's in wat meer detail.

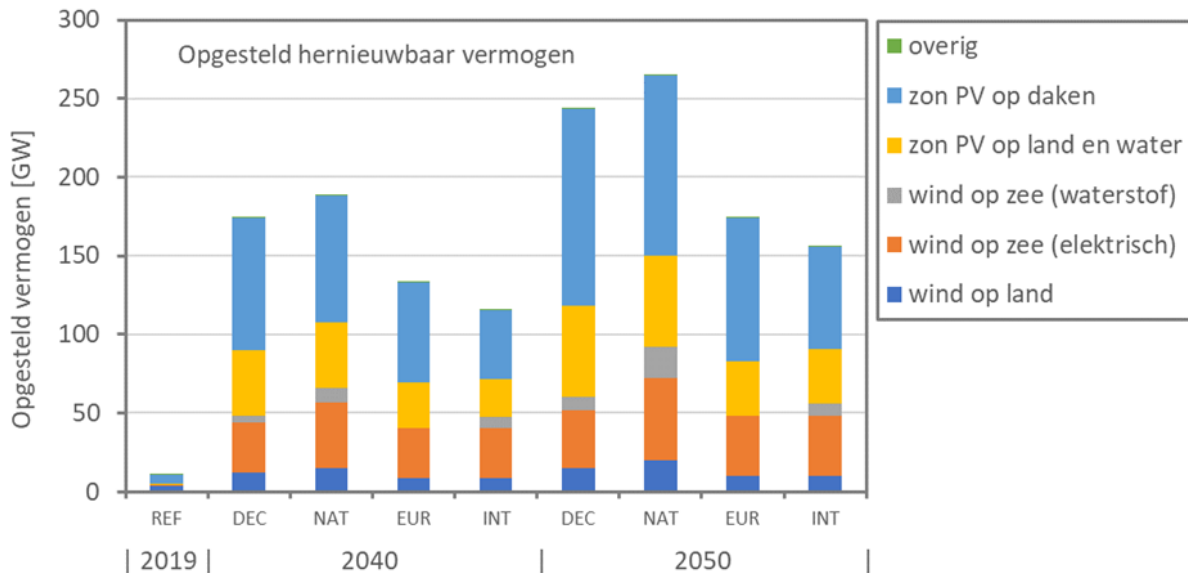
Doel van de Netbeheer energie scenario's is om de verschillende keuzes die gemaakt moeten worden om tot een klimaatneutraal energiesysteem in 2050 te komen, inzichtelijk te maken. Twee belangrijke aspecten zijn gecombineerd in de energie scenario's. Het eerste aspect is een de keuze tussen collectieve techniek en regie door de overheid versus vrije marktwerking. Het andere aspect is de keuze tussen een meer regionale/zelfvoorzienende energietransitie versus een meer internationaal/import georiënteerde energievoorziening. Alle Netbeheer Nederland scenario's gaan uit van een klimaat neutraal energiesysteem in Nederland in 2050, zie de rapporten van Netbeheer Nederland (2023).



Figuur 13: Finale energievraag in Nederland volgens de 4 verschillende Netbeheer scenario's in 2040 en 2050 vergeleken met de finale energievraag in 2019 (REF). DEC = Decentrale initiatieven, NAT = Nationaal leiderschap, EUR = Europese integratie, INT = Internationale handel. Gegevens overgenomen uit Netbeheer Nederland (2023).

De scenario's betekenen een snelle afbouw van het gebruik van fossiele energie en een forse toename van het gebruik van elektriciteit door industrie en consumenten. De 4 scenario's verschillen in de finale vraag naar energie waaronder elektriciteit, zie Figuur 13. Het scenario "nationaal

leiderschap” heeft de grootste finale vraag naar elektriciteit, het “internationale handel” scenario de kleinste vraag in 2050. De finale vraag naar elektriciteit neemt wel toe tussen 2009 en 2050. De toenemende finale vraag naar elektriciteit en de noodzaak deze op te wekken uit hernieuwbare bronnen leidt tot een sterke toename aan opgesteld hernieuwbaar vermogen, zie Figuur 14. Het “nationaal leiderschap” heeft de grootste toename aan opgesteld hernieuwbaar vermogen, het “internationale handel” scenario heeft de kleinste toename.



Figuur 14: Opgesteld hernieuwbaar vermogen in Nederland volgens de 4 verschillende Netbeheer scenario's in 2040 en 2050 vergeleken met opgesteld vermogen in 2019 (REF) DEC = Decentrale initiatieven, NAT = Nationaal leiderschap, EUR = Europese integratie, INT = Internationale handel. Gegevens overgenomen uit Netbeheer Nederland (2023).

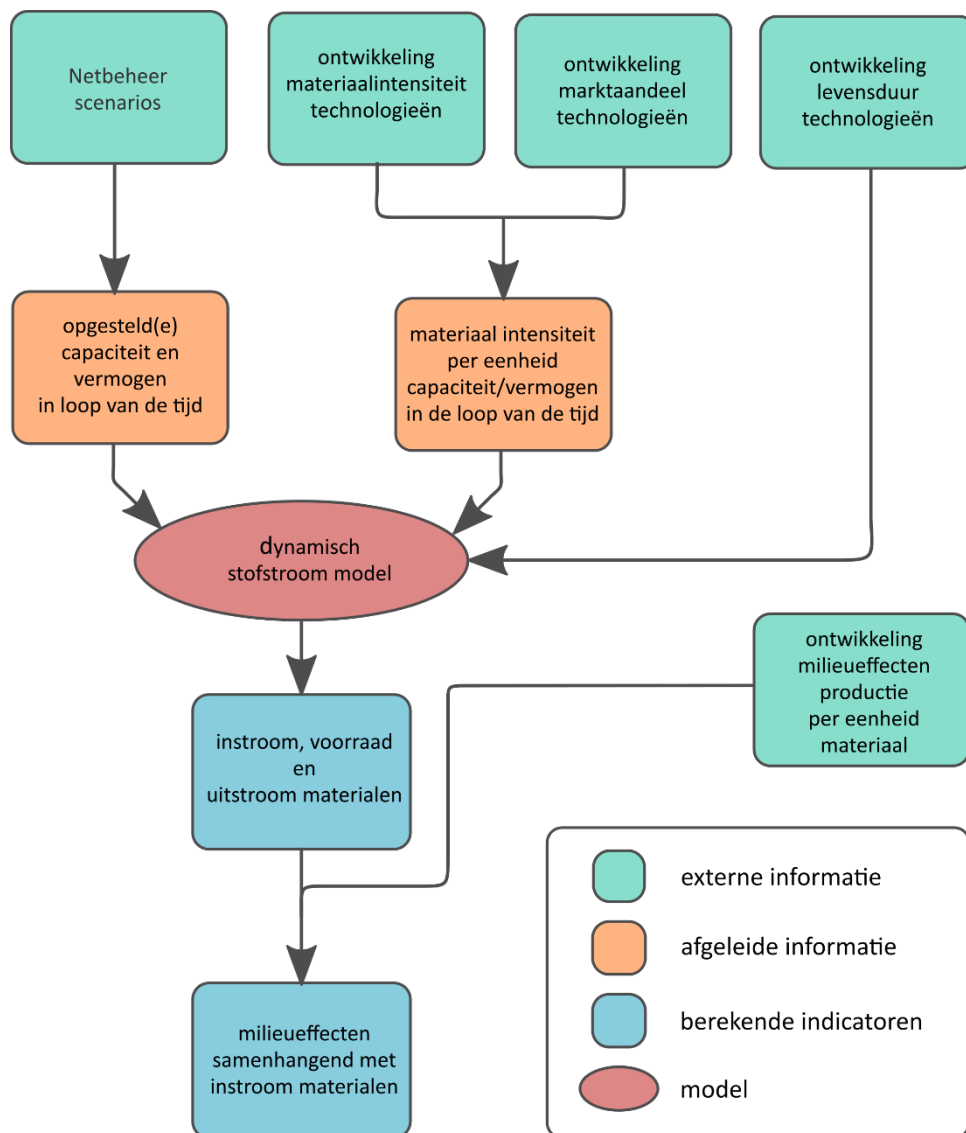
Het baseline grondstoffen scenario is gebaseerd op het gemiddelde materiaalgebruik in de 4 verschillende Netbeheer scenario's. Het circulair grondstoffen scenario gaat uit van het Netbeheer scenario met de kleinste hoeveelheid opgesteld hernieuwbaar vermogen, i.e. het internationale handel scenario. Dit laatste scenario is een scenario waar het circulaire principe “verminderen” van materiaalgebruik wordt bewerkstelligd door de hoogste circulaire strategie “afwijzen” van finaal elektriciteit gebruik. In dit scenario stijgt het gebruik van waterstof wel sterk.

De berekening van het materiaalgebruik gaat altijd uit van één van de Netbeheer scenario's waarin het opgesteld vermogen van wind en zon PV en capaciteit van batterijen met elkaar in samenhang zijn. De capaciteit of het vermogen van een individuele hernieuwbare energietechnologie worden niet veranderd omdat dan opgesteld vermogen, vraag naar elektriciteit en noodzaak tot buffering niet meer in balans is.

5.2 Materialen in het baseline en circulair grondstoffen scenario

Het gebruik van materialen en de milieueffecten samenhangend met het gebruik van deze materialen in het baseline en circulair grondstoffen scenario worden op eenzelfde manier berekend.

In Figuur 15 is op schematische wijze de berekening van het materiaalgebruik in de hernieuwbare energietechnologieën

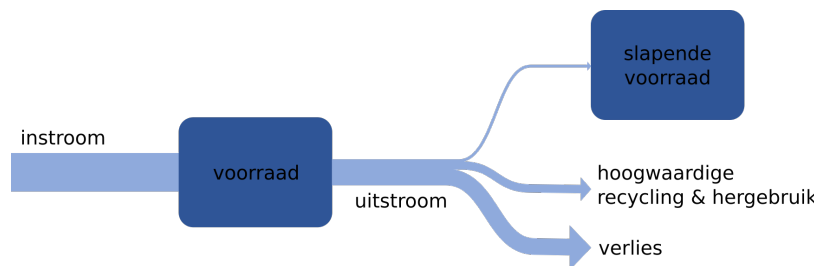


Figuur 15: Schematische opzet berekening van het materiaalgebruik en de milieueffecten samenhangend met hernieuwbare energie technologieën.

De opzet van de berekeningen verschilt niet tussen de het baseline en circulair scenario maar de externe informatie wel. Zo kiezen we op basis van de informatie opgehaald uit de technische en ontwerp analyse voor het circulair grondstoffen scenario andere levensduren voor de technologieën, wordt de bijdrage van een technologie anders gekozen en kunnen de materiaalintensiteiten van de technologieën anders zijn, zie Hoofdstuk 4. Voor het circulaire grondstoffen scenario wordt ook van een ander Netbeheer scenario uitgegaan. De milieueffecten van de productie van de primaire grondstoffen per eenheid materiaal zijn in het baseline- en circulair grondstoffen scenario gelijk. In paragraaf 5.4.1 tot 5.4.3 wordt in detail beschreven hoe baseline en circulair grondstoffen scenario verschillen.

De materialen die nodig zijn om het opgesteld vermogen wind, zon pv en batterijen te realiseren tot aan 2050 zoals getoond in Figuur 14 worden berekend met een dynamisch stofstroommodel waarbij

de realisatie van het opgesteld vermogen leidend is. Het opgesteld vermogen representeert een zekere voorraad materialen. Uitbreiding van het opgesteld vermogen vraagt om extra instroom van materialen. Tegelijkertijd zijn er ook batterijen, PV-panelen en windturbines die aan het einde van hun werkzame levensduur² zijn gekomen en uit de voorraad stromen. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 16. Wij volgen de instroom van materialen naar de voorraad van de in gebruik zijnde hernieuwbare energietechnologieën tot aan 2050. Vervolgens wordt berekend hoe deze materialen over de gehele levensduur tot ver na 2050 weer uitstromen. De uitstromende materialen kunnen worden gerecycled, kunnen verloren gaan of kunnen terechtkomen in een “slapende voorraad”. De slapende voorraad wordt ook wel “hibernating stock” genoemd.



Figuur 16: Schematische weergave van het raamwerk waarmee het materiaalgebruik van een energiesysteem (instroom) en het vrijkomen van materialen uit afgedankte componenten van het energiesysteem worden gemodelleerd. De materialen uit de afgedankte componenten kunnen vervolgens closed loop worden gerecycled of kunnen verloren gaan of kunnen terechtkomen in een slapende voorraad.

Onder slapende voorraden verstaan we bijvoorbeeld PV-panelen die niet meer werken maar blijven liggen op daken of opgesteld blijven in zonneparken. Ze functioneren niet meer maar zitten nog niet in een afvalketen. Onder recycling van materialen verstaan we closed loop recycling. De kwaliteit van de gerecyclede materialen is zo hoog dat deze (eventueel) opnieuw ingezet kunnen worden in hernieuwbare energietechnologie systemen. Glas van afgedankte zonnepanelen toegepast als glaswol of gebruik van betongranulaat in de wegenbouw wordt niet gezien als closed loop recycling. Al het materiaal dat uitstroomt en niet closed loop gerecycled kan worden of terecht komt in de ongebruikte voorraad zien we als verlies uit de keten.

Uiteindelijk zijn we in staat om van de hoeveelheid materialen die instroomt tot aan 2050 een schatting te maken van het verlies van deze materialen ook als dat verlies na 2050 optreedt. De circulaire economie maatregelen worden beoordeeld op de mate van reductie van verlies in de keten. Vermindering van gebruik van grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop recycling zullen allen leiden tot minder verlies aan materialen.

Indicatoren voor veranderende milieueffecten als gevolg van veranderend materiaalgebruik door vermindering, levensduurverlenging, closed loop recycling en vervangen zijn ook belangrijk bij de beoordeling van circulaire maatregelen omdat het milieueffect van verschillende materialen per materiaal sterk kan verschillen. Naast een materiaalgebruik indicator en een verliesindicator

² Met werkzame levensduur wordt de levensduur bedoeld zoals valt te constateren in de praktijk. Dit is niet de maximaal technische levensduur of economische levensduur.

gebruiken we ook de indicatoren voor milieueffecten van materiaalgebruik zoals beschreven in Paragraaf 2, namelijk:

- Klimateffect
- Metaaldepletie
- Landtransformatie
- Humane toxiciteit

Specifiek besteden we aandacht aan het gebruik en verlies van kritieke- en strategische materialen. Kritieke materialen zijn materialen waar er een relatief hoog risico bestaat dat het op korte termijn niet meer geleverd kan worden en waar het belang voor de maakindustrie in Europa relatief groot is. Strategische materialen zijn materialen waarvan de leveringszekerheid nu niet onder druk staat maar die in de toekomst wel minder beschikbaar zouden kunnen worden door sterk toenemende (wereld) vraag en beperkte mogelijkheden om de winning uit te breiden. Alle verschillende materialen meegenomen in deze studie staan in Tabel 9.

Tabel 9: Materialen meegenomen in de studie.

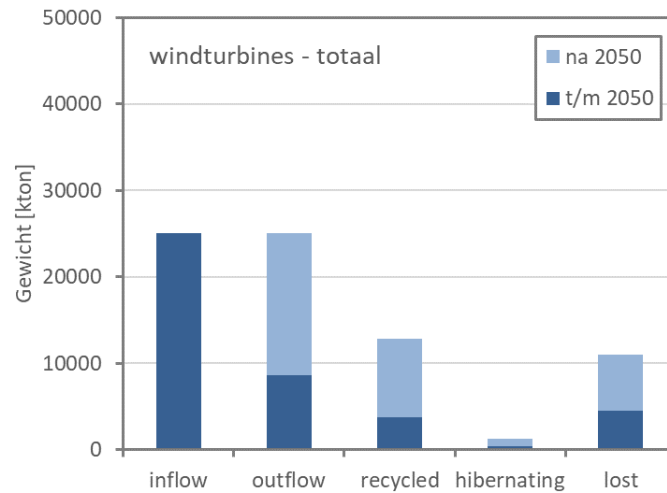
Classificatie	Materiaal/element
Anders	Staal, ijzer, zilver, cadmium, telluur, indium, glas, plastic, beton, glasvezeldoek, kunststofhars, balsa
Kritiek	Aluminium, kobalt, gallium, germanium, neodymium, praseodymium, dysprosium, lithium, magnesium, mangaan, silica metaal, tantaal.
Strategisch	Koper, nikkel

5.3 Baseline grondstoffen scenario

5.3.1 Wind

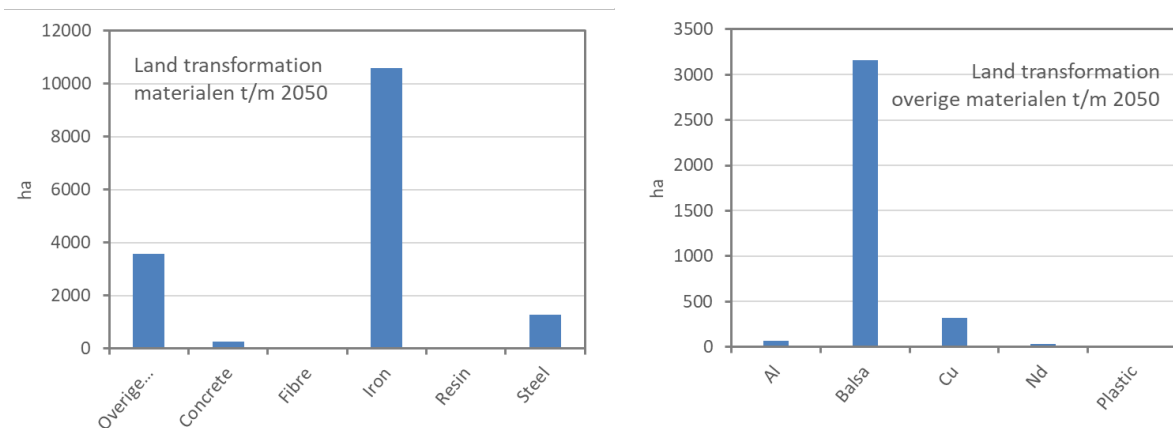
In Figuur 17 staat is de cumulatieve instroom van materialen in windturbines tot aan 2050 weergegeven. Tot aan 2050 is er cumulatief circa 25 miljoen ton materialen nodig voor de opbouw van windturbines. Over de gehele levensduur van deze windturbines is vervolgens de hoeveelheid closed loop gerecycled materiaal, de slapende voorraad en het verlies weergegeven. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen de periode voor 2050 en na 2050. We kunnen zien dat van de materialen die instromen voor 2050 voor een groot deel pas na 2050 weer uitstromen.

Circa 44% van de materialen op gewichtsbasis gaat verloren over de gehele levensduur van de windturbines geplaatst tot aan 2050. Dat is voornamelijk het beton in de funderingen en in kleinere mate de materialen die gebruikt worden in de windturbine bladen.



Figuur 17: Cumulatief totaalgewicht van materialen nodig voor de opbouw van de windturbine-systemen tot aan 2050 en de uitstroom van deze zelfde materialen voor en na 2050 en het verlies van materialen in voor en na 2050.

In z'n algemeenheid worden de vier milieueffecten samenhangend met de instroom van materialen voor de onderzochte energietechnologieën veelal bepaald door de grootste hoeveelheid materialen die een technologie instromen. Toch moeten we oppassen voor te sterke generalisaties. Bij windturbines zien we dat de kleine hoeveelheid balsa gebruikt in de windturbine bladen een belangrijke bijdrage heeft op de land transformatie indicator, zie Figuur 18. De land transformatie indicator is een proxy indicator voor impacts op biodiversiteit. Dit laat zien dat de analyse van de milieueffecten van het gebruik van materialen verder moet gaan dan alleen klimaateffecten omdat sommige materialen juist sterk bijdragen aan andere milieueffecten dan klimaateffecten.



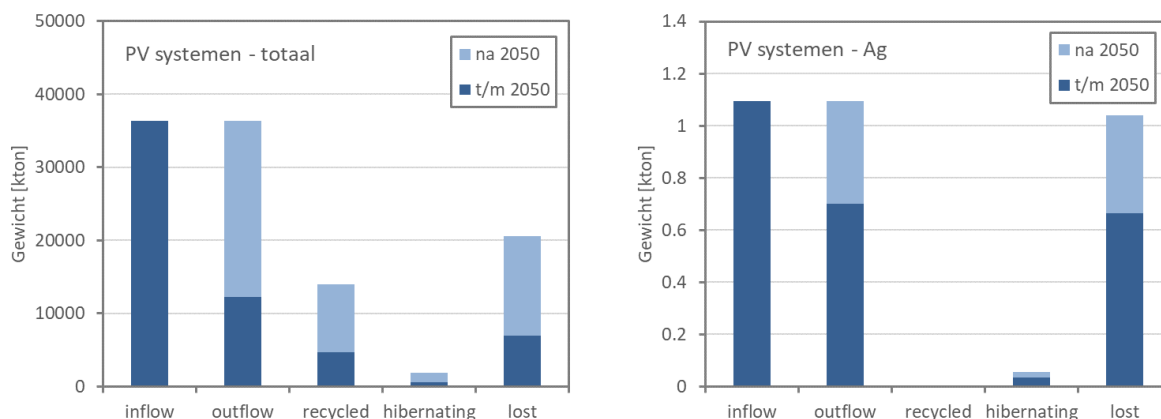
Figuur 18: Land transformatie indicator samenhangend met de cumulatieve instroom van materialen in de de windturbines tot en met 2050. Overige materialen, gedomineerd door Balsa, hebben een belangrijke bijdrage aan de landtransformatie.

5.3.2 Zon

In Figuur 19 (links) is de cumulatieve instroom van materialen naar PV-systemen tot aan 2050 weergegeven. Tot aan 2050 is er cumulatief circa 35 miljoen ton materialen nodig voor de opbouw van de PV-systemen. Over de gehele levensduur van deze PV-systemen is vervolgens de hoeveelheid closed loop gerecycled materiaal, de slapende voorraad en het verlies weergegeven. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen de periode voor 2050 en na 2050. We kunnen zien dat van de materialen die instromen voor 2050 voor een groot deel pas na 2050 weer uitstromen.

In het baseline scenario verliezen we ongeveer 57% van de materialen op gewichtsbasis, een hoger percentage dan bij windturbines. Het verlies wordt gedomineerd beton, (antimoon houdend) glas en in mindere mate plastic en silicium zonnecel materiaal.

Zilver (Ag) is één van de materialen in een zonnepaneel. Het is een relatief duur materiaal maar wordt momenteel niet teruggewonnen. Omdat zilver relatief duur is, is de huidige technologieontwikkeling erop gericht het gehalte zilver terug te brengen door minder zilver te gebruiken en te zoeken naar substituten. De analyse van cumulatieve instroom, uitstroom en verlies is voor zilver sterk verschillend van het totaalbeeld, zie Figuur 19 rechts. Omdat het gehalte zilver aan het dalen is in nieuwe generaties zonnepanelen zien we dat het merendeel van het zilver voor 2050 uitstroomt. Recyclingtechnologieën van zonnepanelen die focussen op zilverteruggewinning zouden dan ook snel ingezet moeten worden omdat nieuwe generaties zonnepanelen veel minder zilver bevatten waardoor in de toekomst de concentratie zilver in te recyclen PV-zonnepanelen zal dalen. Verder zien we dat vooralsnog alle zilver verloren gaat omdat de hydrometallurgische recycling processen waarmee zilver kan worden teruggewonnen nog niet ingezet worden.



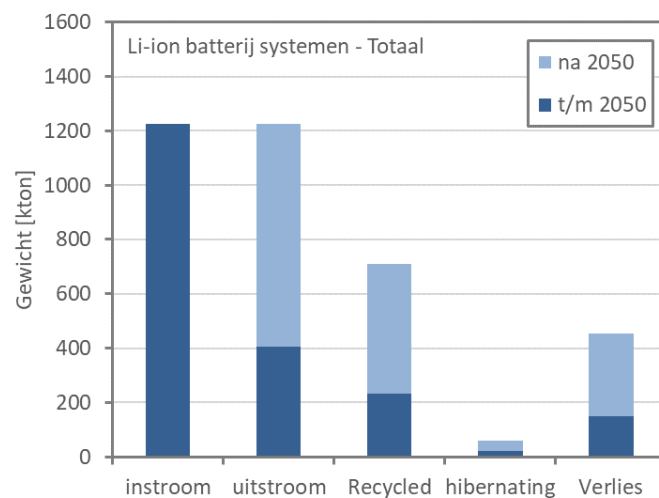
Figuur 19: Cumulatief totaalgewicht (links) van materialen nodig voor de opbouw van PV-systemen tot aan 2050 en de uitstroom van deze zelfde materialen voor en na 2050 en het verlies van materialen in voor en na 2050. Rechts is hetzelfde getoond maar dan alleen voor zilver.

5.3.3 Batterijen

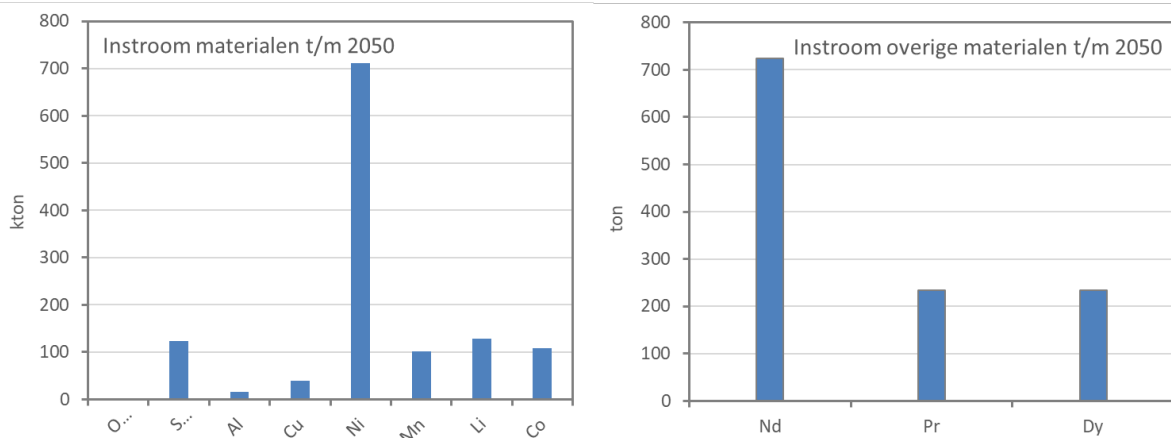
In Figuur 20 (links) staat is de cumulatieve instroom van materialen naar Li-ion batterijsystemen tot aan 2050 weergegeven. Tot aan 2050 is er cumulatief circa 1.2 miljoen ton materialen nodig voor de opbouw van de PV-systemen. De hoeveelheid materialen in Li-ion batterijsystemen is een onderschatting omdat de veelal alleen informatie bekend is over de metalen in de kathode van de Li-ion batterijen. Er is veel minder bekend over materialen in de anode van de Li-ion batterijen zoals grafiet en er is geen informatie over de materialen die nodig zijn om van de individuele batterijcellen,

batterijmodules te maken en vervolgens deze batterijmodules samen te voegen tot een accu pakket, zie ook Figuur 12 waarin de opbouw van het accupakket schematisch is weergegeven. Het is dus niet mogelijk om de absolute hoeveelheid materialen die nodig zijn voor de opbouw van de batterijcapaciteit te vergelijken met de absolute hoeveelheid materialen nodig voor de opbouw van het geïnstalleerd PV- en windenergie vermogen. Voor PV-zonnepanelen en windturbines hebben we op massa basis een completere inventarisatie van materialen.

Over de gehele levensduur van deze PV-systemen is vervolgens de hoeveelheid closed loop gerecycled materiaal, de slapende voorraad en het verlies weergegeven. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen de periode voor 2050 en na 2050. We kunnen zien dat van de materialen die instromen voor 2050 voor een groot deel pas na 2050 weer uitstromen.



Figuur 20: Cumulatief totaalgewicht van materialen nodig voor de opbouw van Li-ion batterij systemen tot aan 2050 en de uitstroom van dezelfde materialen voor en na 2050 en het verlies van materialen voor en na 2050.



Figuur 21: Gewichtsandaal van de verschillende metalen noodzakelijk voor de opbouw van Li-ion batterij capaciteit tot aan 2050. Anode materialen zoals grafiet en silicium en de plastics gebruikt voor het maken van een batterijverpakking zijn buiten beschouwing gelaten. Let op de eenheid van de linker verticale as is in kiloton, rechts is de eenheid in ton.

5.3.4 Overzicht

Een beknopt overzicht van essentiële uitkomsten van het baseline grondstoffen scenario is weergegeven in Tabel 10 en Tabel 11. Deze tabellen geven een overzicht van de veranderingen in instroom, voorraad, uitstroom en milieueffecten van de materialen in de vier systemen tussen 2020 en 2050. De verandering is uitgedrukt in een factor verschil tussen 2020 en 2050. Er is gekozen voor uitdrukken als factor omdat de verandering drie ordes van grootte kunnen zijn. Ook het percentage [%] verlies aan materialen over de gehele levensduur van de systemen geïnstalleerd tot aan 2050 is weergegeven.

De jaarlijkse snelheid van instroom van materialen kan in 3 decennia tot een factor 3 toenemen. De voorraad stijgt veel sterker en kan tot een factor 38 toenemen bij batterijen. Waar bij zonnepanelen en batterijen er anno 2020/2025 slechts een minimale hoeveelheid materialen uitstroomt, zal er tegen 2050 jaarlijks een factor 2000 tot 3000 keer meer materialen gaan uitstromen dan nu het geval is. Wij nemen in onze modellering aan dat er voldoende verwerkingscapaciteit is om deze stroom te kunnen inzamelen en verwerken om de berekende verliespercentages te kunnen behalen. Echter is hieruit te concluderen dat opschaling van verwerkingscapaciteit, zoals ook aangegeven in hoofdstuk 3, zeer noodzakelijk zal zijn. Ook de 7x hogere uitstroom van materialen uit de windturbines moet in de gaten worden gehouden.

Batterijen en windturbines hebben over de gehele levensduur de laagste verliespercentages omdat deze systemen relatief veel closed loop recyclebare metalen bevatten. Bij de PV-panelen constateren we hogere verliespercentages omdat materialen zoals beton, glas en silicium materiaal niet closed loop gerecycled kunnen worden op dit moment.

Tabel 10: De verandering van de totale hoeveelheid materiaal dat instroomt, uitstroomt en in voorraad is in de verschillende systemen in het baseline scenario. Er is gekozen voor de factor verandering tussen 2020 en 2050 i.p.v. een percentage verandering, omdat de veranderingen vele ordes van grootte kunnen zijn. Het percentage [%] verlies van materiaal over de gehele levensduur van de systemen die tot aan 2050 worden geplaatst, staat in de meest rechter kolom.

Systeem	Factor verandering periode 2020 -2050					Percentage [%] verlies over gehele levensduur
	Instroom materialen	Voorraad materialen	Uitstroom materialen	Instroom strategische materialen	Instroom kritieke materialen	
Zonnepanelen	2.1	11	2030	2.1	1.7	56
Windturbines	1.5	4.4	7.7	2.0	1.8	44
Batterijen	3.0	38	3043*	4.0	2.3	37

*berekend vanaf 2025 omdat er in 2020 nog geen significante uitstroom berekend/bekend is.

Het klimaateffect samenhangend met de jaarlijkse instroom van materialen gaat juist omlaag tussen 2020 en 2050, zie Tabel 11. Het klimaateffect wordt kleiner omdat we in deze studie, in lijn met het SSP1.5 scenario hebben aangenomen er door de wereldwijde energietransitie minder CO₂ uitgestoten gaat worden per eenheid materiaalproductie. Dat het meenemen van mindere milieueffecten in de beoordeling van materiaalgebruik essentieel is wordt geïllustreerd door de drie overige milieueffecten. Deze nemen juist toe.

Tabel 11: De verandering van de milieueffecten samenhangend met de winning en productie van materialen gebruikt in de verschillende systemen in het baseline scenario. Er is gekozen voor de factor verandering tussen 2020 en 2050 i.p.v. een percentage verandering, omdat de veranderingen vele ordes van grootte kunnen zijn.

Systeem	Factor verandering periode 2020 -2050			
	Klimaat effect	Metaal depletie	Land transformatie	Humane toxiciteit
Zonnepanelen	0.42	2.0	1.5	1.9
Windturbines	0.12	1.3	1.9	1.5
Batterijen	0.80	2.7	3.0	3.0

Welke veranderingen worden toegepast om het circulair grondstoffen scenario vorm te geven wordt per systeem in de volgende paragrafen kort beschreven waarna we de effecten van het circulaire t.o.v. het baseline grondstoffen scenario bespreken.

5.4 Circulair grondstoffen scenario

5.4.1 Wind

Het circulair scenario voor windturbines is overgenomen uit Paragraaf 4.1. In Tabel 12 staan de verschillen tussen het baseline en circulair grondstoffen scenario.

Tabel 12: Vergelijking van de parameters gebruikt in het baseline en circulair grondstoffen scenario voor windturbines en de technische en design opties die aangeven hoe vermindering van grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop verwerking bewerkstelligd zou kunnen worden.

Knoppen	Baseline grondstoffen scenario	Circulair grondstoffen scenario
Vermindering grondstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteitsopbouw volgens gemiddelde 4 Netbeheer scenario's. • Offshore windturbines gefundeerd op monopiles • Tiphoopte van offshore windturbines groeit door naar 130 meter in 2040. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteit opbouw volgens internationaal Netbeheer scenario. Dit resulteert in 12% lager opgesteld vermogen in 2050. • Start gebruik van jacket i.p.v. monopiles voor offshore windturbines in 2025. • Introductie van HSPMG-generatoren voor onshore windturbines in 2025. • Tiphoopte van offshore windturbines blijft na 2030 gelimiteerd tot 120 meter
Levensduurverlenging	<ul style="list-style-type: none"> • Onshore windturbines hebben een gemiddelde levensduur van 24 jaar • Offshore windturbines hebben een gemiddelde levensduur van 25 jaar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Onshore windturbines hebben een gemiddelde levensduur die toeneemt tot 60 jaar in 2050. • Offshore windturbines hebben een gemiddelde levensduur die toeneemt tot 60 jaar in 2050.
Closed loop verwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Windturbinebladen kunnen niet closed loop worden gerecycled 	<ul style="list-style-type: none"> • Uit de windturbinebladen wordt 75% van het plastic, 50% van de glasvezel en 50% van het kunststofhars closed loop gerecycled.

5.4.2 Zon

Het circulair scenario voor PV-panelen is overgenomen uit Paragraaf 4.2. In Tabel 13 staan de verschillen tussen het baseline en circulair grondstoffen scenario.

Tabel 13: Vergelijking van de parameters gebruikt in het baseline en circulair grondstoffen scenario voor PV-panelen en de technische en design opties die aangeven hoe vermindering van grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop verwerking bewerkstelligd zou kunnen worden.

Knoppen	Baseline grondstoffen scenario	Circulair grondstoffen scenario
Vermindering grondstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteitsopbouw volgens gemiddelde 4 Netbeheer scenario's. • Ontwikkeling efficiëntie van PV-paneel (in termen van hoeveelheid materiaal per elektriciteit opbrengst) volgt midden scenario Carrara et al. (2020) • Aandeel CIGS stijgt naar 10% in 2050. 	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteit opbouw volgens internationaal Netbeheer scenario. Dit resulteert in 31% minder capaciteit in 2050. • Ontwikkeling efficiëntie van PV-paneel versnelt en volgt hoog scenario van Carrara et al (2020). • Aandeel CIGS stijgt naar 30% in 2050.
Levensduurverlenging	<ul style="list-style-type: none"> • Gemiddelde leeftijd van panelen op particuliere daken 25 jaar • Gemiddelde leeftijd van panelen in zonneparken 20 jaar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gemiddelde leeftijd van panelen op particuliere daken stijgt naar 35 jaar in 2050. • Gemiddelde leeftijd van panelen in zonneparken stijgt naar 35 jaar in 2050.
Closed loop verwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Staal, aluminium en koper worden volledig closed loop gerecycled 	<ul style="list-style-type: none"> • Closed loop recycling van zilver, indium, en tin worden tot 75% teruggewonnen in 2050. • Staal, aluminium en koper worden volledig closed loop gerecycled.

5.4.3 Batterijen

Het circulair scenario voor batterijen is overgenomen uit Paragraaf 4.3. In Tabel 14 staan de verschillen tussen het baseline en circulair grondstoffen scenario.

Tabel 14: Vergelijking van de parameters gebruikt in het baseline en circulair grondstoffen scenario voor batterijen en de technische en design opties die aangeven hoe vermindering van grondstoffen, levensduurverlenging en closed loop verwerking bewerkstelligd zou kunnen worden.

Knoppen	Baseline grondstoffen scenario	Circulair grondstoffen scenario
Vermindering grondstoffen	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteitsopbouw volgens gemiddelde 4 Netbeheer scenario's. • LFP-batterij in EVs heeft een marktaandeel dat groeit van 6% in 2020 tot 10% in 2050 (LFP al dominant in stationaire toepassingen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Capaciteit opbouw volgens internationaal Netbeheer scenario. Dit resulteert in 21% minder opslagcapaciteit in 2050. • LFP-batterij in EVs heeft een marktaandeel dat groeit van 6% in 2020 tot 40% in 2030 en blijft vervolgens constant (LFP blijft dominant in stationaire toepassingen).
Levensduurverlenging	<ul style="list-style-type: none"> • Gemiddelde leeftijd van batterijen in mobiele en stationaire toepassingen 16 jaar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gemiddelde leeftijd van batterijen in mobiele en stationaire toepassingen stijgt van 16 jaar naar 20 jaar in de periode 2020 – 2025 en blijft vervolgens constant.
Closed loop verwerking	<ul style="list-style-type: none"> • Staal, aluminium en koper worden volledig closed loop gerecycled. • Nikkel en kobalt worden voor 70% gerecycled. 	<ul style="list-style-type: none"> • Staal, aluminium en koper worden volledig closed loop gerecycled. • Nikkel en kobalt recycling neemt toe van 70% in 2020 tot 95% in 2050. • Lithium en Mn recycling neemt toe vanaf 0% in 2020 tot 35% 2025 en 70% in 2030.

5.4.4 Overzicht

Een overzicht van het relatieve verschil tussen het baseline en circulair grondstoffen scenario voor alle drie de beoordeelde systemen is weergegeven in Tabel 16.

Met de introductie van het circulaire grondstoffen scenario is de instroom van materialen sterk te reduceren t.o.v. van het baseline grondstoffen scenario, tot wel $\approx 38\%$ in de zonnepanelen. Dit betekent nog wel dat het jaarlijkse grondstoffengebruik in hernieuwbare energietechnologieën sterk gaat toenemen naar 2050, zie Tabel 10, maar de toename minder sterk zal zijn. De afname in gebruik van grondstoffen heeft een nog sterker effect op de jaarlijks benodigde hoeveelheid kritieke en strategische materialen die tot wel 54% afneemt t.o.v. het baseline grondstoffen scenario. De versnelde technologische ontwikkelingen en focus op het verminderen van gebruik van strategische en kritieke materialen in het circulaire grondstoffen scenario heeft hier zijn effecten.

Het verlies van de som van alle materialen wordt nog veel sterker teruggedrongen dan de instroom van materialen, tot wel 87% reductie in batterijen. Dit is het resultaat van minder instroom en daarmee over de gehele levensduur van de systemen minder uitstroom van materialen in combinatie met de op termijn inzet van meer closed loop recycling. Materialen die in de toekomst nog geen closed loop recycling kennen zijn beton, glas, plastic, zonnecel silicium materiaal, kunststofharsen en glasvezel.

Vermindering is in het circulaire grondstoffen scenario voor alle systemen het circulaire principe dat over de volle breedte van indicatoren de grootste bijdrage levert. Het relatieve verschil tussen de omvang van de systemen in het baseline en circulair grondstoffen scenario staat in Tabel 15. Zoals te zien bepaald de verandering van de omvang van de systemen in 2050 voor een groot deel de verminderde cumulatieve instroom van materialen in die systemen onder invloed van het circulaire principe "vermindering".

De vraag is hoe realistisch het opgestelde Internationale Netbeheer scenario is en welke barrières er zijn om dit scenario werkelijkheid te maken. Het rapport van Netbeheer Nederland ziet de verschillende scenario's als verkennend maar doet geen uitspraken over de realiseerbaarheid van de scenario's. Een van de belangrijkste punten is de aangenomen forse groei van het gebruik van waterstof in dit scenario.

Tabel 15: Relatieve verschillen tussen baseline en circulair grondstoffen scenario. Verschil in omvang van het systeem en de effectiviteit van een lager cumulatief materiaalgebruik tot aan 2050 onder invloed van het circulaire principe "vermindering" is weergegeven.

Systeem	Verandering omvang systeem	Verminderde instroom materialen
	[%]	[%]
Zonnepanelen	-31	-35
Batterijen	-21	-25
Wind	-12	-11

Levensduurverlenging heeft een positief effect bij alle systemen en alle indicatoren, zie Tabel 16Tabel 15. Bij batterijen lijkt het effect over de volle breedte het grootst te zijn. Batterijen hebben van alle systemen de kortste levensduur in het baseline grondstoffen scenario, namelijk 16 jaar. De levensduur stijgt in het circulaire scenario in korte tijd naar 20 jaar, een 25% toename, zie Tabel 14 . Binnen de tijdsperiode tot aan 2050 worden de effecten van de levensduur verlenging al zichtbaar juist omdat in de periode tot aan 2050 veel van de oude generatie batterijen reeds vervangen zijn door nieuwe generaties batterijen met een langere levensduur. Het uiteindelijk effect van de

levensduurverlenging zal pas na 2050 zichtbaar worden. Bij windturbines wordt de levensduur opgerekt tot meer dan het dubbele (60 jaar) van de huidige gebruiksduur van de windturbines (24 – 25 jaar), zie Tabel 12. Desondanks zien we een relatief klein effect van deze grote levensduurverlenging. Dit komt door de relatief lange levensduur van de windturbines die tot aan 2023 zijn neergezet. Pas in de periode richting 2050 gaan veel van de windturbines uit deze generaties windturbines afgedankt worden en vervangen worden door windturbines met langere levensduur. Pas gedurende de levensduur van deze nieuwe generatie windturbines (veelal in de periode na 2050) gaan we de volle effecten zien van de levensduur verlengende maatregelen die nu ingezet worden. Eenzelfde effect speelt bij zonnepanelen. De technische en ontwerpmaatregelen kunnen de levensduur verlengen met 40 tot 75%, zie Tabel 13, maar we zien bij lange na niet zo'n groot effect in vermindering van instroom van materialen. Ook hier zal het volledige effect pas na 2050 zichtbaar worden.

Waar het circulaire principe vermindering tot aan 2050 de grootste effecten lijkt te hebben en het circulair principe levensduurverlenging een minder belangrijke rol lijkt te hebben in het verminderen van de cumulatieve totale instroom van materialen (-18% - -43%), is het dus goed om in gedachten te houden dat levensduurverlenging in de periode tot aan 2050, na 2050 een veel grotere bijdrage kan hebben aan minder materiaalgebruik dan de het circulaire principe vermindering tot aan 2050. Het is lastig om deze bijdrage van levensduurverlenging in z'n volledigheid te kwantificeren omdat we dan aannames moeten doen over de technologie en de materiaalintensiteit van deze technologie die na 2050 gebruikt gaat worden.

Inzetten op closed loop recycling geeft een direct en groot effect op het terugdringen van verlies (Tabel 15), zeker voor specifieke materialen zoals zilver (werkpakket 4). Het heeft vooralsnog geen effect op het terugdringen van verminderde instroom van materialen. Al de systemen hier beoordeeld zijn pas sinds korte tijd in opbouw en de jaarlijkse instroom van materialen in deze systemen gaat tot een factor 3 (Tabel 10) groeien tot aan 2050. De uitstroom van materialen is nu nog gering t.o.v. de instroom en zal tot aan 2050 klein blijven t.o.v. de instroom. Daarmee kan recycling niet helpen het gebruik van primaire materialen te verdringen. De volumes die gerecycled moeten gaan worden zullen wel enorm gaan toenemen, zie Tabel 10, en daar zal rekening gehouden moeten worden.

Tabel 16: Overzicht van het verschil tussen het baseline- en circulaire grondstoffen scenario. Let op de percentages verandering per circulaire principe tellen niet op tot het percentage verandering van de toepassing van alle circulaire principes tegelijkertijd in het circulaire grondstoffen scenario. Circulaire oplossingen toegepast om een zeker circulair principe praktisch vorm te geven kunnen andere circulaire principes positief of negatief beïnvloeden.

Systeem	Circulair principe	Verlies			Instroom materialen	Effect van veranderende instroom materialen					
		Alle materialen	Strategisch materialen	Kritieke materialen		Klimaat effect	Metaal depletie	Humane toxiciteit	Land transformatie	Strategische materialen	Kritieke materialen
		[%]	[%]	[%]		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Zonnepanelen	Vermindering	-35	n.a. [#]	-53	-35	-36	-35	-36	-42	-39	-53
	Levensduurverlenging	-5	n.a. [#]	-4	-5	-3	-5	-5	-5	-5	-4
	Closed loop recycling	≈0	n.a. [#]	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	0	0
	Circulair grondstoffen scenario	-38	n.a.[#]	-54	-38	-38	-38	-37	-44	-42	-54
Batterijen	Vermindering	-43	-48	-39	-25	-35	-43	-25	-36	-40	-35
	Levensduurverlenging	-11	-12	-11	-11	-9	-11	-11	-11	-12	-11
	Closed loop recycling	-74	-78	-71	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
	Circulair grondstoffen scenario	-87	-90	-84	-33	-40	-48	-32	-42	-47	-41
Wind	Vermindering	-18	n.a. [§]	n.a. ^{&}	-11	-4	-4	-4	-7	-3	-7
	Levensduurverlenging	-26	n.a. [§]	n.a. ^{&}	-8	-3	-7	-8	-9	-9	-8
	Closed loop recycling	-4	n.a. [§]	n.a. ^{&}	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0	≈0
	Circulair grondstoffen scenario	-40	n.a.[§]	n.a.^{&}	-19	-7	-12	-12	-15	-11	-15

[#] Voor zonnepanelen bestaat het verlies van strategische materialen uit koper. Koper wordt verondersteld volledig gerecycled te worden. Er is dus geen enkel verlies. [§] Voor windturbines bestaat het verlies van strategische materialen uit koper. Koper wordt verondersteld volledig gerecycled te worden. Er is dus geen enkel verlies. [&] Voor windturbines bestaat het verlies van kritieke materialen uit aluminium en neodymium. Beide metalen worden verondersteld volledig gerecycled te worden. Er is dus geen enkel verlies.

6 Conclusies Deel 1: Barrières, interventiepunten en potentieel effect

Dit rapport is gebaseerd op een integratie van zes achterliggende studies (Balkenende et al., 2024; De Koning & Kleijn, 2024a, 2024b, 2024c; Elzinga, 2024; Van Heusden & De Boer, 2024) die zijn uitgevoerd binnen de PGA hernieuwbare energietechnologie.

In tabel 17, 18 en Tabel 19 worden de resultaten van de innovatiesysteem analyse, technische/design mogelijkheden en het potentieel materiaal/milieueffect naast elkaar gezet. De analyse is hierbij opgedeeld per circulaire strategie. Echter zijn sommige technische/ontwerp mogelijkheden niet onder één circulaire strategie te vatten en zijn verschillende interventies juist gericht op de interacties tussen de verschillende oplossingsroutes of innovatiesystemen. Deze interventies, gebaseerd op de innovatiesysteem analyse en de onderzochte technische/design mogelijkheden, staan in de “interventie” kolom. De meest rechterkolom van de overzichtstabellen geeft een beeld van het potentieel effect als de technische/design mogelijkheden worden geïmplementeerd.

Tezamen vormen deze tabellen dus een overzicht waaruit opgemaakt kan worden wat de circulaire strategieën zijn die de meeste potentie tonen tot impactbesparing en wordt getoond wat voor een systematische aangrijpingspunten of designmogelijkheden beschikbaar zijn (per technologie of component) om deze potentiële impact te verwezenlijken.

Een lastig maar onvermijdelijk punt is het verschil in detail niveau van de verschillende analyses. Zo wordt (noodzakelijkerwijs) een hoger detail niveau gehanteerd in de technische/ontwerp analyse. Op deze zeer specifieke maatregelen kan niet altijd gereflecteerd worden in de innovatiesysteem analyse en de effect modellering omdat deze uitgaan van sector-brede dynamieken. Doordat vanuit de technische/design analyse een schatting is gemaakt van het collectief van technische/design maatregelen op vermindering, levensduurverlenging en closed loop recycling is een deel van deze schaalniveau problemen ondervangen.

6.1 Wind

Tabel 17: Interventiepunten gebaseerd op innovatiesysteem analyse, technische/design mogelijkheden en potentieel materiaal/milieueffect van de circulaire strategieën voor windturbines.

Knoppen	Innovatiesysteem			Design/tech scenario	Potentieel effect
	Onderdeel	Barrière	Aangrijpingspunt		
Vermindering	Bladen	<ul style="list-style-type: none"> Ondernemers hebben data nodig over het ontwerp en de levenscyclus van de bladen om gepaste secundaire toepassingen te vinden. Er is te weinig aandacht voor experimenten met nieuwe technieken (zoals het snijden van bladen om herbruikbaar plaatmateriaal te maken) omdat de use-case en businesscase niet duidelijk is. Afvalwetgeving voor bladen creëert onzekerheid omtrent afdanking na secundair gebruik. 	<ul style="list-style-type: none"> Toegankelijk maken van informatie voor actoren bijvoorbeeld door paspoort-oplossingen. Data moet inzicht geven in resterende potentie van de materialen en het ontwerp van het product. Duidelijkheid verschaffen over afdanking na secundair gebruik (en bijbehorende wetgeving), bijvoorbeeld door afdanking mee te nemen in de aanbesteding (in samenwerking met lokale overheden) 	<ul style="list-style-type: none"> Koolstofvezel heeft een hogere specifieke sterkte en stijfheid dan glasvezel. Om dezelfde sterkte te bereiken is minder materiaal nodig. Koolstofvezel sparcaps (langsverstijvers) kunnen het gewicht van een blad met 25% reduceren. Toepassing gerecyclede materialen in bladen 	<ul style="list-style-type: none"> Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -11% Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -7% Cumulatieve instroom strategische materialen: -3% Verlies: -18% Klimaatteffect: -4% Metaal depletie: -4% Land transformatie: -7% Humane toxiciteit: -6%
	Toren	<ul style="list-style-type: none"> Monopiles zijn moeilijk en duur om te verwijderen. Veel materiaal gaat verloren in het deel van de monopile dat in de zeebodem achterblijft na verwijdering. 	<ul style="list-style-type: none"> Niet benoemd door actoren in de MIS-analyse 	<ul style="list-style-type: none"> Voor offshore wordt vooral direct drive met permanente magneten toegepast (DD-PMG). Dit is efficiënter, vergt minder onderhoud en de turbine (o.a. de toren) kan lichter uitgevoerd worden Gebruik jacket i.p.v. monopile op korte termijn; Gebruik jacket-composite ipv monopile op langere termijn 	

	Windturbine (park)	<ul style="list-style-type: none"> Niet benoemd door actoren in de MIS-analyse 	<ul style="list-style-type: none"> Niet benoemd door actoren in de MIS-analyse 	<ul style="list-style-type: none"> Wake control waardoor in een windmolenpark op zee windturbines dichter bij elkaar gezet kunnen worden Voorkeur voor plaatsing windturbines op zee i.p.v. op land Capaciteit opbouw volgens internationaal NetBeheer scenario. 	
Levensduurverlenging	Funderingen op zee	<ul style="list-style-type: none"> Monopiles zijn moeilijk en duur om te verwijderen. Veel materiaal gaat verloren in het deel van de monopile dat in de zeebodem achterblijft na verwijdering van de monopile. Monopiles vermoeien over de levensduur en zouden niet kunnen worden hergebruikt (nieuwe turbine op bevestigd). Nieuwe turbines zijn in de regel groter dan voorgaande waardoor funderingen verder uit elkaar moeten staan vanwege de grotere rotordiameter. Omdat hier geen rekening mee gehouden wordt bij het plaatsen is hergebruik geen optie. 	<ul style="list-style-type: none"> Ontwerp-opties nodig die minder materialen gebruiken of makkelijker te verwijderen zijn en langer meegaan. Verlenging vergunningen Als funderingen hergebruikt dienen te worden kan dit in gebiedsplanningen en meerjarenplannen worden geregeld. 	<ul style="list-style-type: none"> Minder vermoeiing en hergebruik mogelijk bij jacket i.p.v. monopile op korte termijn en gebruik jacket-composite i.p.v. monopile op langere termijn 	<ul style="list-style-type: none"> Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -8% Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -8% Cumulatieve instroom strategische materialen: -9% Verlies: -26% Klimaatteffect: -3% Metaal depletie: -7% Land transformatie: -9% Humane toxiciteit: -8%
	Wind op land	<ul style="list-style-type: none"> Vergunningsduur vaak korter dan technologische/ economische levensduur. Vergunningen waren vaak afgestemd op de duur van de subsidie of kort gehouden om ruimte te bieden aan nieuwe technologieën. 20 jaar i.p.v. 35 jaar. Hierdoor worden windparken vaak vroegtijdig afgebouwd (en vervangen voor efficiëntere modellen: klimaatmissie). 	<ul style="list-style-type: none"> Er zou geëxperimenteerd kunnen worden met een langere duur van vergunningen (2 cycli i.p.v. 1). Bijvoorbeeld een vergunning van 50 à 60 jaar stelt parkbeheer/eigenaars in staat een optimalisatie te maken tussen het benutten van resterende economische waarde (door reparatie en onderhoud) en het vervangen van turbines voor nieuwe modellen. 	<ul style="list-style-type: none"> Planningssoftware over onderhoud en parkbeheer. 	
		<ul style="list-style-type: none"> Het businessmodel voor hergebruik van turbines op zee kan niet uit vanwege de 	<ul style="list-style-type: none"> Onderzoek, experimenteren en coördinatie is nodig om nieuw businesskansen te 		

		<p>hoge kosten gepaard met deïnstallatie van de turbines.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hergebruik van turbines op land zal spoedig niet meer mogelijk worden door toegenomen grootte van turbines en de belemmeringen die dat oplevert in wegwatertransport. Ook focust de businesscase van hergebruik zich op niches in wetgeving in andere landen waar grotere en efficiëntere turbines nog niet zijn toegestaan. De verwachting is dat deze niches snel gevuld zullen worden of zullen verdwijnen door institutionalisering van de windsector. 	<p>identificeren voor het hergebruiken van turbines. Een mogelijkheid is het verleggen van de focus op het hergebruiken van onderdelen i.p.v. gehele turbines.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Specifieke actoren in de sector bezitten hoge kwaliteit kennis over welke turbines en onderdelen restwaarde hebben. Deze informatie dient te worden opgehaald en gebundeld voor het identificeren van nieuwe businesskansen 		
Closed loop verwerking	Bladen	<ul style="list-style-type: none"> • De business case voor recyclen van bladen kan niet uit. Hierdoor gaan recycler failliet. • Bladen worden veelal niet aangeboden aan recyclers omdat recycling te duur is (naar schatting 1400€/ton). • Verbranden en storten van composieten is verboden in Nederland tenzij alternatieve verwerking duurder is dan 200€/ton. Hierdoor worden bladen veelal verbrand of bewaard in opslag. 	<ul style="list-style-type: none"> • Campagnes kunnen de legitimiteit van secundaire toepassingen verhogen aansluitend bij het beeld dat er oplossingen gevonden moeten worden voor de toenemende afvalberg aan turbinebladen. • De uitzonderingsregeling voor het verbranden van composieten dient herzien te worden om het businessmodel voor recycling mogelijk te maken • Voordelen introduceren om bladen uit opslag te halen en aan te bieden aan recyclers. Recyclebaar volume is nodig om businessmodel recyclers te verbeteren. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vervangen van de thermohardende hars, zoals epoxy, polyester of vinylester, door een recyclebare variant 	<ul style="list-style-type: none"> • Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: geen effect • Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: geen effect • Cumulatieve instroom strategische materialen: geen effect • Verlies: -4% • Klimateffect: geen effect • Metaal depletie: geen effect • Land transformatie: geen effect • Humane toxiciteit: geen effect
		<ul style="list-style-type: none"> • Er wordt onderzoek gedaan naar beter recyclebaar hars. Hierdoor zou de recyclebaarheid van bladen verbeteren mits recycling methodes hierop worden afgestemd. 	<ul style="list-style-type: none"> • Onderzoek naar harsen kan verder gestimuleerd worden om recyclebaarheid van bladen te stimuleren • Een veelvoud aan verschillende harsen bemoeilijkt de afstemming tussen ontwerp (hars gebruik) en verwerking (recyclingtechniek). In verloop van tijd kan de sector gestuurd worden op het creëren van uniformiteit (b.v. d.m.v. standaardisatie) om zo opschaling mogelijk te maken. 		
		<ul style="list-style-type: none"> • Recyclingtechnologie is nog onvoldoende in staat recycleat te genereren voor closed loop toepassingen 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologische innovatie 		
		<ul style="list-style-type: none"> • (Closed loop) recyclebare bladen zijn momenteel (driemaal) duurder dan doorsnee bladen. Hierdoor worden geen recyclebare bladen gebruikt. 	<ul style="list-style-type: none"> • Er kan geëxperimenteerd worden met verschillende methodes (zoals het toepassen van gerecycled materiaal in nieuw bladen) om markt vraag naar recyclebare bladen te creëren. Recyclebare 		

			bladen kunnen meegenomen worden in gunningscriteria bij aanbestedingen of maatregelen kunnen worden getroffen om de prijs van recyclebare balden te reduceren.		
	Turbine (met uitzondering van bladen)	<ul style="list-style-type: none"> Het huidige volume aan afgedankte turbines (niet bladen) kan worden verwerkt door de recyclers in de markt. Echter geven veel recyclers aan dat windturbines niet hun primaire focus is. Hierdoor dreigt het gevaar dat de grote en toenemende stroom aan turbines die vrij gaat komen niet adequaat gerecycled kan worden 	<ul style="list-style-type: none"> Recyclers dienen verder gestimuleerd te worden. Bewustzijn creëren over de grote verwachte stroom aan afgedankte turbines kan hierbij helpen. 	<ul style="list-style-type: none"> Directe en indirecte recycling van magneten. Maatregelen om alle materialen (incl. volledige monopile + kabel array) te verwijderen kunnen worden opgenomen in het beleid, zowel kavelbesluit als ministerieel Verbeterde sortering metalen 	
<p>Circulair systeem scenario: vermindering + levensduurverlenging + closed loop verwerking</p>					<ul style="list-style-type: none"> Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -19% Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -15% Cumulatieve instroom strategische materialen: -11% Verlies: -40% Klimaateffect: -7% Metaal depletie: -12% Land transformatie: -15% Humane toxiciteit: -12%

6.2 Zon PV

Tabel 18: Interventiepunten gebaseerd op innovatiesysteem analyse, technische/design mogelijkheden en potentieel materiaal/milieueffect van de circulaire strategieën voor PV-installaties.

Knoppen	Innovatiesysteem			Design/tech scenario	Potentieel effect
	Onderdeel	Barrière	Aangrijpingspunt		
Vermindering	Materialen	<ul style="list-style-type: none"> Niet transparante keten zorgt ervoor dat er materialen in producten worden gebruikt die schadelijk zijn of op onethische wijzen zijn verkregen. Ook is er weinig inzicht in de voetafdruk van de verschillende panelen. Doordat er geen inzicht is in de milieuprestatie noch het materiaalgebruik, kan hier niet op geconcentreerd worden. 	<ul style="list-style-type: none"> Het documenteren en controleren van data over panelen en gebruikte materialen kan helpen ongewenste materialen te voorkomen. Een (dynamisch) Product Paspoort kan hierbij helpen als tool om informatie te standaardiseren, op te halen en te delen. 	<ul style="list-style-type: none"> Capaciteit opbouw volgens internationaal NetBeheer scenario. Dit resulteert in 31% minder opgesteld vermogen in 2050. Versnelde efficiëntieverbetering van PV-panelen volgens het hoog scenario van Carrara et al (2020) door het stimuleren van intensief onderzoek naar verbeteringen Aandeel CIGS stijgt naar 30% in 2050. Vanuit het oogpunt van materiaalbeheer toch interessant om op grotere schaal andere types PV-panelen te installeren. 	<ul style="list-style-type: none"> Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -35% Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -53% Cumulatieve instroom strategische materialen: -39% Verlies: -35% Klimaateffect -36% Metaal depletie: -35% Land transformatie: -42% Humane toxiciteit: -36%
		<ul style="list-style-type: none"> Milieu impact en materiaalgebruik kan worden meegenomen in aanbesteding of bij import van panelen 			
Levensduurverlenging	PV-installaties	<ul style="list-style-type: none"> Er is een grote verscheidenheid aan panelen op de markt beschikbaar waarvan niet duidelijk is hoe deze zich tot elkaar verhouden op <i>repareerbaarheid</i> en <i>levensduur</i>. Actoren die leasemodellen op de markt zetten, zijn zich hiervan bewust en bezitten expertise op dit gebied. 	<ul style="list-style-type: none"> Informatie ophalen over de levensduur en reparerbaarheid van PV-installaties. Hiermee kunnen initiatieven, zoals de recent gestarte “buyer-group”, inkoopcriteria opstellen op deze parameters. 	<ul style="list-style-type: none"> Vertraagde veroudering door de voornaamste degradatiemechanismen te onderdrukken Oprekken gebruiksfase door te stimuleren om panelen pas af te danken bij 70% van de oorspronkelijke efficiëntie. Levenslange garantie garantieperiode. De minimaal te verwachten levensduur van de panelen beslaan gelijkzetten aan garantieperiode. Tweedehands gebruik stimuleren. PV-systemen die vervangen worden hebben doorgaans nog een capaciteit van 80% van hun oorspronkelijke waarde. Dergelijke systemen kunnen nog 10-20 jaar nut hebben op plaatsen in Nederland waar de energiebehoefte 	<ul style="list-style-type: none"> Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -5% Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -4% Cumulatieve instroom strategische materialen: -5% Verlies: -5% Klimaateffect: -3% Metaal depletie: -5% Land transformatie: -5% Humane toxiciteit: -5%
	Industriële panelen	<ul style="list-style-type: none"> Vergunningen voor zonneparken zijn vaak korter dan de economische en technologische levensduur van de panelen. 	<ul style="list-style-type: none"> Geëxperimenteerd kan worden met de duur van vergunningen. Gesproken wordt over langere vergunningen van niet één maar twee levenscycli. Bijvoorbeeld een vergunning van 50 à 60 jaar stelt parkbeheer/eigenaars in staat een optimalisatie te maken tussen het benutten van resterende economische waarde (door reparatie en onderhoud) en het vervangen van panelen voor nieuwe modellen. 		
		<ul style="list-style-type: none"> Industriële panelen die vroegtijdig vrijkomen door aflopende 	<ul style="list-style-type: none"> Het faciliteren van traceerbaarheid na export kan helpen de legitimiteit van export voor 		

		vergunningen worden vaak geëxporteerd voor hergebruik. Echter wordt gevreesd dat panelen na export niet, of slecht, worden verwerkt na afdanking en op stortplaatsen belanden.	hergebruik te vergroten om garant te kunnen staan voor closed loop verwerking bij afdanking. Paspoort-oplossingen kunnen hierbij helpen.	kleiner is of op plaatsen elders waar de zonnestraling intensiever is.	
Closed loop verwerking	Panelen	<ul style="list-style-type: none"> • Closed loop recycling van panelen wordt belemmerd doordat ontwerp en verwerking niet op elkaar zijn afgestemd. Recyclebaarheid wordt niet voor ontworpen. 	<ul style="list-style-type: none"> • In Nederland zijn er een aantal zonnepaneel producenten. Lokaal inkopen kan afstemming tussen design en recycling faciliteren. • Uit onderzoek is gebleken dat consument bereid zijn een 15% premium te willen betalen voor lokaal geproduceerde panelen. • Recyclebaarheid kan worden meegenomen in aanbesteding of bij import van panelen. • Specifiek het weren van Sb i het glas kan recyclebaarheid vergroten en/of het opzetten van en Sb bevattende glas route. 	<ul style="list-style-type: none"> • Effectieve verwerking van panelen om juist kritieke materialen terug te winnen naast glas en de ontwikkeling van (hydrometallurgische) processen om deze metalen effectief terug te winnen, kunnen tot radicaal hogere opbrengst van kritieke metalen leiden. • Door in de ontwerpfase rekening te houden met de wijze waarop recyclingprocessen worden uitgevoerd, kunnen producten gemaakt worden die tijdens de gangbare recyclingprocessen in hoge mate uiteenvallen in grotendeels homogene fragmenten. Maatregelen als het invoeren van individuele producent verantwoordelijkheid (in plaats van de huidige collectieve 'extended' verantwoordelijkheid), het stellen van hogere targets en materiaalgericht doelen in plaats van gewichtsdoelen kunnen hieraan bijdragen. • Door verplichte gerichte inzameling in een toegespitste verwerkingsstroom, wordt maximaal op de juiste wijze ingezameld en indien nodig verder gescheiden op basis van type 	<ul style="list-style-type: none"> • Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: geen effect • Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: geen effect • Cumulatieve instroom strategische materialen: geen effect: geen effect • Verlies: geen effect • Klimaatteffect: geen effect • Metaal depletie: geen effect • Land transformatie: geen effect • Humane toxiciteit: geen effect
		<ul style="list-style-type: none"> • Doordat er nog maar weinig panelen terugkomen uit de markt is het vanuit de UPV niet mogelijk om de put-on-market doelstelling te halen zoals afgesproken voor WEEE. Daarom wordt een uitzondering gemaakt van deze verplichting voor zonnepanelen. Hierdoor werkt de UPV minder sturend. 	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclingdoelstellingen kunnen worden herzien om wel sturing te bieden tijdens deze opschalingsfase. Doelen kunnen anders worden ingestoken dan de standaard put-on-market, zoals volume teruggewonnen materiaal gebaseerd op ingezameld volume. Alternatief kan gekeken worden naar materiaal specifieke doelstellingen. 		
		<ul style="list-style-type: none"> • De huidige recycling technologie focust zich op het terugwinnen van het zilver in zonnepanelen maar is niet in staat om (rendabel) andere (schaarse) materialen terug te winnen. Zilver wordt steeds minder gebruikt in de productie van nieuwe panelen wat het toekomstig verdienmodel bemoeilijkt. 	<ul style="list-style-type: none"> • In de markt wordt kennis en expertise ontwikkeld over het type panelen die beter presteren qua levensduur, reparatiebaarheid en recyclebaarheid. Door een tariefdifferentiatie te hanteren voor panelen met een betere circulariteit score kan de adoptie hiervan worden gestimuleerd. 		
		<ul style="list-style-type: none"> • In sommige panelen wordt antimoon wordt toegevoegd aan het glas om de transparantie te verhogen. Antimoon is echter zeer toxisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbeteren recycling technologie 		
			<ul style="list-style-type: none"> • Inkoopcriteria kunnen panelen met Sb weren aangezien alternatieve beschikbaar zijn. 		

		<p>waardoor het glas niet gerecycled en toegepast kan worden in nieuwe producten</p>			
<p>Circulair systeem scenario: vermindering + levensduurverlenging + closed loop verwerking</p>					<ul style="list-style-type: none"> • Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -38% • Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -54% • Cumulatieve instroom strategische materialen: -42% • Verlies: -38% • Klimaat effect: -38% • Metaal depletie: -38% • Land transformatie: -44% • Humane toxiciteit: -37%

6.3 Batterijen

Tabel 19 Interventiepunten gebaseerd op innovatiesysteem analyse, technische/design mogelijkheden en potentieel materiaal/milieueffect van de circulaire strategieën voor batterijen in elektrische auto's, huis- en wijkbatterijen.

Knoppen	Innovatiesysteem			Design/tech scenario	Potentieel effect
	Onderdeel	Barrière	Aangrijpingspunt		
Vermindering	Batterijssystemen	<ul style="list-style-type: none"> Actoren benadrukken dat de toename van het gebruik van elektrische auto's zal leiden tot een aanzienlijke vermindering van CO₂-emissies, maar dat tegelijkertijd de hoeveelheid gebruikte materialen zal toenemen naarmate de adoptie stijgt. 	<ul style="list-style-type: none"> Deelmobiliteit (--> stad/wijk van de toekomst ontwikkeling plan opzoeken#) Buurtbatterijen 	<ul style="list-style-type: none"> Vereist een maatschappelijke innovatie waarbij veel minder vervoersbewegingen plaatsvinden. 	<ul style="list-style-type: none"> Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -25% Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -35% Cumulatieve instroom strategische materialen: -40% Verlies: -43% Klimaateffect: -35% Metaal depletie: -43% Land transformatie: -36% Humane toxiciteit: -25%
		<ul style="list-style-type: none"> Adoptie van elektrische mobiliteit is belemmerd door verminderde actieradius en hoge prijs van batterijen. Innovatie heeft de afgelopen jaren geleid tot significante daling in prijs en materiaalgebruik 	<ul style="list-style-type: none"> Innovatie voor het verminderen van materiaalgebruik en het verbeteren van batterijprestatie 	<ul style="list-style-type: none"> Internationale Handel scenario Netbeheer. LFP Li-ion batterij in kleinere/goedkopere modellen EVs. 	
Levensduurverlenging	Batterijen	<ul style="list-style-type: none"> Batterijen worden steeds "dieper"/meer in de auto geïntegreerd. Hierdoor is de batterij moeilijk te repareren en demonteren voor hergebruik. 	<ul style="list-style-type: none"> Batterijen moeten beter te repareren zijn volgens het nieuwe Directive. Hierdoor zou hergebruik gestimuleerd moeten worden. 	<ul style="list-style-type: none"> Hergebruik van mobiele batterijen in stationaire toepassingen. Opladen van batterijen onder hun maximale capaciteit voor andere batterijen dan LFP. Reparatie batterijpack waarbij de levensduur wordt verlengd door het identificeren en vervangen van slechte en niet werkende individuele batterij modules 	<ul style="list-style-type: none"> Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -11% Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -11% Cumulatieve instroom strategische materialen: geen effect: -12% Verlies: -11% Klimaateffect: -9% Metaal depletie: -11% Land transformatie: -11% Humane toxiciteit: -11%
		<ul style="list-style-type: none"> Het aanbod van herbruikbare batterijen is sterk afgenomen (o.a. door afname in productiefouten) 	<ul style="list-style-type: none"> Kennis nodig en coördinatie. State of health en batterij monitoring, platformen. Zoeken naar nieuwe toepassingen en het beter in kaart brengen van potentie van de batterijen die terug gaan komen uit de markt 		

		<ul style="list-style-type: none"> • Producenten van batterijen vrezen dat zij aansprakelijk worden gesteld wanneer een batterij (afkomstig uit hun auto's) problemen veroorzaakt in een nieuwe toepassing. Onduidelijk wie aansprakelijk is voor de batterij tijdens second life. 	<ul style="list-style-type: none"> • Het nieuwe Directive introduceert een software reset functie. Deze moet het opnieuw installeren van software voor hergebruik makkelijk maken en aansprakelijkheid van producenten verhelpen • Standaarden kunnen worden geïntroduceerd die voorschrijven waaraan een batterij moet voldoen voor hergebruik. Evenals standaarden voor het doormeten van batterijen voor het bepalen van de resterende capaciteit. 		
Closed loop verwerking	LFP	<ul style="list-style-type: none"> • LFP-batterijen veel duurder om te recyclen dan andere batterijen door laag volume en noodzaak voor technologie ontwikkeling/ opschalen. Nu is de afvalbijdragen enkel op gewicht. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tariefdifferentiatie op Chemie kan middelen ophalen om te investeren in technologische ontwikkeling en opschaling voor LFP-batterijen 	<ul style="list-style-type: none"> • Introductie European Batteries Regulation • Hydro metallurgische processen worden de norm in batterij recycling. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: geen effect • Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: geen effect • Cumulatieve instroom strategische materialen: geen effect • Verlies: -74% • Klimaat effect: geen effect • Metaal depletie: geen effect • Land transformatie: geen effect • Humane toxiciteit: geen effect •
	Batterijen	<ul style="list-style-type: none"> • Directive stelt dat je specifieke percentages van materialen dient terug te winnen. Is nu geen sturing en overzicht op 	<ul style="list-style-type: none"> • Coördinatie nodig om keten in te richten zodat gestuurd kan worden op materiaal terugwinning en documenteren hiervan. 		
	Keten	<ul style="list-style-type: none"> • Onduidelijk hoe en of nieuwe doelen voortkomend uit directive haalbaar zijn 	<ul style="list-style-type: none"> • Noodzaak voor (F8) coördinatie om kennis op te halen en te ontwikkelen (F2,3) over recycling technologie. Zal misschien innovatie (F1) nodig zijn om percentages wel te kunnen halen 		
		<ul style="list-style-type: none"> • Heterogeniteit aan batterijen in shreddingsproces beïnvloed kwaliteit black mass 	<ul style="list-style-type: none"> • Paspoort oplossingen voor beter sorteren en opzetten recycling proces. 		
<p>Circulair systeem scenario: vermindering + levensduurverlenging + closed loop verwerking</p>					<ul style="list-style-type: none"> • Cumulatieve instroom materialen t/m 2050: -33% • Cumulatieve instroom kritieke materialen t/m 2050: -15% • Cumulatieve instroom strategische materialen: geen effect: -11% • Verlies -87% • Klimaat effect: -40% • Metaal depletie: -48% • Land transformatie: -42% • Humane toxiciteit: -32%

7 Conclusie Deel 2: Aangrijpingspunten voor beleid

Dit rapport is gebaseerd op een integratie van zes achterliggende studies (Balkenende et al., 2024; De Koning & Kleijn, 2024a, 2024b, 2024c; Elzinga, 2024; Van Heusden & De Boer, 2024) die zijn uitgevoerd binnen de PGA hernieuwbare energietechnologie.

Hier zullen voor de onderzochte hernieuwbare energie technologieën, gebaseerd op een combinatie van de voorgaande analyses, verschillende conclusies getrokken worden over de transitie naar een circulaire economie. Deze conclusies zijn verdeeld over zes thema's die achtereenvolgens zullen worden besproken.

Klimaatmissie dominant

De actoren in het innovatiesysteem omtrent de onderzochte energie technologieën zijn sterk gefocust op het behalen van de klimaatmissie, niet zozeer op het realiseren van een circulaire energieketen. Hierdoor blijken innovaties gericht op het verbeteren van de efficiëntie en energieopwekking van de technologieën zich voorspoedig te ontwikkelen, terwijl circulaire innovaties zoals design-for-recycling of het verbeteren van recycling technologieën achterblijven. Het afstemmen en het vinden van synergie tussen de energie- en circulariteitsdoelen is essentieel om beide transities mogelijk te maken.

Voor succesvol circulair economiebeleid binnen de hernieuwbare energietechnologie is een coördinerend, sector overstijgend plan nodig om synergiën te creëren tussen CE en de energie transitie. Dit plan zou verwachtingen moeten stellen, doelen formuleren, sturing bieden maar vooral de toegevoegde waarde van circulariteit aan de klimaatmissie duiden/creëren. Zo kan circulariteit oplossingen bieden voor de toenemende afhankelijkheid van kritieke materialen. Hierdoor kan afstemming tussen CE- en energiebeleid de energiesector toekomstbestendiger maken en leveringszekerheid stimuleren.

Uit het onderzoek is gebleken dat wanneer er tegengestelde belangen spelen tussen de klimaatmissie en de CE-missie, dat actoren de energietransitie zullen prioriteren. Een eerste voorbeeld is de terughoudendheid van actoren omtrent levensduurverlenging. Levensduur verlengende maatregelen worden nu juist gezien als belemmerend in de energietransitie. Om zo snel mogelijk vermogen en capaciteit op te bouwen, is het gunstig wanneer oudere PV-panelen met een lager rendement worden vervangen door panelen met een hoger rendement.

Een tweede voorbeeld van het conflict tussen de klimaatmissie en de CE-missie is terug te zien in het aanbestedingsbeleid van de windsector. De focus van aanbesteding op prijs en het doel om subsidievrij te worden heeft een "race" om de grootste turbine gecreëerd. De (te) snel toenemende grootte van de turbines zorgt ervoor dat voortdurende investeringen nodig zijn in de productie en installatie faciliteiten en de terugverdientijd op gedane investeringen niet gehaald wordt. Hierdoor draaien veel actoren verlies, gaan prijzen omhoog om terugverdientijd te verkorten, loopt de druk op de toeleveringsketen op, maar worden ook grote hoeveelheden aan materieel en kapitaalgoederen vroegtijdig afgedankt.

Een laatste voorbeeld is de circulaire oplossingsroute *preventie*. Preventie, het voorkomen van materiaalgebruik, stimuleert innovaties die de functionaliteit van een technologie behouden of verbeteren met minder materialen. Deze benadering sluit aan bij zowel de CE-missie, omdat er minder materialen worden gebruikt, als bij de klimaatmissie, omdat de prestatie en efficiëntie van de technologie worden verbeterd. Bijvoorbeeld, PV-panelen met een hoger rendement (minder

materiaal per hoeveelheid opgewekte elektriciteit) of goedkopere Li-ion batterijen die minder schaarse en dure metalen bevatten. Vaak leidt het verminderen van materiaalgebruik tot een prijsdaling. Deze kostenreductie creëert een paradoxale dynamiek tussen de twee missies. De circulaire strategie preventie streeft naar vermindering van materiaalgebruik, wat de prijs van de technologie verlaagt. Hierdoor kan meer technologie worden geïnstalleerd om energie op te wekken voor de klimaatmissie. De installatie van extra capaciteit resulteert echter in het gebruik van extra materialen, wat de preventieroute juist probeerde te vermijden. Deze dynamiek illustreert de dominantie van de klimaatmissie over circulariteit. Daarnaast kan het gebruik van minder waardevolle materialen ook negatieve gevolgen hebben voor het verdienmodel van recycling.

Materiaal gebruik en impact van materiaalgebruik nemen toe

De jaarlijkse instroom van materialen gaat sterk toenemen voor de opbouw en opschaling van het hernieuwbare energiesysteem. De jaarlijkse instroom van materialen gebruikt in Li-ion batterijen gaat het sterkst omhoog met een factor 3 wanneer additionele CE-maatregelen uitblijven. De klimaateffecten samenhangend met de winning en productie van deze materialen dalen juist tussen 2020 en 2050 wanneer we uitgaan van dat we klimaatverandering beperken tot onder de 1.5 graad omdat er dan minder CO₂ uitgestoten gaat worden per eenheid materiaalproductie. De overige drie milieueffecten (metaal depletie, humane toxiciteit en landtransformatie) zullen wel sterk stijgen, ongeveer evenredig met de stijging van het jaarlijks materiaalgebruik. Het is dus belangrijk om meerdere milieueffecten in beschouwing te nemen. Circulaire maatregelen kunnen het materiaalgebruik en verlies van materialen sterk reduceren.

Alle circulaire maatregelen (*vermindering, levensduurverlenging, closed loop recycling en substitutie*) kunnen de hoeveelheid materialen die nodig zijn voor de verdere opbouw van het hernieuwbare energiesysteem tussen de 19% en 38% op gewichtsbasis reduceren. De circulaire strategie *afwijzen*, één van de strategieën binnen het circulaire principe *verminderen*, kan tot 2050 het materiaalgebruik tussen 10-35 gewichtsprocent terugdringen door de noodzaak voor en vraag naar energie (opwekkingscapaciteit en opslagcapaciteit) te verminderen. Dit vereist wel dat de economie in Nederland zich ontwikkelt in lijn met het internationale scenario zoals opgesteld door NetBeheer Nederland. In dit scenario wordt echter wel ingezet op een zeer hoog gebruik van waterstof, iets dat in deze analyse verder niet is meegenomen.

Circulaire Economie maatregelen bemoeilijkt door late/weinig uitstroom materialen

De doelen en verwachting voor groei van het energiesysteem zal grote hoeveelheden materialen vragen voor de opbouw van de hernieuwbare energieproductie (windmolens, PV, batterijen) en distributie (netwerk). De instroom van materialen in het energiesysteem zal de komende jaren daarom veel groter zijn dan de uitstroom. De levensduur van de technologieën die nu worden geïnstalleerd ligt tussen de 10 en 60 jaar. Secundair materiaal zal dus pas over meerdere decennia vrijkomende en kan hierdoor op korte termijn weinig primair materiaal vervangen. De uitstroom van afgedankte PV-panelen, windturbines en Li-ion batterijen gaat wel sterk toenemen over de jaren. Inzameling en verwerkingscapaciteit dient rekening te met deze toenemende stroom om zo in de toekomst meer primair materiaal te kunnen vervangen. De disbalans in instroom en uitstroom is een belangrijke dynamiek om mee te nemen in het opstellen maar ook evalueren van beleid.

Daarnaast zullen de volledige effecten van circulaire strategieën onder *levensduurverlening* pas na 2050 zichtbaar worden. De positieve effecten van de oplossingsroute levensduurverlening treden pas op wanneer een technologie normaliter afgeschreven zou worden en vervangen voor een nieuw

product. Door levensduur verlengende interventies wordt de milieu impact geassocieerd met het produceren en plaatsten van het nieuwe product, en de verwerking van het oude product, uitgesteld of (deels) voorkomen. Door de lange levensduur van de bestudeerde technologieën zal de vervanging hiervan grotendeels pas na 2050 plaatsvinden. In deze studie wordt een tijdshorizon tot 2050 gehanteerd waardoor de effecten van levensduurverlenging die na 2050 plaatsvinden niet worden meegenomen in de berekeningen.

Ook kunnen levensduur verlengende interventies op de korte termijn meer materiaal of uitstoot genereren. Voorbeelden hiervan zijn het ontwerpen en plaatsen van jackets, die meerdere generaties windturbines meegaan, in plaats van monopiles (zie tabel 17). Of het beter afstemmen van de vergunningsduur van wind en zonneparken in relatie tot de levensduur van de windturbines en zonnepanelen. Om levensduurverlenging mogelijk te maken zal daar nu op gestuurd moeten worden en zal langdurig consistent beleid nodig zijn om de milieuvoordelen hiervan te kunnen benutten.

Betreffende de oplossingsroute *recycling*, kan momenteel tussen de 40 en 55 procent van de uitstromende materialen niet closed loop worden gerecycled. Dit zijn vooral materialen zoals beton, composietmateriaal, plastic, glas van zonnepanelen en anode materiaal van batterijen. Op dit moment ontbreekt het verdienmodel om deze grondstoffen rendabel te recyclen, is het volume aan ingezameld materiaal te laag is of is de recyclingtechnologie nog niet ver genoeg ontwikkeld.

Angst voor Leveringszekerheid/toekomstbestendigheid energiesysteem

Binnen de CE-missie staat leveringszekerheid centraal. Ook actoren gefocust op de klimaatmissie vrezen dat materiaalgebrek een belemmerende factor kan zijn voor de toekomstbestendigheid van het energiesysteem als Europa haar positie in de (terug)winning en raffinage van materialen niet verstevigt. Veel van de metalen worden al closed loop gerecycled en in het baseline scenario wordt al meegenomen dat er verdergaande ontwikkeling plaatsvindt die de CE ondersteunt. De aanname van een relatief hoog percentage closed loop gerecyclede metalen in het baseline scenario zorgt ervoor dat verdere ontwikkeling van closed loop recycling in het CE-scenario niet heel belangrijk lijkt, behalve bij batterijen. Een zeer hoog recyclingpercentage betekent niet per definitie dat leveringszekerheid is gegarandeerd. De vrijkomende hoeveelheid is in elk jaar minder dan de benodigde instroom van metalen en de recycling vindt grotendeels niet in Nederland of Europa plaats. Ook dienen veel van de gerecyclede materialen opgewerkt te worden voordat deze opnieuw in energietechnologieën toegepast kunnen worden. Er moet strategisch worden nagedacht over de extractie van materialen, de productie van componenten voor hernieuwbare energietechnologieën en de locatie waar de closed loop recycling plaatsvindt.

De complexiteit van het systeem vraagt om productgroep-specifiek beleid

Uit de analyse blijkt dat de onderzochte hernieuwbare energietechnologieën op verschillende punten zeer verschillend zijn en dat technologie-specifiek beleid ontwikkeld zal moeten worden om de ontwikkeling en diffusie van deze technologieën optimaal te kunnen stimuleren. Allereerst verschillende de technologieën sterk qua sturende wetgeving; windturbines worden door aanbestedingen gedreven, PV-panelen worden veelal vanuit de consument gedreven en EV batterijen ondervinden sterke sturing van uit de Europese Commissie. Ook kennen de sectoren andere configuraties omtrent eigenaarschap, businessmodellen, levensduur en functie (energieopwekking versus -opslag. Daarnaast spelen verschillende (type) materialen een centrale rol binnen het behalen van circulariteit voor de verschillende technologieën. Voorbeelden zijn de composieten in de

windturbinebladen, de zeldzame aardmetalen in de generatoren van windturbines, het silicium en antimoon in zonnecellen, het glas in de PV-panelen en het lithium in de Li-ion batterijen.

Naast specifiek beleid afgestemd op de hierboven genoemde verschillen en karakteristieken van de technologieën, zal ook sector overstijgend beleid nodig zijn. Zo zijn alle technologieën gebaat bij, dan wel afhankelijk van, opschaling en uitbreiding van het energienet. Symbiose tussen de technologieën moeten voor verdere stimulering en uiteindelijk versnelling van de energietransitie zorgen. Daarom zal het nodig zijn beleid op te stellen dat stuurt op het creëren van deze symbiotische interacties. Ook zal een systeemperspectief nodig zijn om effectief beleid op te kunnen stellen voor deze sterk interacterende missies, technologieën, sectoren en systemen. Zoals aangetoond kunnen interventies oplossingen stimuleren maar ook onbedoeld andere oplossingsroutes belemmeren.

Nog geen compleet beeld wat betreft aanwezigheid ZZS

Bij productie van hernieuwbare energietechnologieën worden stoffen gebruikt die schadelijk zijn voor mens of milieu. Het gaat bijvoorbeeld om lood in zonnepanelen of oplosmiddelen in batterijen. Er is nog geen compleet beeld van de aanwezigheid van ZZS in energietechnologieën, en daarmee ook niet van de risico's die deze stoffen kunnen veroorzaken over de gehele levenscyclus. De ZZS kunnen de circulaire economie belemmeren wanneer deze tijdens recycling in het recyclaat terecht te komen en deze hiermee onbruikbaar maken. Het is daarom belangrijk om bij de ontwikkeling van energietechnologieën, naast milieu impact, ook aandacht te hebben voor andere duurzaamheidsaspecten zoals chemische veiligheid.

Er zijn verschillende aanknopingspunten om de energietransitie aan te laten sluiten bij de Europese ambitie voor een non-toxic environment. Bij het ontwerp van nieuwe producten of energietechnologieën kunnen ZZS en andere gevaarlijke stoffen vervangen of geëlimineerd worden. Hiervoor biedt het Safe and Sustainable by Design-principe (SSbD) kansen. Er zijn al mogelijkheden voor bijvoorbeeld zonnepanelen zonder lood en PFAS, en batterijen zonder kobalt.

8 Discussie

In de analyse van materiaalgebruik in de PV-panelen, batterijen en windturbines zijn bestaande data en modellen gebruikt. Deze hebben beperkingen. Gegevens over de materiaalintensiteit en levensduur van technologieën zijn overgenomen uit openbare bronnen, veelal enkele jaren oud. In een zich snel ontwikkelend systeem als hernieuwbare energietechnologie betekent het dat deze data waarschijnlijk niet goed de huidige stand van zaken weergeeft. Naast de relatieve ouderdom van de materiaalintensiteit gegevens is het ook zeker dat deze incompleet zijn. Dit probleem speelt het sterkst bij batterijen. In het verleden zijn vooral de (kritieke) metalen in batterijen onderwerp van studie geweest. Anode materialen zoals natuurlijk grafiet maar ook de materialen die nodig zijn om uit individuele batterijcellen, batterijmodules en uiteindelijk een complete batterij voor een auto te maken, hebben veel minder aandacht gekregen. We hebben voor de verschillende systemen een incompleet beeld van de gebruikte materialen en het eenvoudig vergelijken van het volume van de materialen in de verschillende technologieën is daarom niet mogelijk. Voor de verschilanalyse per systeem en de identificatie van potentieel effectieve maatregelen is dit minder een probleem maar het weerhoudt ons ervan om de som van alle veranderingen in alle beoordeelde systemen bij elkaar op te tellen en te presenteren.

De dynamische stroommodellen die eerder zijn ontwikkeld en wij hebben overgenomen, moesten in alle gevallen, vanwege tekortkomingen, worden aangepast of herschreven worden. Ze zijn desondanks een sterke versimpeling van de werkelijkheid. Voor een betere analyse van levensduur verlengende maatregelen door vervanging en reparatie zouden meer componenten en hun aparte levensduur meegenomen moeten worden. Zeker bij windturbines waarbij het vervangen van windturbinebladen een optie zou kunnen zijn, zouden verder uitgewerkte dynamische stroommodellen van belang kunnen zijn. Omdat een strategie waarbij componenten vervangen worden geen grote rol hebben in de periode 2020 – 2050, is het niet bezwaarlijk dat vervangcycli niet goed meegenomen kunnen worden.

De dynamische stroommodellen nemen niet expliciet mee dat closed loop gerecycled materiaal als secundair materiaal ingezet kan worden in de bouw/constructie van de hernieuwbare energietechnologieën. We gaan ervan uit dat het percentage secundair materiaal op de markt in de periode 2020 – 2050 gelijk blijft. Deze aanname is verantwoord. De sterk toenemende vraag in de wereld naar materialen in combinatie met een laag percentage closed loop recycling voor sommige materialen maakt dat het percentage secundair materiaal waarschijnlijk niet flink stijgt. Alleen voor staal, ijzer en aluminium zou het percentage secundair staal kunnen gaan oplopen omdat naar verwachting de vraag naar algemene infrastructuur (woningen, wegen, bruggen en viaducten) sterk gaat afzakken en er veel schroot beschikbaar komt (Pauliuk et al., 2013).

Het gedrag van privé consumenten is onderbelicht gebleven. Deels is dit gerechtvaardigd omdat de opbouw van het hernieuwbare energietechnologie systeem en de keuzes voor specifieke technologieën zich buiten de directe invloed van consumenten valt. Waar consumenten wel directe invloed op hebben zijn keuzes met betrekking tot het energieverbruik, de aanschaf van privé PV-panelen, EVs en thuisbatterijen. Voor mogelijke maatschappelijke veranderingen zoals als verandering van mobiliteit en het afwijzen van het gebruik van elektriciteit is het gedrag van consumenten zeer belangrijk. De inzameling van afgedankte PV-panelen, thuisbatterijen en oude EVs is al gedekt door de uitgebreide producenten verantwoordelijkheid. Hoe circulaire economie maatregelen in het hernieuwbare energie technologie systeem en het gedrag van consumenten elkaar beïnvloeden zou verder onderzocht moeten worden.

Referenties

- Balkenende et al (2024) *Circulaire technologische en ontwerp mogelijkheden. Werkpakket 3 van de productgroepanalyse hernieuwbare energietechnologie*. Concept eindrapport 47p.
- Bielewski, M., D. Blagoeva, M. Cordella, F. Di Persio, P. Gaudillat, S. Hildebrand, L. Mancini, F. Mathieux, P. Moretto, E. Paffumi, D. Paraskevas, V. Ruiz, J. Sanf elix, A. Villanueva, L. Zampori (2021) *Analysis of sustainability criteria for lithium-ion batteries including related standards and regulations*, , Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 30597 EN , isbn 978-92-76-30284-1, doi: 10.2760/811476.
- Carrara, S., P. Alves Dias, B. Plazotta, and C. Pavel (2020) *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*. Joint Research Centre (JRC), Petten. doi: 10.2760/160859.
- CBS, PBL, RIVM, WUR (2024) *Verkoop, gebruik en afgedankte elektronische en elektrische apparatuur, 1995-2022* (indicator 0561, versie 07, 19 september 2023). www.clo.nl.
- De Koning, A., E.G.M Kleijn (2024a) *Productgroepanalyse hernieuwbare energietechnologie; Werkpakket 1: Definitie document*. Universiteit Leiden. 23p.
- De Koning, A., E.G.M. Kleijn (2024b) *Productgroepanalyse hernieuwbare energietechnologie; Werkpakket 2: Baseline grondstoffen scenario*. Universiteit Leiden. 66p.
- De Koning, A., E.G.M. Kleijn (2024c) *Productgroepanalyse hernieuwbare energietechnologie; Werkpakket 4: Circulaire grondstoffen scenario's*. Universiteit Leiden. 29p.
- Elzinga, R., Negro, S.O., Hekkert M.P. (2024) *Transitie naar een circulaire energiesector: Een missie-gedreven innovatiesysteem analyse; Hernieuwbare Energie Technologie en Werkpakket 5 – Innovatiesysteem Analyse*. Universiteit Utrecht 68p.
- Elzinga, R., Janssen, M. J., Wesseling, J., Negro, S. O., & Hekkert, M. P. (2023) Assessing mission-specific innovation systems: towards an analytical framework. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, **48**, 100745. doi: 10.1016/j.eist.2023.100745.
- EU (2023) Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance) PE/2/2023/REV/1
- Etxandi-Santolaya, M., L. Canals Casals, T. Montes, C. Corchero (2023) Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity. *Journal of Environmental Management*, **338**, 117814. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117814.
- EZ & IenM (2016) *Rijksbrede programma Circulaire Economie 'Nederland circulair in 2050'*, Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Frischknecht, R., P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, V. Fthenakis, H. C. Kim, M. Raugei, M. Stucki (2020) *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020.
- Hanemaaijer, A., M. Kishna, J. Koch, P. Lucas, T. Rood, K. Schotten, M. van Sluisveld (2023) *Integrale Circulaire Economie Rapportage 2023*, Den Haag: PBL.

- Installatie Journaal (2024) *De onderdelen van een pv-installatie*. Geraadpleegd op 18 Mei 2024, van <https://www.installatiejournaal.nl/16833/de-onderdelen-van-een-pv-installatie>
- I&W (2023) *Nationaal Programma Circulaire Economie 2023 - 2030*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 172p.
- Lobregt, M., Kamper, S., Besselink, J., Knol, E., & Coolen, E. (2021) *The ideation process focused on circular strategies in the wind industry*. 77p.
- Manthiram, A. (2020) A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry., *Nat Commun*, **11**(1) 1550, doi: 10.1038/s41467-020-15355-0.
- Metabolic (2023) *De metaalvraag voor de Nederlandse energietransitie; Een gedeeltelijke actualisering op basis van de nieuwe ii3050-scenario's*. 12p.
- Metabolic (2021) *Towards a circular energy transition; Exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition*. Metabolic, Copper8, Polaris Sustainability, Quinttel, CML- Leiden University. 59p.
- Netbeheer Nederland. (2023) *Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's; Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050*. s.l.: Netbeheer Nederland.
- Oorschot, J. van, B. Sprecher, B. Roelofs, J. Horst, E. van der Voet (2022) *Towards a low-carbon and circular economy: scenarios for metal stocks and flows in the Dutch electricity system. Resources, Conservation and Recycling*, 178. doi: 10.1016/j.resconrec.2021.106105.
- Pauliuk, S., R.L. Milford, D.B. Müller, J.M. Allwood (2013) *The Steel Scrap Age. Environ. Sci. Technol.* **47**(7) 3448–3454. doi: 10.1021/es303149z.
- PBL (2023) *Werkprogramma monitoring & sturing circulaire economie 2023-2024*. 18p.
- Santoyo-Castelazo, E., K. Solano-Olivares, E. Martínez, E.O. García, E. Santoyo (2021) *Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3 kWp: A case study for Mexico. Journal of Cleaner Production*, 316, 128314. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128314.
- s.n. (2019) *Klimaatakkoord*. Den Haag, 28 juni 2019. 239p.
- s.n. (2021) *Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst; Coalitieakkoord 2021 – 2025 VVD, D66, CDA en ChristenUnie*. 15 december 2021.
- Tang, C., B. Sprecher, A. Tukker, J.M. Mogollón (2021) *The impact of climate policy implementation on lithium, cobalt and nickel demand: The case of the Dutch automotive sector up to 2040. Resources Policy*. 74, 102351. doi: 10.1016/j.resourpol.2021.102351.
- Van Heusden, F., L. de Boer (2024) *Zeer Zorgwekkende Stoffen in materialen gebruikt in de energietransitie Adviezen voor de productgroepanalyse hernieuwbare energietechnologieën*. RIVM, Bilthoven, 21p.
- WindEurope. (2017). *Repowering and lifetime extension: making the most of Europe's wind energy resource*. The European wind industry's views on managing wind energy assets at the end of their operational lifetime. 6p.

