

Nederland klimaatneutraal in 2040

Een haalbaarheidsanalyse



Voorwoord

Dit rapport onderzoekt de haalbaarheid van een klimaatneutraal Nederland in 2040. Het onderzoek is uitgevoerd door drie adviesbureaus: Kalavasta, CE Delft en Berenschot. Deze onafhankelijke bureaus combineren hun expertise op het gebied van de energietransitie. Door deze expertises te bundelen ontstaat een volledig en evenwichtig beeld van alle sectoren die moeten verduurzamen.

Op verzoek van Stichting Greenpeace Nederland en Natuur en Milieu is onderzocht of Nederland in 2040 klimaatneutraal kan zijn. De conclusie is helder: het is haalbaar, maar vraagt om stringent overheidsbeleid en een ongekennde inspanning van de hele samenleving.

Deze ambitie - 100% netto broeikasgasreductie in 2040 voor Nederland - ligt overigens niet ver van het streven van de Europese Commissie naar 90% emissiereductie in de hele EU tegen 2040. Dit illustreert dat er hoe dan ook een grote transitie nodig is in de komende decennia.

De inhoud is tot stand gekomen door nauwe samenwerking tussen de bureaus, waarbij verschillende experts hun specifieke kennis hebben ingebracht:

Naam	Bureau	Hoofdstukken geschreven door bureau
Bert den Ouden	Berenschot	4.2 Elektriciteit en warmte
Joachim Schellekens		4.5 Gebouwde omgeving
Sieb Rodenburg	CE Delft	4.3 Mobiliteit
Denise Hilster		
Matthijs Otten		
Izzy Cronin	Kalavasta	1. Introductie
John Kerkhoven		2. Klimaatbeleid en transitie scenario's
Naomi Hanemaaijer		3. Onze aanpak
Rob Terwel		4.4 Industrie
Sander Kempkes		4.6 Landbouw
Sebastiaan Koerhuis		4.7 Landgebruik
		4.8 Negatieve emissies
		5. Sector overstijgende thema's
		6. Conclusies en discussie
	Eindredactie	

Het rapport bundelt diepgaande sectoranalyses en biedt een waardevol inzicht in de route naar een klimaatneutraal Nederland - niet alleen voor Stichting Greenpeace Nederland en Natuur en Milieu, maar voor alle betrokken partijen.

John Kerkhoven en Naomi Hanemaaijer
Kalavasta

Samenvatting

Aanleiding en doel

Dit rapport onderzoekt de haalbaarheid van een netto klimaatneutraal Nederland in 2040, wat een versnelling van tien jaar betekent ten opzichte van het huidige doel van 2050. Het onderzoek is uitgevoerd door Kalavasta, CE Delft en Berenschot in opdracht van Greenpeace Nederland en Natuur en Milieu. We beantwoorden de vraag of het mogelijk is om de transitie tot netto klimaatneutraliteit in Nederland met tien jaar te versnellen, zodat we in 2040 netto nul broeikasgasemissies uitstoten in Nederland.

Methodologie

Het onderzoek gebruikt het 'Nationaal Leiderschap' scenario uit de II3050-studie (2023) van de gezamenlijke netbeheerders als uitgangspunt. Het scenario is op een beperkt aantal punten aangepast naar een '[Klimaatzaak 2040](#)' scenario: onder andere zijn er aanpassingen gemaakt om de haalbaarheid in 2040 te vergroten¹. Dit scenario gaat uit van centrale regie door de Nederlandse overheid op de energietransitie, met als doel maximale elektriciteits- en groene waterstofproductie in Nederland. Het scenario veronderstelt dat onze huidige levensstijl grotendeels behouden blijft, de industrie in Nederland gevestigd blijft, en dat er al substantiële productie plaatsvindt van synthetische brandstoffen en grondstoffen. Deze moleculen dienen ter vervanging van producten zoals fossiele kerosine voor vliegtuigen, stookolie voor schepen en nafta voor kunststofproductie in Nederland in 2040. Daarmee is dit een uitdagend scenario om netto klimaatneutraal te maken.

We hebben de haalbaarheid van netto klimaatneutraliteit geanalyseerd via zeven verschillende 'lenzen': beleid, economie, sociaal-maatschappelijk en cultureel, milieu, technologie, infrastructuur en ruimtelijke ordening. Per sector is met een stoplichtmodel (groen, oranje, rood) de haalbaarheid van versnelling beoordeeld en is ingeschat hoeveel restemissies er in 2040 nog zullen zijn, zelfs na introductie van veel normerend, stimulerend en beprijzende maatregelen. Onderdeel van de haalbaarheidsanalyse is een overzicht van enkele belangrijke beleidsmaatregelen die de energietransitie versnellen.

Resultaat analyse

De analyse toont aan dat er in 2040, na maximale inspanning om emissiereductie te versnellen, nog ongeveer 18,5 Mton (bandbreedte 14-26 Mton) aan restemissies gecompenseerd moet worden. Dit is een emissiereductie van 92% ten opzichte van 1990. De restemissies bestaan uit 8,7 Mton structurele emissies die blijvend aanwezig zijn in het eindbeeld en die voornamelijk methaanemissies uit de landbouwsector zijn, en 9,8 Mton tijdelijke emissies die na 2040 verder gereduceerd kunnen worden. De tijdelijke restemissies zijn er omdat we het onwaarschijnlijk achten dat de benodigde aanpassingen in een aantal sectoren al voor honderd procent zijn doorgevoerd in 2040, maar we verwachten dat dit niveau wel in de jaren na 2040 wordt bereikt.

¹ https://energytransitionmodel.com/saved_scenarios/19003

De grootste uitdagingen liggen bij de gebouwde omgeving (middenwaarde 6,2 Mton). Voor de overige sectoren - elektriciteit en warmte (0,4 Mton), mobiliteit (2,9 Mton) en industrie (0,3 Mton) - zijn de restemissies lager. De landbouw (7,6 Mton) en het landgebruik (1,1 Mton) kennen ook restemissies, maar deze blijven als de transitie voltooid is bestaan. Om netto klimaatneutraliteit binnen Nederland te bereiken, moeten de restemissies worden gecompenseerd door negatieve emissies, waarvoor verschillende technieken beschikbaar zijn zoals mineralisatie, houtbouw en CO₂-afvang bij afvalverbranding en biobrandstofproductie (12 Mton). Daarmee kan een emissiereductie van 97% ten opzichte van 1990 behaald worden. Voor de resterende 7 Mton aan negatieve emissies, die nodig zijn om in 2040 Klimaatneutraal te zijn, wordt Direct Air Capture (DACCS) ingezet in het scenario.

Tabel 1. Een overzicht van historische emissies per sector, de verwachte emissies in 2030 volgens de KEV, de verwachte emissies in een klimaatneutraal 2050 volgens twee andere studies (II3050v2 scenario Nationaal Leiderschap en de Trajectverkenning van PBL) en in een klimaatneutraal 2040 volgens dit rapport.

Sector	Sub-sector	1990	2023	2030	2050 (klimaatneutraal in eerdere studies)		2040 (klimaatneutraal in deze studie)	
					PBL KEV 2024	II3050-NAT ²	PBL TVKN	Resultaat analyse
Elektriciteit en warmte	Opwek, infrastructuur en flex	39,6	23,5	12,9	0	0,8	0,4 (0 – 0,8)	<i>Tijdelijk</i>
Mobiliteit	Personen	17,9	15,3	10,5	0	1,3	2,9 (0 – 4,2)	<i>Tijdelijk</i>
	Goederen	10,5	11,9	8,1				
	Mobiele werktuigen + binnenvaart en spoor	5,1	3,4	2,5				
Industrie	ETS2	86,8	10,5	2,0	0	0,0	0,3 (0 – 0,7)	<i>Tijdelijk</i>
	ETS1		36,1	36,5				
Gebouwde omgeving	Woningen	21,0	12,6	11,8	0	4,6	6,2 (5,6 – 8,5)	<i>Tijdelijk Mogelijk nog na 2045, 2050 neutraal</i>
	Utiliteitsbouw	9,1	5,2	3,8				
Landbouw	Energetische emissies en methaanslip (GTB)	7,5	6,6	5,4	1,5	14,2	7,6 (7,6 – 11,0)	<i>Blijvend</i>
	Niet energetische emissies	25,3	17,8	16,5	7,5			
Landgebruik	LULUCF	5,4	3,8	4,8	- ³		1,1 (0,75-1,25)	<i>Blijvend</i>
Negatieve emissies					-	22	18,5 (14 – 26)	<i>Waarvan 7 Mton DACCS</i>
Totaal Mton CO₂-eq. (reductie ten opzichte van 1990)		228,0 0%	146,7 -31%	117 49%	9,0 -96%	-1⁴ -100%	0 -100%	

² De getallen uit deze kolom zijn gebaseerd op de data onderliggend aan het II3050 rapport, welke in het team aanwezig waren vanwege betrokkenheid bij dat project. Ze sluiten niet altijd volledig aan bij de ETM scenario's, wel op het II3050v2-scenario-rapport.

³ Niet bekend

⁴ Exclusief bunkers

Conclusies

De analyse wijst uit dat er geen onoverkomelijke belemmeringen zijn voor het bereiken van verregaande emissiereductie in 2040, maar dat het wel een formidabele opgave wordt die vraagt om zeer stringent overheidsbeleid en grote inspanningen van alle betrokkenen. Er zijn vier hoofduitdagingen geïdentificeerd: de benodigde méérinvesteringen⁵ (24-34 miljard euro per jaar), de druk op de arbeidsmarkt (560.000 extra arbeidsplaatsen op de piek), de infrastructurele opgave (met name het elektriciteitsnetwerk) en de beschikbaarheid van kritieke materialen (momenteel vindt beperkt recycling plaats).

Wij concluderen dat in 2040 een emissiereductie van meer dan 95% t.o.v. 1990 zeker haalbaar is, en dat bij maximale inspanning van alle partijen in combinatie met negatieve emissies (incl. DACCS), netto klimaatneutraliteit zeer uitdagend, maar mogelijk is. Cruciaal hierbij is tijdig, duidelijk en stringent overheidsbeleid, zowel beprijsend als normerend, in combinatie met stimulerend beleid voor burgers en bedrijven die de transitie niet op eigen kracht kunnen maken.

Hierna beschrijven we op hoofdlijnen de uitkomsten van de sectoranalyses en de analyses op de sectoroverstijgende thema's, waarbij we ons vooral concentreren op die aspecten die de transitie moeilijk kunnen maken en waar aanvullend stringent beleid nodig is. De haalbaarheid van het versnellen van het eindbeeld naar 2040 beoordelen we met behulp van dit stoplichtmodel:

- **Groen:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt haalbaar en geïdentificeerde uitdagingen zijn te overkomen.
- **Oranje:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt moeilijk haalbaar en er bestaan significante onzekerheden, doordat er zeer grote veranderingen dienen plaats te vinden op het gebied van technologie, innovatie, financiering en/of aantal arbeidskrachten om de versnelling te realiseren.
- **Rood:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt niet haalbaar. Bereiken van het eindbeeld in 2045 is mogelijk haalbaar. Dit betekent overigens wel dat er met zeer stringente maatregelen en grote veranderingen een aanzienlijke versnelling van emissiereductie kan worden gerealiseerd. Tot het halen van het eindbeeld blijven tijdelijk extra restemissies ten opzichte van dat eindbeeld, die gecompenseerd moeten worden.

Daarnaast is ook naar de som van de afzonderlijke analyse van de lenzen en de sectoren gekeken, hiervoor passen we de volgende beoordeling toe:

- **Som sector:** Combinatie van beoordeling afzonderlijke lenzen; oranje bij 3 of meer oranje beoordelingen en rood vanaf 4 of meer oranje óf 1 rode beoordeling.
Som lens: Combinatie van beoordeling afzonderlijke lenzen; oranje bij 3 of meer oranje beoordelingen en rood bij 1 of meer rode beoordeling.

⁵ De investeringen die nodig zijn bovenop de “vervangingsinvesteringen” van het huidige energiesysteem noemen we meerinvesteringen. Een vervangingsinvestering is de investering nodig om een bestaande asset te vervangen door een andere asset.

Tabel 2. Een overzicht van de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040, bekeken door 7 lenzen.

Sector	Sub-sector	Lens							Som van Sector
		Beleid	Economisch	Sociaal, maatschappelijk en cultureel	Milieukundig	Technologisch	Infrastructureel	Ruimtelijk	
Elektriciteit en warmte	Opwek, infrastructuur en flex	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow
Mobiliteit	Personen	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green
	Goederen	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green
	Mobiele werktuigen + binnenvaart en spoor	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Green
Industrie	ETS2	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Gebouwde omgeving	Woningen	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Red
	Utiliteitsbouw	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	Yellow
Landbouw	Energetische emissies en methaanslip (GTB)	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green
	Niet energetische emissies	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Landgebruik	LULUCF	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Negatieve emissies		Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green
Som van lens		Green	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green

Sectorale analyses

De **elektriciteitssector** ondergaat een fundamentele transitie waarbij het systeem verschuift van een focus op operationele kosten (OPEX) naar een focus op investeringskosten (CAPEX). Deze verschuiving vraagt om nieuwe financieringsvormen en creëert onzekerheid bij investeerders. Zonder zekerheid op inkomsten vindt onvoldoende opschaling van duurzame productie plaats. De benodigde verzwaring van het elektriciteitsnetwerk vormt een tweede cruciaal aandachtspunt - deze moet op tijd gerealiseerd worden om de toegenomen elektriciteitsvraag aan te kunnen, terwijl er nu al sprake is van netcongestie in grote delen van het land. Een derde belangrijke uitdaging is de beschikbaarheid van kritieke materialen voor batterijen, netwerkapparatuur en duurzame opwekkingsinstallaties. Er is een divers beleidspakket nodig waarin zowel investeringen in duurzame technieken worden gestimuleerd als het uitrollen en financieren van extra infrastructuur wordt vergemakkelijkt.

De **mobilitéissector** kent twee hoofduitdagingen. Ten eerste is er onvoldoende netcapaciteit voor het laden van elektrische voertuigen. Dit vraagt om slimme oplossingen voor laadinfrastructuur en gedragsverandering bij gebruikers wat betreft laden. Ten tweede bestaat er nog onzekerheid over de meest geschikte technologie voor zwaar transport. Hoewel batterij-elektrisch voor veel toepassingen de aangewezen route lijkt, zijn er voor specifieke gebruiksscenario's mogelijk andere oplossingen nodig zoals waterstof. Deze technologische onzekerheid remt investeringen en vertraagt de transitie in deze subsector.

Voor de **industrie** vormen vooral de beschikbaarheid van elektriciteitsinfrastructuur en de financiering van verduurzaming belangrijke knelpunten. De beschikbaarheid van voldoende netcapaciteit voor elektrificatie is cruciaal, maar niet gegarandeerd. Daarnaast hebben sommige bedrijven moeite om de benodigde investeringen te financieren, zelfs als deze op termijn rendabel zijn. Beide knelpunten creëren onzekerheid bij bedrijven over het juiste moment om te investeren in verduurzaming. We bevelen aan om de verduurzaming op verschillende manieren financieel te ondersteunen en vertragende factoren weg te nemen, en tegelijkertijd de emissies in de industrie te normeren.

De verduurzaming van de **gebouwde omgeving** wordt belemmerd door meerdere factoren. Het belangrijkste knelpunt is de beschikbaarheid van arbeid om verduurzamende maatregelen uit te voeren voor de miljoenen huizen in Nederland. Daarnaast zijn de kosten voor verduurzaming hoog, vooral voor kwetsbare groepen, wat vraagt om nieuwe financieringsconstructies en mogelijk extra ondersteuning. De benodigde verzwaring van het elektriciteitsnet vormt ook hier een knelpunt, vooral in oudere wijken. Het draagvlak voor verduurzaming verschilt per bevolkingsgroep; met name bij ouderen bestaat soms weerstand tegen ingrijpende aanpassingen aan hun woning. Dit vraagt om gerichte communicatie en ondersteuning. Het eindbeeld van de transitie is in de gebouwde omgeving in 2040 niet volledig haalbaar.

De **landbouwsector** staat voor de uitdaging om het verdienmodel aan te passen naar een meer extensieve vorm van landbouw. Dit vraagt om fundamentele veranderingen in de bedrijfsvoering en mogelijk ook om aanpassingen in de hele keten. De transitie moet zodanig vormgegeven worden dat boeren een gezond verdienmodel behouden, terwijl tegelijkertijd de uitstoot significant wordt verminderd. Dit spanningsveld vraagt om nieuwe verdienmodellen en mogelijk ook om aanvullende verdiensten uit bijvoorbeeld natuurbeheer of andere diensten.

De **LULUCF-sector** kent volgens de lenzenanalyse ook met name economische obstakels die gepaard gaan met het afwaarderen van grond in met name veengebieden. Ook zullen er fors meer bomen gepland worden. Het voordeel is dat de benodigde technieken en kennis grotendeels beschikbaar zijn.

Bij **negatieve emissies** zijn veel maatregelen goed in te passen in Nederland, maar vormen kosten van bepaalde technologieën zoals Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) een aandachtspunt. Deze technologieën zijn mogelijk van belang voor het bereiken van klimaatneutraliteit, maar zijn momenteel nog kostbaar. Er is innovatie nodig

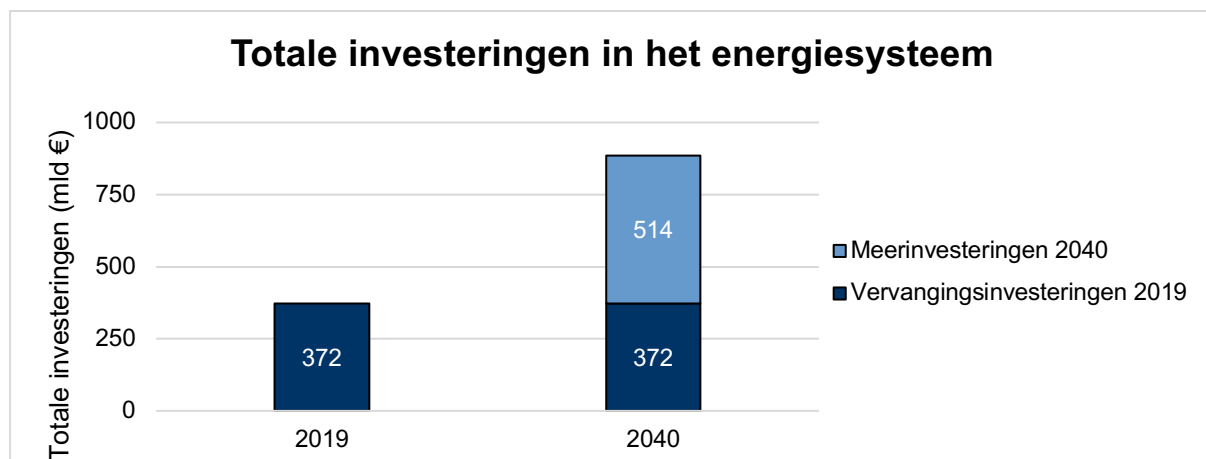
om de kosten te verlagen. Daarnaast bestaat er ook nog onzekerheid over de exacte rol die verschillende vormen van negatieve emissies moeten gaan spelen in het totale systeem.

Sectoroverstijgende analyses

Uit de sectoranalyses kwamen enkele thema's naar voren die in meerdere sectoren een belangrijke rol spelen.

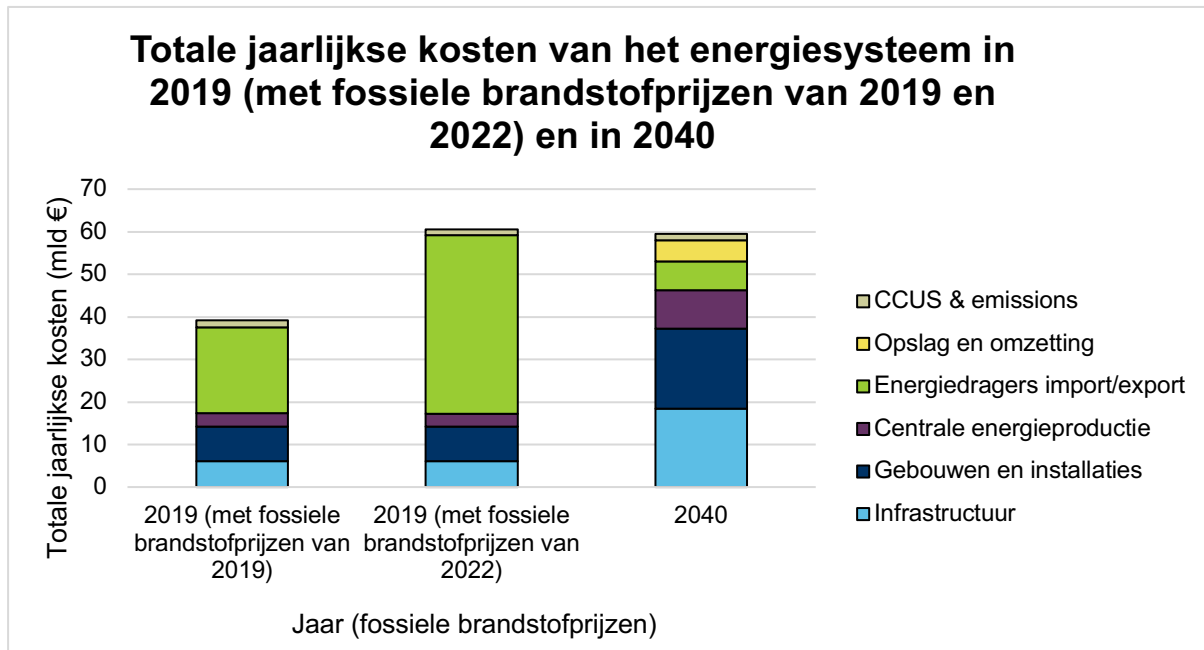
De transitie naar klimaatneutraliteit vraagt om zeer grote jaarlijkse **investeringen**⁶. Figuur 1 geeft de totale investeringen die nodig zijn om het energiesysteem van 2019 en 2040 in zijn geheel en op één moment opnieuw op te bouwen. De investeringen voor 2040 zullen jaarlijks worden gedaan en -afgeschreven zodat de *jaarlijkse* meerinvesteringen uitkomen op 24 – 34 miljard euro per jaar.

De jaarlijkse investeringen voor het 2040 energiesysteem moeten op de juiste manier gefinancierd worden, wat nieuwe financieringsvormen vraagt. De verschuiving van operationele (vooral variabele) kosten naar investeringen in duurzame capaciteit (vooral vaste kosten) betekent ook dat er anders naar businesscases gekeken moet worden. Dit vraagt om aanpassingen in het financiële systeem en waarschijnlijk ook om nieuwe vormen van risicodeling tussen publieke en private partijen, met name in de aanloopfase waar aanbod op vraag voorloopt.



Figuur 1. De totale investeringen die nodig zijn om het energiesysteem van 2019 en 2040 in zijn geheel en op één moment opnieuw op te bouwen, een zogenaamde greenfield benadering (in mld € vandaag de dag). De totale investeringen voor 2019 zijn gedefinieerd als de vervangingsinvesteringen voor dezelfde assets die in 2019 bestonden. De totale investeringen voor 2040 zijn gedefinieerd als de hoogte van vervangingsinvesteringen voor 2019 (bestaande uit mogelijk andere assetinvesteringen dan in 2019) plus meerinvesteringen die hier bovenop nodig zijn.

⁶ Met investeringen refereren we naar de som van publieke én private investeringen in individuele assets (zie Tabel 30) die het gehele energiesysteem opnieuw opbouwen, een zogenaamde greenfield benadering.



Figuur 2. De totale jaarlijkse nationale kosten van het energiesysteem in 2019 en 2040. Voor 2019 is onderscheid gemaakt tussen 2019 met de fossiele brandstofprijzen van 2019 en 2022 (gecorrigeerd voor inflatie).

De hogere investeringen vertalen zich niet noodzakelijk in hogere jaarlijkse **nationale kosten**⁷, omdat de investeringen over periodes van 15 – 40 jaar kunnen worden afgeschreven en omdat de momenteel jaarlijkse uitgave aan de import van steenkool, aardolie en aardgas ten behoeve van warmte en elektriciteit verdwijnt. De mate waarin de nationale kosten toe-/afnemen hangt sterk af van de prijs van energiebronnen. Bovenstaande figuur toont dit aan. Het geeft de jaarlijkse kosten van het energiesysteem aan voor 2019 en voor 2019, maar dan op basis van de brandstofprijzen van 2022. In dit tweede scenario zijn de jaarlijkse kosten vergelijkbaar met de verwachte kosten in 2040.

De **infrastructurele** uitdagingen concentreren zich rond drie hoofdthema's. Ten eerste de tijdige verzwaring van het elektriciteitsnet, wat cruciaal is voor vrijwel alle sectoren. Ten tweede de beperkte beschikbaarheid van arbeidskrachten voor deze netuitbreiding. Ten derde de complexe coördinatie tussen verschillende energiedragers zoals elektriciteit, warmte en waterstof. Deze uitdagingen vragen om slimme aansturing van energie-intensieve apparaten en om nieuwe vormen van prioritering en flexibiliteit in het systeem. Het is voorstelbaar dat de gezamenlijke netbeheerders in staat zijn om in de loop van 2030 tot 2040 het "maakbaarheidsgat" te dichten en tegen 2040 de benodigde netverzwaringen en uitbreidingen te hebben gerealiseerd.

De **arbeidsmarkt** vormt een cruciale factor in het realiseren van klimaatneutraliteit. Er is een grote vraag naar technisch geschoold personeel, terwijl de opleidingscapaciteit beperkt is. Daarnaast spelen er uitdagingen rond de huisvesting van arbeidsmigranten die mogelijk nodig zijn om in de arbeidsvraag te voorzien. Dit vraagt om een integrale aanpak waarbij onderwijs, arbeidsmarkt en huisvesting in samenhang worden gezien. Op

⁷ Nationale jaarlijkse kosten zijn het saldo van financiële gevolgen van het energiesysteem voor Nederland als geheel (publiek en privaat). Concreet zijn de nationale jaarlijkse kosten de som van jaarlijkse nationale afschrijvings- en financieringskosten van een investering (CAPEX) en de som van alle operationele kosten (OPEX), exclusief belastingen en subsidies maar inclusief besparingen.

de piek van de energietransitie zijn er 560.000 extra arbeidsplaatsen nodig. Dat is ongeveer acht procent van de huidige arbeidsmarkt. Het is voorstelbaar dat we door een andere inzet van de beschikbare mensen in Nederland en de inzet van tijdelijke buitenlandse werknemers deze opgave aankunnen.

De transitie naar een netto klimaatneutraal Nederland in 2040 vereist een aanzienlijke inzet van **schaarse grondstoffen** voor windturbines, zonnepanelen, batterijen en elektrische voertuigen. Nederland is hierbij sterk afhankelijk van import, met name uit China dat negentig procent marktaandeel heeft in zeldzame aardmetalen. Hoewel er voldoende materialen beschikbaar zijn, zorgen de lange ontwikkeltijd voor nieuwe mijnen, groeiende wereldwijde vraag en geopolitieke spanningen voor uitdagingen. Deze uitdagingen kunnen worden aangepakt door monitoring van beschikbaarheid en prijzen, het ontwikkelen van alternatieven met minder kritieke grondstoffen, en maximale inzet op recycling. Door vroeg te handelen kan Nederland hierin een strategisch voordeel opbouwen.

Discussie

Sinds de Tweede Wereldoorlog heeft Nederland een sterke industriële groei doorgemaakt. Ons consumptiepatroon is veranderd van een dieet waarin vlees en vis uitzonderingen waren, naar een overconsumptie van dierlijke eiwitten. We winkelen in supermarkten waar tachtig procent van de aangeboden producten ongezond is, terwijl de gezonde levensverwachting van Nederlanders al jaren daalt. Het online bestellen van producten uit China is gemeengoed geworden, evenals het kopen van kleding die slechts enkele keren gedragen wordt. Daarnaast is het aantal vierkante meters woonruimte per persoon sterk toegenomen - ruimte die in de winter verwarmd moet worden. Vliegen voor vakantie is veranderd van een luxe voor enkelen naar een vanzelfsprekendheid voor velen.

Een scenario waarin we niet alle energie-intensieve industrie in Nederland willen of kunnen behouden (industrie vertegenwoordigt ongeveer vijftig procent van de elektriciteitsvraag in 2040), waarin de gemiddelde Nederlander langer gezond is (en ook beter kan deelnemen aan het arbeidsproces), waarin we een minder materiaal-intensief leven leiden (bijvoorbeeld minder producten uit China bestellen), anders op vakantie gaan (reizen per trein en elektrische auto in plaats van vliegen), gezonder en plantaardiger eten van Nederlandse bodem en genoeg nemen met minder vierkante meters woonoppervlakte per individu, zou het doel van netto klimaatneutraliteit eenvoudiger en goedkoper binnen bereik kunnen brengen. Met deze factoren hebben we in deze analyse echter geen rekening gehouden. Onze analyse toont aan dat Nederland in 2040 netto klimaatneutraal kan worden, zelfs in een scenario waarin de huidige levensstijl en industrie grotendeels behouden blijven.

Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd.

- Hoofdstuk 2 gaat in op het klimaatbeleid in Nederland en de EU en op de transitiescenario's die er voor Nederland beschikbaar zijn vanuit de Netbeheerders en PBL.
- Hoofdstuk 3 beschrijft de kwantitatieve en kwalitatieve methodiek toegepast om de haalbaarheid van klimaatneutraliteit in 2040 te beoordelen. En hoe we door verschillende lenzen kijken naar de deze haalbaarheid.
- Hoofdstuk 4 vormt de kern van het rapport met daarin per sector een analyse naar de haalbaarheid om versnelling van de transitie met tien jaar te realiseren.
- In hoofdstuk 5 gaan we in op een aantal sector overstijgende thema's, namelijk de financiering van de energietransitie, infrastructuur, de beschikbaarheid van arbeid en schaarse materialen en grondstoffen.
- In hoofdstuk 6 bespreken we de totale restemissies die overblijven, als optelsom van de restemissies per sector in 2040. En hoe je deze restemissies kan compenseren met negatieve emissies. Vervolgens geven we onze conclusies ten aanzien van de haalbaarheid van klimaatneutraliteit in 2040 en bespreken we hoe aankijken tegen de robuustheid van deze conclusies.

Voorwoord	2
Samenvatting	3
Aanleiding en doel	3
Methodologie	3
Resultaat analyse	3
Conclusies	5
Sectorale analyses	6
Sectoroverstijgende analyses	8
Discussie	10
Leeswijzer	11
1. Introductie	13
1.1. Inleiding	13
1.2. Doel	13
1.3. Scope van dit onderzoek	15
1.4. Ontwikkeling energieaanbod en CO ₂ eq emissies 1990 – 2050, II3050-NAT	16
2. Klimaatbeleid en de transitiescenario's van Nederland	19
2.1. Klimaatbeleid in Nederland	19
2.2. Nationale klimaat- en energietransitie scenario's	20
2.3. Europees energie- en klimaatbeleid	23
3. Analyse naar de haalbaarheid van klimaatneutraliteit in 2040 – onze aanpak	28
3.1. Inleiding	28
3.2. Het II3050 scenario Nationaal Leiderschap	28
3.3. Kwantitatief: Het Klimaatzaak 2040 scenario	29
3.4. Resultaten van het Klimaatzaak 2040 scenario	31
3.5. Kwalitatief: Aanvullende analyse per sector	35
3.6. Restemissies en potentie negatieve emissies	37
4. Sectorale Analyses haalbaarheid versnelling transitie	38
4.1. Inleiding	38
4.2. Analyse sector: Elektriciteit en warmte	40
4.3. Analyse sector: Mobiliteit	58
4.4. Analyse sector: Industrie	90
4.5. Analyse sector: Gebouwde omgeving	107
4.6. Analyse sector: Landbouw	133
4.7. Analyse sector: Landgebruik	152
4.8. Analyse potentie negatieve emissies	163
5. Sector overstijgende thema's	187
5.1. Inleiding	187
5.2. Nationale kosten en investeringen	187
5.3. Infrastructuur	200
5.4. Beschikbaarheid arbeid	207
5.5. Schaarse grondstoffen en materialen	214
6. Conclusie en discussie	225
6.1. Inleiding	225
6.2. Netto klimaatneutraal in 2040	225
6.3. Resultaten analyse	226
6.4. Conclusie haalbaarheid	231
6.5. Discussie	235
Bijlage I: achtergrond bij de ontwikkeling van de scenariostudies ii3050v2	237
Bijlage II: Finland en Oostenrijk in 2035 en 2040 klimaatneutraal	241

1. Introductie

1.1. Inleiding

Stichting Greenpeace Nederland heeft samen met negen mede-eisers van Bonaire op 11 januari 2024 de Nederlandse Staat gedagvaard. Bonaire heeft de status van bijzondere gemeente in Nederland, maar in tegenstelling tot Europees Nederland is er voor Caribisch Nederland geen deltaplan die de inwoners bescherming moet bieden tegen de gevolgen van klimaatverandering. Dit terwijl Bonaire zeer kwetsbaar is voor die gevolgen. Om die reden is het ook cruciaal dat de opwarming van de aarde beperkt blijft tot onder de 1.5 graden Celsius aan het eind van deze eeuw, ten opzichte van de pre-industriële temperatuur. De Nederlandse Staat stelt zich achter dit doel dat vastgelegd is in het klimaatakkoord van Parijs, maar handelt er volgens Greenpeace Nederland en mede-eisers onvoldoende naar. Nederland moet zijn eerlijke bijdrage leveren en dat betekent dat voor een rijk land als Nederland met een hoge historische uitstoot, de uitstoot van broeikasgassen sneller naar netto nul moet dan het mondiale gemiddelde dat nodig is om het 1.5 gradendoel te halen. Greenpeace Nederland en mede-eisers vorderen netto nul uitstoot van nationale emissies vanaf Nederlands grondgebied uiterlijk in 2040⁸. In de Klimaatwet staat nu netto nul uitstoot in 2050. De Europese Unie buigt zich over een Europees Klimaatdoel voor 2040, waarbij Nederland het standpunt inneemt dat de uitstoot van broeikasgassen dan met 90% moet zijn afgenomen. De vordering van Greenpeace Nederland samen met Natuur en Milieu trekt netto nul uitstoot tien jaar naar voren. Het is belangrijk dat dit ook realistisch haalbaar is voor de Nederlandse Staat. Om die reden hebben Greenpeace Nederland en Natuur en Milieu opdracht gegeven aan Kalavasta, Berenschot en CE Delft om dit te onderzoeken.

1.2. Doel

Het doel van dit onderzoek en deze rapportage is de haalbaarheid van netto klimaatneutraliteit voor Nederland in 2040 te bestuderen. De Nederlandse regering streeft nu in lijn met de EU naar klimaatneutraliteit in 2050. De opgave 10 jaar naar voren halen en het traject verkorten van 25 jaar naar 15 jaar vraagt om een grondig onafhankelijk onderzoek naar de haalbaarheid.

Tegelijkertijd zien we dat de EU en in lijn daarmee de Nederlandse regering zijn klimaatdoelen steeds verder aanscherpt en nu aangeeft te streven naar 90% emissiereductie in 2040. Aangenomen dat dit doel gehaald wordt, is de opgave waar in dit rapport naar gekeken wordt dus met name een analyse naar de haalbaarheid van een versnelling van “slechts” 10%, van 90% naar 100%, ten opzichte van het basispad.

In welke mate de overheid in staat is invloed uit te oefenen op de reductie van broeikasgassen blijkt wellicht uit de statistiek waarin tussen 1990 (Kyoto afspraken) en

⁸ Als we in dit rapport het hebben over emissiereductie dan wordt daarmee bedoeld de reductie van de uitstoot van scope 1 broeikasgassen in Nederland. Met scope 1 wordt bedoeld de directe uitstoot van broeikasgassen door een sector van de samenleving in Nederland. Direct of indirect veroorzaakte uitstoot van broeikasgassen in het buitenland, bijvoorbeeld vanwege de import van (fossiele) elektriciteit, vallen buiten de scope. Dit is conform hoe in het klimaatakkoord gekeken is naar de uitstoot van de Nederlandse broeikasgassen.

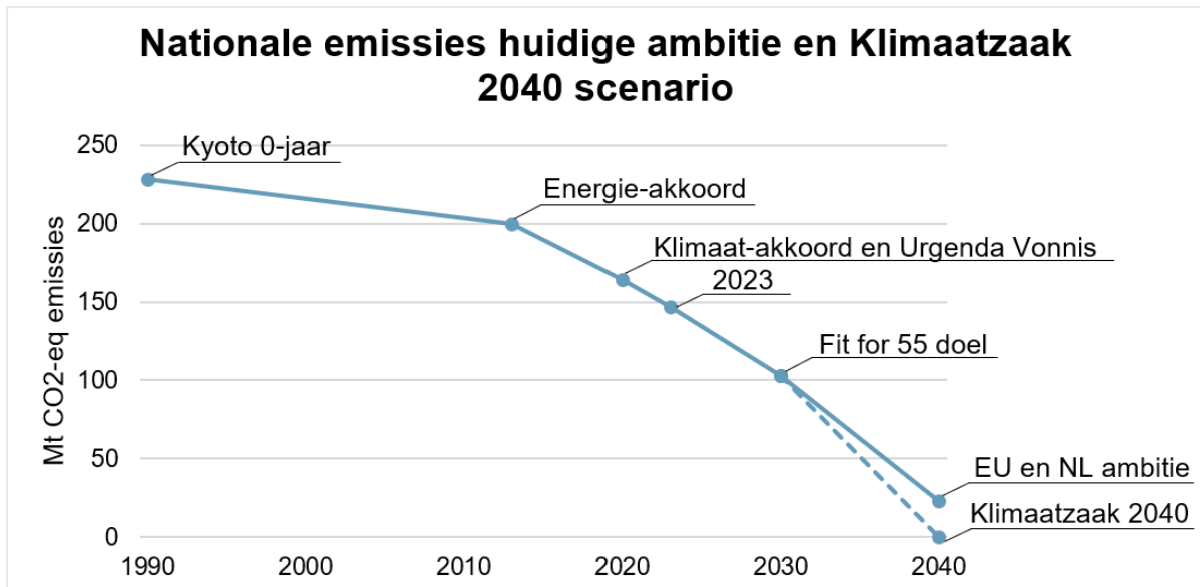
2013 de CO₂ uitstoot toenam maar de emissies van overige broeikasgassen sterk afnam, met name als gevolg van het Montreal Protocol om de ozonlaag te beschermen. Het beleid van de Rijksoverheid concentreerde zich in deze periode op liberalisering van energiemarkten en niet zozeer op emissiereductie van CO₂. In 2013 werd het Energieakkoord gesloten, maar nog steeds was er niet echt aandacht voor dit onderwerp in het beleid en tussen 2013 en 2018 was er slechts sprake van een kleine versnelling. In juni 2019 werd het Klimaatakkoord gesloten en tevens deed de Hoge Raad in december een uitspraak in de Urgenda-Zaak. Vanaf 2020 zien we dan ook een versnelling van de afname van broeikasgassen door zowel stimulerend beleid van de Rijksoverheid, o.a. in de vorm van subsidies en versnelling van procedures, als beprijzend beleid, bijvoorbeeld verhoging van de energiebelasting op aardgas en als normerend beleid, bijvoorbeeld de Nederlandse CO₂ heffing. Ook de kostendaling van groene stroom uit zon-pv en wind, de corona lockdowns en de oorlog tussen Rusland en Oekraïne hebben meegeholpen aan deze besparing omdat de prijs van met name het aardgas is gestegen terwijl de (kost)prijs van groene stroom is gedaald. Het tempo van emissiereductie is in de verschillende hier besproken periodes significant omhoog gegaan. Van 0,5% gemiddeld per jaar tussen 1990 en 2013, naar 1,9% per jaar in de periode tussen 2013 en 2020, naar 3,2% tussen 2020 en 2023.

Om het doel van 55% emissiereductie uit de Klimaatwet te halen, moeten we blijven op ongeveer 3% reductie per jaar. Om de 90% doelen in 2040 te halen moeten we vanaf 2030 versnellen naar 3,5% per jaar. Om het Klimaatzaak doel van 100% voor 2040 moeten we verder versnellen naar 4,5% per jaar, of vóór 2030 een verdere versnelling realiseren.

Tabel 3. Ontwikkeling broeikasgasemissies 1990-2022, prognose 2030 en doelen 2040

Jaar	1990	2013	2020	2023	2030	2040	
Gebeurtenis	Kyoto 0-jaar	Energie-akkoord	Klimaat-akkoord en Urgenda Vonnis	Heden ⁹	Fit for 55 doel	EU en NL ambitie	Onderzocht doel
Totale emissies (Mt CO₂-eq)	228	200	164	147	103	23	0
CO₂ Emissies (Mt)	168	169	138	121	76	17	0
Emissies andere broeikasgassen (Mt CO₂-eq)	60	31	26	26	27	6	0
Gemiddelde jaarlijkse reductie (%)		0,5%	1,8%	3,2%	2,8%	3,5%	4,5%
Reductie ten opzichte van 1990 (%)		12%	25%	36%	55%	90%	100%

⁹ 2023 is het meest recente jaar waarvoor deze data beschikbaar zijn



Figuur 3. De historische nationale emissies van 1990 tot 2023, de emissies in 2030 volgens het Fit for 55 doel, de emissies in 2040 volgens de huidige ambitie en de netto nul in 2040 die in dit rapport wordt onderzocht.

De bovenstaande Tabel 3 suggereert dat een versnelling van de emissiereductie mogelijk is. Dit vereist een aanscherping en vastberaden uitvoering van het overheidsbeleid ingezet door het Klimaatakkoord en het Urgenda vonnis. Dit rapport onderzoekt of deze versnelling haalbaar is, waarbij het gaat om het volhouden van zo'n 3,0% emissiereductie per jaar in de periode 2024-2030 en een verdere versnelling naar 4,5% emissiereductie per jaar in de periode 2030-2040.

1.3 Scope van dit onderzoek

In dit onderzoek wordt per sector geïnventariseerd wat er nodig is – en in hoeverre het haalbaar is – om klimaatneutraal te worden in Nederland in 2040.

De volgende sectoren maken deel uit van deze studie:

- A. Elektriciteit en warmte
- B. Mobiliteit, minus de sub-sectoren die niet in scope zijn (zie 1 hieronder)
- C. Industrie, minus de grotere bedrijven die onder ETS 1 vallen (zie 2 hieronder)
- D. Gebouwde omgeving
- E. Landbouw en landgebruik
- F. Potentie negatieve emissies (ter compensatie van de restemissies in 2040 in 1 t/m 5 hierboven)

De scope van de onderbouwing van Klimaatneutraliteit in 2040 voor Nederland bevat niet alle sectoren in Nederland. De volgende (sub-)sectoren vallen in principe buiten de scope van het onderzoek, omdat deze sectoren niet vallen binnen de definitie van de scope 1 broeikasgasemissies van Nederland of omdat ze al voor 2040 door EU wetgeving (ETS1) en/of afspraken uit het Klimaatakkoord op nul emissies moeten uitkomen.

Het gaat om de volgende (sub)sectoren:

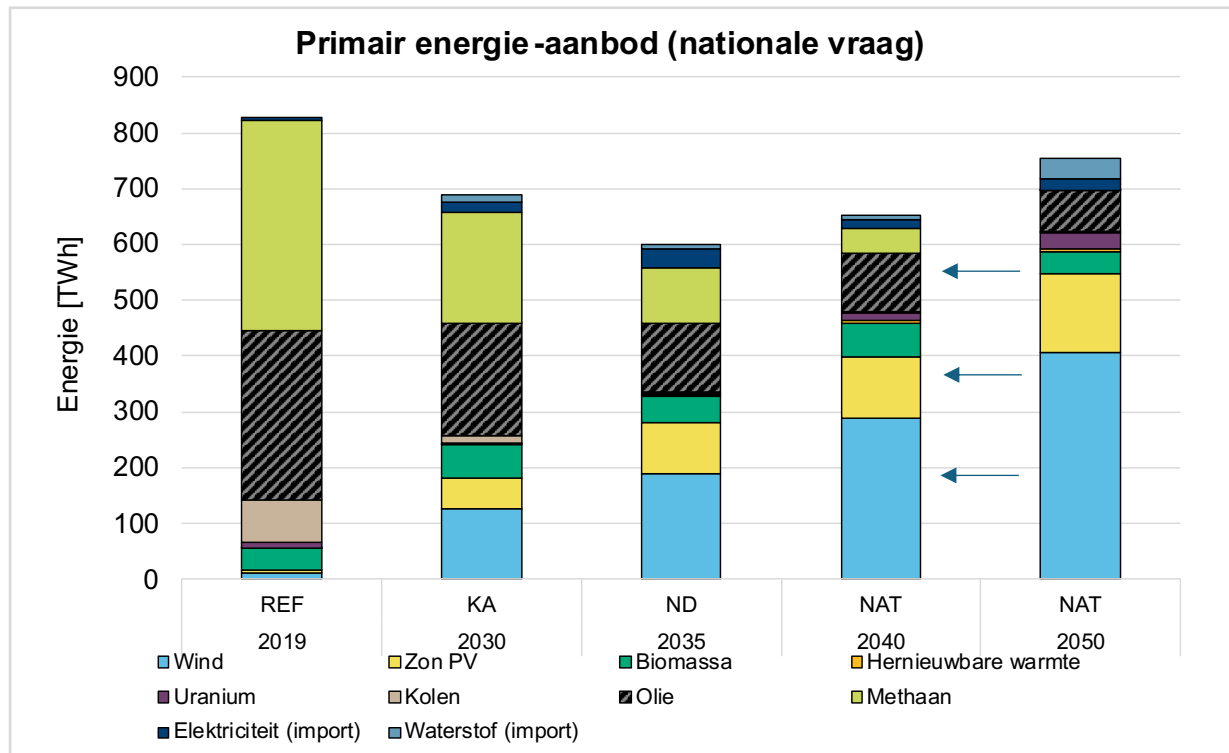
1. Internationale mobiliteit.
 - a. Internationale luchtvaart. Deze wordt niet meegenomen in de optelsom van de Nederlandse emissies in de Klimaatzaak.
 - b. Internationale zeescheepvaart. Ook deze wordt niet meegenomen in de optelsom van de Nederlandse emissies in de Klimaatzaak.
 - c. Binnenvaart buiten de Nederlandse grenzen. De emissies worden toegerekend primair aan de hand van de ingenomen brandstoffen in Nederland.
2. Bedrijven die onder ETS 1 vallen en waarvan het EU-beleid nu is om de rechten die beschikbaar zijn om broeikasgasemissies uit te stoten in 2039 op 0 zullen staan.
 - a. Dit betreft o.a. de grotere industriële bedrijven. Vanaf 2040 zijn er geen emissierechten meer en zullen deze bedrijven emissievrij moeten opereren of hun emissies (laten) compenseren met negatieve emissies. We bespreken dit in meer detail in hoofdstuk 4.4 Analyse sector: Industrie.
 - b. Elektriciteitsproductiebedrijven zullen ook in 2039 geen emissierechten meer kunnen krijgen. Bovendien geldt voor de Nederlandse elektriciteitsproductie sector al via het Nederlandse Klimaatakkoord dat de sector in 2035 emissievrij dient te zijn.
3. Scope 3 emissies
 - a. Spullen en goederen die gekocht worden door Nederlandse burger of bedrijven gevestigd in Nederland in het buitenland en daar scope 1 en/of 2 emissies veroorzaken vallen niet onder de scope.
 - b. Idem worden spullen en goederen, die worden geëxporteerd door Nederlandse bedrijven en in het buitenland tot scope 3 emissies leiden worden niet meegenomen. De scope 1 en/of 2 emissies in Nederland van deze goederen tellen we wel mee.

Ondanks dat ETS1 sectoren (industrie en elektriciteitssector) niet binnen de scope van dit onderzoek vallen is het wel goed om toch een beeld te schetsen van de ontwikkelingen in deze sectoren in Nederland, omdat ze een integraal onderdeel uitmaken van het energiesysteem en een significant deel uitmaken in 2040 van de vraag naar energie (industrie) of de productie van elektriciteit (electriciteitssector). Elektriciteit zorgt voor aanbod van hernieuwbare energie, deze energiedrager is nodig voor de verduurzaming van andere sectoren. De vraag naar hernieuwbare energie en flexibele/regelbare bronnen is bij de ambitie klimaatneutraal 2040 hoger dan huidig voorzien en dat vraagt dus ook om extra investeringen, van dit laatste wordt gekeken naar de haalbaarheid. In hoofdstuk 4.2 wordt ingegaan op de ETS1 Elektriciteit Sector en in hoofdstuk 4.5 behandelen we zowel de ETS1 als ETS2 Industrie.

1.4 Ontwikkeling energielevering en CO₂eq emissies 1990 – 2050, II3050-NAT

In dit rapport kiezen we ervoor om de scenario's van de gezamenlijke Netbeheerders te gebruiken als die als uitgangspunt een klimaatneutraal energiesysteem in 2050 hebben.

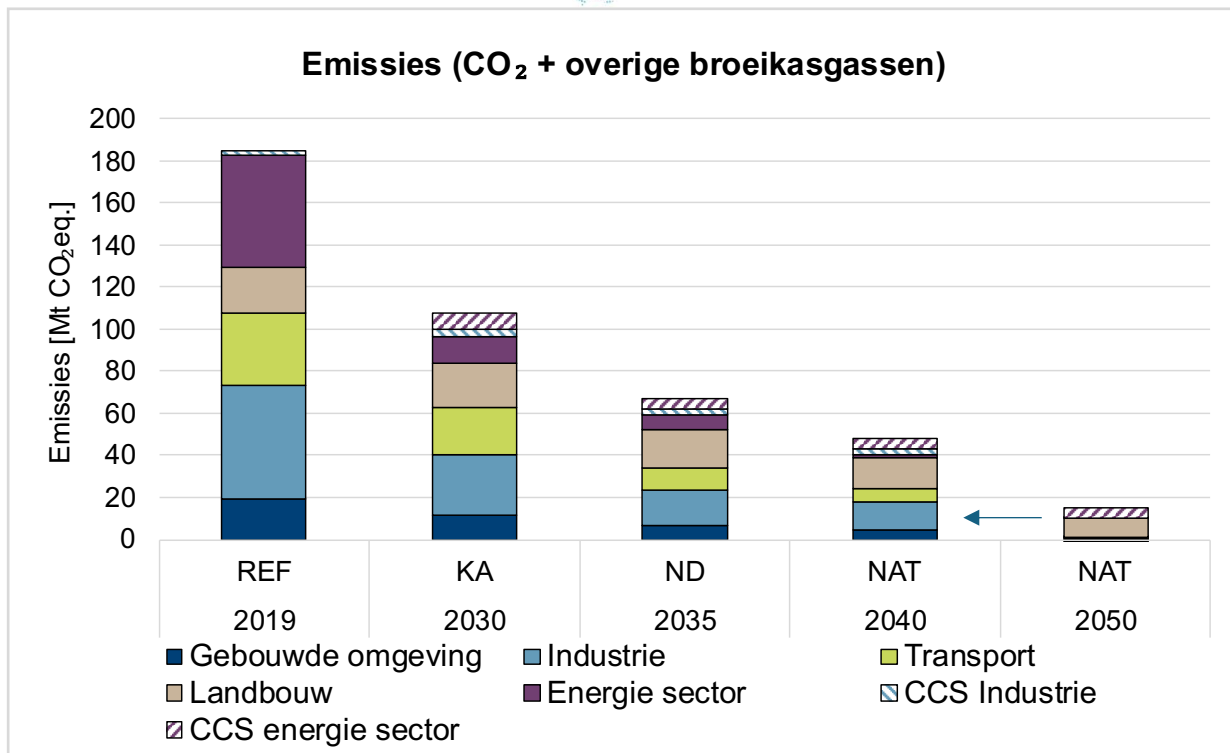
Op basis van deze scenario's voeren we de toets uit; is klimaatneutraliteit mogelijk in 2040. In hoofdstuk 3 gaan we dieper in op de keuzes die we maken met betrekking tot de scenario's voor 2040. In hoofdstuk 3.3 laten we zien waar we de scenario's ongewijzigd hebben overgenomen en waar we aanpassingen hebben gemaakt. In bijlage 1 geven we meer achtergrond over hoe deze scenario's tot stand zijn gekomen en hoe ze worden toegepast door Netbeheerders, de Rijksoverheid en vele anderen. Hier laten we alvast zien wat er gebeurt met de energiemix en de totale hoeveelheid benodigde energie.



Figuur 4. Primair energie-aanbod in de II3050 editie 2 scenario's. Bron: Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's, Netbeheer Nederland, 2023

In bovenstaande Figuur 4 starten we vanuit de situatie zoals die bekend is voor 2019. Dit is het referentie scenario. Verder is er gekozen om in deze grafiek het Klimaatakkoord scenario weer te geven en voor 2035 het scenario Nationale Drivers. De scenario's voor 2030 en 2035 komen uit de onderbouwing van de investeringsplannen van de Netbeheerder voor de periode 2025-2035, die gemaakt zijn in 2024 (afkorting IP2024). Vervolgens hebben we gekozen om het scenario Nationaal Leiderschap voor 2040 en 2050 te kiezen. De exercitie die we hier doen is dat we het **Nationaal Leiderschap scenario voor 2050 van toepassing verklaren op 2040 om te onderzoeken in hoeverre deze verschuiving haalbaar is**. Beide scenario's komen uit de Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050 van de gezamenlijke Netbeheerders (II3050 editie 2).

Figuur 4 laat zien dat de energiemix bijna geheel verandert tussen 2019 en 2050. Van voornamelijk aardolie en aardgas naar voornamelijk wind, zon en waterstof. Zonder dat de hoeveelheid primair aanbod aan energie veel verandert, terwijl Nederland qua inwoneraantal nog wel groeit. Dit laatste komt doordat de rechtstreekse inzet van elektriciteit over het algemeen veel efficiënter is dan het verbranden van fossiele brandstoffen, omdat er minder warmte verloren gaat.



Figuur 5. Broeikasgasemissies in de II3050 editie 2 scenario's. Bron: Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's, Netbeheer Nederland, 2023. Voor 2040 is nog uitgegaan van de indicatieve ambitie om 80% reductie te realiseren. Deze ambitie is nadien aangescherpt tot 90%, dit betekent een versnelling.

De bovenstaande Figuur 5 laat voor dezelfde scenario's zien hoe de emissiereductie verloopt van 2019 – 2050 voor de gekozen scenario's. Ook hier geeft de pijl tussen 2050 en 2040 aan dat we het scenario Nationaal Leiderschap van 2050 van toepassing verklaren op 2040 om te onderzoeken in hoeverre deze verschuiving haalbaar is. Het Nationaal Leiderschap scenario kent nog emissies in 2050 c.q. 2040 in deze studie. Deze emissies zijn onvermijdelijk in 2050 voor de landbouw en soms zeer lastig naar 0 te brengen voor sommige andere sectoren, zoals we in dit rapport nader zullen toelichten. Vandaar dat het onvermijdelijk is dat er ook negatieve emissies worden gecreëerd, in het scenario met name door inzet van biomassa in combinatie met Carbon Capture and Storage (CCS). In hoofdstuk 4.8 gaan we dieper in op het potentieel aan negatieve emissies in Nederland om de Nederlandse restemissies in de verschillende sectoren in 2040 te compenseren.

2. Klimaatbeleid en de transitie scenario's van Nederland

2.1. Klimaatbeleid in Nederland

Er is steeds meer bewijs dat als gevolg van met name de verbranding van fossiele brandstoffen en uitstoot vanuit de (intensieve) veehouderij de aarde opwarmt en dat daarmee het weer verandert en extremer wordt (IPCC, AR6). Gevolg hiervan is dat de zeespiegel jaar op jaar steeds sneller stijgt door het wereldwijd smelten van landijs en uitzetting van het water in de oceanen. De gevolgen van het extremere weer (langdurige droogte, extreme regenval in korte tijd, smelten van gletsjers, hogere zee- en landtemperaturen, orkanen van een steeds hogere categorie en overstromingen etc.) zijn al (bijna) dagelijks in het nieuws te vinden. Evenals de gevolgen voor de natuur en de migratie van mensen uit gebieden die onbewoonbaar (dreigen te) worden^{10 11}.

Het wetenschappelijk bewijs en de eigen waarneming van mensen voor het veranderen van ons klimaat en hoe dit het voortbestaan van ons als mens bedreigd zijn aanleiding geweest voor het sluiten van het Parijs Akkoord. Het Parijs Akkoord is een wereldwijd klimaatakkoord, in 2015 ondertekend door bijna alle landen, met als doel de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder 2°C, met inspanning om het te beperken tot 1,5°C, ten opzichte van het pre-industriële niveau. Het akkoord verplicht landen hun uitstoot van broeikasgassen te verminderen door nationale klimaatplannen op te stellen en deze regelmatig bij te werken. Daarnaast bevat het afspraken over financiële steun aan kwetsbare landen en over samenwerking om de effecten van klimaatverandering aan te pakken.

Mede als gevolg van het Parijs Akkoord is in Nederland gewerkt aan het Klimaatakkoord.

Het **Nederlands Klimaatakkoord** is een nationaal plan uit 2019, opgesteld door de overheid, bedrijven en maatschappelijke organisaties, met als doel de uitstoot van broeikasgassen in Nederland in 2030 met 49% te verminderen ten opzichte van 1990. Het akkoord bevat maatregelen in verschillende sectoren, zoals energie, industrie, mobiliteit, landbouw en de gebouwde omgeving, om deze doelstelling te halen. Daarnaast wordt samenwerking bevorderd en financiële steun geregeld om de overgang naar een duurzame economie mogelijk te maken.

Het Klimaatakkoord is weer mede aanleiding geweest tot het wettelijk verankeren van datgene wat er in het Parijs Akkoord en het Klimaatakkoord is afgesproken.

De **Klimaatwet**¹², ingevoerd in 2019, legt wettelijk vast dat Nederland de uitstoot van broeikasgassen in 2030 met 55% moet verminderen ten opzichte van 1990 en de netto-uitstoot van broeikasgassen uiterlijk in 2050 tot nul reduceert. De wet verplicht de regering om elk jaar een Klimaatnota te presenteren waarin de voortgang van de klimaatdoelen wordt geëvalueerd. Hiermee biedt de wet een kader voor

¹⁰ De rapporten van het IPCC beschrijven de veranderend situatie in ons klimaat en de gevolgen daarvan zie <https://www.ipcc.ch/synthesis-report/>

¹¹ Op een website van de Nasa worden deze veranderingen in kaart gebracht en worden de trends getoond. Zie <https://science.nasa.gov/climate-change/>

¹² Klimaatwet, artikel 2, lid 1a, [wetten.nl - Regeling - Klimaatwet - BWBR0042394](https://wetten.nl/Regeling-Klimaatwet-BWBR0042394) (overheid.nl)

langetermijnbeleid om klimaatverandering tegen te gaan en een duurzame economie te realiseren.

Het **Nationaal Programma Energiesystemen (NPE)**¹³ is een overheidsinitiatief dat de energietransitie in Nederland ondersteunt door te plannen voor een duurzaam, betrouwbaar en betaalbaar energiesysteem voor de toekomst. In het NPE staat een langetermijnvisie op het energiesysteem in 2050. Het programma richt zich op de benodigde infrastructuur en technologieën, zoals waterstof, energieopslag en slimme netwerken, om de groei van hernieuwbare energie mogelijk te maken. Het NPE coördineert de samenwerking tussen verschillende sectoren en overheidslagen om de klimaatdoelen van Nederland, zoals vastgelegd in de Klimaatwet, te bereiken.

2.2. Nationale klimaat- en energietransitie scenario's

Om een idee van de toekomst te kunnen hebben, is het noodzakelijk dat er met behulp van modellen en onderzoek beelden van de toekomst worden gemaakt. Zowel kwalitatief als kwantitatief. Vaak noemen we zo'n beeld een scenario. Bij iedere beeld van de toekomst is er onzekerheid over hoe ontwikkelingen die we nu zien gaan uitpakken en is er altijd de mogelijkheid dat mogelijke ontwikkelingen over het hoofd worden gezien. Vandaar dat we bij het opstellen van toekomstscenario's vaak uitgaan van meerdere scenario's waarin sommige onzekerheden zich meer of minder manifesteren in een scenario. Met energietransitiescenario's is echter iets bijzonders aan de hand en dat is, dat we ervan uitgaan dat de manier waarop we energie gebruiken - en onze samenleving daarop inrichten - in hoge mate maakbaar is. Dus dat we eigenlijk als mensen kunnen sturen op de realisatie van een scenario. Vandaar dat we er in dit rapport voor kiezen om uit gaan van bepaalde scenario's, die het beste aansluiten bij de gedachte dat we in Nederland in hoge mate zelf kunnen bepalen dat we al in 2040 klimaatneutraal dienen te zijn.

Bij het kiezen van de scenario's willen we uitgaan van scenario's van recente datum, die al kwantitatief zijn uitgewerkt en die algemeen erkend zijn en in gebruik bij de Rijksoverheid en diverse andere organisaties. Daarmee is de keuze van het aantal scenario's waaruit we kunnen kiezen voor onze analyse beperkt. Hieronder gaan we verder in op welke scenario's beschikbaar zijn voor Nederland die ook recent, kwantitatief en algemeen erkend zijn.

In dit rapport wordt gebruik gemaakt van hoofdzakelijk de volgende studies:

1. De scenario studies van de gezamenlijke Netbeheerders en in het bijzonder de Integrale Infrastructuur- en energiesysteemverkenning 2030-2050 (editie 2). Binnen die scenariostudie zullen we voornamelijk gebruik maken van het Nationaal Leiderschap scenario voor 2040 en 2050¹⁴, omdat dit uitgaat van maximale sturing vanuit de Nederlandse Rijksoverheid.

¹³ <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2023/12/01/nationaal-plan-energiesysteem>

¹⁴ [Het energiesysteem van de toekomst: de I13050-scenario's](#), Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050, Netbeheer Nederland, 30 juni 2023,

2. De analyses van het Plan Bureau voor de Leefomgeving (PBL) over de haalbaarheid van 90% emissiereductie in 2040 en 100% emissiereductie in 2050^{15, 16} voor Nederland.

Daar waar de Netbeheerders in II3050 editie 2 nog uitgingen van ongeveer 80% emissiereductie in 2040 en 100% in 2050, bekeek PBL in 2024 of 90% emissiereductie in 2040 en 100% of meer mogelijk is in 2050.

2.2.1 De scenario studies (II305017) van de gezamenlijke Netbeheerders

Het scenario rapport (II3050 editie 2) van de gezamenlijke Netbeheerders dat we voor dit rapport zullen gebruiken is tot stand gekomen als update van een vorige set van scenario's (II3050 editie 1¹⁸). De aanleiding voor het scenario rapport (II3050 editie 1), die de gezamenlijke Netbeheerders hebben gemaakt, zijn de afspraken die gemaakt zijn in het Klimaatakkoord van 2019¹⁹. In het Klimaatakkoord staat op pagina 187 : “*Gasunie en TenneT starten in 2019, samen met de regionale netbeheerders, een integrale infrastructuurverkenning 2030-2050. Oplevering is voorzien in 2021*”. Sinds 2019 wordt er door een team van eerst ongeveer tien mensen en voor daaropvolgende edities, tientallen mensen gewerkt aan de verbetering en verfijning van de scenario's voor de periode 2030-2050.

Zowel Berenschot als Kalavasta hebben een belangrijke bijdrage geleverd aan deze integrale infrastructuurverkenning editie 1 en 2. Zij deden dat in het verlengde van scenario's, die al in November 2017 door CE Delft met de gezamenlijke Netbeheerders waren ontwikkeld²⁰. Inmiddels wordt er door de gezamenlijke netbeheerders, Berenschot en Kalavasta gewerkt aan editie 3, de resultaten daarvan zullen pas in 2025 beschikbaar komen.

2.2.2 De energietransitie scenario's van het PBL

De rol van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) richting de Rijksoverheid is voornamelijk gericht op het bieden van onafhankelijke, wetenschappelijk onderbouwde analyses en adviezen om beleid te ondersteunen en vorm te geven. PBL vervult een cruciale rol in het inzichtelijk maken van de complexe vraagstukken die verbonden zijn aan het realiseren van klimaatdoelen, zoals klimaatneutraliteit in 2050.

¹⁵ Trajectverkenning klimaatneutraal 2050, Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050, PBL, 28 juni 2024, <https://www.pbl.nl/publicaties/trajectverkenning-klimaatneutraal-2050>

¹⁶ Analysis of cost-effective reduction pathways for major emitting countries to achieve the Paris Agreement climate goal, PBL, 2023 <https://www.pbl.nl/en/publications/analysis-of-cost-effective-reduction-pathways-for-major-emitting-countries-to-achieve-the-paris-agreement-climate>

¹⁷ II3050 is een afkorting voor Integrale Infrastructuurverkenning voor de periode 2030 – 2050. Deze afkorting werd gehanteerd voor de eerste verkenning uit 2020. Voor de tweede editie is de afkorting gehandhaafd maar nu staat dit voor Integrale Energiesysteemverkenning voor de periode 2030 – 2050.

¹⁸ *Klimaatneutrale Energiescenario's 2050*, Berenschot en Kalavasta, Maart 2020

¹⁹ *Klimaatakkoord*, 28 juni 2019, pagina 187,

²⁰ *Net voor de Toekomst*, Netbeheer Nederland, November 2017,

De Klimaat- en Energieverkenning 2024

De Klimaat- en Energieverkenning (KEV)²¹ wordt jaarlijks opgesteld door het PBL in samenwerking met andere organisaties. Het dient als monitoringsinstrument voor het Nederlandse klimaatbeleid en laat zien welke beleidsmaatregelen effect hebben.

De conclusies van de KEV2024 laten zien hoe noodzakelijk het is dat het kabinet extra beleid formuleert om de doelen te kunnen halen.

Nederland dreigt het klimaatdoel van 55% emissiereductie in 2030 te missen, en extra snelwerkend beleid is nodig om dit doel te halen. Momenteel ligt het land met vastgesteld en voorgenomen beleid op een reductie van 49% (44 tot 52%), wat lager is dan de schatting van vorig jaar. Vertragingen, zoals bij windparken en groene waterstofproductie, en het schrappen van maatregelen zoals kilometerbeprijzing en de verplichting hybride warmtepomp, zijn factoren die de voortgang belemmeren. Er is nog een reductie van 16 megaton nodig voor een 50% kans om het doel te halen, oplopend tot 24 megaton voor een zekerheid van 95%.

In de afgelopen twee jaar is er vooruitgang geboekt door nieuwe regelgeving en subsidies, vooral in mobiliteit, de gebouwde omgeving en de industrie. Echter, de elektriciteitssector stagneert door de lager dan verwachte elektriciteitsvraag en vertragingen bij de bouw van windparken. In 2030 zal naar schatting 70% van de elektriciteit hernieuwbaar zijn, lager dan de eerdere schatting van 85%. Volgens de KEV2024 is de elektriciteitssector in 2035 ook nog niet fossielvrij en verwacht men circa 8 Mton aan restemissies.

Het ontwikkelen en invoeren van beleid kost tijd; maatregelen die effect hebben binnen enkele jaren, zoals belastingaanpassingen en transpositie van Europees beleid, zijn cruciaal om de doelen te halen. Tegelijkertijd moet er ook aandacht zijn voor lange termijn beleid voor de doelen van 2040 en 2050, waarbij een versnelling nodig is om een jaarlijkse reductie van 7,3 megaton te halen. Waarbij PBL het beleid nog beoordeelt op 0 emissies in 2050 en niet zoals in dit rapport in 2040.

Nederland ligt wel op schema voor het Europese ESR-doel voor sectoren buiten het emissiehandelssysteem ETS1, mede door de daling van emissies door corona en de stijgende hernieuwbare energieproductie. Toch zal vanaf 2027 de uitstoot in deze sectoren mogelijk boven het emissiepad komen te liggen. Verder zijn de EU doelstellingen voor hernieuwbare energie aangescherpt naar 39% in 2030, maar de huidige raming van 30-37% blijft hieronder, door onder andere minder inzet van wind en zonne-energie. Ook de energiebesparingsdoelen van de EU vragen meer aandacht.

PBL geeft met de KEV2024 een duidelijk signaal af aan de politiek dat er stringenter en extra beleid nodig is van de Rijksoverheid om de klimaatdoelen voor 2030 en daarna te kunnen halen.

²¹ <https://www.pbl.nl/kev>

De studie Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050

Een andere studie van PBL, de Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 bespreekt de haalbaarheid van klimaatneutraliteit in 2050 evenals de vooruitzichten voor 2040.

Klimaatneutraliteit in 2050

- **Technische haalbaarheid:** De studie concludeert dat het technisch mogelijk is om Nederland in 2050 klimaatneutraal te maken, mits alle beschikbare technieken en middelen worden ingezet. Dit omvat onder andere de productie van CO₂-vrije elektriciteit, de inzet van biograndstoffen en groene waterstof, en het opschalen van CO₂-afvang en -opslag (CCS).
- **Restemissies:** Voor sommige sectoren, zoals landbouw en landgebruik, is het niet mogelijk om de emissies volledig naar nul terug te brengen tegen 2050. Deze resterende emissies moeten worden gecompenseerd met negatieve emissies, zoals vastgelegd in de Klimaatwet.

Doelstellingen voor 2040

- **Reductiepad:** De studie volgt een lineair reductiepad van 55% reductie in 2030 naar klimaatneutraliteit in 2050, wat impliceert dat er in 2040 een emissiereductie van ongeveer 80% nodig zou zijn. De Europese Commissie heeft een voorstel gedaan voor een reductiedoel van 90% in 2040.
- **Beleidsuitdagingen:** Voor 2040 zijn nog geen bindende doelstellingen gesteld, en het is noodzakelijk dat toekomstige politieke keuzes, technologische ontwikkelingen en internationale afspraken bijdragen aan het bereiken van deze doelstellingen. Het bereiken van 90% reductie in 2040 zal aanzienlijke aanscherpingen en aanvullingen van het huidige beleid vereisen.

Klimaatneutraliteit in 2050 is volgens PBL technisch haalbaar, maar de haalbaarheid hangt af van de inzet van alle beschikbare technieken, internationale samenwerking en effectieve beleidsvoering. Voor 2040 wordt een emissiereductie van 80-90% als mogelijk gezien, maar het bereiken hiervan vereist significante beleidsinspanningen en verdere technologische vooruitgang. PBL heeft zich niet gebogen over de vraag of klimaatneutraliteit al in 2040 zou kunnen worden gehaald, en geeft aan dat nader onderzoek naar deze vraag nodig is.

2.3. Europees energie- en klimaatbeleid

2.3.1. Algemeen en overkoepelend beleid

Het Europese energie- en klimaatbeleid richt zich op het aanpakken van de klimaatcrisis, het stimuleren van duurzame energie en het verminderen van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen. De Europese Unie heeft ambitieuze doelstellingen vastgelegd in het Klimaatplan voor 2030 en de Europese Green Deal. Deze plannen omvatten cruciale wet- en regelgeving om de beoogde energietransitie te realiseren. Centraal staan het terugdringen van de uitstoot van broeikasgassen, het verhogen van het aandeel hernieuwbare energie en het verbeteren van energie-efficiëntie.

Een van de belangrijkste doelstellingen is om tegen 2030 de uitstoot van broeikasgassen met 55% te verminderen ten opzichte van het niveau van 1990. Daarnaast wil de EU dat

tegen die tijd 39% van het totale energieverbruik afkomstig is van hernieuwbare bronnen. Het verbeteren van energie-efficiëntie met 32,5% is een ander cruciaal aspect van dit beleid, met als doel de verspilling van energie tegen te gaan. Al deze maatregelen zijn nodig om de bredere doelstelling van klimaatneutraliteit in 2050 te bereiken.

De Europese Green Deal, gepresenteerd in 2019, vormt de kern van het klimaatbeleid. Dit is een uitgebreide strategie om de EU te transformeren naar een duurzame en circulaire economie. Onderdeel hiervan is de Europese Klimaatwet, waarin de verplichting is opgenomen om tegen 2050 netto geen uitstoot van broeikasgassen meer te hebben. Een ander belangrijk initiatief binnen de Green Deal is het 'Fit for 55'-pakket, dat bestaat uit een reeks hervormingen in sectoren zoals energie, industrie en vervoer. Deze hervormingen zijn erop gericht om de uitstoot te verminderen en de energietransitie te versnellen.

Een van de meest impactvolle instrumenten van het Europese beleid is het Emissiehandelssysteem (EU ETS). Dit systeem zet een limiet op de totale hoeveelheid broeikasgassen die de industrie, energiecentrales en luchtvaartmaatschappijen binnen de Europese Economische Ruimte (EER) mogen uitstoten. Bedrijven kunnen emissierechten kopen en verkopen, waardoor er een markt ontstaat die ondernemingen stimuleert om hun uitstoot te verminderen. Dit systeem beslaat ongeveer 40% van de totale uitstoot in de EU en wordt steeds verder aangescherpt om het terugdringen van CO₂ te bevorderen. In de rest van dit document zullen we aan dit emissiehandelsysteem refereren als ETS1.

Voor sommige sectoren binnen het ETS1 heeft de EU het Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) voorgesteld. Dit is een mechanisme om koolstoflekkage te voorkomen, waarbij bedrijven producten uit landen met minder strenge klimaatregels goedkoper kunnen produceren en naar de EU kunnen exporteren. CBAM verplicht importeurs om te betalen voor de CO₂-uitstoot die gepaard gaat met de productie van deze goederen, waardoor een gelijk speelveld ontstaat voor Europese bedrijven die zich wel aan strenge emissieregels moeten houden.

Voor sectoren die buiten het ETS1 vallen, zoals de landbouw, mobiliteit en gebouwde omgeving, is er de Effort Sharing Regulation (ESR). Deze regelgeving verdeelt de verantwoordelijkheid voor emissiereducties over de lidstaten op basis van hun economische capaciteit. De reductiedoelstellingen variëren van 0% tot 40% voor 2030, afhankelijk van de economische situatie van de betrokken landen. Dit moet ervoor zorgen dat alle sectoren bijdragen aan de emissiereducties, ook waar het moeilijker is om marktoplossingen zoals het ETS1 toe te passen.

Als onderdeel van de herziening van de ETS-richtlijn in 2023 is ETS2 opgericht, een nieuw emissiehandelssysteem dat CO₂-uitstoot uit brandstofverbranding in gebouwen, wegvervoer en kleine industriële bedrijven zal dekken. ETS2 zal andere beleidsmaatregelen van de Europese Green Deal aanvullen om de emissiereductiedoelstellingen van de lidstaten te ondersteunen. Het systeem wordt in 2027, of bij zeer hoge energieprijzen in 2028, operationeel en zal een 'cap and trade'-systeem zijn, waarbij brandstofleveranciers, niet de eindgebruikers, verantwoordelijk zijn

voor het rapporteren en inleveren van emissierechten. Het doel is om de emissies in deze sectoren tegen 2030 met 42% te verminderen ten opzichte van het niveau van 2005. Alle emissierechten worden geveild, en een deel van de opbrengsten zal kwetsbare huishoudens en kleine bedrijven ondersteunen via een Sociaal Klimaatfonds. Lidstaten moeten de overige inkomsten besteden aan klimaatmaatregelen en sociale voorzieningen, en hierover rapporteren.

Vooralsnog is de afspraak via het EU ETS1 geen rechten meer beschikbaar te stellen voor de industrie en de elektriciteitssector vanaf 2039. Voor EU ETS2 is dit voor de gebouwde omgeving, mobiliteit en kleinere industriële bedrijven 2045. Dit betekent dat de betrokken sectoren vanaf dat jaar geen broeikasgasemissies mogen hebben en anders moeten zorgen voor negatieve emissies zodat ze toch netto 0 zijn.

Voor de landbouw is het nog onzeker of sommige onderdelen onder ETS2 gaan vallen. Dit gaat dan specifiek over de emissies vanuit de glastuinbouw, brandstoffen voor landbouwvoertuigen en de energie die wordt gebruikt voor het verwarmen van stallen en gebouwen.

Naast emissiehandel is de Richtlijn hernieuwbare energie (RED II) van cruciaal belang. Deze wetgeving verplicht lidstaten om hun aandeel in hernieuwbare energie flink op te schroeven. Tegen 2030 moet ten minste 40% van de energie afkomstig zijn uit hernieuwbare bronnen zoals wind- en zonne-energie, maar ook uit biomassa. Dit is essentieel om de EU minder afhankelijk te maken van fossiele brandstoffen en import om de klimaatdoelen te halen.

Energie-efficiëntie speelt ook een centrale rol in het beleid. De Energie-efficiëntie richtlijn stelt bindende energiebesparingsdoelen vast voor de lidstaten. Deze doelen richten zich onder meer op het verminderen van energiegebruik in gebouwen en het stimuleren van efficiënter energieverbruik in verschillende sectoren. Lidstaten zijn verplicht om maatregelen te nemen, zoals het bevorderen van de renovatie van gebouwen om het energieverbruik te verlagen.

Om de sociale gevolgen van de groene transitie op te vangen, heeft de EU het Just Transition Mechanism geïntroduceerd. Dit mechanisme biedt financiële steun aan regio's die sterk afhankelijk zijn van fossiele brandstoffen of vervuilende industrieën. Het doel is om deze gebieden te helpen bij het overstappen naar duurzamere economische activiteiten, zonder dat werkgelegenheid en sociale stabiliteit te sterk onder druk komen te staan.

2.3.2. Europees energie- en klimaatbeleid gericht op 2040

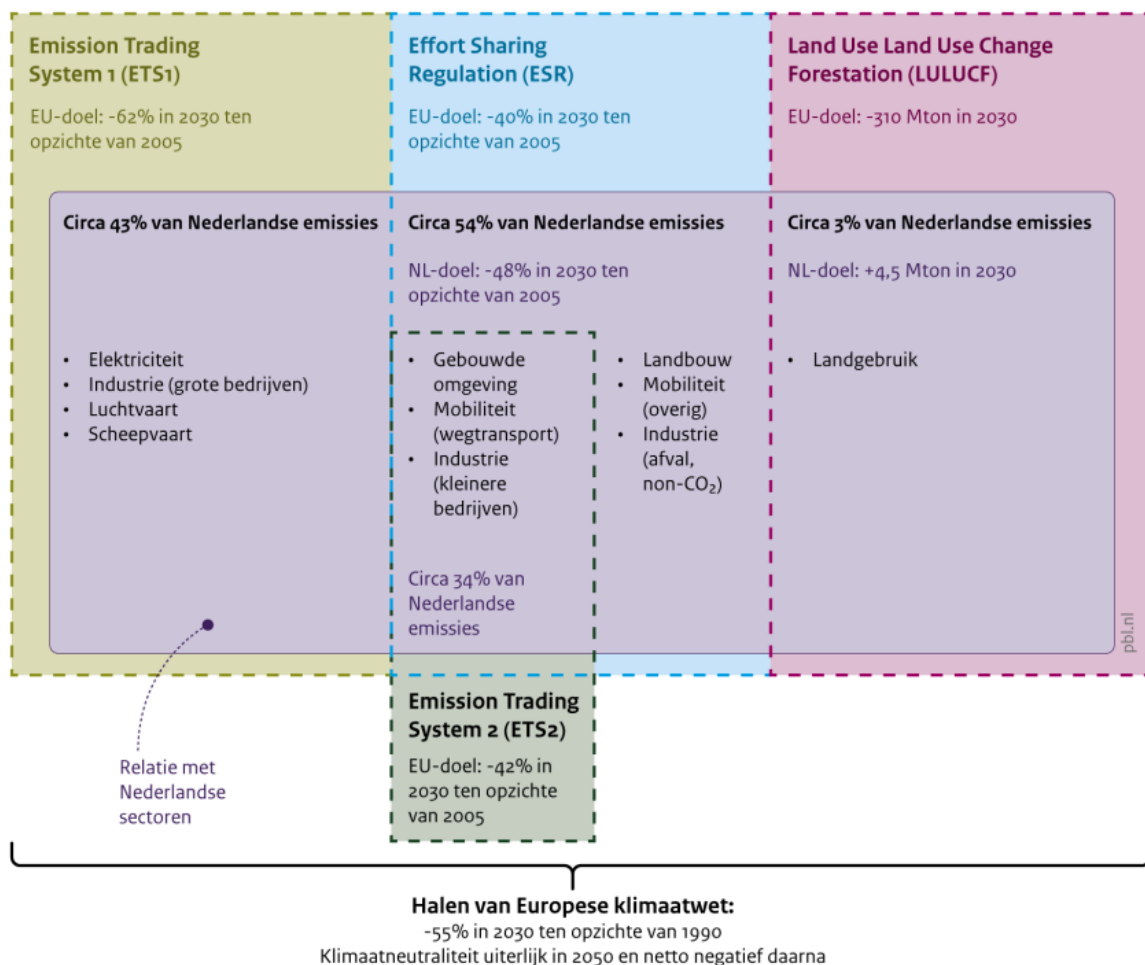
De EU ligt op koers om in 2040 uit te komen op 88,7%²² emissiereductie volgens een recente impact analyse. De nieuwe doelstelling om de broeikasgasemissies met ten minste 90% te verminderen tegen 2040 is momenteel nog een aanbeveling van de Europese Commissie en moet nog worden omgezet in wetgeving²³. Dit voorstel is

²² Fiche 1: Mededeling EU-klimaatdoelstelling 2040

²³ EU COM, [2040 climate target - European Commission \(europa.eu\)](https://ec.europa.eu/energy/en/2040-climate-target)

gebaseerd op wetenschappelijk advies en een gedetailleerde impactbeoordeling²⁴, en het dient als een tussenstap op weg naar klimaatneutraliteit in 2050.

De ten minste 90% aanbeveling wordt nu besproken door het Europees Parlement en de lidstaten, en de komende Europese Commissie, van na de verkiezingen van 2024, zal een wetgevingsvoorstel doen om dit doel in de Europese Klimaatwet op te nemen²⁵. Om de beoogde reductie te realiseren is door de lidstaten in Europees verband een scala aan normerende wetgeving (zoals een minimum percentage duurzame opwek of bijmengen van groene brandstof), belasting op uitstoot binnen (ETS1, ETS2 vanaf 2027/28 en mogelijk ETS3 dat zich richt op landbouw) en buiten Europa (het CBAM treedt vanaf 2026 in werking), sectorale specifieke wetgeving (zoals energie labels voor producten en woningen) en subsidies (zoals het Just Transition Fund) ontwikkeld. Specifiek voor deze studie zijn ETS2 en eventueel ETS3 relevant. ETS2 en 3 omvatten de emissies van de gebouwde omgeving, wegtransport, de landbouw en het deel van de industrie dat niet



Figuur 6. Drie pijlers van het Europees klimaatbeleid, PBL TVKN2050, 2024

²⁴ communication from the commission to the European Parliament, the council, the european economic and social Committee and the committee of the regions, Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society, date 6.2.2024 , [link](#), [link](#), [link](#)

²⁵ Delivering the European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en

onder ETS1 valt, de demarcatie is goed weergegeven in Figuur 6. In deze figuur is ook LULUCF (landgebruik) zichtbaar, voor de EU geldt dat deze sector zorgt voor een aanzienlijke carbon sink (negatieve emissies), voor Nederland zorgt de sector voor positieve emissies. Dit komt mede doordat we relatief weinig bos hebben en veel grasland.

ETS2-rechten worden door nationale overheden geveild aan de sectoren die onder ETS2 vallen, het gaat hier om de energieleveranciers en de brandstofleveranciers. Zij rekenen deze milieubelasting vervolgens door in hun prijzen, hierdoor stijgt de prijs voor emissies voor de consument en is er een financiële prikkel om te investeren in een duurzamer alternatief en/of besparing. ETS2 moet nog worden ingevoerd en het effect is momenteel onzeker. Op Europees niveau is voorgesorteerd op een latere invoer van het ETS2 bij hoge energieprijzen en is er een voorlopig prijsplafond van 45€/ton ingesteld. Bij overschrijding van deze prijs worden er aanvullende emissierechten geveild uit de marktstabiliteitsreserve en zal de emissiereductie dus in eerste instantie lager uitvallen. Ondanks deze maatregelen zou het ETS2 wettelijk wel voor de gewenste emissiereductie moeten zorgen in 2045, omdat er dan geen rechten meer worden geveild.

Waar binnen het ETS1 de elektriciteitsproducenten en zware industrie over het algemeen voorspelbaar op prijsprikkels wordt gereageerd, is dit in ETS2 minder het geval, in het bijzonder in de gebouwde omgeving. In de trajectverkenning geeft PBL aan dat zij verwachten dat er een zeer hoge emissieprijs in euro per ton nodig is om de gewenste gedragsverandering te realiseren. Het PBL geeft aan dat het de vraag is welke prijs politiek en maatschappelijk nog acceptabel wordt geacht, waardoor het ETS2 alleen als onvoldoende prikkel zou functioneren om tot 0 emissies te komen te komen in 2045, met name in de gebouwde omgeving. Daarom veronderstelt PBL dat het ETS2 niet volledig dwingend zal worden ingezet en er nog steeds restemissies zijn in ETS2 sectoren in 2045 en in sommige trajecten in 2050.

Voor de analyse van de haalbaarheid van klimaatneutraliteit in 2040 nemen wij aan dat de Rijksoverheid vasthoudt aan het ETS2 zoals dat voorzien is en wettelijk is vastgesteld. Dat betekent dat de emissies in de sectoren gebouwde omgeving, wegtransport en de overige industrie in 2045 al op het niveau liggen dat nu voor 2050 wordt geschetst door de PBL Trajectverkenning. Eventuele resterende emissies na 2045 worden middels certificaten vanuit negatieve emissies gecompenseerd. De Rijksoverheid kan er alternatief voor kiezen om al in 2040 geen ETS2-emissierechten meer te veilen. Dat zou betekenen dat alle resterende uitstoot certificaten vanuit negatieve emissies gekocht moeten worden aan de ene kant, en aan de andere kant dat de Rijksoverheid 5 jaar aan ETS2-veiling inkomsten misloopt. Maar ETS2 rechten worden geveild in een Europese markt en niet een nationale markt. Partijen uit Nederland kunnen ook in het buitenland rechten kopen en vice versa. Dus het is daarnaast tevens nodig om een emissieplafond of emissiebegrenzing voor Nederland specifiek vast te stellen voor de ETS2 sectoren. Of als alternatief de emissies tussen 2040 en 2045 wel te laten ontstaan, en niet in te grijpen in ETS2 veilingen en vervolgens extra negatieve emissies te produceren. We bespreken deze opties en hun kosten nader bij de verschillende sectoren en het hoofdstuk over negatieve emissies.

3. Analyse naar de haalbaarheid van klimaatneutraliteit in 2040 – onze aanpak

3.1. Inleiding

De Netbeheer Nederland scenario studies geven aan dat 100% emissiereductie van CO₂ binnen bereik kan zijn in 2050. De PBL studies geven aan dat klimaatneutraliteit bereikt kan worden in 2050. En PBL geeft tevens aan dat meer dan 90% emissiereductie van CO₂-eq in 2040 nodig kan zijn om de (mondiale) doelen van het Akkoord van Parijs binnen bereik te houden. Maar de vraag of 100% netto emissiereductie in 2040 bereikt kan worden, wordt in de hiervoor genoemde studies niet beantwoord. PBL geeft wel aan dat onderzoek naar de implicaties en haalbaarheid van het versnellen van klimaatneutraliteit nodig is.

Vandaar dat we startend vanuit de scenario's, rekensommen en redeneringen van de gezamenlijke Netbeheerders en het PBL aanvullende analyses zullen doen om de vraag te beantwoorden of klimaatneutraliteit al in 2040 in Nederland mogelijk is.

3.2. Het II3050 scenario Nationaal Leiderschap

Het raamwerk van de vier scenario's van de II3050 editie 2 studie bestaat uit vier mogelijke toekomstige werelden, allen klimaatneutraal.

- Een wereld waarin Nederland meer wordt gestuurd vanuit burger collectieven en er een groter streven is naar nationale autonomie (Decentrale Initiatieven)
- Een scenario waar de Nederlandse Rijksoverheid met name de regie heeft (Nationaal Leiderschap)
- Een scenario waarin de EU grotendeels de regie heeft (Europese Integratie)
- Een scenario waarin internationale handel leidend is (Internationale Handel).

Om de vraag te beantwoorden of Nederland de transitie naar klimaatneutraliteit kan versnellen, kiezen we 1 van deze scenario's en onderzoeken of deze versneld bereikt kan worden. Gegeven het idee dat Nederland sneller dan de voor de EU voorgestelde emissiereductiedoelstelling van minstens 90% in 2040 naar netto 0 emissies zou willen gaan in 2040 en gegeven dat met name in het Nationaal Leiderschap Scenario de Rijksoverheid de regie heeft, hebben we voor dit scenario gekozen. Hieronder volgt de scenario verhaallijn van dit scenario²⁶ zoals het door de netbeheerders is gebruikt. Het startscenario Nationaal Leiderschap 2050 (hetgeen we van toepassing verklaren op 2040) kan worden gevonden via de [ETM link](#). Meer informatie over het tot stand komen en het gebruik van II3050 editie 2 scenario's kan gevonden worden in bijlage 1.

Het Nationaal Leiderschap (NAT) van de netbedrijven
Nederland streeft naar een energetisch efficiënt systeem binnen de Nederlandse mogelijkheden en stuurt nationaal sterk op de invulling van de energiemix.
 Overheden maken daarbij keuzes over de technieken die in Nederland gebruikt gaan worden. Hiervoor maakt de overheid verplichtend beleid en regulering en participeert

²⁶ [Het energiesysteem van de toekomst](#): de II3050-scenario's, Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050, pagina 27, Netbeheer Nederland, 30 juni 2023

zij financieel in projecten van nationaal belang. De overheid bevordert de ontwikkeling van nieuwe industrieën (onder andere synthetische brandstofproductie) en stimuleert elektrificatie van de bestaande industrie. In de gebouwde omgeving zorgt regie (verplichtende wijkaanpakken) voor de ontwikkeling van warmtenetten, gevoed door hoofdzakelijk restwarmte, geothermie en flexibele elektrische bronnen (zoals power-to-heat). Voor het energieaanbod komen grootschalige nationale projecten tot stand, zoals wind op zee die tot een maximum wordt benut en enkele flexibele kerncentrales. Groene waterstof speelt verder een belangrijke rol voor het balanceren van het elektriciteitssysteem, voor de levering van hogetemperatuurwarmte in de industrie en als grondstof.

Het gebruiken van een eerder ontwikkeld en gepubliceerd scenario als basis voorkomt dat we al het werk dat hierin is gestopt (tientallen mensjaren) opnieuw moeten doen. Ook weten we dat het energiesysteem dat wordt voorgesteld gebalanceerd is en dus technisch kan werken. Vraag en aanbod van de verschillende energiedragers zoals elektriciteit, waterstof, groengas etc. zijn met elkaar in balans, niet alleen per jaar, maar voor de meeste dragers ook per uur, rekening houdend met verschillende weerjaren etc. En er wordt ook rekening gehouden met import en export van en naar het buitenland en de noodzaak om sommige emissievrije energiedragers te gaan inzetten als grondstoffen ter vervanging van de huidige fossiele grondstoffen zoals aardolie (bijvoorbeeld raffinaderijen en stoomkrakers) en aardgas (bijvoorbeeld kunstmestproductie). Bovendien is dit scenario mede input geweest bij de ontwikkeling van het NPE door de Rijksoverheid.

3.3. Kwantitatief: Het Klimaatzaak 2040 scenario

We hebben ons in deze analyse veelal gebaseerd op het Nationaal Leiderschap Scenario 2050 van I13050 editie 2. Dit scenario is gemaakt in het Energy Transition Model ([ETM](#)). Er zijn beperkt aanpassingen doorgevoerd in dit basisscenario, om dit bruikbaar te maken voor de Klimaatzaak. Een aantal aanpassingen zijn op verzoek van de opdrachtgevers, en een aantal is gerelateerd aan het versnellen van de transitie en het pad hiernaartoe:

Aanpassingen op verzoek van de opdrachtgevers:

1. Op verzoek van Greenpeace en Natuur en Milieu hebben we in het scenario 3 GW aan kerncentrales vervangen door een extra 3 GW aan Waterstof back-up centrales (aanpassing 1 en 2), omdat het doel ook met alternatieven gehaald kan worden. Een vermindering van import van uranium wordt uitgewisseld met extra import van emissievrije waterstof. En over het algemeen zijn waterstof back-up centrales meer regelbaar dan kerncentrales.

Aanpassingen gerelateerd aan het versnellen van de transitie:

2. We verwijderden 20 GW aan offshore windmolens vanwege het natuurbelang op de Noordzee (aanpassing 3). Het scenario gaat voor 2040 uit van 52GW (in plaats van 72 GW in het oorspronkelijke scenario) offshore wind. Van de verwijderde 20 GW, was 10 GW specifiek voor de productie van waterstof. Hiermee zit je aan het maximum van wat technisch haalbaar is om te realiseren voor 2040. De afname van offshore wind zorgt mede voor een toename in biomassa import om aan de vraag te kunnen voldoen.

3. Aan de kust staan in het scenario 10 GW elektrolyzers (in plaats van 25 GW, aanpassing 4), die indien er meer aanbod is van dan vraag naar elektriciteit, deze stroom kunnen omzetten in groene waterstof. Deze waterstof kan voor een belangrijk deel worden opgeslagen voor periodes met minder wind en zon. Om de 52 GW Wind op Zee en 10 GW elektrolyzers te bereiken in 2040, moet er vanaf 2030 jaarlijks zo'n 3 GW Wind Op Zee en ongeveer 0,75 – 1 GW aan elektrolyzers operationeel worden. En daarnaast moeten de landelijke transportnetten gereed worden gemaakt om deze volumes aan elektriciteit en waterstof naar de eindgebruikers te transporteren. Volgens het PBL (TVKN) is een groei naar 3 GW WOZ operationeel per jaar mogelijk, al betekent dit een aanzienlijke versnelling ten opzichte van vandaag.
4. Waterstofopslag kan verder tot mogelijke problemen leiden in het energiesysteem. In 2040 is er namelijk niet voldoende opslagcapaciteit om aan de vraag te voldoen. Vandaar dat er Autothermal Reformer (ATRs²⁷) met CCS met een vermogen van 7.5 GW worden geïnstalleerd (aanpassing 5). Daardoor kan er meer waterstof geproduceerd worden en is de afhankelijkheid van waterstof opslag minder groot. De benodigde omvang van de waterstofopslag neemt door deze aanpassing af met 3 TWh (aanpassing 6).
5. Om de druk op isolatie van woningen te reduceren en de haalbaarheid van het scenario te vergroten, worden de all-electric luchtwarmtepompen (tijdelijk) ongeveer gehalveerd in de gebouwde omgeving (huishoudens) en vervangen door een hybride warmtepomp (aanpassing 7). Dit is een tijdelijke oplossing; op moment dat het elektriciteitsnet overal voldoende verzaagd is komen er elektrische warmtepompen voor in de plaats.
6. Om uiteindelijk op nul restemissies te komen, zijn negatieve emissies noodzakelijk. In het ETM is het mogelijk om Direct Air Capture (DAC) toe te passen. DAC heeft een hoge energievraag en kosten, die vervolgens integraal in het energiesysteem worden meegewogen. Conform het scenario dat in de rest van het rapport is beschreven, is voor 6,7 Mton DAC in 2040 nodig om Klimaatneutraal te worden (aanpassing 8). In het ETM heeft DAC een warmtevraag, welke via het hoge temperatuur warmtenet wordt ingevuld. Er is in het scenario een surplus aan elektriciteit welke hiervoor kan worden ingezet. We passen dit toe door de warmtemix van het HT warmtenet elektrisch in te vullen met 9 GW in plaats van 3 GW aan warmtepompen (aanpassing 9).

Met deze aanpassingen is het Klimaatzaak scenario een goede benadering van onze verwachting voor 2040. Echter is het Klimaatzaak scenario niet één-op-één onze verwachting van Nederland in 2040. Niet alle veranderingen die uit onze analyses naar voren komen zijn in Klimaatzaak 2040 scenario doorgevoerd. Het gaat hier bijvoorbeeld om zaken die niet in het ETM kunnen worden ingesteld zoals netcongestie en arbeidspotentieel, of die zeer gedetailleerd zijn, of die op een andere manier zijn ingeschat. In hoofdstuk 4 en 5 bediscussiëren we in welke opzichten Nederland nog zal verschillen van dit scenario. Bovendien komen de hierboven genoemde veranderingen dan ook in meer detail aan bod.

Het aangepaste scenario Klimaatzaak 2040 kan worden gevonden in het Energietransitiemodel via deze [link](#).

²⁷ Installatie die aardgas en zuurstof omzet in waterstof en CO(2).

3.3.1. Geen aanpassingen syn-grondstoffen en -fuels

Een verdere aanpassing aan het Nationaal Leiderschap 2050 V2 scenario die we hebben overwogen is het verwijderen van productie van synthetische brand- en grondstoffen in Nederland. Synthetische brand- en grondstoffen zijn moleculen die lijken op aardolieproducten, zoals benzine of nafta, maar die vanuit waterstof en CO zijn opgebouwd. Afhankelijk van de productiemethode en oorsprong van het waterstof en CO kunnen op deze manier emissievrije aardolieachtige producten worden gemaakt. Bijvoorbeeld voor de mobiliteit, luchtvaart of chemische industrie. De productie van synthetische moleculen kost echter wel enorm veel energie, in het ETM scenario 13% van de gehele elektriciteitsvraag. Deze industriële activiteit heeft daarmee veel invloed op de energiebalans in Nederland. We hebben besloten om deze activiteit te laten staan in het scenario en daarmee de route voor de basisindustrie open te houden hier wel activiteiten te ontplooiën.

Ook de Netbeheerders hebben met de vraag hoeveel syn-grondstoffen en brandstoffen in Nederland worden geproduceerd geworsteld, omdat de vraag naar elektriciteit en daaraan gekoppelde waterstof en koolstofmoleculen bij het volledig invullen van de prognoses van de basisindustrie voor de periode 2040 – 2050 de fysieke mogelijkheden van het energiesysteem in Nederland zou overstijgen. En in plaats van het importeren van extra waterstof en elektriciteit en koolstofmoleculen is het dan wellicht logischer om de synthetische brand- en grondstoffen zelf te importeren.

De Netbeheerders hebben met betrekking tot synthetische brand- en grondstoffen ervoor gekozen om drie varianten door te rekenen van het Nationaal Leiderschap Scenario 2050 V2, waarvan de links te vinden zijn in het rapport:

- Een met de volledige prognose van de basisindustrie zoals meegegeven aan de Netbeheerders in 2022.
- Een midden variant waarin in Nederland syn-grondstoffen en -fuel gemaakt worden tot een maximum van wat in Nederland zelf aan elektriciteit en waterstof kan produceren.
- Een nul-variant waarin in Nederland geen syngrondstoffen en – fuel gemaakt worden.

Wij hebben ervoor gekozen om te blijven bij de midden-variant van de Netbeheerders, omdat wij de basisindustrie niet de mogelijkheid willen ontnemen om de ontwikkeling van de productie van deze synthetische brand- en grondstoffen ter hand te nemen voor 2040. Voor de geïnteresseerde lezer hebben we ook een no-synfuels variant van het Klimaatzaak scenario gemaakt, welke kan worden gevonden via deze [link](#). Deze wordt echter niet gebruikt in de rest van dit rapport, noch in een van de analyses.

3.4. Resultaten van het Klimaatzaak 2040 scenario

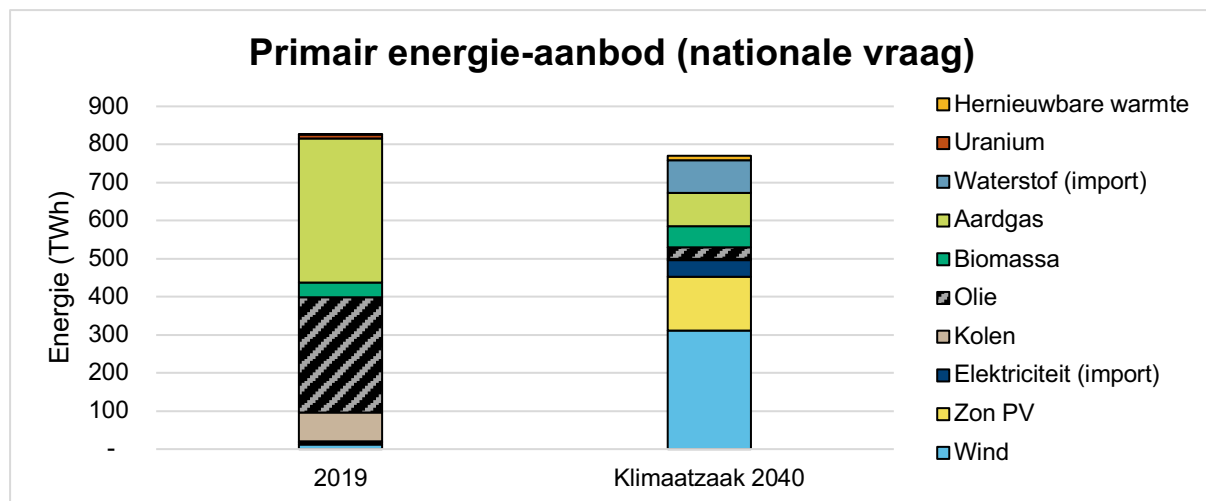
Het klimaatzaak 2040 scenario toont een beeld van een netto klimaatneutraal Nederland in 2040. Het scenario vormt de basis van onze analyse. In Hoofdstuk 4 stellen we per sector de vraag in hoeverre het mogelijk is om het eindbeeld uit dit scenario te versnellen naar 2040. Onze inschattingen voor 2040 wijken soms af van het eindbeeld dat in dit

scenario geschetst wordt. Hier gaan we in de sectorhoofdstukken in hoofdstuk 4 op in. Eerst bespreken we hier hoe het eindbeeld in het Klimaatzaak 2040 scenario eruit ziet.

Het Klimaatzaak 2040 scenario kan gevonden worden via deze [link](#). Het lijkt sterk op het 2050 Nationaal Leiderschap scenario.

Primair energieaanbod

In Figuur 7 is het primair energie-aanbod voor de nationale vraag weergegeven voor twee periodes: het referentiejaar 2019²⁸ en het Klimaatzaak 2040 scenario. Het primaire energieaanbod omvat alle energie die nodig is om in het eindverbruik te voorzien, inclusief de energie voor conversie (bijvoorbeeld wind voor elektriciteitsopwekking of elektriciteit voor waterstofproductie).



Figuur 7. Primair energieaanbod voor de binnenlandse behoefde, inclusief grondstoffen en syngas

De totale omvang van het primaire energieaanbod daalt van ongeveer 830 TWh in 2019 naar 780 TWh in 2040. Deze afname komt voornamelijk voort uit een reductie van 14% in de Nederlandse energievraag door verbeterde technieken en energiebesparing.

De energiemix van Nederland ondergaat tussen 2019 en 2040 een fundamentele transformatie. Waar het energiesysteem in 2019 nog wordt gedomineerd door fossiele energiedragers zoals aardolie, aardgas en kolen, ontstaat er in 2040 een systeem dat grotendeels steunt op hernieuwbare bronnen.

- **Duurzame elektriciteit** is de belangrijkste primaire energiebron, waarvan een deel in waterstof wordt omgezet, door elektrolyse. Deze omslag wordt vooral gedreven door grootschalige nationale wind- en zonprojecten.
- **Aardgas:** In 2019 bedroeg de binnenlandse productie van aardgas 278,5 TWh, daarnaast wordt ongeveer 100 TWh geïmporteerd. In 2040 wordt geen aardgas meer geproduceerd, alleen geïmporteerd. De totale geïmporteerde hoeveelheid aardgas is 88 TWh.
- **Olie:** Het aanbod van olie daalt aanzienlijk van 302 TWh naar 31 TWh in 2040, omdat auto's en vrachtverkeer grotendeels overstappen op elektriciteit.

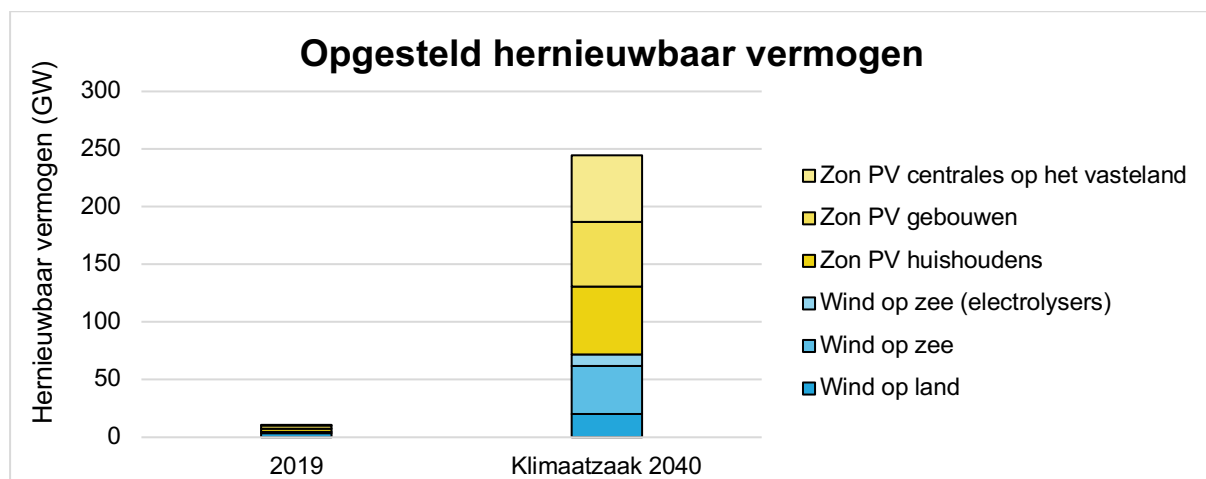
²⁸ Het Energy Transition Model werkt met het basisjaar 2019.

In het Klimaatzaak 2040 scenario stijgt het aandeel energie-import naar 23,3% van het totale Nederlandse energieverbruik, waar dit in het oorspronkelijke Nationaal Leiderschap scenario 18,6% was. Deze toename past binnen de bandbreedte van andere II3050 scenario's voor 2050, die variëren van 18,7% in het Decentrale Initiatieven scenario tot 58,5% in het Europese Integratie scenario. Ter vergelijking: in 2022 was Nederland voor 77% afhankelijk van energie-import, met name door het stopzetten van de Groningse gaswinning en de bijna volledige import van steenkool, uranium en aardolie.²⁹ Het Klimaatzaak 2040 scenario vermindert de Nederlandse importafhankelijkheid dus aanzienlijk. Bovendien verschuift de import naar andere landen, waarbij bijvoorbeeld waterstof kan worden geïmporteerd uit Europese landen met veel zon en wind zoals Spanje, Portugal en Schotland.

Opgesteld hernieuwbaar vermogen

Wind op zee neemt een prominente positie in met een totaal opgesteld vermogen van 52 GW, zie Figuur 8. Hiervan is 42 GW bestemd voor directe elektriciteitsproductie, wat resulteert in een opwek van 196 TWh per jaar. De overige 10 GW wordt ingezet voor waterstofproductie, waarbij 48 TWh aan windenergie door elektrolyse wordt omgezet naar waterstof. Wind op land draagt bij met een opgesteld vermogen van 20 GW, wat resulteert in een jaarlijkse productie van 64 TWh. In totaal levert windenergie 57% van de elektriciteit.

Zon heeft met 173 GW verreweg het grootse opgesteld vermogen in 2040 en produceert door de beperktere zonuren 29% van de elektriciteit, of 134 TWh opwek. Dit aanbod uit zon is vrijwel evenredig verdeeld over verschillende toepassingsvormen: zonnevelden/weiden (58 GW), zon op daken van bedrijven (56 GW) en zon op daken van woningeigenaren (59 GW). De resterende elektriciteit komt van waterstofcentrales, import en biomassa.

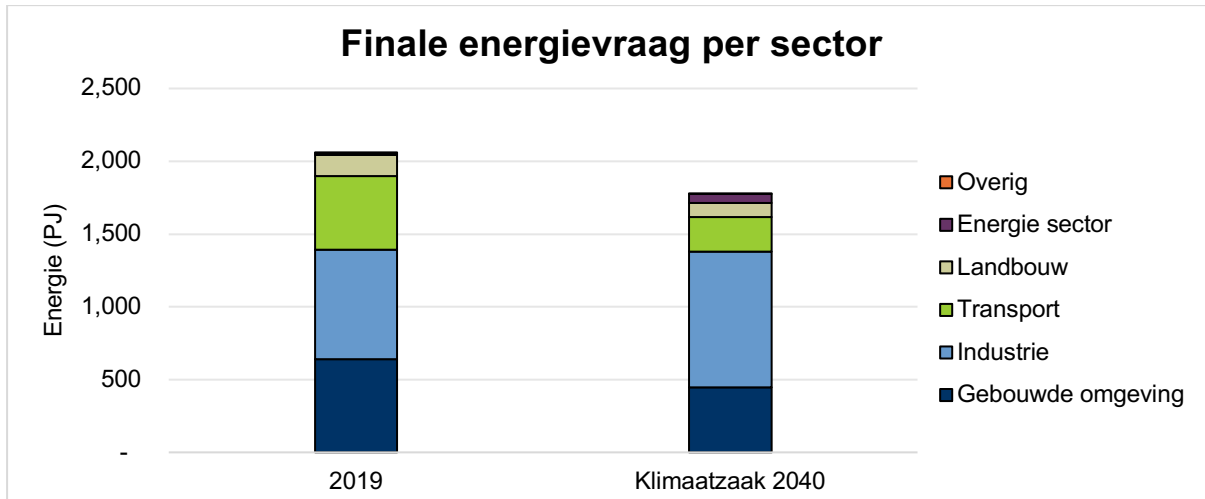


Figuur 8. Opgesteld hernieuwbaar vermogen voor elektriciteit en waterstof productie

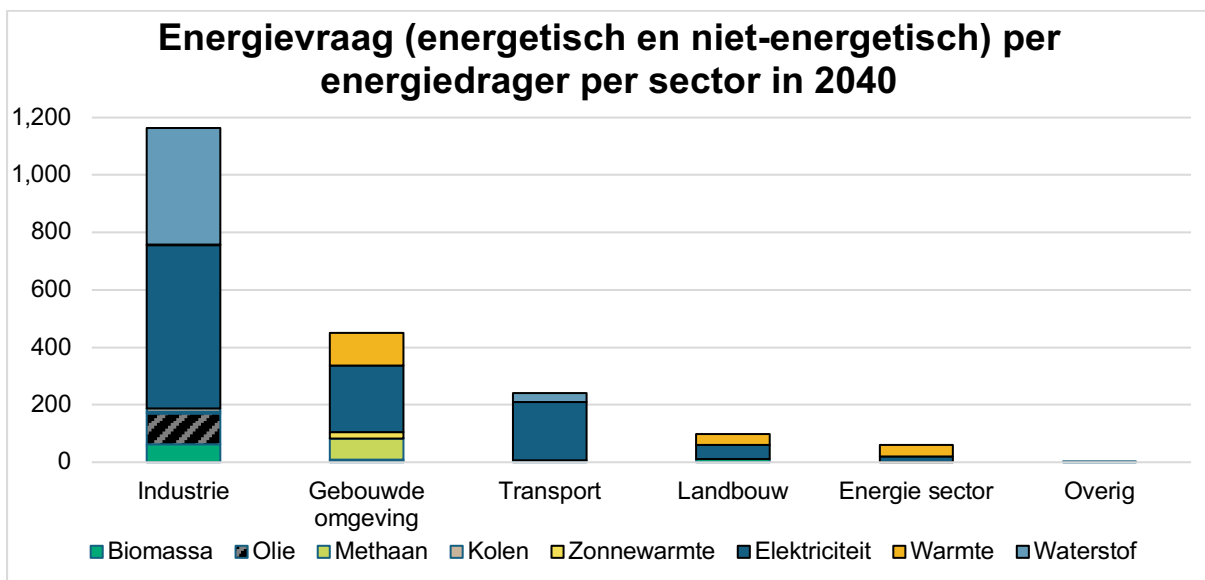
Finale energievraag

Figuur 9 en Figuur 10 laten de finale energievraag per sector en drager zien. Het finaal eindverbruik neemt tussen 2019 en 2040 af met 14%, van 2060 PJ tot 1780 PJ.

²⁹ CBS, 2023, Ruim tweehonderd jaar energieverbruik in Nederland. Transitie, afhankelijkheid en besparing van 1800 tot 2023. [3. Ruim 200 jaar energieverbruik in hoofdlijnen | CBS](#)



Figuur 9. Finale energievraag per sector in het Klimaatzaak 2040 scenario



Figuur 10. Finale energievraag (energetisch en niet-energetisch) per energiedrager per sector in het Klimaatzaak 2040 scenario

De grootste reductie in energievraag vindt plaats in de transportsector met een afname van 53% van 506 PJ naar 238 PJ. Deze significante daling wordt veroorzaakt door de overstap van traditionele verbrandingsmotoren naar elektrische aandrijving, die een veel hoger energetisch rendement hebben. In 2040 is het transportsector volledig op elektriciteit en waterstof overgestapt.

De landbouwsector laat een afname van 32% zien van 145 PJ naar 98 PJ, voornamelijk door een krimp van de veestapel en de modernisering van de glastuinbouw met energiezuinige kassen en LED-verlichting. De finale energievraag van landbouw in 2040 bestaat uit 51% elektriciteit, 37% hernieuwbare warmte en 11% biomassa.

In de gebouwde omgeving is eveneens een afname van 30% zichtbaar, van 641 PJ naar 448 PJ, wat het resultaat is van verbeterde isolatie van gebouwen en de implementatie van efficiëntere verwarmingssystemen zoals warmtepompen. In 2040 is de energievraag

voornamelijk elektriciteit (52%), warmte (25%) en methaan (16%). Dit wordt aangevuld met kleine hoeveelheden zonnearmte (5%), biomassa (1%) en olie (1%)

De industrie vormt een uitzondering en toont als enige sector een toename in energievraag van 24%, van 751 PJ naar 930 PJ. Deze stijging wordt hoofdzakelijk veroorzaakt door drie ontwikkelingen: de elektrificatie van industriële processen, de opkomst van de productie van synthetische brandstoffen en de groei van datacenters. Hoewel elektrificatie van processen over het algemeen leidt tot een hoger energetisch rendement, wordt deze efficiëntiewinst meer dan gecompenseerd door de groei van deze nieuwe activiteiten. Deze toename is alleen te zien in de energetische vraag; als we de niet-energetische vraag meenemen, zien we een 7% daling in energievraag van 1.249 PJ naar 1.164 PJ. Dit betekent dat er een significante afname van de niet-energetische vraag richting 2040 bestaat. In 2040 wordt aan de energievraag van de industrie voornamelijk voldaan door elektriciteit (49%) en waterstof (35%). Daarnaast spelen olie (9%, non-energetisch), biomassa (5%), methaan (1%) en kolen (1%) ook een rol.

Kosten

Het Energietransitiemodel (ETM) rekent uit dat de totale kosten van het energiesysteem van Nederland door deze aanpassingen stijgen van 38.8 miljard in 2019 tot 59.6 miljard in 2040 (Euro's van 2023). Aan dit verschil kan echter beperkt waarde worden ontleend, omdat de onzekerheid over toekomstige energieprijzen groot is. Een uitgebreide analyse van de kosten van het nieuwe energiesysteem is opgenomen in hoofdstuk 5.2.

3.5. Kwalitatief: Aanvullende analyse per sector

De haalbaarheid van het versnellen van de transitie kan vanuit verschillende perspectieven ("lenzen") worden bekeken. Wij zien zeven belangrijke lenzen welke hieronder kort worden toegelicht. In hoofdstuk 4 analyseren we de versnelde transitie per sector aan de hand van deze lenzen.

1. Beleid lens:

- *Beleid en regelgeving:* Welke wet- en regelgeving moet worden aangepast of ingevoerd om het scenario mogelijk te maken?
- *Internationale afspraken:* Hoe past het scenario binnen internationale afspraken en verplichtingen, zoals het Klimaatakkoord van Parijs en de EU Green Deal?

2. Economische lens:

- *Kosten en investeringen:* Wat zijn de kosten van de benodigde infrastructuur en technologieën? Hoe verhouden deze kosten zich tot de beschikbare budgetten en wat is de financiële invloed van het versnellen? De integrale kosten worden beschreven in een sector overkoepelend hoofdstuk.
- *Energieprijzen:* Wat zijn de verwachte energieprijzen en hoe beïnvloeden deze de economische haalbaarheid van het scenario? En wat voor trends zijn er te verwachten t.a.v. kostendalingen of kostenstijgingen van verschillende apparaten.
- *Economische groei en impact:* Hoe beïnvloedt het scenario de economische groei en welke economische voordelen kunnen worden verwacht?

3. Sociaal-maatschappelijke en culturele lens:

- *Publieke acceptatie*: Hoe staat de samenleving tegenover de veranderingen die het scenario met zich meebrengt? Is er draagvlak onder de bevolking? Ook dit onderwerp beschrijven we in een sector overstijgend hoofdstuk.

- *Sociale rechtvaardigheid*: Hoe worden de kosten en baten van het scenario verdeeld over verschillende bevolkingsgroepen? Zijn er mechanismen om ongelijkheden te verminderen?

- *Werkgelegenheid, kennis en vaardigheden*: Welke impact heeft het scenario op de werkgelegenheid, kennis en welke vaardigheden zijn nodig voor de arbeidsmarkt van de toekomst?

- *Gedragsverandering*: Welke gedragsveranderingen zijn nodig bij consumenten en bedrijven om het scenario te laten slagen?

- *Cultuur en waarden*: Hoe beïnvloeden culturele waarden en normen de acceptatie en implementatie van het scenario?

4. Milieukundige Lens:

- *Biodiversiteit en ecologie*: Hoe beïnvloedt het scenario de biodiversiteit en ecologische systemen?

- *Resourcegebruik*: Wat is het gebruik van natuurlijke hulpbronnen en hoe duurzaam is dit op lange termijn?

- Vormen de grondstoffen een bottleneck voor de realisatie van klimaatneutraliteit in 2040?

5. Technologische Lens:

- *Innovatie en technologische ontwikkeling*: Welke innovaties zijn nodig om het scenario te realiseren? Hoe snel kunnen deze technologieën worden ontwikkeld en geïmplementeerd?

- *Betrouwbaarheid en veerkracht*: Hoe betrouwbaar en veerkrachtig is het energiesysteem in het scenario, vooral in het licht van veranderende klimaatomstandigheden en mogelijke verstoringen? Hoe robuust is het scenario voor weersextremen en zeespiegelstijging.

6. Infrastructurele Lens:

- *Netwerkcapaciteit en -uitbreiding*: Wat is de huidige capaciteit van het elektriciteitsnetwerk en welke uitbreidingen zijn nodig? Ook wordt gekeken naar andere benodigde infrastructuren bijvoorbeeld voor waterstof en CO₂. Infrastructuur wordt beschreven in een sector overstijgend hoofdstuk.

- *Integratie van hernieuwbare energiebronnen en energiedragers*: Hoe goed kunnen hernieuwbare energiebronnen en -dragers worden geïntegreerd in het bestaande netwerk en welke additionele netwerken zijn er nodig?

7. Ruimtelijke Lens:

- In welke mate is er ruimte in Nederland voor de apparaten die nodig zijn voor de energietransitie en in welke mate komt er ruimte vrij doordat fossiele apparaten niet meer nodig zijn.

Door deze verschillende "lenzen" te gebruiken, kan een veelomvattend beeld worden gevormd van de haalbaarheid van een versnelde transitie. Elk aspect biedt waardevolle inzichten en helpt bij het identificeren van potentiële obstakels en kansen.

3.6. Restemissies en potentie negatieve emissies

Er zullen in 2040 nog restemissies zijn. Dit kan komen doordat het ofwel niet realistisch of haalbaar geacht wordt om sommige emissies op deze termijn te reduceren, ofwel doordat er inherent emissies vrijkomen bij bepaalde processen die niet te vermijden of af te vangen zijn (bijvoorbeeld lachgasemissies van de landbouw als gevolg van microbiële processen in de bodem).

De vervolgstap die we nemen is om te beschrijven hoe Nederland deze restemissies kan compenseren met negatieve emissies uit Nederland zelf, om in 2040 klimaatneutraal te zijn. Dit doen we in hoofdstuk 4.8. Dat hoofdstuk gaat in op de totale potentie van negatieve emissies. Hierbij wordt gekeken naar verschillende routes, zowel natuurlijk (koolstofvastlegging in biomassa) als synthetisch (koolstofafvang uit de atmosfeer en opslag).

4. Sectorale Analyses haalbaarheid versnelling transitie

4.1. Inleiding

In dit hoofdstuk analyseren we per sector welke opties er zijn om de transitie te versnellen. We beoordelen de haalbaarheid om het eindbeeld van de transitie tien jaar eerder te realiseren. De analyse richt zich op de haalbaarheid van deze versnelling door de klimaatplannen te toetsen aan zeven verschillende "lenzen", zogenaamde invalshoeken die elk een belangrijk aspect van de transitie belichten. Deze lenzen omvatten onder meer technologische en infrastructurele mogelijkheden, financiële haalbaarheid, maatschappelijke acceptatie en een discussie van de beleidskaders.

Om de resultaten van deze analyse overzichtelijk weer te geven, wordt gebruikgemaakt van een stoplichtmodel om de bereikbaarheid van het eindbeeld in 2040 weer te geven. Daarnaast maken we een inschatting van de restemissies per sector.

4.1.1. Stoplichtmodel haalbaarheid

We onderzoeken per sector of het mogelijk is om een versnelling van tien jaar in het eindbeeld, een klimaatneutraal Nederland, te bereiken en welke extra inspanningen dit vraagt, in de vorm van additionele acties, sturend beleid en systeemveranderingen.

We beoordelen de haalbaarheid van de versnelling van het eindbeeld naar 2040, gegeven het uitvoeren van mogelijke extra inspanningen.

De haalbaarheid van het versnellen van het eindbeeld naar 2040 beoordelen we met behulp van dit stoplichtmodel:

- **Groen:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt haalbaar en geïdentificeerde uitdagingen zijn te overkomen.
- **Oranje:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt moeilijk haalbaar en er bestaan significante onzekerheden, doordat er zeer grote veranderingen dienen plaats te vinden op het gebied van technologie, innovatie, financiering en/of aantal arbeidskrachten om de versnelling te realiseren.
- **Rood:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt niet haalbaar. Bereiken van het eindbeeld in 2045 is mogelijk haalbaar. Dit betekent overigens wel dat er met zeer stringente maatregelen en grote veranderingen een aanzienlijke versnelling van emissiereductie kan worden gerealiseerd. Tot het halen van het eindbeeld blijven tijdelijk extra restemissies ten opzichte van dat eindbeeld, die gecompenseerd moeten worden.

Daarnaast is ook naar de som van de afzonderlijke analyse van de lenzen en de sectoren gekeken, hiervoor passen we de volgende beoordeling toe:

- **Som sector:** Combinatie van beoordeling afzonderlijke lenzen; oranje bij 3 of meer oranje beoordelingen en rood vanaf 4 of meer oranje óf 1 rode beoordeling.
- **Som lens:** Combinatie van beoordeling afzonderlijke lenzen; oranje bij 3 of meer oranje beoordelingen en rood bij 1 of meer rode beoordeling.

Deze analyse van elke sector biedt inzicht in de kansen en uitdagingen van een versneld klimaatbeleid. Voor elke sector is beschreven wat we verwachten van het voornaamste beleid dat emissiereductie moet bewerkstelligen en doen we suggesties voor additioneel beleid dat nodig is om versnelling te realiseren.

4.1.2. Restemissies

Voor 2040 maken we een inschatting van de verwachte restemissies per sector. Deze inschatting is gebaseerd op twee pijlers: een kwantitatieve analyse die gebruik maakt van het Klimaatzaak 2040 scenario, of in sommige sectoren een andere toegelichte methode, en de PBL TVKN2050 studie, en een kwalitatieve beoordeling via ons stoplichtmodel dat de versnellingspotentie evalueert.

Bij de interpretatie van deze resultaten is het belangrijk om enkele nuances te begrijpen. Een groene beoordeling in het stoplichtmodel betekent niet dat een sector volledig emissievrij wordt - er kunnen nog steeds restemissies zijn. Ook betekent een rode beoordeling niet dat er geen emissiereductie plaatsvindt, maar wel dat er significante barrières zijn om de transitie voor of in 2040 te voltooien. De landbouwsector illustreert dit goed: zelfs zonder belemmeringen voor versnelling zullen er restemissies blijven bestaan. We maken daarom in onze beoordeling van de restemissies ook onderscheid tussen permanente en tijdelijke restemissies. Permanente restemissies zijn ook aanwezig in het eindbeeld van een klimaatneutraal Nederland en zullen blijvend gecompenseerd moeten worden door negatieve emissies. Tijdelijke restemissies, bijvoorbeeld vanwege de verbranding van fossiel aardgas zonder afvang en opslag, moeten gecompenseerd worden zolang ze nog niet gereduceerd zijn. Na voltooiing van de transitie zijn deze restemissies er niet meer.

Aan het einde van elke sectoranalyse presenteren we een gedetailleerde inschatting van de verwachte restemissies voor 2040, inclusief een bandbreedte die de onzekerheid weergeeft. Deze sectorale analyses worden samengevat aan het eind van het hoofdstuk. De mogelijkheden om deze restemissies te compenseren met negatieve emissies worden apart behandeld in hoofdstuk 4.8.

4.2. Analyse sector: Elektriciteit en warmte

In dit hoofdstuk bespreken we zowel de transitie van de elektriciteitssector (direct gebruik of indirect na conversie tot waterstof), als warmtebronnen verantwoordelijk voor ruimteverwarming bij woningen, gebouwen, glastuinbouw en de industrie. De sector omvat niet warmte nodig bij hoge temperatuur processen in de industrie, zie hiervoor de sector industrie³⁰. De ontwikkeling van de nodige warmte infrastructuur wordt besproken bij de vraagsectoren, met name de gebouwde omgeving.

Elektriciteit wordt op dit moment geproduceerd uit hernieuwbare (zon, wind, afvalverbranding en biomassa), fossiele (aardgas en kolen) en geologische bronnen (uranium). De belangrijkste warmtebronnen zijn aardgas (met name verbranding in een CV-ketel of WKK), restwarmte (restproduct van de industrie, afvalverbranding en elektriciteitsproductie), aardwarmte, omgevingswarmte, zonnewarmte en bodemwarmte.

4.2.1. Inleiding

De uitstoot van de sector elektriciteit is sterk afhankelijk van de economische groei van Nederland, de ontwikkeling van de prijs van fossiele energie, de productie van duurzame elektriciteit en warmte en de mate van elektrificatie van verbruikende sectoren. Mede vanwege de SDE++, Rijkscoördinatieregeling voor grootschalig wind op land en de ambitie voor wind op zee neemt de uitstoot van de sector sinds 2015 af. Echter, vanwege grootschalige netcongestie en problemen bij tijdig uitbreiden van het elektriciteitsnet en toebehoren zoals transformatorstations, stokt de uitstootreductie met nog 8 Mton aan restemissies in 2035 volgens de PBL KEV 2024. Door Europese en (de implementatie in) nationale regelgeving wordt deze CO₂ reductie de komende jaren gerealiseerd (zie Figuur 11). We verwachten dat additioneel beleid vanuit de overheid de CO₂-reductie verder kan terugbrengen dan nu wordt geprognostiseerd, maar dat het terugbrengen van de emissies naar nul erg kostbaar is en dat er restemissies zijn om lange perioden van weinig zon (zgn. dunkelflaute) en wind mee op te vangen. In onderstaande paragraaf lichten we de prognoses van de KEV, II3050 en de trajectverkenning 2050 van PBL verder toe. Daarna lichten we toe hoeveel CO₂-reductie nog extra mogelijk is in 2040 met strenger beleid en additionele financieringsvormen die zekerheid op omzet bij investeerders vergroot.

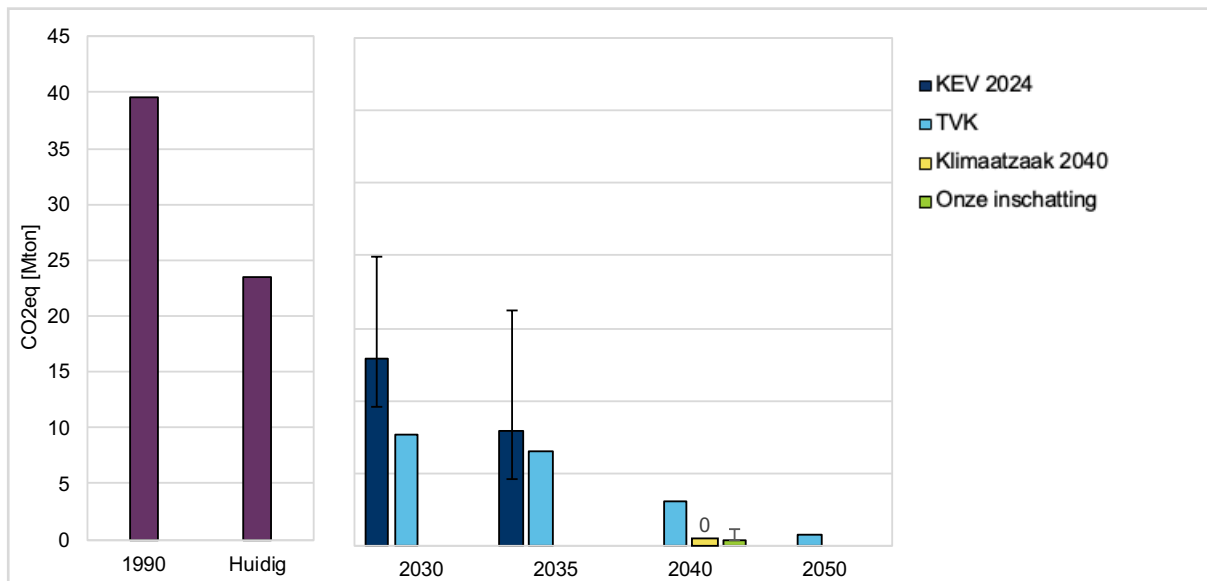
1. Ontwikkeling emissies 1990-2030³¹

De uitstoot van elektriciteit en warmte bedroeg 39,6 Mton CO₂eq in 1990 (dit is excl. proceswarmte industrie). In de periode 1990-2023 hebben de broeikasgasemissies in de Nederlandse elektriciteitssector een aanzienlijke daling laten zien van zo'n 40%. De reductie is vooral gerealiseerd in de laatste jaren en per jaar zijn er grote verschillen

³⁰ Een deel van de elektriciteit en warmte opwek vindt plaats op eigen terrein. Bijvoorbeeld een WKK wekt warmte en stroom op dat niet getransporteerd wordt, deze emissies vallen bij de industrie.

³¹ De gerapporteerde emissies van de opwek van elektriciteit en warmte zijn scope 1 emissies. Dit betekent dat emissies van warmte geproduceerd in een CV-ketel toegekend worden aan de gebouwde omgeving; restwarmte bij de industrie indien een AVI de warmtebron is en bij elektriciteit indien het een elektriciteitscentrale betreft; en voor een warmtepomp geldt dat het uitmaakt of het een all-electric of hybride betreft waar emissies gerapporteerd worden. Door de energietransitie vindt ook een transitie plaats van waar emissies gerapporteerd worden. Naast sectorale emissies moet daarom ook altijd naar de totale emissies van Nederland gekeken worden, dit geeft een vollediger beeld.

voortkomend uit toename duurzame opwek, warm-/koud weer, economische conjunctuur en als gevolg van geopolitieke veranderende verhoudingen.



Figuur 11. Ontwikkeling emissies sector elektriciteit tussen 1990 en 2050 op basis van verschillende bronnen

In de jaren '90 en vroege 2000's werd de elektriciteitsopwekking in Nederland voornamelijk gedomineerd door kolen- en gascentrales, waardoor de uitstoot van CO₂ en andere broeikasgassen relatief hoog bleef. Na 2000 begon de transitie naar duurzamere energiebronnen langzaam op gang te komen, mede door Europese regelgeving en de toenemende druk om klimaatverandering aan te pakken, al was de technologie nog kostbaar en niet concurrerend. Een keerpunt kwam na 2015, toen Nederland versnelde maatregelen nam om hernieuwbare energiebronnen, zoals wind- en zonne-energie, te stimuleren en de technologie ook volwassener werd. Dit ging gepaard met het verbod op productie van elektriciteit door kolenstook in 2030 en het bevorderen van energie-efficiëntie in productieprocessen en huishoudelijke apparaten. Biomassa speelt een belangrijke rol in de verduurzaming van de sector, in 2022 was deze bron goed voor 40% van de duurzame opwek. Biomassa is een kort-cyclische bron en wordt daarmee door het IPCC niet aangemerkt als fossiele bron. Over de herkomst van biomassa is veel discussie vanwege het risico dat dit tot bomenkap elders leidt. De verwachting is dat biomassa in de toekomst een veel kleinere rol heeft.

Het PBL gaat er in de KEV2024 van uit dat de emissies uitkomen op 12,9 Mton (bandbreedte 9,6-19,9) in 2030. De grote bandbreedte komt voort vanuit onzekerheid omtrent de import en exportvolumes³² en de mate waarin de binnenlandse vraag naar elektriciteit vanuit met name industrie en datacenters ontwikkelt. De verwachting is dat de emissies van de elektriciteitssector afnemen, onder andere als gevolg van het verbod op kolenstook vanaf 2030, de toename van wind op zee (17-21 GW) en verdere investeringen in duurzame opwek en batterijen. De daling is iets vertraagd vergeleken de

³² De emissies van fossiele elektriciteit (uit aardgas) die geëxporteerd wordt, worden namelijk aan het land waar de stroom wordt geproduceerd toegekend.

KEV2023 door de tragere uitrol van wind op zee, samenhangend met vertraging van de uitrol van het net voor wind op zee.

In 2023 is in het voorjaarsbesluitvorming Klimaat voor elke sector een opgave c.q. ambitie voor 2030 vastgesteld. Als alle sectoren dit sectorale doel halen komt de netto reductie in 2030 uit op 55%. Het sectorale doel voor elektriciteit bedraagt 7,9 Mton en kent een forse bandbreedte (6,1 – 20,5); de bandbreedte van het PBL valt hierbinnen.

2. Transitie sector 2030-2050 (Klimaatzaak 2040 scenario)

In het Klimaatzaak 2040 scenario wordt de elektriciteitssector, alsook alle vraagsectoren, tussen 2025 en 2040 getransformeerd. In dit scenario heeft de Rijksoverheid een trekkersrol in de energietransitie en wordt centraal gestuurd op de energie- en klimaatdoelen. Dit is in lijn met het Nationaal Programma Energie wat voor de elektriciteitssector o.a. als ambitie heeft om nagenoeg fossielvrij te zijn in 2035. Het scenario voorziet in een massale uitbreiding van offshore-windparken en grootschalige zonneparken en grootschalige energieopslag zoals batterijen en waterstof. Daarnaast speelt restwarmte, groen gas, biomassa en import van waterstof een rol. De uitstoot van de sector daalt richting 2040 naar bijna 0, dit komt met name door veel duurzame opwek, import van waterstof en beleidsmatig door het ETS1. Onzekerheid omtrent de restemissies in 2040 komt voort vanuit het weer, interactie met het buitenland en de vraag of ook tijdens een dunkelflaute³³ alle vraag kosteneffectief duurzaam kan worden opgewekt, of dat zeer beperkte fossiele bijstook nog nodig is.

De elektrificatie van sectoren zoals industrie en transport wordt in dit scenario versneld, waardoor de (primaire) vraag naar elektriciteit fors stijgt: van 120 TWh per jaar in 2019 neemt de vraag naar elektriciteit naar circa 500 TWh (1,8 EJ) toe, hiervan is circa 75 TWh direct en indirect bestemd voor synthetische brandstofproductie³⁴. Tegelijkertijd wordt de betrouwbaarheid van de energie-infrastructuur gewaarborgd door investeringen in netcapaciteit. Vanaf 2040 is de elektriciteitssector niet alleen CO₂-neutraal, maar vormt zij ook de ruggengraat van een volledig duurzame Nederlandse energievoorziening, die flexibel inspeelt op fluctuaties in vraag en aanbod dankzij innovatieve technologieën en internationale samenwerking. Dit scenario impliceert aanzienlijke (publieke) investeringen, maar benadrukt dat sterke nationale regie en samenwerking tussen alle betrokken partijen cruciaal zijn om de klimaatdoelen te halen.

De vraag naar groene stroom neemt fors toe, met name door een versnelde verduurzaming van alle sectoren en dus zowel direct als indirect (grotendeels naar waterstof als grondstof in de industrie inclusief de productie van brandstoffen en voor een deel via waterstof weer terug naar elektriciteit) een grote behoefte aan groene stroom. Ook versnelt de verduurzaming van de lucht- en scheepvaartbrandstoffen, dit wordt grotendeels ingevuld door extra wind op zee, elektrolyse en import van waterstof.

³³ Met 'dunkelflaute' wordt in de energiesector een periode aangeduid waarin weinig tot geen energie kan worden opgewekt door middel van wind en zonlicht, wegens gelijktijdig optredende duisternis en windstilte (bron: wikipedia). Tijdens deze periode is het systeem aangewezen op regelbaar vermogen en flexibiliteit bij afnemers om de leveringszekerheid te kunnen garanderen.

³⁴ Het NPE gaat voor het eindbeeld uit van 270 TWh inzet voor direct energetisch gebruik en 280 TWh voor andere energieketens, veruit het meeste voor waterstof (power to gas).

Een aanzienlijk deel van deze brandstoffen wordt echter geïmporteerd of nog fossiel ingevuld, zie ook figuur 59 van het II3050v2-scenario rapport. Door de transitie verandert het systeem van OPEX-gedreven (import fossiele energie en regelbaar vermogen) naar CAPEX-gedreven (voorinvestering in bijv. windmolens en beperkt regelbaar vermogen) in combinatie met veel flexbronnen om de normale ‘tekorten’ vanuit weersafhankelijke opwek mee op te vangen. Tijdens periode van dunkelflaute kunnen gascentrales nog regelbaar vermogen leveren om zo een brown-/ of black-out te voorkomen.

3. Transitiepad volgens PBL TVKN

In het TVKN2050 rapport schetst PBL haar visie hoe de Nederlandse elektriciteitssector klimaatneutraal wordt. Het PBL gaat in deze studie uit van beperkte gedragsverandering. De elektriciteitssector speelt een centrale rol in het verduurzamen van de gehele economie, mede door de grootschalige elektrificatie van andere sectoren zoals de industrie, mobiliteit en gebouwde omgeving. In dit scenario groeit de vraag naar elektriciteit fors, terwijl fossiele opwekking volledig wordt afgebouwd. In 2035 is de sector grotendeels verduurzaamt met nog gemiddeld 6,5 Mton aan restemissies. Dit is een trouwens minder dan de 7,9 Mton in 2035 (PBL KEV 2024). In 2040 neemt de uitstoot af tot gemiddeld 3,1 Mton. Tegen 2050 is de elektriciteitsproductie vrijwel geheel gebaseerd op hernieuwbare energiebronnen, met name wind- en zonne-energie, die in een aanzienlijk tempo worden opgeschaald. Offshore-windparken in de Noordzee leveren hierbij het grootste aandeel. In 2050 verwacht PBL nog gemiddeld 0,8 Mton aan restemissies. Dit betekent dat ook in een systeem met al 10 jaar 0 ETS1 emissierechten er nog restemissies zijn die met negatieve emissies gecompenseerd moeten worden. De schade van uitval (brown- of black-out) van het elektriciteitssysteem is groter dan balanceren van het net middels fossiele bronnen.

Het rapport benadrukt dat grootschalige investeringen in het elektriciteitsnet en de infrastructuur noodzakelijk zijn om deze groei aan te kunnen, inclusief de uitbreiding van interconnectorcapaciteit met buurlanden en de ontwikkeling van opslagtechnologieën zoals batterijen en waterstof. Daarnaast is flexibiliteit in vraag en aanbod van cruciaal belang, waarbij slimme systemen en vraagsturing worden ingezet om te kunnen omgaan met de variabiliteit van hernieuwbare energie. Tegen 2050 wordt een robuust, flexibel en emissievrij elektriciteitssysteem verwacht, dat in staat is om de sterk toegenomen vraag te dekken. Volgens het PBL vereist dit scenario echter niet alleen technologische innovaties en investeringen, maar ook beleidsmatige regie, lange termijnvisie en samenwerking tussen publieke en private partijen om deze complexe transitie te realiseren.

4.2.2. Beoordeling haalbaarheid

1. Beleid

Er zijn verschillende Europese en nationale wetten, plannen en regels die van invloed zijn op de transitie naar een CO₂-vrij elektriciteitssysteem in de periode 2035-2040. De voornaamste zijn het ETS1 en het NPE (incl. de transitieplannen in de verbruikssectoren, deze worden besproken bij de ‘beleidslens’ in de desbetreffende sectoren). We introduceren ze eerst kort en beschrijven daarna welke impact ze hebben op de verduurzaming en in hoeverre additionele wet- en regelgeving ingevoerd moet worden om versnelling van transitie van de elektriciteitssector mogelijk te maken.

Het **EU Emission Trading System (ETS1)** is een van de belangrijkste instrumenten van de Europese Unie om de uitstoot van broeikasgassen te verminderen en speelt een cruciale rol in de transitie van het elektriciteitssysteem. ETS1, dat in 2005 werd geïntroduceerd, werkt volgens het principe van "*cap and trade*", waarbij een plafond wordt gesteld aan de totale hoeveelheid uitstoot die bedrijven in bepaalde sectoren, waaronder de elektriciteitssector, mogen uitstoten. Binnen dit systeem krijgen bedrijven emissierechten, die ze kunnen verhandelen, en het aantal beschikbare rechten wordt elk jaar verlaagd, waardoor een prikkel ontstaat om uitstoot te reduceren. De rechten eindigen vanaf 2040, voor bedrijven is zo een voorspelbaar prijspad ontstaan op basis waarvan investeringsbeslissingen kunnen worden genomen. Momenteel werkt men aan het introduceren van verhandelbare negatieve emissies, deze kunnen in de toekomst waarschijnlijk ingezet worden om restemissies vanuit elektriciteit of andere sectoren te compenseren (zie ook sectie 4.6, deze geeft de kostprijs per ton CO₂ voor verschillende negatieve emissie methoden weer). De prijs van negatieve emissies hangt af van de kosten om deze emissies te realiseren en de vraag naar deze certificaten. Op dit moment is de optie om buiten Nederland emissiereductie te realiseren niet meegenomen.

Voor de elektriciteitssector heeft ETS1 een directe invloed op de kosten van koolstofuitstoot. Bedrijven die elektriciteit opwekken uit fossiele brandstoffen zoals kolen en gas, moeten emissierechten kopen voor de CO₂ die ze uitstoten, wat de kosten voor vervuilde energiebronnen verhoogt. Dit stimuleert de verschuiving naar schone energiebronnen zoals wind en zon, omdat deze geen emissierechten nodig hebben en daardoor economisch aantrekkelijker worden. ETS1 heeft hierdoor een dubbele functie: het versnelt de uitfasering van fossiele brandstoffen door de kosten van koolstof te internaliseren, terwijl het tegelijkertijd investeringen in duurzame energiebronnen bevordert. Ook versnelt ETS de transitie omdat het uitgaat van de laagst mogelijke kosten door verhandelbare emissierechten. De inkomsten uit de verkoop van emissierechten kunnen bovendien worden ingezet voor investeringen in schone energieprojecten, wat de transitie naar een duurzaam elektriciteitssysteem verder ondersteunt.

Het tempo waarmee ETS1 rechten uit de markt worden gehaald is recent omhoog bijgesteld, hierdoor is het eindjaar teruggebracht naar 2040 (2039 laatste veilingjaar). Het is niet onze verwachting dat het eindjaar nogmaals wordt aangepast. Dit betekent dat de uitstoot van de elektriciteitssector in Europa nagenoeg 0 is vanaf 2040. Restemissies (bijvoorbeeld ter voorkoming van een brown- of black-out) moeten middels handel in negatieve emissies gecompenseerd worden of door betaling van de ETS1-boete. Dit geldt op dit moment maar zeker richting 2040 als er minder rechten in de markt zijn.

De regering heeft als doel gesteld om een CO₂-vrije elektriciteitssector te hebben in 2035, dit staat in het **Nationaal Plan Energiesysteem (NPE)**. Het plan speelt een centrale rol in de transitie naar een volledig klimaatneutrale energievoorziening en legt de nadruk op het snel opschalen van hernieuwbare energiebronnen, zoals wind- en zonne-energie. In de periode tot 2040 voorziet het NPE een aanzienlijke groei in de opwekking van elektriciteit uit offshore windparken, grootschalige zonneparken, en kleinschalige duurzame initiatieven zoals zonnepanelen op daken. Het NPE erkent ook de noodzaak van flexibiliteit in het systeem, door middel van technologieën zoals waterstofproductie en -

opslag, om de variabiliteit van hernieuwbare energiebronnen op te vangen en de betrouwbaarheid van de energievoorziening te waarborgen.

De komende jaren wordt het NPE nader uitgewerkt en per onderdeel wordt onderzocht of de markt voldoende in staat is om bepaalde technieken op te schalen. Dit is belangrijk aangezien niet alle systeemonderdelen in de huidige liberale energiemarkt van de grond komen. De onzekerheid op het kunnen terugverdienen van de investering is te groot en/of vanwege een vollooprisico zijn mogelijk de eerste jaren na aanleg van een warmtenet, batterij of zoutcaverne voor waterstofopslag te verlieslatend. Daarnaast wordt gewerkt aan het herzien van de tarifiering van stroomverbruik. Wij nemen op dit punt aan dat omtrent 2030 er een dynamisch nettatarief geldt dat afhankelijk is van zowel tijd als locatie. Dit moet de gelijktijdigheid tussen duurzame opwek en vraag enerzijds vergroten en anderzijds ervoor zorgen dat de infrastructuur beter benut wordt (minder pieken).

In het NPE wordt vanwege de transitieplannen van de verschillende verbruikssectoren rekening gehouden met een sterke toename van de vraag naar elektriciteit door elektrificatie van onder andere vervoer, industrie en de gebouwde omgeving. Dit staat beschreven in de Cluster Energie Strategieën (CES), Regionale Energie Strategieën (RES), Transitievisies Warmte (TVW) en overige sectorale documenten, die door respectievelijk de industrie clusters, de regio's en gemeentes zijn opgesteld.

In het NPE is de ambitie uitgesproken om het elektriciteitssysteem CO₂-vrij te laten zijn in 2035. In het NPE zijn daarvoor een aantal maatregelen voorzien. Uitvoering van deze maatregelen is nodig als randvoorwaarde om dit doel te halen. De Minister heeft begin 2024 aangekondigd daarom uit te zoeken hoe een exploitatiesubsidie vormgegeven kan worden³⁵, aangezien in de aanloopperiode (2030-35) deze toekomstige/omgebouwde centrales anders niet kunnen concurreren met het fossiele park. Deze centrales zijn in het Coalitieakkoord Rutte IV aangekondigd. Tussen 2035-2040 nemen de kosten van ETS aanzienlijk toe is de verwachting, dan wordt fossiel vanzelf duurder dan een duurzaam alternatief. Een belangrijke voorwaarde voor de transitie naar waterstof centrales is voldoende aanbod van waterstof. Dit aanbod is weer afhankelijk van de zekerheid over vraag naar waterstof. Op dit moment ontbreekt die zekerheid waardoor ondanks een flinke pijplijn aan elektrolyser projecten³⁶, bedrijven geen Final Investment Decision (FID) nemen. Dit kan door in blauwe waterstofcentrales (ATRs) te investeren of door waterstof op te slaan in zoutcavernes en richting 2040 in oude gasvelden. ATRs en opslag is nodig om periode met weinig wind en zon te overbruggen.

Het NPE is daarmee aanvullend op het ETS1. Aangenomen dat groene productie buiten Europa de komende jaren voldoende opschaaft en dat deze voor ons beschikbaar is, dan verwachten wij vanuit de 'beleidslenzen' geen additioneel (in aanvulling op wat hierboven beschreven is, economisch zijn er echter zeker extra maatregelen nodig) beleid nodig is om rond 2040 een nagenoeg fossielvrij elektriciteitssysteem te realiseren. Hierbij geldt wel de kanttekening dat er een toename in de vraag is van een factor 4 ten opzichte van vandaag en dat bij deze groei het niet zeker is of tijdig alle benodigde opwek, opslag en

³⁵ TK 29012024: Stimulering duurzame energieproductie

³⁶ CE-Delft, oktober 2023, Afnameverplichting Groene Waterstof

transport beschikbaar is.³⁷ Vanuit de beleidslenzen is hier beperkt op te sturen, het zijn met name economische en infrastructurele (en technologie bij waterstofopslag) uitdagingen.

Beoordeling: **groen**. Het EU ETS1 zorgt voor een forse daling van de emissies in deze sector. We nemen aanvullend aan dat de prijs van stroom locatie- en tijdsafhankelijker wordt door verandering van de nettarieven en de splitsing van Nederland in meerdere biedzones, dit geeft een financiële prikkel om verbruik en opwek op elkaar af te stemmen. Dit vergt nog wel nadere beleid-/praktijk uitwerking, denk aan de exploitatiesubsidie ter stimulering van CO₂-vrij regelbaar vermogen en ontwikkeling waterstofopslag.

2. Economisch

We gaan in op de kosten van de transitie en of deze investeringsopgave lijkt te passen binnen beschikbare budgetten en wat het effect is van versnelling met 10 jaar.

De totale kosten van het energiesysteem voor de samenleving (eindgebruikers plus subsidies minus fiscale inkomsten) bedragen zo'n 35 miljard euro volgens een analyse van Quintel, gebruik makend van het ETM. Dit is de som van de operationele kosten van de productie van energie, import van (fossiele) energie, (infrastructuur) afschrijvingen, netbeheer en opslag en omzetting. Door Quintel in opdracht van Invest-NL is ook inzichtelijk gemaakt hoe de systeemkosten zich ontwikkelen ten opzichte van de huidige Kosten (Quintel, FIT 2024). Uit dit onderzoek blijkt dat de totale kosten met ongeveer een derde toenemen tot 55 miljard euro per jaar (II3050v2-NAT scenario). Deze groei vindt met name tussen nu en 2035 plaats (zie Figuur 12). Een versnelling van 10 jaar betekent dat de jaarlijkse investeringsopgave in de periode 2025-2040 niet met 15 miljard per jaar hoger is dan vandaag de dag maar zo'n 25 miljard.

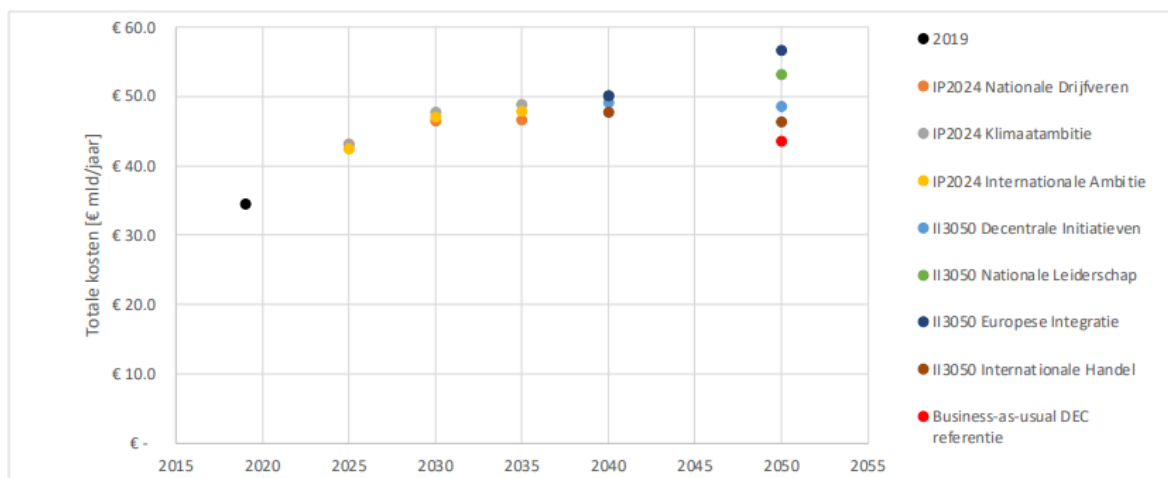
In het klimaatzaak 2040 scenario (zie ook hoofdstuk 5) nemen de kosten tot 60 miljard per jaar toe. De jaarlijkse meerinvesteringen in de periode 2019-2040 nemen met 24 miljard euro toe. Dit is een combinatie van publieke en private investeringen. De private investeringen worden direct doorbelast aan de gebruiker, de publieke investeringen momenteel via het nettarief.

In deze periode vindt er een verschuiving plaats van de post import energie (OPEX) naar de posten productie, infra en opslag³⁸ (CAPEX). Deze verschuiving is op dit moment al goed merkbaar voor elektriciteit. De prijzen van elektriciteit dalen in uren met veel duurzame opwek en er is een toename van de infrastructuurkosten.

³⁷ II3050v2-KA-2035 verwacht een toename van het totale elektriciteitsaanbod tot 265 TWh (120 TWh in 2019). In II3050v2-NAT-2050 (het scenario wat als basis dient voor Klimaatneutraal 2040 en vergelijkbaar is qua e-vraag) is de vraag toegenomen tot 480 TWh, een toename van 215 TWh in 5 jaar. Indien opschaling tussen 2025-2035 sneller gaat (conform II3050-ND-2035), dan is het verschil tussen 2035-2040 40 TWh kleiner. Indien we alle synfuels importeren scheelt dit zo'n 60 TWh aan totale energievraag, met name omdat de conversieverliezen in het buitenland plaatsvinden. Dit verschil komt bijna volledig voort vanuit minder import van waterstof (-50 TWh).

³⁸ In deze berekeningen gaat het normaliter wel om marginale kosten van de productie van stroom, of deze prijs voldoende is voor producenten om te investeren in additionele opwek uit zon en wind hangt af van de mate van (flexibele) vraagontwikkeling met name vanuit de industrie, deze blijft momenteel achter bij de prognoses mede vanwege onvoldoende netcapaciteit.

Een versnelling van de transitie met 10 jaar betekent dat netbedrijven en marktpartijen die duurzame opwek, energie importeren of flexibiliteitsdiensten leveren veel investeringen moeten doen (systeem van OPEX naar CAPEX). De nodige installaties dienen namelijk 10 jaar eerder operationeel te zijn. Dit betekent dat op korte termijn veel geld beschikbaar moet komen. Een belangrijke voorwaarde voor publieke en private partijen voor toegang tot het benodigde kapitaal om deze investeringen te kunnen doen is voldoende zicht op afnemers van niet-fossiele energie (m.n. voor publieke partijen), capaciteit op het net om energie te transporteren (m.n. voor private partijen) en zicht op hoe de schaa sprong van de publieke infrastructuur wordt doorbelast aan afnemers (de netkosten zijn voor de industrie zijn nu bijvoorbeeld aanzienlijk hoger dan omliggende landen, E-bridge 2024).



Figuur 12. Ontwikkeling kosten van het energiesysteem, huidig en elk scenario. Bron: Quintel, 2024

Specifiek voor investeringen in wind op zee ontstaat er een financieringsprobleem, wanneer een ontwikkelaar geen meerjarig afnamecontract (Power Purchase Agreement, PPA) kan sluiten met een afnemer. Dan is er een groot financieel risico vanwege kannibalisatie van de prijs op het moment dat er wind (en zon) productie is. De tenders voor wind op zee in het Verenigd Koninkrijk en Denemarken tonen aan dat de interesse om te investeren afneemt ten opzichte van eerdere jaren. Wisselend overheidsbeleid (m.u.v. ETS1) de laatste jaren omtrent tempo van verduurzamen is hier mede schuldig aan.

Indien de huidige onzekerheid omtrent daadwerkelijk afname wordt weggenomen (bijvoorbeeld door two sided contracts-for-difference) verwachten we dat er voldoende kapitaal naar Nederland vloeit om de nodige investeringen te doen. Dit betekent wel dat de Nederlandse overheid, in de situatie dat er lange tijd een verschil blijft bestaan tussen 'groen' en 'grijs', dit gat met flinke subsidies moet overbruggen terwijl er onzekerheid bestaat of de industrie elektrificeert. Nederland is een kapitaalkrchtig land met een AAA-status, investeerders zullen desondanks elk project onafhankelijk beoordelen en zonder voldoende zekerheden worden pas bij hogere ETS1-prijzen (naar verwachting omtrent 2035) voldoende investeringen gedaan. Indien dan pas met de transitie gestart wordt, gaat 2040 niet meer haalbaar zijn. In een periode van 5 jaar kan het merendeel van de energietransitie niet gerealiseerd worden, de ombouw en opschaling moet vele jaren eerder starten.

Bij bovenstaande merken we verder op dat de prognoses van TenneT een forse stijging van de nettarieven voorspellen. Een stijging die concurrentie voor Nederlandse bedrijven met het buitenland erg lastig maken. Op dit moment werkt een interdepartementale (IBO) werkgroep aan een rapport dat alternatieve financieringsopties in kaart brengt om de toegenomen investeringslasten op een andere manier te verdelen. Onze verwachting is dat dit rapport een advies uitbrengt over een andere spreiding in tijd en/of bijdrage vanuit andere middelen en dat de verwachte stijging van de netkosten lager uit gaat vallen.

Specifiek voor de opschaling van duurzame warmte geldt dat geothermie (aardwarmte) een belangrijke rol speelt om aan de toekomstige warmtevraag te kunnen voldoen. Op dit moment komen geothermie projecten echter moeizaam van de grond en blijft het aantal boringen fors achter bij de potentie (zie EBN WARM 2020). Op veel locaties is geothermie de enige warmtebron. Vanwege de kans op een foute boring (wat erg kostbaar is), is het projectrisico aanzienlijk voor individuele projecten. De overheid kan door garanties af te geven dit risico (mits deze aanvaardbaar is na voldoende studies) op zich nemen en zo de ontwikkeling (conform de ontwikkelde play-based aanpak) van deze duurzame warmtebron versnellen.

Beoordeling: **oranje**. De kosten van het energiesysteem nemen toe van 39 miljard in 2019 naar 60 miljard in het klimaatzaak 2040 scenario volgens de analyse in het sector overstijgende hoofdstuk. Dit betekent een jaarlijkse extra investering van 24 miljard per jaar in deze periode³⁹. Deze schaa sprong betekent een transitie van een OPEX gedreven systeem naar een CAPEX gedreven systeem. Voor private partijen brengt dit risico's met zich mee. OPEX (olie / brandstof) kan relatief eenvoudig verplaatst worden naar een locatie met een betere prijs. CAPEX (windmolen) staat op een locatie en vraagt om forse voorinvesteringen tegen een onzekerdere omzet (de prijs is op veel uren laag vanwege concurrentie met andere duurzame opwek). De overheid kan middels two sided contracts for difference zekerheid bieden aan investeerders/producenten, dit is wel kostbaar op het moment dat er een groot verschil tussen 'groen' en 'grijs' blijft bestaan en indien de industrie pas omtrent 2035 omschakelt. Dan is er nog maar 5 jaar om de transitie te realiseren / vraag te laten toenemen. Specifiek voor geothermie lijkt een garantiestelling vanuit de overheid een vereiste om deze duurzame warmtebron op te schalen naar het benodigde niveau in 2040.

3. Sociaal-maatschappelijk en cultureel

Deze lens kijkt naar het draagvlak voor de (versnelde) transitie, de lasten-lustenverdeling en eventuele gedragsverandering die nodig is voor versnelling.

Uit onderzoek door Motivaction (Publieksmonitor Klimaat en Energie 2023) blijkt dat "Circa zes op de tien Nederlanders maken zich zorgen over klimaatverandering, de huidige toestand van het klimaat en de wereld die wij achterlaten aan toekomstige generaties". In een studie door het CBS in 2023 stelt men dat zelfs driekwart van alle volwassenen zich zorgen maakt over klimaatverandering. Ook lijkt er draagvlak c.q. een gevoel van urgentie te zijn voor de investeringen in de infrastructuur en voor aanpassingen

³⁹ Hierbij is beperkt rekening gehouden met de prijzen van fossiele energie in de toekomst. Indien de gasprij voor 2022 wordt gehanteerd zijn de jaarlijkse kosten van het systeem ongeveer gelijk aan de kosten in 2040. Zie voor nadere toelichting hoofdstuk 5.

aan de regulering op de invoeding- en afnamecongestie te verminderen. De wijze waarop dit gebeurt is namelijk verschillend tussen landen en met name het net op zee drijft de kosten voor het elektriciteitsnet voor de huidige generatie aanzienlijk op. Het elektriciteitsnet wordt verzaamd mede ten behoeve van de volgende generatie en de discussie loopt of de te hanteren afschrijvingstermijnen niet opgerekt kunnen/moeten worden om hiervoor te disconteren. Daarnaast is er overwegend draagvlak om voor het import deel van onze energievoorziening te diversifiëren om zo niet/minder afhankelijk te zijn van bepaalde landen.

In de samenleving zijn er zorgen over waar de baten en de lasten van de energie-/klimaattransitie terecht komen. Bij een deel van de samenleving leeft het gevoel dat multinationals grote subsidies opstrijken en dat de 'burger' allerlei extra belastingen moet betalen. Dit kwam sterk naar voren in 2022, toen – als gevolg van de sancties tegen Rusland – de energieprijzen tot met een factor 10 stegen en een aantal multinationals in de energiesector recordwinsten boekten en dit uitkeerden aan hun aandeelhouders.

Qua gedragsverandering is er langzaam maar zeker een kentering gaande.⁴⁰ Verbruik moet flexibeler worden en zo veel als mogelijk confirmeren aan duurzame opwekprofielen. De eerste dynamische contracten worden nu gemeengoed in de consumentenmarkt en veel initiatieven (en wettelijke ruimte) voor het verplicht aanbieden van flexibiliteit door bedrijfsmatige verbruikers komen van de grond. Het is onze verwachting dat een periode van 15 jaar voldoende is om de nodige gedragsverandering bij bewoners en bedrijven grotendeels te realiseren, al blijven er een aantal processen die lastig of alleen tegen zeer hoge prijzen hun processen zullen afregelen zoals glasovens en bepaalde chemische processen. Deze transitie wordt naast nieuwe regelgeving en nettarieven ook gesteund door nieuwe prijsprikkels zoals het ETS2.

Voor het maken van de transitie (nieuwe installaties, fabrieken en netwerken) is veel arbeidskracht nodig. Dit is een van de grotere knelpunten, welke ook terugkomen bij technologie en infrastructuur en in paragraaf 5.7 in algemeenheid besproken wordt.

Beoordeling: **groen**. Er is een groeiende bezorgdheid in Nederland over klimaatverandering volgens verschillende studies en een breed draagvlak voor maatregelen zoals investeringen in infrastructuur en aanpassing van regelgeving om netcongestie te verminderen. We verwachten dat verdere gedragsverandering wordt gestimuleerd door dynamische contracten en/of prijsprikkels op basis van tijd en locatie. Verder verspreiden van feitelijke informatie op scholen en in de maatschappij lijkt zinvol om de samenleving beter voor te bereiden en draagvlak voor nodige transitie te vergroten.

4. Milieukundig

De transitie naar een CO₂-vrij elektriciteitssysteem en voldoende duurzame warmte heeft effecten op het milieu, zowel in Nederland als daarbuiten vanwege de noodzaak van import van met name waterstof en biomassa. We bespreken de voornaamste:

⁴⁰ <https://www.scp.nl/actueel/nieuws/2024/04/23/bereidheid-nederlanders-tot-duurzaam-gedrag-vooral-financieel-gedreven>

- Ten eerste betekent de bouw van veel opwek uit wind op zee dat dit effect heeft op het ecologisch systeem. Enerzijds wordt het ecosysteem verstoord tijdens de constructieperiode, dit heeft een kort nadelig effect. Aan de andere kant kan er niet gevist/gevaren worden in een windmolenpark, hierdoor ontstaat op de Noordzee een groot gebied waar dieren rustig(er) kunnen leven en de biodiversiteit zich kan herstellen indien ze niet verwijderd worden aan eind van hun levensduur. Verder betekent de ontwikkeling van veel wind op zee dat er elektriciteitskabels naar land aangelegd moeten worden. Deze kabels hebben een elektromagnetisch veld, dit heeft mogelijk invloed op de oriëntatie van vissen. De Rijksoverheid, samen met ontwikkelaars en universiteiten, doen onderzoek naar de verschillende effecten en proberen deze te mitigeren. Een voorbeeld van een mitigerende maatregel is het installeren van een vogel-detectie-systeem, wat ervoor zorgt dat een windmolenblad niet meer draait op moment dat een vogel nabij is.
- Ten tweede is dus ook import van veel (blauwe en groene) waterstof(dragers) voorzien. Deze waterstof zal voor een groot deel van buiten Europa komen (naast Spanje/Portugal/Schotland), met name in gebieden met veel zonuren en wind. Dit komt het aantal draaiuren van een elektrolyser ten goede en zorgt tevens voor een relatief lage kostprijs. Hiervoor geldt dat de opgewekte waterstof in theorie ook in het land waar het geproduceerd is gebruikt had kunnen worden. Echter, vaak geldt dat hier geen/minder vraag is naar deze waterstof (o.a. vanwege een lagere belasting op fossiele energie elders), dat de infrastructuur er niet is in dat land en/of dat de prijs van deze duurzame energiebron hoger is dan de betalingsbereidheid van dat land (klimaatdoel is o.a. minder ambitieus).
- Tenslotte is ook een belangrijke rol weggelegd in het toekomstige energiesysteem voor opslag van elektriciteit in batterijen. Een deel van de huidige opslag technologieën maakt gebruik van kritieke aardmetalen die beperkt beschikbaar zijn⁴¹. Een strategie hoe voldoende materialen beschikbaar te hebben lijkt noodzakelijk om te ontwikkelen en uit te voeren. Zie ook het hoofdstuk 5.5.

Beoordeling: **oranje**. De milieuimpact van de energietransitie in Nederland lijkt beperkt, maar er zijn belangrijke uitdagingen rondom de beschikbaarheid en winning van kritieke materialen. Voor batterijen, omvormers, transformatorstations en windmolens zijn zeldzame aardmetalen nodig, wat een knelpunt kan vormen als ook andere landen deze metalen massaal willen inzetten. Extra mijnbouw om aan de vraag te voldoen heeft bovendien negatieve gevolgen voor het milieu. Innovatie kan hierin echter uitkomst bieden, bijvoorbeeld door apparaten te ontwikkelen die geen kritieke materialen vereisen, door het terugwinnen van reeds gebruikte metalen om de ecologische impact van de energietransitie te beperken, en innovatie bij batterijen zoals gesmolten zout.

5. Technologisch

De technologische lens gaat in op de haalbaarheid van de benodigde innovatiesnelheid van technieken (en daarmee opschaling en kostendaling) en de mate van robuustheid van het scenario klimaatneutraal 2040.

⁴¹ Denk dan aan de volgende metalen: lithium, kobalt, nikkel, Zeldzame aardmetalen (Neodymium, Praseodymium, Dysprosium, Terbium), grafiet, koper, mangaan, zink, zilver, Platina en palladium.

Het Klimaatzaak 2040 scenario volgt in grote lijnen de innovatie verwachting zoals aangenomen voor het II3050-NAT in 2050. Dit betekent met name wat voor de ontwikkeling van de kostprijs van groene waterstof, het aantal geothermie boringen en opschaling van de opslag van waterstof – dit moet sneller gaan. We bespreken de uitdagingen en mogelijke oplossingen hieronder.

De eerste elektrolyzers op GW-schaal worden momenteel ontwikkeld in de wereld, al blijft het tempo achter bij de initiële inschattingen en roadmaps⁴². Het verwachte gevolg van de opschaling van deze – en andere technieken – moet zorgen voor kostenreductie. Innovatie is zeer lastig te voorspellen, al geldt veelal wel dat wanneer men normering introduceert er meer tijd/geld wordt gestoken in onderzoek en pilot projecten en dat dit een positief effect heeft op de kosten van een technologie. Door onzekerheid over de normering aan de afnamekant komen nauwelijks grootschalige projecten tot een FID. Aan de afnamekant kijkt men met argusogen naar de kostprijs; er is relatief veel subsidie nodig om CO₂-reductie te bewerkstelligen middels groene waterstof ten opzichte van alternatieven. Ook speelt mee dat er (nog) geen duidelijkheid is over het moment waarop er een (inter)nationale waterstofpijpleiding (zgn. backbone) ligt en wat de kosten van gebruik van dit netwerk zal gaan zijn.

Een tweede probleem is de nodige opschaling van de opslagcapaciteit van waterstof. Geproduceerde waterstof in Nederland wordt in pieken geproduceerd, met name op momenten dat er veel duurzame productie is. Er is in het II3050-NAT een verschil tussen tijden van aanbod en vraag, waardoor opslag nodig is. Ook speelt waterstof een belangrijke rol in de balancering van het energiesysteem, op momenten dat er geen duurzame opwek is produceren flexibele centrales op waterstof stroom. Om beide redenen is opslag nodig, in zoutcavernes maar ook in oude gasvelden. De eerste zoutcavernes worden naar verwachting rond 2030 operationeel. Voor opslag in oude gasvelden is momenteel de verwachting dat dit rond 2040 te realiseren is. Hier ontstaat een probleem. Versnelling van opslag in oude gasvelden lijkt niet aanzienlijk eerder (technisch) te kunnen. Dit is een bottleneck voor de productie en de inzet van waterstof⁴³ om stroom mee te produceren en zorgt voor leveringszekerheid risico's. In het klimaatneutraal 2040 scenario is rekening gehouden met de uitdaging van waterstofopslag, namelijk door extra in te zetten op productie van blauwe waterstof uit een ATR⁴⁴. Dit proces is net als elektriciteit uit een gascentrale goed regelbaar en heeft dus geen of een geringe behoefte aan opslag: er wordt geproduceerd op moment dat er vraag is. De ATR zien we als een overgangsmaatregel, wanneer er voldoende opslag en

⁴² De ambitie van Nederland was voor 2030 4GW aan elektrolyzers. In recente berichten wordt dit naar beneden bijgesteld tot 1,5GW. FID's van projecten met subsidie (zoals de OWE-regeling) worden nog niet genomen door ontwikkelaars, er is te veel onzekerheid of afnemers bereid zijn om de kosten voor groene waterstof te betalen.

⁴³ Volgens het PBL zijn 3 a 4 zoutcavernes nodig bij 3 a 4 GW elektrolyzers; in het scenario klimaatneutraal 2040 gaan we uit van 10 GW aan elektrolyzers, dat betekent dat er ongeveer tussen de 9 en 12 zoutcavernes nodig zijn.

⁴⁴ Een autothermische reforming (ATR) installatie is een technologie die wordt gebruikt om waterstof of syngas (een mengsel van waterstof en koolmonoxide) te produceren uit koolwaterstoffen, zoals aardgas. Het proces combineert elementen van zowel stoomreforming als partiële oxidatie en maakt gebruik van een gecontroleerde toevoer van zuurstof of lucht en stoom.

elektrolyzers zijn kunnen ze uitgefaseerd worden – al is dat afhankelijk van de kostprijs van beide opties.

Ten derde loopt de ontwikkeling van het aantal geothermieprojecten achter. Geothermie speelt een belangrijke rol in het duurzaam verwarmen van de gebouwde omgeving. De slaagkans van een boring alsook de kennis over deze bron bij lokale bestuurders is vaak nog beperkt, waardoor het aantal concrete projecten achterblijft. Indien er niet tijdig meer boringen worden gedaan en warmtenetten met deze bron duurzaam verwarmd, wordt het zeer onzeker of de gebouwde omgeving snel genoeg kan overstappen. Meer inzicht in de ondergrond (bijv. SCAN) kunnen helpen om het risico op een foute boring te verkleinen.

Beoordeling: **groen**. De technologische uitdagingen zijn grotendeels overkoombaar, we zijn echter uitdagingen: er is een noodzaak voor opschaling van waterstofopslag en dekking van risico's bij geothermieboringen, en onzekerheden rond de afname van de kosten van- en infrastructuur voor waterstof. De inzet van overgangsmaatregelen, zoals de productie van blauwe waterstof in en/of om Nederland, zorgt ervoor dat het 2040-doel technologisch – lastig – maar haalbaar lijkt.

6. Infrastructureel

Op dit moment is de elektra-, warmte- en waterstofinfrastructuur onvoldoende om aan de transportcapaciteit die we voor 2040 verwachten te voldoen. De huidige investeringshorizon van de netbedrijven kent een periode van 10 jaar, al kijkt men wel door in het kader van het II3050-traject naar de vraag in 2050.

DNV GL heeft onderzocht hoe groot het maakbaarheidsgat is van dit investeringsplan. In 2030 bedraagt het maakbaarheidsgat 28%, dit betekent dat in 2030 een kwart van de nodige investeringen niet uitgevoerd (kan zijn) is. De omvang van het maakbaarheidsgat in 2035 is (nog) niet bekend. Onze verwachting is dat rond 2035 de ontstane achterstand is ingelopen en dat omtrent 2035 de energie infrastructuur voldoet aan de capaciteitsvraag (aangenomen dat juiste prijsprikkels, zie de lens beleid/economie) van 2035.

Bij een versnelling van de transitie moet er in minder tijd meer gebeuren. Dit betekent dat 2040 zeer uitdagend wordt, met name omdat aan de vraagontwikkeling van 15 jaar in 5 jaar moet worden voorzien. Veel van de nodige werkzaamheden (zoals het openen van de grond om een elektriciteitskabel te vervangen) zijn ook niet te automatiseren (mechanische ondersteuning zoals een graafmachine is aangenomen). Wel is denkbaar dat de doorlooptijd van het huidige vergunningentraject wordt ingekort, bijvoorbeeld door netinfra projecten aan te merken als werkzaamheden van nationaal belang. Of dit lukt is te bezien, mede vanwege de grote toename aan elektriciteitsvraag en de daarvoor nodige netuitbreidingen. Dit vraagt ook om veel gespecialiseerde arbeidskracht.

Zoals hierboven vermeld werken de netbedrijven hard aan het uitbreiden en verzwaren van de nodige infra. Dit vraagt mensen, middelen en ruimte. Aan alle drie - en met name mensen - is momenteel op de korte termijn een tekort. Dit betekent dat tot en met 2035 er waarschijnlijk een achterstand is. Deze wordt bij een versnelling van de transitie met

10 jaar waarschijnlijk in elk geval tot 2040 verlengt. Dat betekent dat om aan de infra behoefte te voldoen, er tot 2040 (en mogelijk enkele jaren daarna, denk aan verwijdering van het redundante gasnet) heel hard gewerkt moet worden en waarschijnlijk veel nieuwe plannen en projecten niet of pas later uitgevoerd kunnen worden, de mate waarin dit speelt zal afhangen van de mate waarin bedrijven hun productieproces flexibeler kunnen inrichten (en hoe sterk hierop gestuurd wordt). Het is een forse opgave, echter met voldoende ruimtelijke reserveringen, aantrekken van extra arbeidskracht, het verkorten van vergunningprocedures, uitstellen van verwijderen van redundante gasinfra (vraagt om een wetswijziging) en het toewerken naar inzet van meer non-firm ATO's (zijnde contracten met een tijdsafhankelijke vermogensafsprake in plaats van een 24h vaste vermogensafsprake tussen een afnemer en de netbeheerder), en mogelijk het openbreken van ATO's om ze om te zetten in non-firm ATO's, schatten wij in dat de netbedrijven (en alle betrokken partijen) de infra-opgave mogelijk (net aan) aankunnen. Eenvoudig is dit echter niet.

Beoordeling: **oranje**. De beoordeling komt op oranje uit omdat de infrastructuur voor elektriciteit, warmte en waterstof momenteel onvoldoende is om de verwachte vraag in 2040 (dit is eigenlijk de vraag die voor 2050 wordt voorzien) aan te kunnen. Het maakbaarheidsgat voor investeringen is in 2030 naar verwachting 28%, wat betekent dat een aanzienlijk deel van de benodigde infrastructuur mogelijk niet tijdig gerealiseerd is. Een versnelling van de energietransitie met 10 jaar maakt de opgave nog uitdagender, vooral door een tekort aan mensen, middelen en ruimte, en het niet-automatiseerbare karakter van veel werkzaamheden. Hoewel aanpassingen zoals verkorte vergunningstrajecten en flexibele netaansluitingen kunnen helpen, is het erg onzeker of tegen 2040 aan de infra-behoefte van de verwachte vraag in 2050 kan worden voldaan.

7. Ruimtelijk

De energietransitie kent ook een grote ruimtelijke component. Veel van de uitbreiding en/of verzwaring van de elektriciteitsinfrastructuur vindt plaats in dicht bewoond gebied, bijvoorbeeld vanwege het plaatsen van transformatorstations in de wijk en laadpalen. Realisatie van deze infrastructuur uitbreidingen vraagt van alle overheden om tijdig voldoende ruimte reserveren. In de verschillende energievisies die momenteel worden opgesteld en in de Transitievisie Warmte/Wijk Uitvoeringsplan (TVW/WUP) wordt hier al deels rekening mee gehouden.

Daarnaast speelt vergunningverlening een rol in het tempo van de transitie. Veel nieuwe projecten vragen om een vergunning. Het verkrijgen van alle nodige vergunningen, bijvoorbeeld voor het bouwen van een elektrolyser, is tijdrovend en kan vanwege andere belangen vanuit bijvoorbeeld natuur (stikstof, biodiversiteit) of water (kwantiteit en kwaliteit) voor vertraging zorgen. Ook hier geldt dat overheden in hun energievisies met dit aspect rekening kunnen houden, zodat het vergunningverleningsproces minimaal vertragend werkt.

Indien de urgentie van de transitie bij alle betrokken partijen nu of in de nabije toekomst hoger als prioriteit komt te staan is onze verwachting de ruimtelijke component geen onoverkomelijk struikelblok is voor het realiseren van de transitiedoelen.

Beoordeling: **groen**. Overheden hebben momenteel al aandacht voor de ruimtebehoefte van de energietransitie. Overheden zijn zich bewust van de noodzaak om tijdig ruimte te reserveren voor infrastructuur zoals transformatorstations en laadpalen, zelfs in dichtbevolkte gebieden. Hoewel vergunningen voor nieuwe projecten soms vertraging hebben, kan dit worden geminimaliseerd door prioriteit te geven aan de transitie, waardoor ruimtelijke beperkingen geen groot obstakel vormen.

4.2.3. Conclusie en discussie

1. Hoe komen we uit op de emissieraming voor 2040?

De restemissies schatten we in op 0,0 tot 0,8 Mton CO₂eq. Dit zijn tijdelijke restemissies welke richting 2045 gereduceerd zijn tot 0 in een gemiddeld weerjaar. De onderkant van de emissieraming volgt de rationale dat er geen ETS1 rechten meer zijn in 2040 en dat er voldoende waterstofcentrale en productie (ATR) of waterstofopslag is om zo een black-out brown-out (elektriciteitsuitval tijdens een dunkelflaute) te voorkomen, zelfs bij een elektriciteitsproductie die jaarlijks is toegenomen tot circa 420 TWh. Dit betekent wel dat ook in de periode 2025-2035 forse versnelling gerealiseerd moet worden, de schaa sprong naar circa 420 TWh in 2040 kan niet in een periode van 5 jaar (2035-2040) gedaan worden aangezien in 2035 de elektriciteitsproductie volgens het I13050v2-KA ‘slechts’ circa 275 TWh bedraagt.⁴⁵

Voor de bovenkant van de bandbreedte gaan we uit van het gemiddelde van PBL TVKN 2050. Vanwege de snelle elektrificatie (factor 4 toename vraag⁴⁶) t.o.v. realisatie duurzame opwek, regelbaar vermogen en flexibiliteit in het systeem wordt aan een deel van de vraag tijdens een dunkelflaute-periode vanuit fossiele energie in voorzien. De rationale voor de bovenkant van de bandbreedte is dat het vanuit kostenefficiëntie waarschijnlijk goedkoper is om voor de laatste uren in het jaar gasgestookte centrales in te zetten en negatieve emissiecertificaten te kopen dan om een emissievrij systeem te hebben dat aan de vraag van 2050 in 2040 voldoet. Per jaar hangt het van het weer af hoe groot de restemissies daadwerkelijk zijn; de 0,8 is een ruwe inschatting van de bovenkant van de restemissies. Deze emissies kunnen technisch tegen zeer hoge kosten omlaag worden gebracht. Dit kan bijvoorbeeld met CO₂-afvang op bestaande gascentrales, die hebben echter zeer weinig draaiuren wat deze investering ongunstig maakt. Al speelt hier ook de vraag of deze extra maatregel – wat extra arbeid vraagt – voor 2040 af kan zijn.

2. Waarom is versnelling haalbaar en wat zijn de voorname beperkingen?

De elektriciteitsproductie neemt sterk toe, met name door de beoogde jaarlijkse uitbreiding van 3 GW aan windcapaciteit op zee vanaf 2030. Deze snelle opschaling die maximale inspanning vergt, vraagt om aanzienlijke investeringen in transportcapaciteit op zowel land als zee, de bouw van elektrolyzers op zee en aan de kust en de ontwikkeling van flexibele afnamecapaciteit op locaties waar elektriciteit naartoe kan worden getransporteerd. Flexibele waterstofcentrales zullen de rol van fossiele centrales het

⁴⁵ De totale elektriciteitsvraag is in 2040 en 2035 groter. Door levering vanuit flexbronnen en import wordt aan de totale vraag voldaan.

⁴⁶ In 2019 bedraagt de totale vraag 120 TWh. Dit neemt in het eindbeeld toe tot circa 500 TWh in 2040, waarvan circa 75 TWh direct en indirect ingezet wordt voor de productie van synfuel, zie I13050v2 figuur 8 en 20 scenario Nationaal Leiderschap.

volgend decennium (grotendeels) overnemen, maar hiervoor zijn nog grote technologische en financiële stappen nodig (op dit moment is circa 1,5 MW aan elektrolyse capaciteit operationeel), net als voor de uitbreiding en versterking van de infrastructuur voor elektriciteit, waterstof en opslag (1 zoutcaverne omstreeks 2030).

Tabel 4. Haalbaarheidsinschatting per lens voor de sector Elektriciteit en Warmte

Lens	Beoordeling haalbaarheid
Beleid	Groen
Economisch	Oranje
Sociaal maatschappelijk en cultureel	Groen
Milieukundig	Oranje
Technologisch	Groen
Infrastructureel	Oranje
Ruimtelijk	Groen

Als de benodigde opwekkingscapaciteit, netverzwaring en stimulerende regulering voor flexibiliteit niet tijdig worden gerealiseerd, is het waarschijnlijk dat het aanbod in 2040 niet voldoende is om de vraag van 2050 – die tien jaar naar voren wordt gehaald – te dekken. In dat geval is het afhankelijk van de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag in andere sectoren en het buitenland hoe groot de restemissies zijn. De leveringszekerheid zal echter niet direct in gevaar komen, aangezien wij verwachten dat fossiele backupcentrales beschikbaar blijven om bij te springen en brown- of black-outs te voorkomen, die tijdens een dunkelflaute voor zouden kunnen komen. Dit vraagt waarschijnlijk wel om de introductie van een capaciteitsmechanisme (anders ontstaan hele hoge prijsspieken op het moment dat deze centrales draaien en/of de centrales zijn niet beschikbaar). Dit betekent dat mede afhankelijk van de opschaling aan zowel de vraag als aanbodzijde er nog restemissies zijn in 2040.

Om opschaling te realiseren moeten vergunningprocedures worden versneld, ruimtelijke reserveringen tijdig beschikbaar komen en de kosten van blauwe en groene waterstof (waaronder import) dalen en/of een nog groter deel van de synthetische brandstoffen geïmporteerd worden. Dan zou een nagenoeg volledig fossielvrij elektriciteitssysteem haalbaar zijn.

Een bijkomende uitdaging is de tijdsdruk: de bouw van respectievelijk de benodigde capaciteit per jaar aan elektrolyzers en waterstofopslag plus de 3GW per jaar aan wind op zee betekent een opschaling die vlak buiten de fysieke grenzen ligt (PBL TVKN, tabel 4.1). Om deze investeringen te realiseren is zekerheid over voldoende afzet (tegen een kostendeckende prijs) noodzakelijk alsook innovatie om sneller meer geïnstalleerd vermogen te realiseren en de aanlanding en doorvoer van stroom te versnellen. Op dit moment is er nog veel onzekerheid over de afzetontwikkeling, dit heeft invloed op de investeringsbereidheid van partijen. Mochten investeringen achterblijven bij de verwachte vraag kan de overheid kiezen om het mechanisme van ‘two sided contract for difference’ in te zetten, om zo producenten van inkomsten te verzekeren.

Het tempo van de energietransitie in het buitenland speelt ook een rol. Duitsland wil bijvoorbeeld in 2045 klimaatneutraal zijn en samen met 6 andere Europese lidstaten in

2035 een CO₂-vrij elektriciteitssysteem hebben. Voor al deze landen geldt dat realisatie van dit doel mede afhangt van de mate van elektrificatie van andere sectoren. Aangezien de verduurzaming in omliggende landen de emissies in Nederland beïnvloedt hebben hun keuzes invloed op ons. Ook bepaalt de capaciteit van interconnectoren of Nederland meer of minder moet doen om aan de eigen vraag te voorzien op het moment dat wij zelf onvoldoende duurzame opwek hebben.

Om zowel de transitie van de elektriciteitssector te versnellen en de productie te vergroten gaan we ervanuit dat al de volgende acties ondernomen worden:

Tabel 5. Voorgestelde beleidsmaatregelen voor de sector Elektriciteit en warmte

Type	Beleidsvoorstel
Beprijzen	Beschikbaar maken handel in negatieve emissies om restemissies te compenseren
Stimuleren	De inkomsten uit de verkoop van emissierechten kunnen worden ingezet voor investeringen in schone energieprojecten
Normeren	Omtrent 2030 is een dynamisch nettatarief in werking dat afhankelijk is van tijd en locatie
Stimuleren	Introductie exploitatiesubsidie waterstofcentrales tot en circa 2035; alternatief kan gekozen worden voor een capaciteitsveiling – mogelijk ook nodig voor gas tot de transitie afgerond is.
Stimuleren	Ontwikkelen voldoende waterstofopslag om waterstof en elektriciteit te balanceren
Normeren	Vind manieren om de stijging van de netkosten voor afnemers te spreiden in de tijd, zie ook het advies van de IBO werkgroep
Beprijzen	Dek risico's af voor het uitvoeren van geothermie boringen om warmtenetten van een bron te voorzien
Overig	Opstellen van een kritieke materialen strategie en/of recycling t.b.v duurzame opwek en opslag
Normeren	Maak ruimtelijke reserves om aanleg van kabels en leidingen te versnellen; beperkt bezwaarprocedures (zie o.a. aanpak in VK).
Overig	Leid meer mensen op om technische werkzaamheden te kunnen uitvoeren
Normeren	Onttrek niet gebruikte capaciteit in firm-ATO's, zodat andere partijen sneller kunnen elektrificeren
Stimuleren	Introductie van capaciteitsmechanisme t.b.v. regelbaar vermogen en inzet van contract for difference bij achterblijven wind op zee

3. Wat is de omvang van de restemissies?

De omvang van de restemissies zijn sterk afhankelijk van de ontwikkeling/investeringen door landen om ons heen, versnelling GW aan wind op zee, de mate waarin er voldoende import is van groene/blauwe waterstof(dragers) en opslag beschikbaar komt en wat de versnelling is in de periode 2025-2035.

Wij hanteren een middenwaarde van 0,4 Mton CO₂, dit is het gemiddelde van de bandbreedte zoals hierboven toegelicht. De daadwerkelijk restemissies van het elektriciteitssysteem zijn sterk afhankelijk van: 1) het weer, we gaan voor deze studie uit van een gemiddeld weerjaar. In een warm jaar (m.n. warme winter met veel wind) zijn de emissies lager, in een koud jaar (en minder wind) zijn de emissies hoger⁴⁷; 2) ontwikkeling

⁴⁷ Wanneer in het ETM Klimaatneutraal 2040 scenario niet voor een gemiddeld weerjaar wordt gekozen maar voor het weerjaar 1997 (Elfstedentocht) neemt de import van biomassa met ca. 28 PJ toe om aan de

vraag m.n. vanuit de industrie; 3) beschikbaarheid voldoende strategische waterstofopslag locaties om ook in koude en windarme jaren volledig CO₂-neutraal te worden; en 4) versnelling opschaling wind op zee, zon en flexibele bronnen zoals batterijen. Mocht de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag achterblijven, bijvoorbeeld door de productie van synfuels elders, dan valt de vraag naar elektriciteit iets lager uit. Voor de inzet van fossiele centrales tijdens een dunkelflaute heeft dit weinig tot geen effect aangezien synfuels geproduceerd met name geproduceerd worden uit geïmporteerde waterstof. De restemissies zijn tijdelijk, in 2045 verwachten we dat het systeem aan de vraag van 2050 kan voldoen aangezien dan alle nodige infra, waterstofopslag, import en productie, ook in koude en windarme jaren, gereed is.

Aangezien de sector onder ETS1 valt zal de sector nagenoeg volledige verduurzaamd zijn. Dit vergt wel aanzienlijke opschaling van productie, opslag/conversie en infrastructuur en aanpassing aan wet- en regelgeving over tariefstelling die afhankelijk is van uur en locatie. Een versnelling van 10 jaar is uitdagend, met name vanwege de toename in vraag ten opzichte van het II3050v2-2040 basispad. Realisatie hangt ook sterk af van de mate waarin de industrie in Nederland blijft, gezien hun grote aandeel in de totale directe en indirecte elektriciteitsvraag. Een versnelling van het eindbeeld naar 2045 lijkt ons haalbaar. In 2040 zullen er nog beperkt restemissies zijn. De omvang hiervan zal per jaar verschillen en dit hangt sterk samen met het weer. Wij beoordelen de haalbaarheid versnelling naar 2040 met: **oranje**.

4.2.4. Geraadpleegde bronnen

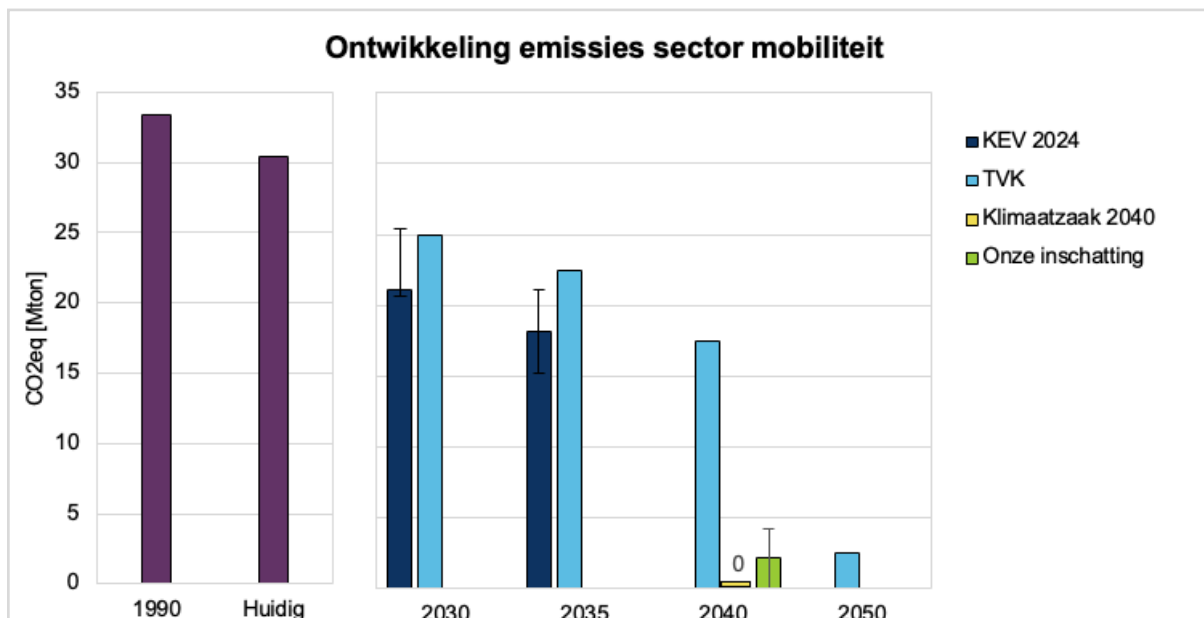
- CBS, klimaatverandering en energietransitie: opvattingen en gedrag van Nederlanders (2023)
- E-bridge, Electricity cost assessment for large industry in the Netherlands, Belgium, Germany and France (2024)
- Netbeheer Nederland, Integrale Infrastructuurverkenning 3050 – II3050 (2023)
- PBL, Klimaat- en Energieverkenning 2024 (2024)
- PBL, Transitieverkenning klimaatneutraal 2050 (2024)
- PBL, Reflectie op het concept NPE (2023)
- PBL, Productie, import, transport en opslag van waterstof (2024)
- Quintel, Pilot Financieel Inzicht in de Energietransitie (FIT) (2024)
- Min. EZK, Nationaal Programma Energiesysteem (2023)
- Ipsos, Nederlanders over klimaatverandering (2021)

energievraag te voldoen. 40 PJ aan biomassa komt overeen met 1,5 Mton CO₂eq. aan fossiel aardgas inzet t.b.v. elektriciteitsproductie. Een ander weerjaar, 2004, met veel periodes van tekorten en overschotten uit duurzame opwek zorgt ook voor 28 PJ extra import van biomassa. Het is dus aannemelijk dat +- elke 5 jaar er een tekort ontstaat, gemiddeld betekent dit per jaar een tekort van ca. 0,3 Mton CO₂eq. In het meest extreme jaar (1987) neemt de import van biomassa verder toe.

4.3. Analyse sector: Mobiliteit

4.3.1. Inleiding

De sector mobiliteit is historisch gezien een sector, waar de CO₂-emissies stegen door toename van verkeer en weinig CO₂-reductie per kilometer. Met name dankzij de introductie van EU-regelgeving rondom CO₂-emissiestandaarden en de introductie van batterij-elektrische voertuigen is deze trend omgebogen naar een trend van CO₂-besparing in de afgelopen jaren. Door Europese en (de implementatie in) nationale regelgeving wordt deze CO₂ reductie de komende jaren fors voortgezet (zie Figuur 13). In 2040 zal er bij het huidige beleid alsnog een flinke restemissie zijn. We verwachten dat strenger beleid vanuit de overheid de CO₂-reductie verder kan terugbrengen dan nu wordt geprognostiseerd, maar dat het terugbrengen van de emissies naar nul nog niet volledig mogelijk is, tenzij er een forse inzet van biodiesel is. In onderstaande paragraaf lichten we de prognoses van de KEV, II3050 en de trajectverkenning 2050 van PBL verder toe. Daarna lichten we toe hoeveel CO₂-reductie nog extra mogelijk is in 2040 met strenger beleid en een verdergaande inzet van zero-emissie (ZE) voertuigen en materieel.



Figuur 13. Ontwikkeling emissies sector mobiliteit tussen 1990 en 2050 op basis van verschillende bronnen

1. Ontwikkeling emissies 1990-2030

De uitstoot van de sector mobiliteit bedroeg 33,4 Mton CO_{2eq} in 1990. Hiervan werd ongeveer 17,9 Mton veroorzaakt door personenvervoer, 10,5 Mton door goederenvervoer en 5,1 Mton vanuit mobiele werktuigen. Tussen 1990 en nu namen de broeikasgasemissies eerst licht toe in de eerste decennia, gevolgd door een meer recente daling. In de jaren '90 en 2000 namen de emissies als gevolg van de groei van het verkeersvolume verder toe. Dit was vooral zichtbaar in de toename van het autoverkeer en de groei van het vrachtvervoer. Innovaties in brandstofefficiëntie en de introductie van strengere Europese emissienormen voor voertuigen hadden een beperkt dempend effect, maar waren niet voldoende om de stijgende trend te keren.

Vanaf 2010 begonnen de emissies langzamerhand te stabiliseren, mede door een verbeterde brandstofefficiëntie, maar het echte omslagpunt kwam na 2015. De overgang naar elektrische voertuigen (EV's) kwam in deze periode op gang, gestimuleerd door belastingvoordelen en investeringen in laadinfrastructuur. Daarnaast leidde het Klimaatakkoord van 2019 tot verdere maatregelen om de uitstoot in de transportsector te verminderen, zoals de stapsgewijze uitfasering van fossiele voertuigen. Hoewel de emissies in de mobiliteitssector tussen 1990 en 2022 slechts beperkt zijn gedaald, werd in de laatste jaren een duidelijke trend ingezet richting emissiereductie als gevolg van beleidsmaatregelen en trends zoals thuiswerken. Echter, de sector blijft een van de grootste bronnen van CO₂-uitstoot, en verdere ingrijpende maatregelen zijn nodig om de emissiereductiedoelen voor 2030 en 2050 te halen.

Het PBL verwacht in de KEV 2024 een reductie van de uitstoot in 2030 tot 23,2 Mton CO₂ (bandbreedte 20,6 – 25,4). Dit is een forse reductie ten opzichte van 2022, maar is nog onvoldoende om klimaatdoelstellingen te realiseren.

2. Transitie sector 2030-2050 (II3050-NAT)

In het Nationaal Leiderschap-scenario II3050 wordt de mobiliteitssector tussen 2030 en 2040 grondig getransformeerd om klimaatneutraliteit te bereiken. De elektrificatie van het wegverkeer speelt hierin een centrale rol, waarbij het merendeel van de personenauto's, vrachtwagens en bussen tegen 2040 volledig elektrisch is. Tegen 2030 is al een groot deel van de nieuw verkochte voertuigen emissievrij, terwijl fossiele brandstoffen geleidelijk worden uitgefaseerd. Dit scenario legt de nadruk op de versnelde uitrol van laadinfrastructuur, zowel langs snelwegen als in stedelijke gebieden, om deze grootschalige elektrificatie te ondersteunen.

Naast elektrische voertuigen spelen ook waterstof en LNG een rol, met name in het zware transport en de binnenvaart, waar elektrificatie minder haalbaar is. Voor een gedeelte (25%) van het busvervoer en van vrachtauto's wordt waterstof gebruikt in dit scenario. Bij binnenvaart is in dit scenario 75% elektrisch en 25% LNG. Slimme laadsystemen en vehicle-to-grid technologieën worden essentieel om de stijgende elektriciteitsvraag in balans te houden en piekbelastingen op het net te voorkomen. Het scenario voorziet tevens in een verschuiving van individueel autogebruik naar gedeelde mobiliteitsoplossingen en een uitbreiding van het openbaar vervoer, om de vraag naar energie te beperken en de mobiliteit efficiënter te maken. Tegen 2040 is de mobiliteitssector in dit scenario emissievrij en geïntegreerd in een duurzaam energiesysteem, maar dit vereist sterke nationale regie, forse investeringen in infrastructuur en samenwerking tussen overheden en de private sector.

Niet alle uitgangspunten van het scenario zijn wat ons betreft haalbaar. Zo verwachten wij dat de elektrificatie van binnenvaart in 2040 nog niet zo ver is als in dit scenario is aangenomen. Ook zijn mobiele werktuigen geen onderdeel van dit scenario, maar wel van deze studie. In de rest van dit hoofdstuk beschrijven we de uitkomsten van onze analyses. Hiervoor hebben we de KEV 2024 als vertrekpunt genomen en zijn via analyse op de verschillende lenzen nagegaan in hoeverre de introductie van ZE voertuigen, vaartuigen en werktuigen versneld kan worden.

3. Transitiepad volgens PBL TVKN

In het PBL-rapport TVKN wordt beschreven hoe de mobiliteitssector in Nederland tussen 2030 en 2050 een ingrijpende transitie zal doormaken om volledig klimaatneutraal te worden. De elektrificatie van het wegverkeer is een van de belangrijkste pijlers van deze transitie, waarbij het aandeel elektrische voertuigen fors toeneemt. Tegen 2050 moeten bijna alle personenauto's, bussen en vrachtwagens emissievrij zijn, aangedreven door elektriciteit of, in bepaalde gevallen zoals het zware vrachtverkeer, waterstof. De rol van fossiele brandstoffen wordt in deze periode uitgefaseerd, en alternatieven zoals biobrandstoffen worden in de overgangperiode ingezet voor moeilijk te elektrificeren transportmiddelen, zoals de lucht- en scheepvaart.

Het rapport benadrukt dat naast technologische innovaties ook veranderingen in reisgedrag en ruimtelijke ordening nodig zijn. Dit betekent een verschuiving naar duurzamere vervoersopties, zoals fietsen, wandelen en het gebruik van openbaar vervoer. Ook gedeelde mobiliteitsdiensten worden belangrijker om de totale vervoersvraag te verminderen. Daarnaast vereist de transitie grootschalige investeringen in laadinfrastructuur, inclusief snellaadstations en slimme laadnetwerken, om de toenemende vraag naar elektriciteit te faciliteren. Tegen 2050 is de mobiliteitssector in dit scenario volledig emissievrij, maar het PBL waarschuwt dat dit een gecoördineerde aanpak vergt, met duidelijke beleidssturing, investeringen en gedragsveranderingen om de gestelde doelen te halen.

4.3.2. Beoordeling haalbaarheid

In deze sectie analyseren we de verschillende lenzen voor de sector mobiliteit. In deze analyse hanteren we als uitgangspunt onderscheid naar modaliteiten, omdat daartussen grote verschillen zijn in haalbaarheid. We beschouwen de volgende modaliteiten:

1. Personenauto
2. Bestelauto
3. Vrachtauto
4. Ov-bus
5. Touringcar
6. Binnenvaart
7. Mobiele werktuigen
8. Railverkeer

Deze categorieën zijn onder te verdelen in meerdere subcategorieën. Zo bestaat de categorie personenauto uit verschillende segmenten op basis van de grootte van auto's. Voor deze studie zijn een aantal subcategorieën relevant om te benoemen, omdat deze relevant zijn bij de verschillende lenzen:

1. Vrachtauto: bij vrachtauto zijn er verschillende typen die zich kenmerken door de afstand die gereden wordt (kort of lang) en door de goederen die vervoerd moeten worden.
2. Mobiele werktuigen: deze categorie bestaat uit bouwwerktuigen, landbouwwerktuigen, industrie (bv. vorkheftrucks), consumenten (bv. grasmaaiers), HDO (= handel, dienst en overheid, bv. verticuteermachines), containeroverslag (bv. zware heftrucks) (TNO, 2023b).

3. Railverkeer: het railverkeer bestaat uit zowel personen- als goederenvervoer. Onder railverkeer vallen ook tram en metro. Omdat het volledige tram- en metronetwerk in Nederland al is geëlektrificeerd, worden tram en metro verder niet meegenomen in deze studie.

1. Beleid

Passend beleid is een randvoorwaarde om (klimaat)doelstellingen te realiseren. De huidige Europese doelstelling ligt op klimaatneutraliteit in 2050 voor alle sectoren en dus ook voor mobiliteit. In Tabel 6 is een overzicht opgenomen van het huidige beleid op Europees en nationaal niveau. Ook staan er suggesties in voor het aanscherpen van beleid of het toevoegen van nieuw beleid.

Algemeen beeld

Opvallend is dat er, zowel Europees als nationaal, grote verschillen zichtbaar zijn in doelstellingen en ambities tussen de verschillende modaliteiten. Enerzijds is dit een logisch gevolg van de beschikbaarheid van voertuigen (bv. bij personen- en bestelauto's) waardoor doelstellingen gesteld kunnen worden. Anderzijds kunnen aanvullende doelstellingen ertoe leiden dat innovaties en ontwikkelingen in een stroomversnelling komen zodat er ook klimaatneutrale opties beschikbaar komen voor modaliteiten waar dit nu in beperkte mate het geval is (bv. Zwaar wegverkeer⁴⁸ en binnenvaart). Aanvullend beleid is voor alle modaliteiten noodzakelijk, behalve voor ov-bussen. Dit lichten we hieronder verder toe.

Verplichte Zero-Emissie nieuwverkopen

Een belangrijk punt dat speelt bij verschillende voertuigcategorieën, is dat het naar voren halen van verplichte ZE nieuwverkopen, bijdraagt aan de haalbaarheid van de doelstellingen. Dit speelt bij personenauto's, bestelauto's, vrachtauto's, touringcars en bij mobiele werktuigen. Voor al deze voertuigcategorieën zijn Europese doelstellingen geformuleerd, en bij een aantal categorieën zijn er aanvullende nationale ambities geformuleerd. Idealiter worden deze doelstellingen naar voren gehaald zodat het effect op andere lenzen beperkt wordt. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- Economische lens: Indien de ingroei van ZE voertuigen eerder plaatsvindt, zijn er minder hoge afschrijvingskosten voor fossiel aangedreven voertuigen.
- Sociaal maatschappelijke lens: een latere ingroei van ZE voertuigen kan ertoe leiden dat lage inkomensgroepen of kleine ondernemers met een beperkt budget op het laatste moment een grote uitgave moeten doen, die mogelijk niet haalbaar is. Een vervroegde ingroei van ZE voertuigen kan na 2035 leiden tot een beter verzadigde tweedehands markt met meer (betaalbare) opties.

⁴⁸ Onder zwaar wegverkeer vallen vrachtauto's en touringcars

Tabel 6. Overzicht huidig beleid (Europees en nationaal) en voorstel aangescherpt en/of nieuw beleid

Modaliteit	Europees Huidig beleid	Nationaal Huidig beleid	Voorstel aanscheping beleid en/of nieuw beleid	Beleidsinzet restemissies
Personenauto	100% ZE-nieuw verkopen in 2035	Ambitie: 100% ZE-nieuwverkopen in 2030	Ambitie omzetten in doelstelling, indien mogelijk (zie uitleg in tekst onder tabel). Hierdoor vindt de ingroei van elektrische auto's versneld plaats en komt er eerder een tweedehands markt beschikbaar met beter betaalbare elektrische personenauto's.	Inzet 100% ZE in 2040. Om dit mogelijk te maken is er beleid nodig voor de resterende fossiel aangedreven personenauto's. Opties hiervoor zijn bv. sloopregelingen of export.
Bestelauto	100% ZE-nieuw verkopen in 2035	Invoeren ZE-zones vanaf 2025 voor bestelauto's. Dit geldt in een gedeelte van de gemeenten 2025: Afschaffen BPM vrijstelling diesel	Door eerder ZE nieuw verkopen te verplichten, is een groter gedeelte van het wagenpark in 2040 ZE dan bij verplichte ZE nieuw verkoop in 2030, indien mogelijk (zie toelichting in tekst onder deze tabel). Het is wel mogelijk om ZE-zones te vergroten en toe te voegen, maar daarmee wordt geen volledig klimaatneutraal wagenpark afgedwongen.	Hetzelfde als personenauto's.
Vrachtauto	64% minder emissies over het nieuw verkochte wagenpark in 2035 90% minder emissies over het nieuw verkochte wagenpark in 2040	Invoeren ZE-zones vanaf 2025 voor vrachtauto's. Dit geldt in een gedeelte van de gemeenten, dezelfde als voor bestelauto's. 10% ZE-voertuigen in 2030 (dit is met name voor stadslogistiek en regionaal verkeer) Ambitie: 100% ZE-voertuigen nieuwverkoop in 2040	Zie bestelauto. Aanvullend daarop is een voorwaarde dat er voldoende aanbod ZE is van alle typen vrachtauto's. Het is onzeker of dit aanbod voldoende is (dit lichten we nader toe in de volgende lenzen)	Doordat er een onzekerheid is in voldoende aanbod van vrachtauto's, verwachten we restemissies. Deze worden gecompenseerd. De compensatie van restemissies wordt toegelicht in Hoofdstuk 4.8.

Modaliteit	Europees Huidig beleid	Nationaal Huidig beleid	Voorstel beleid en/of nieuw beleid	aanscherping	Beleidsinzet restemissies
Ov-bus	90% van de nieuwverkopen is ZE in 2030 100% van de nieuwverkopen is ZE in 2035	100% ZE-ov bussen instroom 2025 100% ZE-ov bussen in 2030	Geen verdere	aanscherping nodig	100% ZE in 2040, waarschijnlijk al eerder.
Touringcar	90% van de nieuwverkopen is ZE in 2030 100% van de nieuwverkopen is ZE in 2035	100% ZE nieuw verkoop touringcars in 2040 Ambitie: ZE-zones vanaf 2027	Ook voor touringcars geldt dat het naar voren halen van verplichte ZE nieuw verkoop resulteert in minder vervroegde afschrijving. Bij touringcars geldt hetzelfde als bij vrachtauto's: een voorwaarde is dat er voldoende marktaanbod is.		Doordat er een onzekerheid is in voldoende aanbod van touringcars, verwachten we restemissies. Deze worden gecompenseerd. De compensatie van restemissies wordt toegelicht in Hoofdstuk 4.8.
Mobiele werktuigen – Afval- en reinigingsvoertuigen	64% minder emissies over het nieuw verkochte wagenpark in 2035 90% minder emissies over het nieuw verkochte wagenpark in 2040	12,5% van de aangeschafte voertuigen door gemeenten ZE per 2026 Ambitie: 100% ZE-voertuigen in 2030 Ambitie: ZE-zone vrachtoertuigen per 2025	Ambitie omzetten in doelstelling: 100% van de aangeschafte voertuigen door gemeenten ZE per 2030, mits technisch haalbaar.		Doordat er een onzekerheid is in voldoende aanbod van mobiele werktuigen, verwachten we restemissies. Deze worden gecompenseerd. De compensatie van restemissies wordt toegelicht in Hoofdstuk 4.8.
Mobiele werktuigen – Bouwmaterieel	Niet gespecificeerd	Schoon en Emissieloos bouwen convenant (SEB) (Rijksoverheid, 2024a) 60% NOx-reductie in de bouw in 2030 t.o.v. 2019 0,4 Mton CO ₂ -reductie in 2030 t.o.v. 2019 75% minder gezondheidsschade t.o.v. 2016	Aanscherpen doelstelling in 2030, mits technisch haalbaar.		Doordat er een onzekerheid is in voldoende aanbod van mobiele werktuigen, verwachten we restemissies. Deze worden gecompenseerd. De compensatie van restemissies wordt toegelicht in Hoofdstuk 4.8.

Modaliteit	Europees Huidig beleid	Nationaal Huidig beleid	Voorstel beleid en/of nieuw beleid	Beleidsinzet restemissies
Mobiele werktuigen - landbouw	Niet gespecificeerd	Ambitie niet gespecificeerd.	Formuleren van een ambitie, met oog voor de haalbaarheid binnen de andere lenzen.	Doordat er een onzekerheid is in voldoende aanbod van mobiele werktuigen, verwachten we restemissies. Deze worden gecompenseerd. De compensatie van restemissies wordt toegelicht in Hoofdstuk 4.8.
Binnenvaart	Niet gespecificeerd	Ambitie: 150 ZE-vaartuigen in 2030 (van de 1.750) (Rijksoverheid, 2024b) Ambitie: klimaatneutrale binnenvaart in 2050 (Rijksoverheid, 2024b)	Formuleren van ambitie na 2030. Alle nieuwe schepen ZE vanaf 2035 Onderzoeken of ZE-zones binnenvaart mogelijk zijn. Daarbij is het belangrijk om te onderzoeken op welke havens er overwegend korte afstanden gevaren worden. Verplicht tanken biobrandstof vanaf 2040	Momenteel is er een zeer beperkt aanbod van ZE binnenvaartschepen. De verwachting is dat er tegen 2040 een beperkt aanbod zal zijn van ZE binnenvaartschepen, waardoor er nog restemissies zijn in 2040. Deze worden gecompenseerd. De compensatie van restemissies wordt toegelicht in Hoofdstuk 4.8.
Railverkeer – personen	Niet gespecificeerd	Elektrificatie Zutphen – Hengelo en Almelo – Mariënberg (ProRail, 2024)	Extra bovenleidingen toevoegen op trajecten waar met dieseltreinen gereden wordt. Waar bovenleidingen niet mogelijk zijn, inzetten op batterij elektrische aandrijvingen of waterstof	Inzet 100% ZE in 2040

Modaliteit	Europees Huidig beleid	Nationaal Huidig beleid	Voorstel aanscherping beleid en/of nieuw beleid	Beleidsinzet restemissies
Railverkeer - goederen	Niet gespecificeerd	Er is geen beleid of ambitie geformuleerd	Emissies van railverkeer goederen worden grotendeels veroorzaakt door rangeerbewegingen. Het is niet mogelijk om te rangeren met bovenleidingen, waardoor rangeren uitgevoerd zal moeten worden met batterij elektrische aandrijving of met waterstof. Mogelijk belemmert bestaande regelgeving elektrisch rangeren (Spoorpro, 2023). Het aanpassen van regelgeving kan er mogelijk toe leiden dat elektrisch rangeren mogelijk wordt.	Inzet 100% ZE in 2040

Het is onduidelijk of het mogelijk is om nationaal andere doelstellingen te hanteren dan Europese, zoals verbod op de verkoop van fossiel aangedreven personenauto's. Op dit moment kan niet geconcludeerd worden dat strengere Nederlandse regelgeving niet mogelijk is, maar er is ook niet met zekerheid te zeggen of de EU een nationale versnelling zal goedkeuren. Dit heeft te maken met een spanning tussen interne marktregels (auto's die toegestaan zijn in de EU zijn daarmee automatisch ook toegestaan in Nederland) en milieuregels (Nederland is vrij om strenger milieubeleid te voeren dan de EU voorschrijft). Natuur & Milieu heeft een juridische quickscan uitgevoerd naar de verenigbaarheid van een nationale zakelijke vlootnorm met het EU-recht. De conclusie van deze quickscan is dat een zakelijke vlootnorm mogelijk moet zijn, mits er voldaan wordt aan drie voorwaarden (Natuur & Milieu, 2023):

1. De norm leidt niet tot strengere sancties voor fabrikanten.
2. De norm leidt niet tot strengere sancties op gebieden die zijn opgenomen in de Kaderverordening.
3. De norm leidt niet tot belemmering van het vrije verkeer.

Deze voorwaarden gelden waarschijnlijk ook voor het naar voren halen van de doelstellingen zoals deze hierboven besproken zijn.

Mocht er niet kunnen worden voldaan aan deze voorwaarden, dan is de consequentie dat het naar voren halen van doelstellingen mogelijk op Europees niveau moet worden geregeld. Dit zijn doorgaans lange trajecten, vanwege de afstemming met andere lidstaten en de doorlooptijden van besluitvormingsprocessen. Het formuleren van een ambitie op nationaal niveau is sowieso mogelijk, waarbij passend beleid ervoor kan zorgen dat er invulling gegeven kan worden aan deze ambitie. De meest effectieve beleidsmaatregelen hiervoor zijn beprijzings-subsidiemaatregelen, waarbij ZE voertuigen financieel aantrekkelijk gemaakt worden. Beprijzing en subsidie kunnen, afhankelijk van de prikkel, een sterke sturing geven om ambities te halen, maar geven de consument nog altijd keuzevrijheid om fossiel aangedreven voertuigen te kopen. Met beprijzen en

subsidie zullen er in 2040 meer fossiel aangedreven voertuigen zijn dan wanneer een verbod op fossiele voertuigen vanaf 2030 van kracht is. Dit maakt het behalen van de doelstelling in 2040 onzekerder, omdat een grotere groep fossiele voertuigen in 2040 vervangen moet worden en ZE voertuigen beschikbaar moeten zijn als vervanging.

Er zijn hiervoor veel mogelijkheden te bedenken, enkele hiervan zijn:

- 1 Verhogen brandstofaccijns: hierbij wordt de accijns op brandstoffen verhoogd, waardoor elektrisch rijden aantrekkelijker wordt.
- 2 Gedifferentieerde motorrijtuigenbelasting (mrb): alle voertuigen die in Nederland geregistreerd staan, betalen mrb. Door te differentiëren naar type aandrijving (fossiel of ZE) kan ZE rijden gestimuleerd worden.
- 3 Differentiatie in aanschafbelasting (bpm): bij de aanschaf van een voertuig wordt belasting betaald als de aandrijving fossiel is. Voor elektrische voertuigen hoeft geen (of beperkt bpm betaald te worden. Dit beleid is reeds in uitvoering, met als doel om de aankoop van elektrische auto's te stimuleren.

De effectiviteit van de individuele maatregelen is niet gekwantificeerd in deze studie.

Regionaal beleid

Naast Europees en nationaal beleid speelt ook regionaal beleid een belangrijke rol: beleid op provinciaal of gemeentelijk niveau kan een belangrijke bijdrage leveren aan het realiseren van doelstellingen. Er zijn grote verschillen te zien tussen verschillende gemeenten en provincies en het beleid dat gevoerd wordt of gaat worden om klimaatdoelstellingen dichterbij te brengen. Dat maakt het lastig om lokaal beleid mee te nemen in een studie naar klimaatneutrale mobiliteit in Nederland in 2040.

Het is wel belangrijk om te realiseren dat samenwerking met en het betrekken van decentrale overheden essentieel zijn voor het dichterbij brengen van de doelstellingen. Dit heeft onder andere te maken met de bevoegdheden van de gemeenten en provincies. Zo valt het invoeren van Zero Emissie (ZE) zones onder verantwoordelijkheid van gemeenten, en ook de verduurzaming van lokaal ov. Ook de inkoop van mobiele werktuigen voor lokaal gebruik valt onder de verantwoordelijkheid van gemeenten en provincies. Andere mobiele werktuigen worden bijvoorbeeld ingekocht door Rijkswaterstaat en ProRail.

Internationale context

De Europese doelstelling is om klimaatneutraal te worden in 2050. Als de doelstelling van de Nederlandse staat is om in 2040 klimaatneutraal te worden, dan is het belangrijk om de internationale context van deze doelstelling goed in beeld te hebben. We geven daarom puntsgewijs een opsomming voor relevante (mogelijke) factoren voor de sector mobiliteit:

- De emissies voor mobiliteit worden in Nederland berekend op basis van verkochte brandstof. Dat betekent echter niet dat deze brandstof alleen getankt wordt door Nederlandse voertuigen, maar ook door voertuigen uit het buitenland. Als de Nederlandse staat stuurt op ZE voertuigen, dan kunnen er alsnog restemissies plaatsvinden op Nederlands grondgebied als gevolg van buitenlandse voertuigen die in Nederland tanken. Nederland mag geen buitenlandse voertuigen uitsluiten en is wettelijk verplicht om tankpunten aan te bieden voor buitenlandse voertuigen

(interne marktregels). We hebben niet gekwantificeerd wat het gevolg is voor de emissies.

- Een gedeelte van de touringcars en vrachtauto's die lange afstanden afleggen, zullen kilometers afleggen in het buitenland. Als deze Nederlandse voertuigen ZE zijn, dan moet de laadinfrastructuur (batterijelektrisch) en tankinfrastructuur (waterstof) in andere landen voldoende aanwezig zijn om te kunnen laden en tanken. Het is denkbaar dat het voorlopen van de Nederlandse vervoerders op buitenlandse vervoerders in het buitenland tot problemen kan leiden met het vinden van geschikte tank- en laadinfrastructuur, alhoewel een minimum aan tank- en laadinfrastructuur op de Europese hoofdwegen wel verplicht is volgens Europese regelgeving (EP, 2023).
- Bij een aantal voertuigcategorieën zijn de technologieën voor het aanbod van ZE varianten nog in ontwikkeling. Dit geldt voor vrachtauto's (lange afstand), touringcars, binnenvaartschepen en mobiele werktuigen. Dat betekent dat er pas aanbod van ZE varianten komt na 2030 en mogelijk pas na 2035, en dat er dan versneld ZE voertuigen moeten worden aangeschaft. Een mogelijke consequentie is dat Nederlandse bedrijven en/of de Nederlandse overheid een relatief hoge aanschafprijs moeten betalen om eerder aanspraak te maken op de ZE voertuigen dan bedrijven en overheden uit andere landen.

Sturen op vraagreductie

Naast bovenstaande beleidsvoorstellen is het van belang om in te zetten op beleidsmaatregelen die gericht zijn op vraagreductie. Dit resulteert niet zozeer in minder emissies, maar wel in minder vraag naar elektriciteit en schaarse materialen (zie ook Hoofdstuk 5):

1. Bij personenvervoer kan vraagreductie gerealiseerd worden door in te zetten op minder reizen en anders reizen. Bij minder reizen kan gedacht worden aan maatregelen als thuiswerken of het dichterbij brengen van voorzieningen. Dit laatste is geen mobiliteitsmaatregel maar beïnvloedt wel de reisafstanden en daarmee het reisgedrag. Met anders reizen kan worden ingezet op het maken van een overstap naar een andere modaliteit. Dit is met name belangrijk bij reizen waarbij veel energie en materialen gevraagd wordt. Voorbeelden hiervan zijn: stimuleren deelmobiliteit (en sturen op minder bezit en gebruik privéauto), stimuleren ov-gebruik, stimuleren fietsen en wandelen.
2. Bij goederenvervoer kan vraagreductie wel leiden tot emissiereductie bij binnenvaart en vrachtauto's, omdat wij hier restemissies verwachten. De vraagreductie kan bijvoorbeeld worden gerealiseerd door bundeling van goederen, samenwerking tussen vervoersbedrijven, maar ook door meer hergebruik van materialen en minder consumptie van goederen. Een modal shift heeft maar beperkt potentie. Veel goederen worden al vervoerd door de optimale vervoerswijze met betrekking tot hoeveelheid en beschikbare infrastructuur. Niet alle bestemmingen kunnen bereikt worden met bijvoorbeeld goederentreinen.
3. Bij mobiele werktuigen is vraagreductie alleen mogelijk door reductie in vraag naar nieuwbouw, verbouw en nieuwe infrastructuur. Komende jaren wordt er echter, mede door de energietransitie, juist meer vraag verwacht.

Beoordeling haalbaarheid: **groen**

Het aanscherpen van doelstellingen is noodzakelijk voor alle modaliteiten, maar is niet onoverkoombaar.

2. Economisch

Het naar voren halen van de doelstelling om in 2040 klimaatneutraal te zijn, heeft economische consequenties. Deze zijn afhankelijk van de manier waarop het beleid wordt ingevuld en heeft bijvoorbeeld effect op de kosten die gemoed gaan met vervroegde afschrijving (het voertuig weg moeten doen voordat die volledig is afgeschreven) en investeringskosten. Deze afschrijvingskosten zullen hoger uitvallen indien het beleid niet wordt aangescherpt en de ingroei van elektrische voertuigen (mits technisch haalbaar) verloopt op basis van de doelstelling om in 2050 klimaatneutraal te zijn. Met aanvullend beleid waarbij de ingroei van ZE voer- en vaartuigen naar voren wordt gehaald, voorkom je veel vervroegde afschrijving

Om gevoel te krijgen voor de economische gevolgen van het naar voren halen van de doelstelling, hebben we een inschatting gemaakt van het aantal voertuigen dat vervroegd moeten worden afgeschreven en de kosten die daarmee gepaard gaan. Als uitgangspunt voor de berekening is gerekend met het aangescherpte beleid uit de vorige paragraaf. Dit aangescherpte beleid leidt tot een andere samenstelling van het wagenpark dan het handhaven van het huidige beleid en ambities.

Het resultaat van de berekening is weergegeven in Tabel 7: hierin is weergegeven wat de ontwikkeling is van het wagenpark voor de verschillende modaliteiten, aan de hand van het totaal aantal voertuigen in 2040 en de hoeveelheid fossiele varianten (absoluut en in percentage van het totaal). Ook is er rekening gehouden met de levensduur van de verschillende voer- en vaartuigen. Om deze categorie ZE te maken, moeten deze voer- en vaartuigen vervroegd worden afgeschreven (sloop of export). Een overzicht van de verschillende kosten:

- Vervroegde afschrijfkosten, berekend aan de hand van de lineaire afschrijfkosten min de werkelijke waarde (marktwaarde).
- Extra investeringskosten: op basis van de gemiddelde meerkosten elektrisch voertuig in vergelijking tot een fossiele variant. De meerkosten per voertuig nemen in de periode van vervroegd aanschaf steeds verder af.
- Brandstofkosten/elektriciteitskosten: in de berekeningen niet meegenomen.

Het is belangrijk om te realiseren dat het aanscherpen van bestaand beleid een voorwaarde is voor de kosten die we in deze paragraaf inschatten. Als het beleid niet wordt aangescherpt (bv. nieuwverkoop ZE personenauto's in 2035 i.p.v. 2030 of prijzingsmaatregelen) dan zullen de kosten hoger uitvallen omdat er waarschijnlijk meer voertuigen zijn die vervroegd afgeschreven moeten worden. Dit zal ook effect hebben op andere lenzen, bijvoorbeeld doordat een late ingroei van elektrische voertuigen ertoe leidt dat er een minder grote tweedehands markt is waardoor er minder betaalbare opties beschikbaar zijn. Dit treft met name mensen in lagere inkomensklassen die aangewezen zijn op de tweedehandsmarkt voor voertuigen (sociaaleconomische lens).

De kosten voor mobiele werktuigen en railverkeer zijn niet ingeschat. Voor beide modaliteiten is onvoldoende data beschikbaar om een gedegen inschatting te kunnen maken van de kosten. Bij mobiele werktuigen gaat dit met name over data van aantallen uitgesplitst naar type, en een gebrek aan data over de investeringskosten en levensduur van de werktuigen. Bij railverkeer zijn de kosten afhankelijk van de manier waarop het railverkeer ZE zal worden: het plaatsen van bovenleidingen leidt tot andere kosten dan een batterij elektrische locomotief of een waterstof trein. Ook hierbij ontbreekt een overzicht van aantallen. Voor personenvervoer gaat elektrificatie over een beperkt aantal kilometer spoor waarover dieseltreinen rijden en bij goederenvervoer gaat het met name over het aantal rangeerbewegingen.

Bij binnenvaart wordt het tempo van de transitie in de binnenvaart beperkt door de lange levensduur van de schepen en motoren. In de binnenvaart hebben veel schepen een levensduur van meer dan 50 jaar en gaan motoren ook tientallen jaren mee, waarbij ze tussentijds gereviseerd worden. Het is daardoor economisch niet rendabel om snel over te stappen op een nieuwe techniek (TNO & PBL, 2024).

In onderstaande tabel zijn de kosten weergegeven die gepaard gaan met het vervroegd afschrijven van fossiel voertuigen, en de meerkosten voor het investeren in een elektrische voertuigen. In de tabel is te zien dat de totale kosten voor vervroegd afschrijven redelijk oplopen. De personenauto's zijn hierbij verreweg de grootste post. Daarnaast zijn de meerkosten voor aanschaf van een elektrisch voertuig in vergelijking met een fossiel aangedreven variant voor een aantal voertuigen nog redelijk hoog. Als gevolg van vervroegde elektrificatie (en de daarmee gepaarde meerkosten die in 2040 in vergelijking tot 2050 naar verwachting nog hoger zijn) wordt er verwacht dat meer mensen rond dezelfde tijd op de tweedehandsmarkt gaan kopen. De concurrentie op de tweedehandsmarkt zal hierdoor groter worden. Hiermee worden met name de lagere inkomensklassen getroffen, die door prijsopdrijving van de tweedehandsvoertuigen mogelijk moeilijker over kunnen stappen op een elektrisch voertuig. Deze meerkosten zijn natuurlijk niet alleen kosten (je hebt er daarna een auto voor terug die iets waard is), echter moeten er wel vroegtijdig meer liquide middelen beschikbaar zijn.

Tabel 7. Ontwikkeling wagenpark naar 2040 en de kosten voor vervroegde afschrijving

Modaliteit	Aantal voertuigen (totaal)	Fossiel (aantal %)	Kosten vervroegde afschrijving fossiel (€ per voertuig)	Extra investeringskosten (€ totaal € per voertuig)	Levensduur voertuig in NL (mediaan)
Personenauto	10,5 miljoen	2,8 miljoen (27%)	4,3 miljard (2 duizend per voertuig)	-	13
Bestelauto	1,1 miljoen	267 duizend (24%)	148 miljoen (9 honderd per voertuig)	230 miljoen (2 duizend per voertuig)	13
Trekker – oplegger	86,7 duizend	27,9 duizend (32%)	200 miljoen (9 duizend per voertuig)	1,2 miljard (50 duizend per voertuig)	8 jaar
Vrachtauto	63 duizend	32 duizend (51%)	157 miljoen (8 duizend per voertuig)	-	10 jaar

Modaliteit	Aantal voertuigen (totaal)	Fossiel (aantal %)	Kosten vervroegde afschrijving fossiel (€ per voertuig)	Extra investeringskosten (€ totaal € per voertuig)	Levensduur voertuig in NL (mediaan)
Touringcar	3 duizend	1,5 duizend (51%)*	5,7 miljoen (6 duizend per voertuig)	4,4 miljoen (25 duizend per voertuig)	10 jaar
Mobiele werktuigen	Niet gekwantificeerd	Niet gekwantificeerd	Niet gekwantificeerd	Niet gekwantificeerd	-
Binnenvaart	1,75 duizend*	1,1 duizend (60%)	Niet gekwantificeerd**	Niet gekwantificeerd	-
Railverkeer	Niet gekwantificeerd	Niet gekwantificeerd	Niet gekwantificeerd	Niet gekwantificeerd	-

* Een overschatting van het aantal schepen omdat Nederlandse schepen relatief meer in het buitenland varen dan andersom (CBS, z.d.).

** Doordat er een grote variëteit zit in kosten per binnenvaartschip is het te complex om dit te kwantificeren.

*** Weinig zicht op de aantallen ZE en ingroei, dus aangenomen dat dit verloop hetzelfde zal gaan als bij de vrachtauto

**** Aan het eind van de levensduur van het voertuig in Nederland worden de voertuigen geëxporteerd of gesloopt, afhankelijk van de staat van het voertuig.

Kosten energie en brandstof

Zoals eerder benoemd zijn de energie en brandstofkosten in bovenstaande berekening niet meegenomen. Wel wordt er verwacht dat de energiekosten van een elektrisch voertuig aanzienlijk lager zullen liggen in 2040 dan voor een benzine/diesel voertuig. Dat is nu al het geval, maar de verwachting is dat dit verschil in de toekomst alleen maar zal toenemen.

Baten

Naast kosten zijn er natuurlijk ook baten, zoals verbeterde luchtkwaliteit en het effect dat dit heeft op de volksgezondheid en de natuur. De effecten van deze baten zijn in dit onderzoek niet gekwantificeerd. De mate waarin de luchtkwaliteit verbetert, is afhankelijk van het type voertuig dat vervangen wordt door een schoner alternatief. Zo stoten oude dieselvoertuigen meer fijnstof en stikstof uit dan nieuwere dieselvoertuigen of benzinevoertuigen. Het vervangen van oude dieselvoertuigen leidt daarmee tot grotere voordelen voor de volksgezondheid en de natuur dan het vervangen van nieuwe diesel- of benzinevoertuigen.

Beoordeling haalbaarheid: **groen**

Afhankelijk van het type modaliteit kunnen de kosten voor vervroegd afschrijven hoog oplopen. Dit kan worden ondervangen door vervroegd ZE voertuigen in te laten stromen in het wagenpark, waardoor er een goede tweedehands markt voor meer betaalbare ZE voertuigen komen. Een andere optie is subsidiering vanuit de overheid voor de hoge aanschafkosten. Daarbij ligt voor ondernemers het grootste knelpunt bij de meerkosten van trekker/opleggers. Bij versneld elektrificeren zal er meer concurrentie zijn op de tweedehandsmarkt. De kleinere ondernemers met een lager budget zullen hierdoor harder getroffen worden wanneer er onvoldoende wordt ingezet op sturend beleid om dit tegen te gaan.

3. Infrastructuur

In principe zijn de technieken beschikbaar om voertuigen elektrisch te laden en om waterstof en andere brandstoffen te tanken. Het huidige aanbod is echter niet voldoende

om aan de toekomstige vraag te voldoen, en ZE in 2040 vraagt om een significante toename in investeringen. In deze paragraaf brengen we de extra opgave in beeld voor infrastructuur en bespreken we de belangrijkste knelpunten.

Netcapaciteit

Eén van de grootste uitdagingen op het gebied van infrastructuur is het gebrek aan netcapaciteit. Deze tekorten spelen op dit moment al, en zullen in de toekomst toenemen. Dit is een uitdaging die breder speelt dan de sector mobiliteit en wordt daarom als overkoepelende uitdaging behandeld in Paragraaf 5.3. Uitbreidingen van het elektriciteitsnetwerk duren over het algemeen lang en kunnen tot wel 10 jaar in beslag nemen. Dit heeft potentieel een enorme impact op de uitbreiding van het laadnetwerk, gezien de vraag die nodig is bij een versnelde uitbreiding.

Operationele inpassing

Het inpassen van de laadpunten kost tijd. Dit komt doordat regelgeving nog niet altijd op orde is, doordat ruimtelijke inpassing tijd kost en omdat de installatie van de daadwerkelijke infrastructuur tijd kost. Ook zal het algemene ruimtebeslag toenemen doordat elektrisch laden langer duurt dan het tanken van voertuigen. Dit wordt echter gecompenseerd doordat veel partijen naar verwachting op eigen terrein zullen gaan laden. Enkele materialen gebruikt voor laadpunten zijn schaars (NKL & Cenex, 2023), waardoor circulair gebruik van materialen bij een versnelde transitie extra belang krijgt. In hoofdstuk 5.8 wordt nader ingegaan op schaarse grondstoffen en materialen.

Laadpunten

Het versnellen van de transitie zorgt voor een groeiende vraag van laadpunten. Op basis van de ontwikkeling van het wagenpark uit Tabel 7 hebben we de extra behoefte van laadlocaties ingeschat. Deze inschatting is weergegeven in Tabel 8. Er is een significante extra vraag aan laadlocaties voor zowel lichte voertuigen (personen- en bestelauto) als zware voertuigen (vrachtauto en touringcar). Het grote verschil tussen het laden van lichte en zware voertuigen is de vermogensvraag bij laden. Bij lichte voertuigen gaat het om laden met minder zware vermogens, terwijl het bij zware voertuigen gaat om laden met hoge vermogens. Dit heeft met name te maken met de grootte van de accupakketten die in de zware voertuigen moeten worden opgenomen: voor het afleggen van lange afstanden is een groot accupakket noodzakelijk omdat daarmee voldoende capaciteit aanwezig is voor het afleggen van deze afstanden. Voor de stadslogistiek en het regionaal verkeer zijn de accupakketten minder groot omdat de af te leggen afstanden kleiner zijn. Dat betekent dat deze voertuigen op minder vermogen geladen kunnen worden.

Met name voor zware voertuigen kan de extra behoefte aan laadlocaties resulteren in extra belasting van het elektriciteitsnet omdat deze voertuigen op hoge snelheid kunnen laden. Het is momenteel echter nog onzeker hoe het laden van elektrische voertuigen zich ontwikkelt. Wanneer in de toekomst veel wordt geladen op hoge snelheid dan is de netbelasting hoger dan bij langzaam laden. Tegelijkertijd bieden voertuigen mogelijkheden om op piekmomenten elektriciteit terug te leveren aan het net. Voor deze ontwikkelingen is het nog erg onzeker hoe de toekomst eruitziet. Het versnellen van de transitie beperkt echter wel de mogelijkheden om weloverwogen keuzes te maken.

Voor mobiele werktuigen hebben we geen inschatting gemaakt van het aantal beschikbare laadpunten en het benodigd extra aantal laadpunten vanwege het gebrek aan data. Bij mobiele werktuigen gaat het met name om het laden op laag vermogen, waardoor de belasting op het elektriciteitsnetwerk minder hoog is. Verder is het belangrijk om op te merken dat het laden van mobiele werktuigen vraagt om een andere manier van laden, met name in de bouw. De mobiele bouwwerktuigen worden namelijk ingezet op locaties van bouwprojecten, waardoor er ter plaatse laadvoorzieningen moeten zijn. Dit kan bijvoorbeeld in de vorm van aggregaten en generatoren.

Tabel 8. Laden van voertuigen in 2040. Bronnen: Elaadnl, 2024, Elaadnl, 2020

Modaliteit	Type laden	Beschikbaarheid	Benodigd extra	Waar laden
Personenauto en bestelauto	<22 kW >150 kW	4,3 miljoen	1,6 miljoen	Thuis, op werk en onderweg
Vrachtwagens en touringcars	50 kW 150 kW 500 kW Megawatts	100 duizend	66 duizend	Depot, truckparkings en verzorgingsplaatsen.
Mobiele werktuigen	11 tot 150 kW	Niet ingeschat	Niet ingeschat	Depot, op bouwlocaties
Binnenvaart	Batterijcontainers met 1 MW laadvermogen Daarnaast voornamelijk waterstof, HVO of een andere duurzame brandstof	100	200	In havens, en op strategische punten langs rivieren.

Naast elektriciteit zal er een rol zijn voor duurzame brandstoffen zoals waterstof en methanol. We verwachten dat deze brandstoffen vooral ingezet worden voor voertuigen met een hoge vermogensvraag. Omdat het om lagere aantallen gaat hebben we geen inschattingen gemaakt van de extra tankpunten. We verwachten ook significante uitdagingen voor tankinfrastructuur. Dit heeft te maken met de hoeveelheid beschikbare brandstoffen, opschalingsproblemen, en vraagstukken qua veiligheid.

Beoordeling haalbaarheid: **oranje**

Het grootste knelpunt is de beschikbaarheid van netcapaciteit. Dit is een knelpunt dat eigenlijk buiten de transportmarkt valt, beïnvloedt wel de haalbaarheid van deze lens. Ook als dit buiten beschouwing gelaten wordt, zijn er nog grote uitdagingen. In totaal zorgt dit voor een oranje beoordeling.

4. Sociaal maatschappelijk & cultureel

Sociale rechtvaardigheid

Het versneld sturen op klimaatneutraliteit kan consequenties hebben voor de sociale rechtvaardigheid in Nederland. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen burgers (personenvervoer) en ondernemers (goederenvervoer). In Tabel 8 staat per modaliteit en voor laadinfrastructuur beschreven wat mogelijke knelpunten zijn voor bepaalde groepen burgers en ondernemers. Mogelijke knelpunten zijn bijvoorbeeld een andere

verdeling van kosten (en baten) en rusttijden van chauffeurs in combinatie met laden. Daarbij worden er mechanismen benoemd die mogelijk kunnen helpen om de ongelijkheid te beperken.

Tweede orde effecten zijn buiten beschouwing gelaten. Een voorbeeld hiervan is: een vervroegde afschrijving van binnenvaartschepen waardoor er hogere kosten zijn voor ondernemers (direct effect) waardoor de prijs van logistiek toeneemt en daardoor productprijzen voor burgers (tweede orde effect). Deze tweede orde effecten vallen buiten de scope van deze studie, maar kunnen wel een rol spelen in de verdeling van kosten en baten tussen verschillende groepen.

Tabel 9. Sociale rechtvaardigheid: groepen die geraakt worden per modaliteit en potentiële mechanismen om dit te ondervangen.

Modaliteit	Groepen die geraakt worden	Mechanismen	Mogelijk beleid
Laadinfrastructuur	Door de transitie naar elektrisch rijden, wordt laden verplicht en is tanken geen optie meer. De verandering is dus eigenlijk verplicht. Mogelijk vormt dit een probleem voor mensen die niet weten hoe ze moeten laden, zoals ouderen. Laden is een nieuwe vaardigheid en mogelijk is deze groep groter dan wanneer de transitie naar elektrisch rijden meer geleidelijk gaat.	Voor de groepen die achterblijven in de mobiliteitstransitie is het van belang deze groepen mee te nemen in de transitie en gebruikerservaringen te blijven ophalen/delen (TNO, 2023a).	Campagnes
Personenauto	Elektrificatie heeft mogelijk consequenties voor lage inkomensgroepen. Zo zijn er huishoudens in Nederland met een brandstofauto, die een (zeer) laag inkomen hebben, veel kilometers rijden en bovendien op een locatie wonen die slecht bereikbaar is met het ov. Deze groep wordt mogelijk getroffen door de verplichte aanschafkosten van elektrische auto's. De huidige aanschafsubsidie komt daarbij vooral terecht bij hogere inkomensklassen (CE Delft, 2024a). Daarentegen ontstaat er, door het beleid dat vanaf 2030 alle geproduceerde auto's ZE moeten zijn, sneller een volwassen tweedehands markt voor ZE auto's. Dit komt de betaalbaarheid van ZE auto's voor de bovengenoemde groep ten goede.	De lage inkomensgroepen kunnen tegemoet gekomen worden door in te zetten op beleidsmaatregelen die effectief zijn voor deze groep, zoals een sloopregeling voor oude fossiel aangedreven personenauto's (CE Delft, 2024a). Ook zou het voor deze groep van belang kunnen zijn om gebiedsontwikkeling op een andere manier insteken zodat ov, lopen en fietsen realistische opties blijven (Copper8, 2022).	Sloopregeling oude fossiel aangedreven personenauto's Aanbieden tegoed voor ov en/of deelmobiliteit Stimuleren gebruik elektrische deelauto's Gedifferentieerde aanschafsubsidie EVs (naar inkomensklasse)

Modaliteit	Groepen die geraakt worden	Mechanismen	Mogelijk beleid
Bestelauto	<p>Kleine ondernemers met een beperkt budget worden mogelijk (financieel) geraakt door versnelde elektrificatie. Er wordt verwacht dat ZE voertuigen steeds goedkoper worden in vergelijking tot fossiele varianten (CE Delft, 2024c), als gevolg van ontwikkeling van nieuwe technologieën en materialen, waardoor batterijen beter en goedkoper worden (PwC, 2021). Wanneer ondernemers eerder moeten overschakelen op elektrisch vervoer zijn de meerkosten van een elektrisch voertuig ten opzichte van een fossiel aangedreven variant naar verwachting dus nog hoger.</p> <p>Daarentegen ontstaat er, door het beleid dat vanaf 2030 alle geproduceerde auto's ZE moeten zijn, sneller een volwassen tweedehands markt voor ZE auto's. Dit komt de betaalbaarheid van ZE auto's voor de bovengenoemde groep ten goede.</p>	<p>De ondernemers met een beperkt budget kunnen worden ondersteund door in te zetten op beleidsmaatregelen die effectief zijn voor deze groep, zoals de sloopregeling (CE Delft, 2024a). Deze regeling richt zich ook op ondernemers die niet zomaar hun diesel bestelauto weg kunnen doen omdat de afschrijftermijn nog niet voorbij is (CE Delft, 2024a).</p>	<p>Aanschafsubsidie elektrische bestelauto</p> <p>Inruilpremie en een tegemoetkoming in de aanschaf van een cargobike (voor de beroepen waar dat mogelijk is).</p>
Vrachtauto	<p>Een van de uitdagingen is het inregelen van rusttijden voor chauffeurs in combinatie met laden. Als laden gecombineerd wordt met pauze, dan hebben chauffeurs verantwoordelijkheden tijdens de pauze, waardoor dit geen echte pauze is. De combinatie van laden en rusttijden moet nog ingeregeld worden.</p>	<p>Op het moment zijn er nog geen wettelijke regels die zich richten op dit probleem. Deze regelgeving moet nog ontwikkeld worden zodat de rusttijd van chauffeurs niet in de knel komt door elektrificatie.</p>	<p>Formuleren van wet- en regelgeving in samenspraak met vakbonden en marktpartijen.</p>
Ov-bus	<p>De meerkosten van de aanschaf van een elektrische bus ten opzichte van een fossiel aangedreven variant worden naar verwachting steeds lager (CE Delft, 2024c). Als deze meerkosten (die in 2040 naar verwachting dus nog hoger liggen dan in 2050) worden doorgerekend aan de gebruiker kan dit lage inkomensgroepen treffen.</p>	<p>Het bieden van financiële ondersteuning voor ov-gebruik aan lage inkomensgroepen, door inzet op minima regelingen (Muconsult, 2023). Een voorbeeld is het aanbieden van gratis ov voor lage inkomensgroepen.</p>	<p>Gratis of goedkoper ov voor lage inkomensgroepen</p>

Modaliteit	Groepen die geraakt worden	Mechanismen	Mogelijk beleid
Touringcar	Een touringcar heeft overeenkomsten met vrachtauto's (lange afstanden) en ov-bus (vervoer van personen). Zie daarom de uitleg bij deze modaliteiten.	Een touringcar heeft overeenkomsten met vrachtauto's (lange afstanden) en ov-bus (vervoer van personen). Zie daarom de uitleg bij deze modaliteiten.	Zie vrachtauto's en ov-bus.
Mobiele werktuigen	Kleine ondernemers met een beperkt budget. De Total Cost of Ownership (TCO) van elektrisch mobiele werktuigen blijkt even voordelig of voordeliger dan een fossiele variant (Natuur & Milieu, 2019). Echter is de aanschafprijs nog een stuk hoger. Ondernemers met een beperkt budget moeten dus wellicht worden ondersteund om deze eenmalige hogere kosten te kunnen dragen. Wanneer er eerdere verplichte elektrificatie plaatsvindt is er kans dat de financiële mechanismen om deze belemmeringen weg te nemen nog niet voldoende ingeregeld zijn.	Financiële mechanismen zoals: Financiering om de belemmering van de hoge aanschafkosten (gedeeltelijk) weg te nemen. Inzet van subsidies voor elektrische mobiele werktuigen. Echter, bestaat er een kans dat deze maatregel met name bij de ondernemers met een ruim budget terecht komt omdat deze ondernemers meer financiële ruimte hebben voor het aanschaffen van nieuwe werktuigen.	Aanschafsubsidies en sloopregelingen
Binnenvaart	Binnenvaartschepen hebben een lange levensduur waardoor verduurzaming in veel gevallen zal leiden tot vervroegde afschrijving. Voor ondernemers is dit een hoge kostenpost die niet in alle gevallen vanzelfsprekend kan worden opgevangen.	Het is denkbaar dat bedrijven tegemoetgekomen worden in de kosten door bijvoorbeeld een subsidieregeling. Op dit moment bestaat er al een subsidieregeling voor binnenvaartschepen, de SRVB (RVO, 2023a).	Aanschafsubsidies en sloopregelingen
Railverkeer	Als de kosten van het elektrificeren van het (personen) railverkeer worden doorgerekend aan de eindgebruiker, kan dit een negatief effect hebben op de betaalbaarheid van het treinverkeer. Bij versnelde uitrol kunnen de kosten mogelijk hoger uitvallen dan bij uitrol over een langere periode.	Zie Ov-bus.	Zie Ov-bus

Impact op werkgelegenheid, kennis en vaardigheden

De versnelde groei van elektrische voertuigen kan ook impact hebben op werkgelegenheid en benodigde kennis en vaardigheden. Deze impact is opgenomen in Tabel 10.

Tabel 10. Werkgelegenheid, kennis en vaardigheden

Modaliteit	Impact op werkgelegenheid en kennis	Benodigde vaardigheden in de markt	Effect op arbeidsplaatsen
Laadinfrastructuur	De versnelde ingroei van laadinfrastructuur vergroot de vraag naar personeel en kennis.	Voor laadinfrastructuur worden vaak technische vaardigheden gevraagd op gebied van elektriciteit en IT.	Het plaatsen en het onderhoud van een grotere hoeveelheid infrastructuur creëert meer werkgelegenheid. Ook zal er ondersteunend personeel nodig zijn bij een gedeelte van de publieke laadpunten zodat er aanbod is van toiletten en de mogelijkheid om eten en drinken te kopen.
Tankinfrastructuur (conventioneel)	Doordat het wagenpark grotendeels elektrisch aangedreven is, zal de noodzaak voor personeel bij tankstations aanzienlijk afnemen.	Het grotendeels overschakelen tot elektrische voertuigen (en andere alternatieve brandstoffen) vereist dat ook de tankstations en tankinfrastructuur wordt vervangen. Dit vereist kennis over herindeling van infrastructuur.	De afname in fossiele voertuigen resulteert in minder werkgelegenheid voor ondersteunend personeel bij tankstations.
Wegvoertuigen	Doordat er een versnelde verjonging van het wagenpark zal plaatsvinden, is er vooral behoefte aan verkopers en monteurs met kennis van elektrische voertuigen. De productie van voertuigen vindt met name plaats in het buitenland, waardoor daarover geen extra kennis in Nederland vereist is.	Nieuwe, zero-emissie voertuigen vragen andere vaardigheden dan voertuigen met een verbrandingsmotor. Het onderhoud van elektrische voertuigen is anders vanwege de aanwezigheid van accupakketten en elektromotoren in de voertuigen. Er zal meer IT kennis nodig zijn, en minder mechanische kennis. IT kennis is ook voor andere sectoren essentieel, waardoor er problemen met aanbod werknemers kunnen ontstaan. Daarnaast vragen incidenten met elektrische voertuigen om een andere benadering dan incidenten met conventionele voertuigen. Dit heeft te maken met ontbrandingsgevaar en andere methodes om te blussen.	Elektrische voertuigen bevatten minder bewegende onderdelen, waardoor er minder onderhoud nodig is. Dit kan ertoe leiden dat er minder monteurs nodig zijn om de werkzaamheden uit te voeren.

Modaliteit	Impact op werkgelegenheid en kennis	Benodigde vaardigheden in de markt	Effect op arbeidsplaatsen
Mobiele werktuigen	Voor mobiele werktuigen geldt dat een aanzienlijk gedeelte van (specialistische) voertuigen omgebouwd dient te worden op basis van een conventioneel platform. (Elaadnl, 2024)	Voor de ombouw van voertuigen is specifieke kennis nodig bij voertuigbouwers, wat vaak specialistische bedrijven zijn. Dit geeft uitdagingen met het opleiden van personeel.	Er zijn niet direct meer werknemers nodig: de benodigde kennis verschuift van voertuigbouwers naar voertuigombouwers. Wanneer het ombouwen van voertuigen veel meer werk is dan het bouwen van werktuigen vraagt dit wel om meer personeel. Daarentegen is er minder onderhoud nodig dan bij fossiel aangedreven varianten omdat elektrische voertuigen minder bewegende onderdelen bevatten.
Binnenvaart	Binnenvaartschepen hebben in veel gevallen een unieke inrichting en omvang. Daarnaast gaan schepen lang mee waardoor het nodig lijkt om bestaande schepen om te bouwen. Met name de versnelde overgang vraagt veel van scheepswerven.	Het inbouwen van nieuwe technieken met nieuwe veiligheidsuitdagingen. Doordat schepen uniek zijn, is er vaak sprake van maatwerk wat de uitdagingen vergroot.	Omdat de ombouw van schepen veel maatwerk vraagt, zijn er waarschijnlijk extra werknemers nodig voor de productie van schepen. Daarentegen is er minder onderhoud nodig dan bij fossiele varianten omdat elektrische voertuigen minder bewegende onderdelen bevatten.
Railverkeer	Veel railverkeer is al elektrisch. Daarom wordt er niet verwacht dat er extra kennis vereist is om het elektrisch railverkeer op te schalen.	n.v.t.	n.v.t.

Beoordeling haalbaarheid: **groen**

Het versnel elektrificeren van het wagenpark kan ervoor zorgen dat bepaalde bevolkingsgroepen achter raken in de mobiliteitstransitie (met name de lagere inkomensklassen of kleinere ondernemers). Het is mogelijk om deze ongelijkheden te verminderen door in te zetten op beleidsmaatregelen die effectief zijn voor deze groep. We verwachten geen groot effect op de werkgelegenheid, maar de benodigde kennis en vaardigheden zullen wel veranderen.

5. Milieukundig

Er zijn verschillende factoren die invloed hebben op biodiversiteit en het milieu. Het IPBES (IPBES, 2018) heeft vijf drukfactoren gedefinieerd die het best de impact op biodiversiteit in kaart brengen. Het gaat om:

1. Veranderd land- en zeegebruik
2. Gebruik en exploitatie van natuurlijke hulpbronnen
3. Klimaatverandering
4. Vervuiling

5. Invasieve soorten

Deze drukpunten zijn generiek en niet alleen toepasbaar op de sector mobiliteit. Wij bespreken de voor- en nadelen van de drukpunten voor de sector mobiliteit.

In veel gevallen zal een versnelde transitie niet tot andere einduitkomsten leiden omdat het gaat om veranderingen die ook plaatsvinden bij een doelstelling om klimaatneutraal in 2050 te zijn. Er zijn echter wel enkele voor- en nadelen te benoemen bij de vijf drukfactoren. Deze zijn opgenomen in Tabel 11.

Tabel 11. Voor- en nadelen drukfactoren biodiversiteit

Drukfactor	Voordelen	Nadelen
Veranderend land- en zee gebruik		Een versnelde transitie zorgt ervoor dat de vraag naar elektriciteit versneld toeneemt. Om hieraan te voldoen zullen mogelijk eerder windparken en zonnevelden nodig zijn in Nederland en in het buitenland.
Gebruik en exploitatie van natuurlijke hulpbronnen	Het gebruik van fossiele brandstoffen daalt, waardoor er minder fossiele hulpbronnen nodig zijn (brandstof). Wel ontstaat er extra vraag naar kritieke metalen waardoor de vraag naar hulpbronnen weer toeneemt.	Door een versnelde transitie worden bestaande voertuigen eerder afgeschreven. Omdat waarschijnlijk niet alle materialen hergebruikt kunnen worden, leidt dit tot extra materiaalgebruik. Het is echter ook mogelijk dat voertuigen worden geëxporteerd naar het buitenland. Batterijtechnieken zijn in ontwikkeling en de technieken gebruiken steeds schonere materialen. Bij een versnelde transitie worden mogelijk minder gewenste materialen gebruikt omdat er geen tijd is voor het optimaliseren van de technieken. Ook zijn er hulpbronnen nodig voor de productie van accupakketten. In hoofdstuk 5.5 gaan we in op schaarse grondstoffen en materialen.
Klimaatverandering	Een versnelde transitie heeft duidelijke voordelen op de uitstoot van CO ₂ -emissies.	Het is mogelijk dat fossiel aangedreven voertuigen naar het buitenland geëxporteerd worden en daar alsnog doorrijden en uitstoot veroorzaken. Dit zorgt ervoor dat de globale emissiereductie significant lager kan zijn, afhankelijk van waar de voertuigen terecht komen: <ol style="list-style-type: none"> 1. Als het ter vervanging is van een oud voertuig dan zorgt export voor emissiereductie 2. Als het geen vervanging is van een oud voertuig, maar wordt toegevoegd aan het wagenpark dan zorgt het voor extra emissies.

Drukfactor	Voordelen	Nadelen
Vervuiling	Voertuigen op fossiele brandstoffen leiden tot meer vervuiling door onder ander stikstof en fijnstof dan ZE voertuigen. Een versnelde transitie vermindert de vervuiling eerder, omdat er eerder schone voertuigen gebruikt worden. Dit heeft positieve gevolgen op de luchtkwaliteit en dus op de volksgezondheid.	-
Invasieve soorten	Voor invasieve soorten verwachten we geen significante voor- of nadelen door een versnelde transitie.	

Beoordeling haalbaarheid: **groen**

Een versnelde transitie leidt niet tot andere uitkomsten dan een transitie naar klimaatneutraliteit in 2050. Desalniettemin is de druk op schaarse materialen ook in deze sector groot, dit bespreken we overkoepelend in Hoofdstuk 5.5.

6. Technologisch

De transitie naar klimaatneutrale mobiliteit is in alle modaliteiten reeds in gang gezet, maar er zijn verschillen tussen de modaliteiten als het gaat om de fase waarin de transitie naar zero-emissie transport zich bevindt en de technologische ontwikkelingen die nodig zijn. In veel modaliteiten lijkt batterij-elektrische aandrijving de meest haalbare of wenselijke techniek. De inzet van alternatieve brandstoffen, zoals groene waterstof, en andere synthetische brandstoffen, heeft als nadeel dat deze minder energie-efficiënt is dan direct toepassing van elektriciteit in een batterij-elektrische aandrijving. Biobrandstoffen zijn ook een optie, maar zien we gezien de beperkte beschikbaarheid en de grote vraag naar van onder andere zeevaart en luchtvaart (CE Delft, 2024b) niet als een oplossing voor klimaatneutraal wegtransport, ook omdat daarmee alsnog uitstoot van stikstof en fijnstof veroorzaakt wordt. In wegtransport is het bovendien de verwachting dat de totale eigendomskosten (TCO) van voertuigen met verbrandingsmotor hoger zullen zijn dan die van batterij-elektrische voertuigen (TNO, 2022). In de energietransitie van mobiliteit zien we daarom dat alternatieve brandstoffen vooral worden gezien als een optie in de segmenten waar elektrificatie (nog) niet (volledig) haalbaar is, zoals met name binnenvaart en mogelijk enkele zware mobiele werktuigen en speciale voertuigen in het wegtransport.

Voor de technologische veranderingen die nodig zijn in de transitie naar klimaatneutrale mobiliteit geldt in het algemeen dat een versnelling als nadeel kan hebben dat er minder tijd is voor uitontwikkeling van nieuwe technieken en er sprake kan zijn van de “wet van de remmende voorsprong”. Voor batterij-elektrische aandrijving betreft dit bijvoorbeeld de ontwikkeling van batterijen, waarbij onder andere de energiedichtheid steeds beter wordt. Dit betekent dat voor eenzelfde gewicht en volume aan batterij, meer capaciteit beschikbaar komt, of dat dezelfde capaciteit minder gewicht en volume met zich meebrengt. Een voertuig dat behoort tot de eerste modellen kan dus qua gebruiksgemak (bijvoorbeeld het aantal keer laden) dan al snel worden ingehaald door latere modellen.

Hieronder bespreken we per modaliteit de technische haalbaarheid van volledige klimaatneutraliteit in 2040.

Wegverkeer

Op dit moment is de verwachting dat voor nagenoeg het gehele wegverkeer het technisch mogelijk is om in 2040 volledig klimaatneutraal te opereren op basis van batterij-elektrische aandrijving. De techniek is beschikbaar en ook voor de zwaardere vrachtauto's is volgens TNO (TNO, 2022) de TCO vanaf 2030/2033 gunstiger dan voor voertuigen met andere aandrijflijnen. Hiervoor is nog wel een grote versnelling in aanbod en wagenparkvernieuwing nodig, met name bij de zware wegvoertuigen (IEA, 2024). Terwijl het aandeel personenauto's in de nieuwverkopen al rond de 40% ligt is dit bij vrachtauto's nog maar 4-6% (oktober 2024) (RVO, 2024). Een versnelling van het aanbod van batterij-elektrische voertuigen wordt verwacht door de Europese emissiestandaarden. Om in 2040 klimaatneutraal te zijn zal echter het aanbod in 2030 al grotendeels batterij-elektrisch moeten zijn, om niet te veel voertuigen vlak voor 2040 te moeten vervangen en om dan ook een tweedehands markt te hebben.

Voor personenauto's en OV-bussen denken we dat het huidige aanbod al redelijk voorziet in verschillende behoeften. Voor bestelauto's worden naast de conventionele bestelauto's voor stedelijke beleving ook steeds meer kleinere elektrische voertuigen ingezet, de zogenaamde LEVVs⁴⁹. Daarnaast moet het aanbod van modellen met een grotere actieradius en trekkracht nog worden uitgebreid (CE Delft, 2024d). Ook voor vrachtauto's en trekker-opleggers moet de productie van verschillende modellen met een grotere actieradius nog echt op gang komen (IEA, 2024). Nog niet alle modellen worden in serie geproduceerd. Voor het zware en lange afstandswegtransport verwachten we dat ook in 2030 modellen met batterij- elektrische aandrijving nog niet voor alle toepassingen volledig goed verkrijgbaar zijn. Richting 2040 zal het aanbod verbeteren, maar in 2040 zal naar onze verwachting een behoorlijk deel van de voertuigen met verbrandingsmotoren nog niet afgeschreven zijn. Vervroegd afschrijven tussen 2040 zal financieel en qua aantallen een uitdaging zijn. Klimaatneutraliteit kan bereikt worden door op HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, een hernieuwbare brandstof) te rijden met deze voertuigen, waarbij nog wel rekening moet worden gehouden met beperkte broeikasgasemissies van methaan en lachgas bij toepassing in een verbrandingsmotor. Mogelijk gaan in het zware segment trucks (ca 10% van de voertuigen) met een brandstofcel of verbrandingsmotor op waterstof nog een rol spelen. Er zijn inmiddels verschillende merken die deze voertuigen op de markt aanbieden.

Naast de beschikbaarheid van modellen speelt ook de ontwikkeling van de laadinfrastructuur een belangrijke rol. Voor lichte voertuigen komen er steeds meer laadstation met snelladers tot ca. 350 kW. De ontwikkeling van snelladers met groot vermogen (> 1 MW) is een belangrijke technische ontwikkeling die belangrijk wordt geacht om ook het lange afstandstransport te kunnen elektrificeren (TNO, 2022). Wanneer de laadtijden voldoende gereduceerd kunnen worden, zijn er minder grote aanpassingen nodig in de logistieke operatie (de roosters) ten opzichte van het gebruik van fossiele brandstoffen. Dergelijke systemen zijn in ontwikkeling en worden momenteel

⁴⁹ Licht elektrisch vrachtotuig

getest (Siemens, 2024). De verwachting is dat deze komende jaren verder uitgerold kunnen worden.

Daarnaast speelt netcongestie een belangrijke rol in de tijdige haalbaarheid van elektrificatie van het wegverkeer. De benodigde laadinfrastructuur vraagt een grote uitbreiding van het elektriciteitsnetwerk. Wanneer de uitbreiding van het elektriciteitsnetwerk niet snel genoeg gaat, is het mogelijk om gebruik te maken van waterstof, maar dit is minder energie-efficiënt. Ook voor middelzwaar en zwaar transport is het de verwachting dat de TCO van waterstoftrucks niet concurrerend zal zijn met batterij-elektrische trucks (TNO, 2022).

Om efficiënt met het beschikbare elektriciteitsnetwerk om te kunnen gaan, zijn technieken relevant waarbij voertuigaccu's ook energie kunnen terugleveren aan het net, zoals Vehicle-to-Grid (V2G), Vehicle-to-home (V2H) en Vehicle-to-vehicle (V2V). Er zijn inmiddels diverse automodellen die aan deze techniek voldoen (Auto van morgen, 2024). Voor bredere toepassing van V2G vindt onderzoek plaats, waarin bijvoorbeeld wordt onderzocht welke standardeisen aan het laden gesteld moeten worden voor goede teruglevering aan het net (Elaad, 2024). Toepassing van de techniek biedt veel kansen om het elektriciteitsnet te ontzien, maar vraagt om goed gecoördineerde aanpassing van voertuigen en laadaansluitingen. Om opschaling van deze technieken mogelijk te maken is dienen de ingroei van geschikte voertuigen in het wagenpark en beschikbaarheid van geschikte laadinfrastructuur ongeveer gelijk op te gaan. Daarnaast kunnen er pilots worden opgezet om te testen hoe de effecten op het elektriciteitsnet in de praktijk uitpakken en hoe deze eventueel bijgestuurd kunnen worden.

Binnenvaart

In de binnenvaart is de verwachting dat batterij-elektrische technologie voor een belangrijk deel van de vloot niet haalbaar is. Om klimaatneutraal te kunnen opereren, zijn naast accutechnologie (bijvoorbeeld met batterijcontainers) verschillende technieken en brandstoffen in beeld, waarbij waterstof brandstofcellen en methanol brandstofcellen de belangrijkste aandrijfsystemen worden in een 100%-klimaatneutraal scenario (DST et al., 2021; TNO & PBL, 2024). Welke klimaatneutrale aandrijftechniek het meest geschikt is, hangt af van verschillende marktspecifieke factoren, zoals de vaarafstanden en het soort goederen dat wordt getransporteerd.

Naast varen op bio-LNG en biodiesel zijn er nog geen uitontwikkelde klimaatneutrale technieken voor de binnenvaart (TNO & PBL, 2024). Op dit moment wordt er in Nederland op kleine schaal emissieloos gevaren met behulp van batterijcontainers voor kleine afstanden of schepen die zijn omgebouwd naar een waterstof-aandrijving met een brandstofcel. De bedoeling is dat het aantal ZE schepen richting 2030 uit te breiden naar meer dan 100 schepen (CE Delft, 2023). De toepassing van methanol of ammonia als brandstof in de binnenvaart bevindt zich nog in de pilotfase.

Dat de transitie naar ZE-technieken in de binnenvaart nog veel innovaties en ontwikkeltijd nodig heeft, wordt geïllustreerd door de Routekaart van de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR, 2022): in een innovatief transitietraject, waarbij een innovatieve benadering als vertrekpunt wordt genomen en de hogere kosten als ondergeschikt

worden gezien, is in 2050 circa 90% van de binnenvaart ZE. In dit scenario zijn waterstof, methanol en batterijen de belangrijkste ZE-aandrijftechnieken. In bijna alle segmenten van de binnenvaart (behalve veerponten en hotelschepen) wordt in 2050 nog een klein aandeel inzet van fossiele diesel verwacht. In 2040 is in dit innovatieve scenario de verwachting dat 50% van de binnenvaart nog op (verschillende soorten) fossiele diesel vaart. Biodiesel kan voor de binnenvaart uitkomst bieden om in 2040 toch klimaatneutraal te worden. Qua kosten is FAME de meest aantrekkelijke optie. FAME heeft echter als nadeel dat het onduidelijk is in hoeverre de motoren bij hoge percentages FAME goed blijven functioneren. Momenteel wordt er in 2024/ 2025 een praktijkproef uitgevoerd (TNO, 2024a). HVO is een voor de binnenvaart relatief dure biobrandstof, maar heeft als voordeel dat de kwaliteit gelijk is aan die van diesel. In verbrandingsmotoren zullen HVO en FAME door methaan- en lachgasemissies nog wel beperkt bijdragen aan broeikasgasemissies. Er is circa 9 PJ aan biobrandstof nodig om de binnenvaart klimaatneutraal te maken als andere technieken niet bijdragen aan de verduurzaming.

Mobiele werktuigen

Mobiele werktuigen worden voornamelijk ingezet in de bouw, landbouw, maar in mindere mate ook de industrie, handel en bij consumenten. Voor mobiele werktuigen in de bouwsector zijn veel innovaties naar ZE-technologie gaande, maar de toepassing ervan bevindt zich nog wel in de beginfase en beperkt zich nog tot minder dan 2% van het materieel⁵⁰ (TNO). Licht materieel is doorgaans te elektrificeren via een directe netaansluiting of (verwisselbare) accu. Ook voor het middelzware materieel (ca. 56-150 kW motorvermogen) worden batterij-elektrische al toegepast in verschillende bouwprojecten.⁵¹ In tegenstelling tot wegvoertuigen wordt bij mobiele werktuigen naast vaste accu's in de machines juist ook veel met verwisselbare accu's gewerkt. Dit biedt als voordeel dat de accu's niet op de bouwplaats hoeven te worden opgeladen, maar ook op locaties buiten de bouwplaats (waar mogelijk meer laadvermogen beschikbaar is). Voor zwaar en specialistisch materieel is elektrificatie vaak nog uitdagend. Bij sommige werktuigen is het accugewicht en de grootte van de benodigde accu een belemmering voor elektrische aandrijving. Voor materieel met een groot benodigd vermogen wordt ook gekeken naar aandrijving met behulp van een brandstofcel (op waterstof, mierenzuur of methanol) of via waterstof in een verbrandingsmotor. De inzet van ZE-werktuigen vraagt een aanpassing van het werkproces op de bouwplaats: in nieuwbouw vinden bijvoorbeeld veel werkzaamheden plaats vóór de aansluiting van het elektriciteitsnet, waardoor er batterijcontainers nodig zijn voor het opladen van de werktuigen. De toepassing van ZE-materieel vraagt dus ook om innovaties in het werkproces, waar nog pilotprojecten voor nodig zijn. Technologische innovaties, zoals het efficiënter/kleiner maken van batterijcontainers, kunnen hieraan bijdragen. De verwachting is dat ZE-technieken voor al het licht materieel in de weg- en waterbouw rond 2030 haalbaar zijn. In deze sector wordt verwacht dat in 2035 in een ambitieus scenario 90% CO₂-reductie mogelijk is, een 100%-reductie is alleen haalbaar wanneer het materieel voortijdig wordt vervangen (IenW, 2022; SEB, 2023). Voor het zware materieel is de verwachting dat

⁵⁰ Uitgaande van middelgroot en groot materieel (groter dan 19 kW).

⁵¹ Zie verschillende [SEB | Initiatieven](#)

elektrificatie na 2030 op gang komt (TNO, 2023c). Om richting 2040 volledig klimaatneutraal te opereren moet het aanbod van de zware mobiele machines in 2033-2035 voldoende zijn. Of 100% uitstootvrije machines in 2033 voor al het materieel beschikbaar is, is volgens TNO nog lastig vast te stellen, maar in ieder geval zeer ambitieus (SEB, 2023). De landbouw is een andere sector waar veel mobiele werktuigen worden ingezet. Elektrificatie (voor lichtere voertuigen), waterstof en hernieuwbare brandstoffen (voor zwaardere voertuigen) zijn voor het gros van de voertuigen waarschijnlijk goed haalbaar, maar de toepassing van deze technieken bevinden zich nog voornamelijk in de ontwikkelingsfase. Elektrificatie van licht materieel en de inzet van hernieuwbare brandstoffen in bestaande voertuigen wordt op kleine schaal al wel toegepast (RVO, 2023b). Over het overige deel van mobiele werktuigen is er nog onvoldoende overkoepelende informatie beschikbaar. Het is de verwachting dat voor deze categorie ongeveer dezelfde technieken benodigd zullen zijn en dat ZE-aandrijving met name uitdagend is voor meer specialistisch en zwaar materieel.

Railtransport

In Nederland is het railtransport van goederen en personen al grotendeels geëlektrificeerd en daarmee klimaatneutraal. In het personenvervoer zijn er nog enkele spoorlijnen (in totaal ca. 400 km) in het noorden en oosten van het land waar nog geen bovenleiding aanwezig is en waar met dieseltreinen wordt gereden. Op deze lijnen worden verschillende ZE-opties overwogen, namelijk elektrificatie via een bovenleiding, het rijden met batterijtreinen of het rijden met waterstoftreinen. Toepassing van batterij- of waterstoftreinen in het personenvervoer kent nog geen grote praktijk, al lijken er vooral kostentechnische bezwaren en geen technische belemmeringen te zijn.

Voor het goederenvervoer vindt vooral het rangeren nog niet altijd elektrisch plaats. Vanwege het overzetten van containers bijvoorbeeld is een bovenleiding op rangeerterreinen niet mogelijk. Op deze locaties zijn meerdere innovaties in ontwikkeling, waarbij de batterij-elektrische locomotief een belangrijke optie is voor klimaatneutraal rangeren, maar ook technieken zoals zeilend binnenrijden⁵².

Tot slot is er nog een kleine categorie overig spoorvervoer van bijvoorbeeld aannemers en infravervoerders. Hierin bevinden zich ook zware speciale voertuigen die niet gemakkelijk elektrisch aangedreven kunnen worden. Mogelijk is waterstof als brandstof of een brandstofcel in combinatie met een pantograaf hiervoor een oplossing, maar deze technieken zijn nog niet uitgewerkt.

Tabel 12. Verwachting ZE-technologieën in 2040 per modaliteit.

Modaliteit	Verwachte technieken in 2040	ZE- Benodigde innovaties	Haalbaarheid ZE-aandrijving in 2040
Personenauto	Elektrisch	Verbetering batterij- en laadtechnologie, Vehicle to Grid	Haalbaar
Bestelauto	Elektrisch	Verbetering batterij- en laadtechnologie, Vehicle to Grid	Haalbaar

⁵² [ProRail test zeilend binnenrijden voor Railterminal Gelderland | SpoorPro.nl](https://www.spoorpro.nl/pro-rail-test-zeilend-binnenrijden-voor-railterminal-gelderland)

Modaliteit	Verwachte technieken in 2040	ZE-	Benodigde innovaties	Haalbaarheid	ZE-
				aandrijving in 2040	
Bussen	Elektrisch		Verbetering batterij- en laadtechnologie	Haalbaar	
Vrachtauto	Elektrisch waterstof	en	- Verbetering batterij- en laadtechnologie voor licht vrachtverkeer - Batterij-elektrische of alternatieve ZE-aandrijving voor zwaar vrachtverkeer - MW-charger	Grotendeels, alleen voor zeer zwaar transport is toepassing van ZE-technologie nog onzeker.	
Binnenvaart	Elektrisch, waterstof, ammonia en/of methanol	en/of	(breed toepasbare) Klimaatneutrale aandrijftechnologie voor sectoren waar batterij-elektrisch varen geen reëel alternatief is	Gedeeltelijk	
Mobiele werktuigen	Elektrisch, waterstof, hernieuwbare brandstoffen		- ZE-aandrijftechnieken voor zwaar en specialistisch materieel	Gedeeltelijk, specialistisch materieel en hoge vermogens is onzeker	
Railverkeer	Elektrificatie bovenleiding, elektrische rangeerlocomotieven, evt. waterstoffreinen	via	- verschillende technieken voor ZE rangeren	Grotendeels, alleen voor zware speciale werktreinen van aannemers en/of infravervoerders is de technische uitwerking nog onduidelijk.	

Beoordeling haalbaarheid: **oranje** voor binnenvaart, specifieke railwerktuigen en bepaalde mobiele werktuigen en mogelijk een klein deel van het zwaar wegtransport. In deze sectoren wordt materieel gebruikt waarbij elektrische aandrijving in 2040 mogelijk niet compleet haalbaar is, zeker omdat de techniek al eerder uitontwikkeld moet zijn (2030-2040) om het in 2040 een compleet ZE wagenpark te realiseren. Biodiesel kan een oplossing bieden voor materieel dat nog niet ZE is, maar de beschikbaarheid hiervan is wel beperkt. Wel komt er vanuit het wegverkeer biobrandstof beschikbaar voor andere modaliteiten door elektrificatie van voertuigen. We beoordelen de haalbaarheid **groen** voor (licht en middelzwaar) wegverkeer, lichte mobiele werktuigen en railverkeer. Elektrificatie biedt voldoende mogelijkheden voor klimaatneutrale aandrijving in 2040.

7. Ruimtelijk

De transitie naar klimaatneutrale mobiliteit vraagt vooral ruimte voor nieuwe (tank- en) laadinfrastructuur, zowel in de openbare ruimte als op het eigen terrein van bedrijven/particulieren. Een uitgebreid, voldoende dekkend laadnetwerk is essentieel voor de elektrificatie, die in de meeste deelsectoren van mobiliteit centraal staat. Voor grootschalige elektrificatie zullen ook grootschaliger laadvoorzieningen nodig zijn (denk aan laadpleinen in steden en relatief grote laadinstallaties bij bedrijven of overslagplaatsen).

Het ruimtebeslag per laadlocatie is beperkt, maar het aantal locaties waarop laadinfrastructuur zal moeten worden uitgebreid is groot. Laden vindt plaats op verschillende soorten locaties (zie Tabel 8). Voor het thuisladen van personenauto's en

depotladen van andere voertuigen kan gebruik worden gemaakt van bestaande parkeerlocaties, maar deze zullen wel moeten worden aangepast.

Het ruimtebeslag van de tankstations voor fossiele brandstoffen zal uiteindelijk minder worden. In de transitiefase is er relatief veel ruimtegebruik, omdat er verschillende brandstoffen en technologieën naast elkaar worden ingezet. In steden zullen bijvoorbeeld oplossingen gezocht moeten worden hoe wordt omgegaan met parkeerruimte wanneer bijvoorbeeld 50% van de personenauto's elektrisch is en 50% nog niet. Toepassing van V2G-technieken kunnen het ruimtebeslag van laadinfrastructuur mogelijk beperken, omdat voertuigen dan worden ingezet om energie in op te slaan.

In de verandering naar klimaatneutrale mobiliteit is het ook mogelijk om in te zetten op het veranderen en verminderen van mobiliteit, door bijvoorbeeld ov-gebruik, deelmobiliteit, fietsen en wandelen te stimuleren. Of transportstromen in de logistiek slimmer te bundelen. Al deze maatregelen zorgen voor een kleiner ruimtebeslag van mobiliteit. Ov-gebruik, fietsen en wandelen legt een minder groot ruimtebeslag in infrastructuur. Daarnaast dragen deze maatregelen bij aan het verminderen van het autobezit per inwoner, waardoor ook de ruimte die nodig is voor parkeren afneemt.

Beoordeling haalbaarheid: **groen**

In de transitiefase is relatief meer ruimtegebruik doordat er zowel tankstations zijn voor fossiele brandstoffen als laadpunten voor elektrisch laden. Op termijn worden tankstations overbodig en zal elektrificatie leiden tot een positief effect op het ruimtegebruik.

4.3.3. Conclusie en discussies

Hoe komen we uit op de emissieraming voor 2040?

We verwachten dat er richting 2040 een aantal mogelijkheden zijn om meer CO₂ te reduceren dan in de huidige prognoses op basis van het huidige beleid, waardoor het naar voren halen met 10 jaar naar een klimaatneutraal Nederland in 2040 dichterbij komt. Dit is mogelijk door aanvullend beleid te maken om de instroom van ZE voertuigen, vaartuigen en werktuigen te versnellen en uiteindelijk de fossiele voertuigen, vaartuigen en werktuigen die resteren in 2040 vervroegd af te schrijven. Daarnaast is het van belang dat er voldoende laadinfrastructuur komt die de versnelde instroom van ZE voertuigen en werktuigen bijhoudt. Dit is de grootste uitdaging richting 2040, gezien de huidige en voorlopig aanhoudende problemen met netcongestie en geeft de grootste onzekerheid met betrekking tot de versnelling die mogelijk is. We hebben de aannames uit de KEV 2024 als vertrekpunt genomen en zijn via analyse op de verschillende lenzen nagegaan in hoeverre de introductie van ZE voertuigen, vaartuigen en werktuigen versneld kan worden.

In hoeverre is versnelling haalbaar en wat zijn de belangrijkste beperkingen?

We hebben de haalbaarheid van een versnelling naar klimaatneutrale mobiliteit beoordeeld aan de hand van verschillende lenzen. De belangrijkste knelpunten worden gevormd door infrastructurele en technologische aspecten van mobiliteit.

Tabel 13. Haalbaarheidsinschatting per lens voor de sector Mobiliteit

Lens	Beoordeling haalbaarheid
Beleid	Groen
Economisch	Groen
Infrastructureel	Oranje
Sociaal maatschappelijk en culture	Groen
Milieukundig	Groen
Technologisch	Oranje
Ruimtelijk	Groen

Een versnelling van de transitie naar klimaatneutrale mobiliteit is haalbaar, wanneer snel actief sturend overheidsbeleid wordt ingezet. Het overheidsbeleid is vooral nodig om economische effecten waar nodig te kunnen mitigeren, de benodigde (energie-) infrastructuur te realiseren en technologische ontwikkelingen in specifieke sectoren te ondersteunen.

Beleid

Op dit moment zijn er grote verschillen tussen de modaliteiten ten aanzien van het beleid om te verduurzamen. Bij alle modaliteiten is het noodzakelijk om aanvullend beleid te voeren. Dit is essentieel, zodat de negatieve effecten op de andere lenzen zoveel mogelijk beperkt blijven. Wij schatten in dat het mogelijk is om aanvullend beleid te voeren waardoor we de haalbaarheid ingeschat hebben op groen.

Economisch

Een versnelde transitie naar klimaatneutrale mobiliteit betekent in veel sectoren een vervroegde afschrijving van voertuigen en werktuigen. Overheidsbeleid kan hierin ondersteunen door kwetsbare groepen burgers en ondernemers te compenseren voor extra kosten. Hierbij is het ook van belang rekening te houden met sociaal-maatschappelijke verschillen in de samenleving. Wij schatten in dat dit goed mogelijk is en beoordelen deze lens daarom met groen.

Infrastructuur

Voldoende beschikbare capaciteit op het elektriciteitsnet is van groot belang om grootschalige elektrificatie in mobiliteit mogelijk te maken. Voor veel subsectoren is elektrificatie de aangewezen techniek voor klimaatneutrale aandrijving, maar dit is alleen mogelijk wanneer er tijdig voldoende netcapaciteit is.

Technologie

In de sectoren binnenvaart, mobiele werktuigen en deels ook zwaar wegverkeer, is elektrificatie in 2040 niet (volledig) mogelijk. Vooral in de binnenvaart is de omvang van restemissies naar verwachting aanzienlijk. Een deel van de alternatieve technieken is in ontwikkeling, maar veel daarvan is nog in onderzoek of in pilotfase. Om deze technieken voldoende te kunnen toepassen is beleid nodig waarin innovaties actief gestimuleerd en ondersteund worden. Een versnelling van deze ontwikkelingen heeft als nadeel dat er mogelijk onvoldoende tijd is voor het testen van technologieën wat tot problemen kan leiden bij een bredere toepassing en tot suboptimale oplossingen leidt.

Het is waarschijnlijk grotendeels mogelijk om restemissies in deze sectoren te voorkomen door de inzet van biobrandstoffen zoals FAME en HVO. Deze biobrandstoffen

zijn echter ook nodig voor andere sectoren zoals zeevaart en luchtvaart en daarom schaars.

Uitwerking in beleid

Om klimaatneutrale mobiliteit in 2040 mogelijk te maken is overkoepelend beleid nodig waarin de doelstellingen per sector worden aangescherpt. Het vaststellen van een groeipad waarmee de doelen in 2040 daadwerkelijk gerealiseerd kunnen worden, is hierbij essentieel. Alleen lange termijn doelstelling is onvoldoende om deze ambitieuze doelstelling in 2040 te halen. Bij de uitwerking van beleid dient rekening te worden gehouden met het internationale karakter van mobiliteit en de beperkte reikwijdte van nationale wetgeving. Eisen die aan nieuwe voertuigen worden gesteld, worden bijvoorbeeld Europees vastgesteld en het Nederlandse wegennet/vaarnet wordt ook gebruikt door buitenlandse voer- en vaartuigen. De invoering van ZE-zones kan daarentegen wel lokaal worden geregeld. Het beleid moet erop gericht zijn dat vanaf 2030 alle nieuwe lichte voertuigen zero emissie zijn. Voor zwaardere voertuigen en werktuigen zo snel mogelijk erna, maar uiterlijk 2035. Voor de resterende voertuigen, vaartuigen en werktuigen moeten in 2040 of iets eerder een regeling worden getroffen om ze versneld af te schrijven. Voor voertuigen, vaartuigen en werktuigen die nog niet vervangen kunnen worden door ZE voertuigen kunnen biobrandstoffen worden toegepast.

Tabel 14. Voorgestelde beleidsmaatregelen voor de sector Mobiliteit

Categorie	Maatregel
Normerend	100% ZE nieuwverkopen (jaartal varieert per modaliteit). Voorwaarde is dat dit Europees geregeld mag worden. Indien dit niet mogelijk is, dan kan er nationaal alternatief beleid geformuleerd worden, bijvoorbeeld door in te zetten op beprijzingsmaatregelen.
Normerend	Indien nodig: aanpassen regelgeving om elektrisch rangeren bij goederentreinen mogelijk te maken
Normerend	Verplicht tanken biobrandstof binnenvaart vanaf 2040
Beprijzend	Verhogen brandstofaccijns
Beprijzend	Gedifferentieerde motorrijtuigenbelasting
Beprijzend	Differentiatie in aanschafbelasting
Beprijzend	Sloopregeling oude dieselauto's
Stimulerend	ITS (en daaraan gekoppeld bv. EcoRouting)
Stimulerend	Modal shift personenvervoer (doel: vraagreductie energie) door stimuleren ov, actieve mobiliteit en deelmobiliteit
Stimulerend	Reisafstanden verkorten / beperken (dichterbij brengen voorzieningen, stimuleren thuiswerken)
Stimulerend	Vergroten ZE zones stadslogistiek
Stimulerend	Onderzoek naar mogelijkheid invoer ZE zones binnenvaart

Daarnaast zijn er maatregelen denkbaar om sociaal-maatschappelijke ongelijkheid te beperken. Deze zijn opgenomen in bij de lens sociaal-maatschappelijk en cultureel.

Wat is de omvang van restemissies?

Zonder inzet van biobrandstoffen komen de totale restemissies uit op 2,9 Mton CO₂ (Bandbreedte 0 – 4,2 Mton CO₂).

Hierbij is het uitgangspunt dat personenauto's en bestelauto's volledig ZE zijn in 2040, na het doorvoeren van aanvullende beleidsmaatregelen. Er zijn geen technologische belemmeringen en indien bidirectionaal laden goed wordt geïmplementeerd, hoeft netcongestie geen probleem te vormen. Vervroegde afschrijving van voertuigen met verbrandingsmotoren moet worden afgedwongen en ondersteund door de overheid. Voor vrachtauto's en touringcars verwachten we dat 5% - 20% in 2040 nog niet volledig ZE zal zijn. Enerzijds omdat voor zware voertuigen de juiste modellen niet tijdig voor 2040 (vanaf 2030) op de markt beschikbaar zijn, anderzijds omdat netcongestie belemmeringen geeft voor de tijdige instroom van ZE voertuigen. De bovengrens komt ongeveer overeen met het aandeel ZE voertuigen dat verwacht mag worden op basis van de Europese CO₂ emissiestandaard voor zware voertuigen. De ondergrens komt overeen met de helft van de zware voertuigen die nog niet ZE is. Voor mobiele werktuigen verwachten we dat 30% CO₂-reductie minimaal mogelijk moet zijn in 2040, maar dat dit in het gunstige geval, wanneer netcongestie vanaf 2035 geen probleem vormt voor laden, 75% CO₂-reductie behaald kan worden. In het laatste geval is ongeveer de helft van het zware materieel ZE. Voor binnenvaart verwachten we dat 25-50% van de schepen die binnen Nederland actief zijn ZE kunnen zijn. Spoor kan volledig emissieloos worden. Met deze aannames komen we op een emissiebandbreedte van 1,6 – 4,2. Ook kan totale klimaatneutraliteit bereikt worden in 2040 door inzet van biodiesel als transitiebrandstof voor de voertuigen, vaartuigen en werktuigen die nog op diesel opereren. Hiervoor is dan 22-57 PJ biodiesel nodig, geschat op basis van de bandbreedte van 1,6-4,2 Mton CO₂. Op dit moment wordt ongeveer 14PJ ingezet hiervoor met name via bijmenging. Bij inzet van biodiesel verlaagt de onderkant van de bandbreedte naar 0 emissies.

De restemissies zijn tijdelijk en kunnen verder worden gereduceerd door de verdere uitrol van technologieën na 2040. Daarnaast is het mogelijk om de restemissies in 2040 verder te reduceren door te sturen op vraagreductie. Dit betekent sturen op minder vraag naar mobiliteit waardoor de emissies (en energievraag) afnemen. Ook kunnen emissies verder worden gereduceerd door technologieën als Intelligente Transportsystemen (ITS), waardoor bijvoorbeeld Ecorouting mogelijk wordt. Daarbij wordt de meest optimale route gegenereerd om zo min mogelijk emissies uit te stoten.

4.3.4. Geraadpleegde bronnen

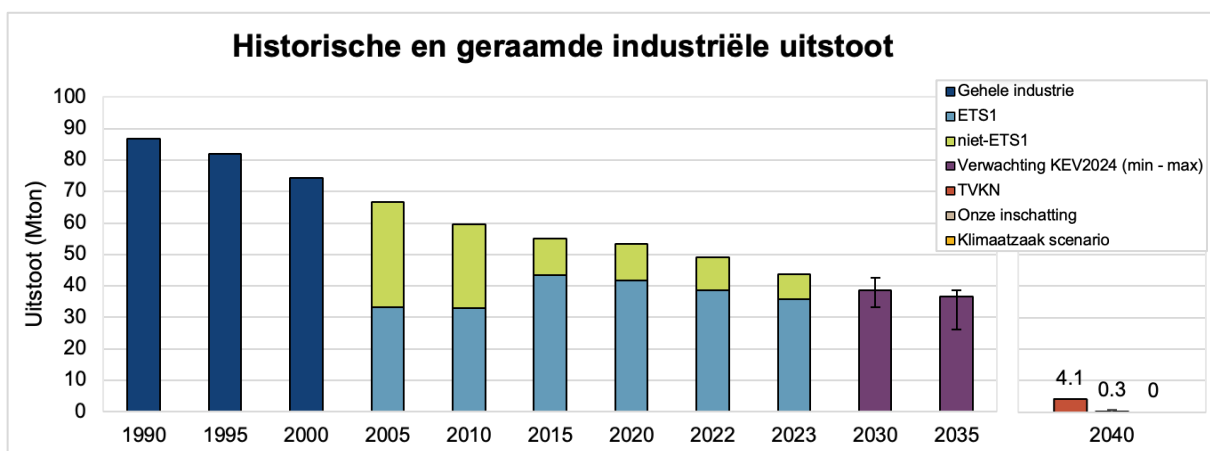
- CBS, Hoeveel binnenvaartschepen zijn er in Nederland? (2024)
- CCR, Routekaart van de CCR voor het terugdringen van de emissies in de binnenvaart. (2022)
- CE Delft, Tank- en laadbehoefte Clean Energy Hubs (2023)
- CE Delft, Een eerlijke mobiliteitstransitie voor iedereen (2024a)
- CE Delft, Energy sources and demand: Can EU27+3 be self-sufficient in its demand for CO₂-free energy sources and competing feedstocks in 2040? (2024b)
- CE Delft, Haalbaarheid ophoging doelstellingen RBSW (2024c)
- CE Delft, Marktverkenning zero-emissie bestelauto's (2024d)
- CE Delft, Nul-emissie vlootnormering zakelijke auto's - Onderzoek naar de kosten voor werkgevers en werknemers (2024e)

- Copper8, Grondstoffentekort zorgt voor ongelijkheid: wie mag er in de toekomst elektrisch rijden? (2022)
- DST, Ecorys, EICB, Panteia, proDANUBE, & Rebel, Study on financing the energy transition towards a zero-emission European IWT sector (2021)
- Elaadnl, Tegen de stroom in varen - De ontwikkeling van batterij-elektrische binnenvaart in Nederland tot en met 2035 (2020)
- Elaadnl, Outlook Bouw – Update 2024 (2024)
- Europees Parlement, (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU (2023)
- IEA, Global EV outlook 2024 (2024)
- IenW, Roadmap Transitiepad Weg-, Dijk- en Spoormaterieel (WDSM) (2022)
- IPBES, IPBES Guide on the production of assessments (2018)
- Muconsult, Inventarisatie maatregelen tegen mobiliteitsarmoede (2023)
- Natuur & Milieu, Belemmeringen bij de inzet van elektrische mobiele werktuigen (2019)
- Natuur & Milieu, Juridische quickscan – Verenigbaarheid van een nationale zakelijke vlootnorm met het EU-recht (2023)
- NKL, & Cenex, Naar een circulaire laadindustrie voor elektrische voertuigen (2023)
- ProRail, Financiering voor elektrificatie twee spoorlijnen (2024)
- PwC, De haalbaarheid van 28 miljard elektrische autokilometers in 2030 (2021)
- Rijksoverheid, Dashboard Klimaatbeleid - Mobiliteit in de bouw (2024a)
- Rijksoverheid, Dashboard Klimaatbeleid Binnenvaart (2024b)
- RVO, Dashboard duurzame mobiliteit (2024)
- RVO, Subsidieregeling Verduurzaming Binnenvaartschepen (2023a)
- RVO, Verduurzaming landbouwwerktuigen; Routes voor de Transitie (2024b)
- SEB, Routekaart Schoon en Emissieloos Bouwen (2023)
- Siemens, Megawatt Charging System from Siemens delivers 1 MW charge for the first-time during testing (2024)
- Spoorpro, Nexrail: ‘Verouderde regelgeving zit elektrisch rangeren in de weg’ (2023)
- TNO, Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe (2022)
- TNO, Effecten flankerend beleid nieuwkoop EV - uitgebreide analyse in segmenten (2023a)
- TNO, Inventarisatie vlootsamenstelling en inzet van mobiele werktuigen buiten de bouwsector en verkenning mogelijkheden voor retrofit (2023b)
- TNO, Transitiepaden Schoon en Emissieloos Bouwen (SEB) (2023c)
- TNO, Binnenvaart test biobrandstof FAME voor snelle verduurzaming (2024a)
- TNO, Rekenregels en emissiefactoren voor het bepalen van de emissiereductie bij inzet van uitstootvrij bouw materieel (2024b)
- TNO, & PBL, Klimaatneutrale binnenvaart in 2050 (2024)

4.4. Analyse sector: Industrie

4.4.1. Inleiding

De sector industrie is historisch gezien een sector met relatief veel broeikasgas uitstoot. Al sinds 1990 is de uitstoot van de industrie gestaag aan het dalen. Voor het grootste deel van de emissies geldt het ETS1, welke een netto nul uitstoot in 2040 garandeert. Een kleiner deel van de industrie valt onder het ETS2. We verwachten dat deze industrie grootschalig kan elektrificeren en, mits de infrastructuur tijdig is aangelegd en financiële obstakels worden weggenomen, op bijna netto nul emissies kan uitkomen in 2040. We bespreken nu eerst de historische emissies en de prognoses voor deze sector volgens II3050 en de trajectverkenning van het PBL. Daarna bespreken we per lens welke hindernissen er zijn om versnelling naar netto nul te realiseren, en hoe die hindernissen kunnen worden weggenomen.



Figuur 14. De historische en geraamde emissies van de Nederlandse industrie. Vanaf 2005 viel een deel van de uitstoot onder het ETS1 en de scope van ETS1 is in 2013 uitgebreid. Daarnaast in paars de door het PBL in de KEV2024 geraamde emissies voor 2030 en 2035 en drie inschattingen voor 2040: de TVKN van PBL, onze inschatting in dit rapport en de uitkomst volgens het ETM Klimaatzaak scenario. Bron: PBL, Klimaat en Energieverkenning 2024 (2024) en PBL, Trajectverkenning klimaatneutraliteit (2024).

1. Ontwikkeling emissies 1990-2030

De Nederlandse industrie heeft tussen 1990 en 2023 een substantiële emissiereductie bereikt, waarbij de broeikasgasemissies zijn gedaald van 87 Mton CO₂-equivalent naar 46,6 Mton. Opvallend aan de industrie is dat circa 60% van de uitstoot geconcentreerd is bij twaalf grote bedrijven. Dit zijn over het algemeen bekende bedrijven, zoals de staalproducent Tata Steel, de raffinaderijen en een aantal kunstmest- en chemieproducenten.

ETS1 industrie

Het Europese emissiehandelssysteem (ETS1) vormt sinds 2005 het belangrijkste sturingsinstrument voor emissiereductie in de energie-intensieve industrie. Het grootste deel van de industriële uitstoot valt sinds 2005 onder het ETS1, zie Figuur 14. Het ETS1 omvat mede alle industriële installaties die aan een of beide van de volgende voorwaarden voldoen: ze komen boven een bepaald thermisch vermogen, oftewel ze kunnen veel brandstof vragen en dus potentieel veel emissies uitstoten, of het gaat om installaties die gespecificeerde producten maken, zoals staal of raffinageproducten, ongeacht hun vermogen. In de praktijk vallen nu zo'n 270 Nederlandse industrie

installaties onder het ETS1, waarvan de uitstoot varieert van een paar kiloton tot meerdere megatonnen per installatie. In 2023 viel ongeveer 36 Mton van de Nederlandse industriële uitstoot onder het ETS1, tegen zo'n 11 Mton buiten het ETS1. We bespreken nu eerst de ETS1 industrie, voordat we met de overige industrie doorgaan.

Onder het ETS1 valt de Nederlandse basisindustrie, zoals staal, het merendeel van de chemie en de raffinagesector. Het ETS1 dwingt het merendeel van de Europese industrie tot kosten-efficiënte emissiereductie, door rechten op CO₂-uitstoot te veilen en laten verhandelen. De marktwerking geeft uitstoot een prijs en loont het investeren in emissiereductie. Het aantal emissierechten voor de EU reduceert jaarlijks, waardoor is verzekerd dat op Europees niveau de uitstoot van ETS1 installaties onder een bepaald plafond blijft. In 2030 zijn de emissies 62% lager dan in 2005.

Om zekerheid te hebben over emissiereductie binnen het ETS1 in Nederland, heeft Nederland aanvullend een nationale CO₂-heffing ingevoerd boven op de ETS1 prijs. Deze heffing fungeert als minimumprijs en wordt alleen betaald als de ETS1-prijs daar onder ligt - wat tot nu toe niet is gebeurd. De overheid kan de hoogte van de CO₂-heffing bijstellen om emissiereductiemaatregelen indien eerder rendabel te maken (PBL, 2024). De CO₂-heffing geeft Nederlandse ETS1 bedrijven zekerheid over de kosten van uitstoot en heeft als doel om uitstootreductie bij de Nederlandse industrie te stimuleren – anders dan het ETS1, waar emissiereductie op de meest kosten efficiënte plek binnen Europa wordt gestimuleerd. Het is onzeker op welke manier c.q. middels welke drijfveer de emissiereductie in Nederland zal wordt bereikt: door verduurzaming van de bedrijven of omdat bedrijven ervoor kiezen hun activiteiten elders voort te zetten.

Vanaf 2039 worden er geen nieuwe ETS1-emissierechten meer uitgegeven, waardoor de Europese ETS1-bedrijven vanaf 2040 netto geen uitstoot meer mogen hebben. Het is nog onbekend hoe negatieve emissies hierin worden meegenomen - deze zouden bijvoorbeeld alleen binnen bedrijven kunnen worden gebruikt als compensatie, of op Europese schaal kunnen worden verhandeld via certificaten.

Het PBL verwacht in de KEV dat de ETS1-industrie in 2040 nog restemissies zal hebben, die worden gecompenseerd door negatieve emissies. Volgens deze prognose stijgt de ETS1-prijs naar ongeveer 184 €/ton (bandbreedte 125-228 €/ton) - onvoldoende om de benodigde duurdere reductiemaatregelen uit te lokken. Het PBL benadrukt echter de onzekerheid over zowel de ETS1-prijs als de rol van negatieve emissies. De KEV geeft geen verwachting van de emissies in 2040, maar de TVKN van PBL raamt de restemissies van de ETS1 industrie in 2040 op 3.5 – 4.7 Mton, welke door negatieve emissies worden gecompenseerd. Wij verwachten een sterkere prijsstijging van de ETS1 prijs richting 2040 omdat het steeds schaarser worden van emissierechten de prijs zal opdrijven, naar het niveau van negatieve emissies (300-500 €/ton). Hierdoor schatten wij de restemissies bij de ETS1 op nul, of ruim lager in dan de TVKN-raming. Net als PBL gaan we ervan uit dat, als er nog restemissies zijn, deze binnen de industrie worden gecompenseerd met negatieve emissies, resulterend in netto nul-emissie in 2040.

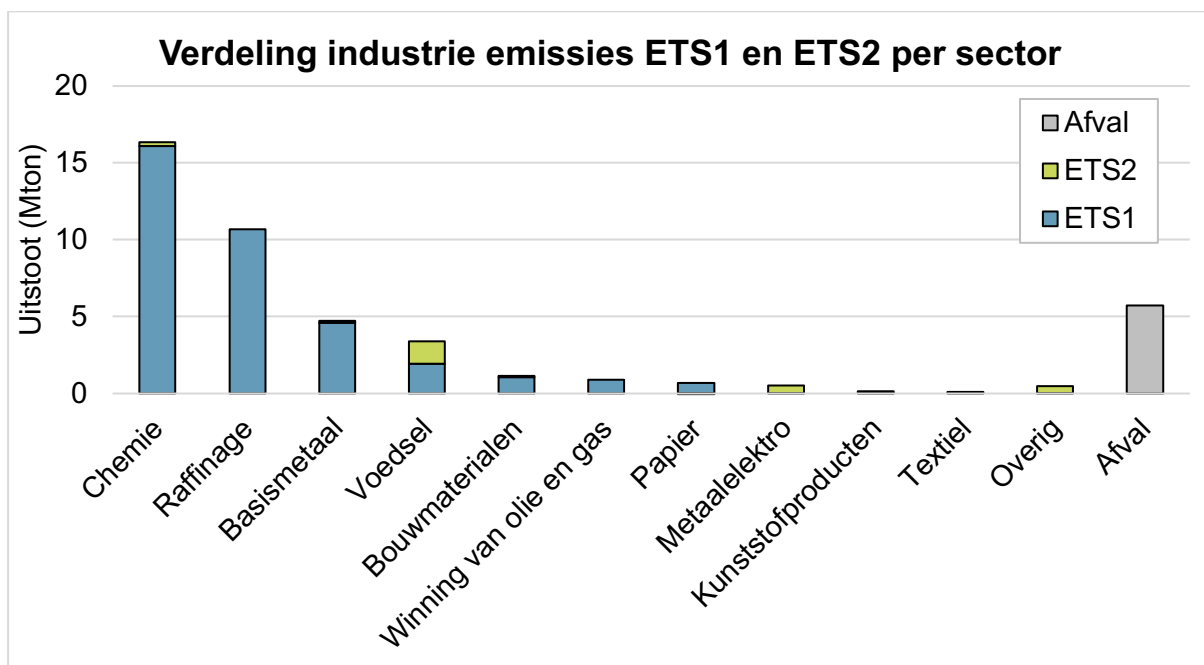
De Nederlandse overheid heeft zich gecommitteerd aan het ETS1 (Tweede Kamer, 2022-2023), wat betekent dat alle installaties onder dit systeem in 2040 netto nul-emissie

moeten bereiken. Gezien deze wettelijke verankering gaan we in dit onderzoek ervan uit dat deze emissiereductie gegarandeerd is.

ETS2 industrie

Een deel van de Nederlandse industriële uitstoot valt buiten het ETS1 (zie Figuur 14 en 15). Deze niet-ETS1 uitstoot komt vrijwel geheel van twee categorieën: afvalbeheer (verbranding en stortplaatsen) en kleinere industriebedrijven die niet aan de ETS1-voorwaarden voldoen. Omdat afval een steeds grotere rol gaat spelen als grondstof in de circulaire economie, en afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) naar verwachting in 2040 zullen bijdragen aan negatieve emissies, wordt de ontwikkeling van afvalbeheer apart behandeld in de Analyse potentie negatieve emissies (vanaf pagina 163).

Dit hoofdstuk richt zich daarom op de overige industrie in Nederland en de vraag hoe de uitstoot die zij veroorzaken voor 2040 sterk gereduceerd kan worden. Deze uitstoot zal vanaf 2027 vallen onder een tweede emissiehandelssysteem: het ETS2.



Figuur 15. De verdeling van de emissies binnen ETS1 en ETS2 industrie per industriële sector voor de emissies in 2023. De afvalverwerking is buiten ETS1 en ETS2 genomen in deze figuur, omdat deze sector wordt behandeld in het hoofdstuk 4.8

Het ETS2 functioneert parallel aan het ETS1, met een vergelijkbare werking maar zonder mogelijkheid tot onderlinge handel in rechten. Een belangrijk verschil is dat onder ETS2 de brandstofleveranciers CO₂-rechten moeten kopen voor alle brandstof die zij leveren aan de industrie, gebouwde omgeving en transport. Omdat deze leveranciers zelf geen emissiereductiemogelijkheden hebben, berekenen zij de kosten door aan hun afnemers, die daardoor worden gestimuleerd tot emissiereductie. Het aantal geveilde rechten neemt jaarlijks af vanaf 2027, waardoor de EU-uitstoot onder het maximumplafond blijft. Dit leidt tot 42% emissiereductie in 2030 ten opzichte van 2005. In 2044 worden de laatste rechten uitgegeven, resulterend in netto nul-emissie in 2045. Bij een lineaire afbouw zou de uitstoot in 2040 ongeveer 20% bedragen van het niveau in 2025.

De ETS2-industrie bestaat uit een groot aantal kleinere bedrijven en installaties met een gezamenlijke uitstoot van zo'n 3 Mton in 2023. Zoals Figuur 15 laat zien, zijn deze emissies verdeeld over verschillende sectoren. De grootste bijdrage komt van de voedselverwerkingssector, gevolgd door de productie van metaal- en elektrische apparaten en kleinere chemiebedrijven. Kenmerkend is dat deze emissies vrijwel uitsluitend voortkomen uit aardgasverbruik voor proceswarmte. Het PBL verwacht in de Klimaat en Energieverkenning 2024 dat de ETS2-industrie emissies in 2030 zullen dalen naar 2 Mton (bandbreedte 1,6-2,4 Mton).

Bij een lineaire emissiereductie zou in 2040 ongeveer 0,7 Mton resteren bij de Nederlandse ETS2-industrie. Echter, omdat ETS2 op Europees niveau werkt, hoeft de Nederlandse reductie niet lineair te verlopen. Een tragere reductie dan het Europese gemiddelde is mogelijk, maar zou wel leiden tot relatief hoge kosten voor Nederlandse brandstofgebruikers.

2. Transitie sector 2030-2050 (II3050-NAT)

In het 2040 Klimaatneutraal ETM scenario is een vrijwel volledige omschakeling naar klimaatneutrale productiemethoden binnen de industrie voltooid. Om tot klimaatneutraliteit te komen ondergaat de Nederlandse industrie een grondige verduurzaming, waarbij elektrificatie en waterstof de hoofdrol spelen.

De zware industrie maakt grote veranderingen door. In de staalproductie worden in dit scenario alle hoogovens omgebouwd naar een proces dat waterstof en elektriciteit gebruikt in plaats van kolen. Bij de chemische industrie zien we een gedeeltelijke krimp in de traditionele productie, maar tegelijk ontstaat er een nieuwe tak die zich richt op duurzame grondstoffen. De raffinaderijen maken een interessante ontwikkeling door: hoewel de traditionele olieraffinage krimpt, ontstaat er een nieuwe focus op de productie van synthetische brandstoffen. Deze sectoren vallen grotendeels onder het ETS1 en komen in dit hoofdstuk verder beperkt aan bod. De elektriciteitsvraag van deze zware industrie en de invloed hiervan op en benodigde infrastructuur wordt wel behandeld in het overkoepelende hoofdstuk 5.3 Infrastructuur aan bod.

Voor de sectoren die grotendeels onder het ETS2 vallen, zien we een duidelijke trend: momenteel wordt voornamelijk aardgas gebruikt, maar in het Klimaatneutraal 2040 scenario is elektrificatie van die aardgasvraag de belangrijkste pijler voor emissiereductie. Een concreet voorbeeld is de voedselsector (deels ETS1, deels ETS2) waar de energievraag in 2040 voor ruim 80% uit elektriciteit bestaat, met daarnaast een klein volume aan waterstof. De andere ETS2-sectoren vallen binnen het ETM vooral onder de categorie "Other", waarin elektriciteit opnieuw de belangrijkste energiedrager is. Mits elektriciteit en waterstof emissievrij worden geproduceerd, zijn deze sectoren dus vrij van scope 1 en 2 emissies. Traditionele industrieën zoals de gaswinning krimpen of verdwijnen zelfs helemaal. Dit illustreert de fundamentele verandering die de Nederlandse industrie doormaakt in dit scenario.

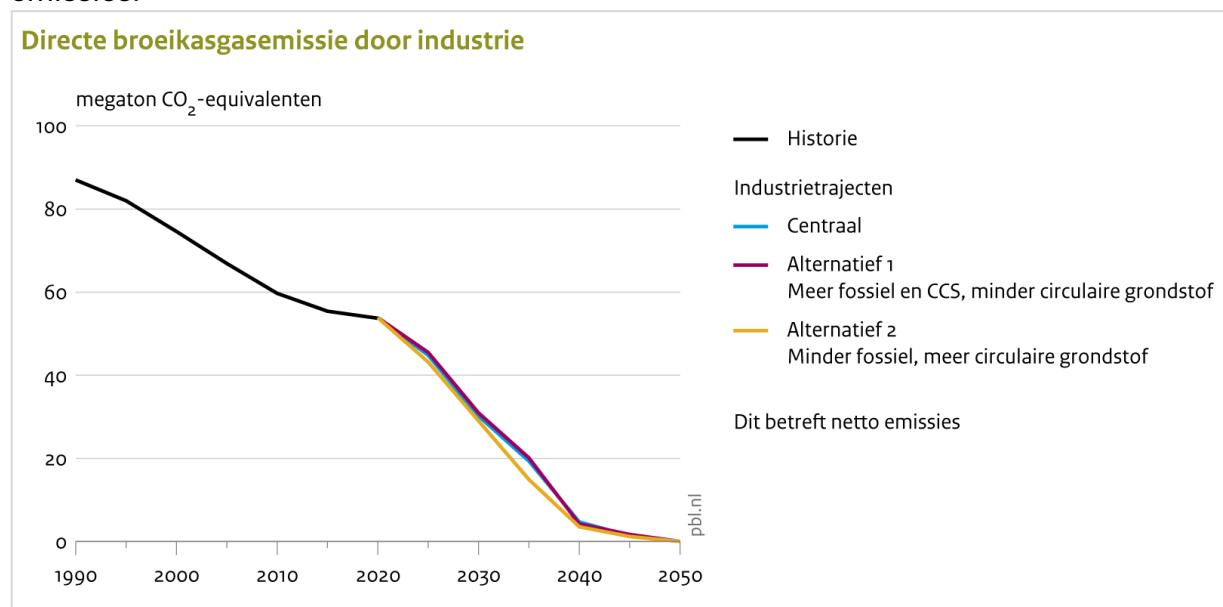
We hebben het ETM scenario niet volledig aangepast naar onze verwachtingen voor 2040, omdat het industriedeel van het scenario wordt ingevuld door een extern model (het Carbon Transition Model). Het industriescenario in dit CTM is niet publiek, omdat er voor

de ii3050 studie door bedrijven vertrouwelijke plannen zijn gedeeld, dus kan niet worden aangepast voor dit onderzoek. Waar onze verwachting afwijkt van het Klimaatzaak 2040 scenario, geven we dit aan.

3. Transitiepad volgens PBL TVKN

In het PBL-rapport "Transitieverkenning klimaatneutraal 2050" wordt de transitie van de Nederlandse industriesector tussen 2030 en 2050 tot een klimaatneutrale industrie beschreven. Hoewel de ETS1 en ETS2 industrie niet strikt gescheiden worden beschreven, zijn er duidelijke ontwikkelingslijnen zichtbaar. De energie-intensieve industrie maakt een drastische ombouw door, met vaak volledige vervanging van productietechnologieën. Zo verschuift de raffinage en chemiesector van aardolieproducten naar biogene, synthetische en gerecyclede moleculen. Daarnaast zien we grootschalige elektrificatie, inzet van waterstof en toepassing van CCS.

Het PBL verwacht voor de gehele industriesector geen uitstoot in 2050 (en netto een negatieve uitstoot). In 2040 is er nog een aantal Mtonnen uitstoot in de gehele industrie, zie Figuur 16, maar deze worden in de TVKN ruim gecompenseerd met negatieve emissies.



Figuur 16. De historische en verwachte industriële uitstoot volgens de PBL Trajectverkenning klimaatneutraliteit (2024), bron: PBL.

Voor de ETS2-industrie verwacht het PBL een vergaande verduurzaming in 2040. ETS2-rechten zullen dan voornamelijk worden gekocht door andere sectoren, mobiliteit en gebouwde omgeving, omdat deze minder alternatieven en een hogere betaalbaarheid hebben. Voor de ETS2-industrie ligt de nadruk op elektrificatie en energiebesparingen. Installaties die nu voornamelijk aardgas gebruiken voor warmtegeneratie worden vervangen door warmtepompen, elektrische boilers en innovatievere elektriciteitsgedreven oplossingen, zoals de opslag van elektrisch geproduceerde warmte.

4.4.2. Beoordeling haalbaarheid

De haalbaarheid van versnelde emissiereductie in de ETS2-industrie wordt beoordeeld vanuit zeven perspectieven: beleid, economisch, sociaal-maatschappelijk en cultureel,

milieukundig, technologisch, infrastructureel en ruimtelijk. Deze integrale analyse laat zien welke aanpassingen nodig en mogelijk zijn om de transitie vijf jaar te versnellen, van 2045 naar 2040.

1. Beleid

Voor de ETS2-industrie ligt er een Europese verplichting om in 2045 netto nul-emissies te bereiken. Om deze deadline vijf jaar te vervroegen naar 2040, zijn aanvullende nationale beleidsinstrumenten nodig. Bedrijven kunnen alleen verduurzamen als zij handelingsperspectief hebben: er zijn financiële, technische, infrastructurele en ruimtelijke mogelijkheden. Beleid kan deze factoren deels beïnvloeden. Andere aspecten van het handelingsperspectief worden bij de respectievelijke lens behandeld.

Om emissies in de industrie te reduceren, moet beleid ingezet worden dat er aan de ene kant voor zorgt dat het uitstoten van emissies wordt teruggedrongen en aan de andere kant dat aan de randvoorwaarden wordt voldaan om de transitie naar alternatieven mogelijk te maken. We gaan hieronder op beide punten in.

Emissiereductie

Een manier om volledige zekerheid te hebben van het behalen van emissiedoelen zou het instellen van een nationaal emissieplafond binnen het ETS2 kunnen zijn (CE Delft, 2024). Dit plafond wordt gewaarborgd door de veiling van emissierechten tot een bepaald aflopend maximum per jaar, tot uiterlijk 2039. In wezen gaat het dus om de invoering van een emissiehandelssysteem, vergelijkbaar aan het ETS1 en ETS2, voor de Nederlandse gebruikers die onder het ETS2 vallen. Zij moeten dan rechten kopen op de ETS2 markt én op het nationale equivalent hiervan. Het gevolg hiervan is dat brandstofleveranciers twee typen emissierechten moeten doorberekenen aan hun klanten, met stijgende brandstofprijzen tot gevolg. Om te voorkomen dat burgers met zeer hoge aardgasprijzen geconfronteerd worden, zou er met deelplafonds per sector kunnen worden gewerkt (CE Delft, 2024). Zo kan het plafond voor de ETS2 industrie sneller dalen dan voor bijvoorbeeld de gebouwde omgeving, waar zeer hoge prijzen voor burger politiek en maatschappelijk wellicht minder acceptabel zijn dan in de industrie. Uiteraard compliceert dit de uitvoering.

Een alternatief voor het invoeren van een emissieplafond is de invoer van een nationale emissieheffing voor de ETS2 industrie. Dit is conform de CO₂-heffing die is ingevoerd voor de Nederlandse ETS1 industrie. Deze aanpak biedt bedrijven zekerheid over toekomstige CO₂-prijzen en daarmee over hun investeringen in emissiereductie. Bovendien biedt een CO₂-prijs de overheid de mogelijkheid tot bijstellingen om het tempo van emissiereductie te beïnvloeden. Anders dan een emissieplafond geeft een CO₂-prijs geen absolute zekerheid over het emissieniveau (zie boven). De overheid zou ervoor kunnen kiezen om deze nationale CO₂-prijs sectorspecifiek in te voeren, bijvoorbeeld alleen voor de ETS2 industrie, en niet de gebouwde omgeving. Dit compliceert de uitvoering, maar heeft als voordeel dat consumenten niet met dezelfde CO₂-prijs worden geconfronteerd als bedrijven.

De bovenstaande voorstellen voor nationaal beleid vereisen een parallelle afbouw van de veiling van Nederlandse ETS2 rechten naar rato van de afbouw van emissies in de industrie. Zonder deze koppeling zou versnelde Nederlandse emissiereductie de

Europese markt verstoren: meer beschikbare ETS2-rechten zouden de prijs kunnen drukken en daardoor emissiereductie elders in Europa vertragen. In het meest ongunstige scenario heeft de Nederlandse maatregel dan op Europees niveau geen effect. Door het naar rato verminderen van geveilde rechten wordt dit voorkomen. De keerzijde is dat de Nederlandse overheid hiermee veilinginkomsten misloopt, al kan dit deels worden gecompenseerd door inkomsten uit de nationale veiling of heffing. Nederland zal hierover in gesprek moeten gaan met de Europese Commissie, aangezien het huidige ETS2 systeem niet op deze manier is ingericht, maar dit zien we niet als een obstakel.

Randvoorwaarden

Het succes van CO₂-beprijzing of emissieplafonds staat of valt met de mogelijkheden die bedrijven hebben om daadwerkelijk te verduurzamen. Zonder deze mogelijkheden bestaat het risico dat bedrijven moeten sluiten of hun activiteiten verplaatsen. Dit risico speelt vooral in de ETS1-industrie, waar energiekosten een groot deel van de omzet vormen. Een concreet risico is dat andere Europese landen sneller hun elektriciteitsinfrastructuur op orde hebben met lagere elektriciteitsprijzen en nettarieven, waardoor bedrijven zich daar vestigen of productie zich verplaatst naar andere locaties. Dit zou wel leiden tot emissiereductie in Nederland, maar zonder mondiale klimaatwinst omdat de uitstoot zich verplaatst. Om dit te voorkomen moet emissie reducerend beleid samengaan met beleid dat de juiste randvoorwaarden schept. Deze randvoorwaarden, die we hier beschrijven en later per lens verder uitwerken, zijn cruciaal voor een succesvolle transitie.

Infrastructuur

Voor de meeste ETS2-bedrijven is een zwaardere elektriciteitsaansluiting een voorwaarde voor emissiereductie. De technische aspecten hiervan komen aan bod in lens 5. Technologie. Het kernpunt is dat versnelde uitrol en maximaal efficiënt gebruik van vooral elektriciteits- en in mindere mate waterstofinfrastructuur cruciaal is voor verduurzaming vóór 2040. Dit thema komt ook sectoroverstijgend terug in hoofdstuk 5.3.

Voor de industrie zijn er specifieke oplossingsrichtingen om elektrificatie te versnellen.

Een veelvoorkomend probleem is dat bedrijven wel fysiek kunnen elektrificeren, maar door netcongestie geen hoger contractueel vermogen krijgen toegewezen. Om dit aan te pakken worden momenteel al verschillende oplossingen onderzocht en toegepast: tijdsafhankelijke nettarieven, gebruik van de N-1 vluchtstrook voor afname, non-firm aansluitovereenkomsten (ATO) en capaciteitsbeperkende contracten (CBC). De effectiviteit van deze maatregelen wordt momenteel onderzocht en de uitkomsten hiervan zullen moeten uitwijzen welke combinatie van maatregelen in welke situatie de meeste winst oplevert.

Een specifieke beleidsoptie die overwogen kan worden om het vertragende effect van netcongestie te beperken is het financieel ondersteunen van de gevolgen van een verplichte non-firm ATO of CBC aansluiting. Wanneer een bedrijf een grotere aansluiting nodig heeft om te kunnen elektrificeren, maar deze dankzij netcongestie niet beschikbaar is, kunnen Netbeheerders bijvoorbeeld een non-firm ATO (Aansluit- en

Transportovereenkomst) aanbieden aan een bedrijf. Bij zo'n overeenkomst mag de netbeheerder het vermogen van een bedrijf gedurende een deel van het jaar verlagen. Voor bedrijven betekent dit een keuze tussen gedwongen periodieke afschakeling of een hybride systeem. In de praktijk leidt dit vaak tot extra kosten die elektrificatie onaantrekkelijk maken, vooral omdat de ETS2-prikkel vooralsnog te zwak is en energiekosten voor deze bedrijven een relatief klein deel van de omzet vormen. Door deze extra kosten is elektrificatie in combinatie met een non-firm ATO (nu) niet rendabel en het kiest bedrijf ervoor om elektrificatie uit te stellen. Om te voorkomen dat netcongestie op deze manier het verduurzamen van de industrie vertraagd, zou de overheid de financiële nadelen van een non-firm ATO kunnen opvangen. Dit kan door de gedeerde inkomsten tijdens afschakeling te compenseren of door meerkosten van een hybride opstelling te vergoeden – specifiek het verschil met een volledig geëlektrificeerde situatie. De uitvoering van dit beleid is complex, maar kan elektrificatie in de industrie wel een boost geven. Bedrijven kunnen dan alvast deels elektrificeren en zijn voorbereid op volledige overschakeling naar elektriciteit zodra voldoende netcapaciteit beschikbaar komt. Als bijkomend voordeel worden ook al direct emissies vermeden in de perioden dat bedrijven elektrisch draaien.

Een andere beleids optie is het stimuleren van efficiënt netgebruik. In andere woorden, het stimuleren van het vervangen van de huidige gas gedreven installaties door een energie-efficiënte oplossing, in tegenstelling tot de gasvraag simpelweg vervangen door eenzelfde volume aan elektriciteit. Een voorbeeld: een bedrijf kan een gasboiler vervangen voor een elektrische boiler (zie ook lens 5. Technologisch). De elektriciteitsvraag zal dan dezelfde orde grootte hebben als de gasvraag. Echter wanneer het bedrijf ervoor kiest te investeren in een (duurdere) warmtepomp neemt de energievraag fors af. Nog efficiënter wordt het wanneer bedrijven investeren in lokale warmtevoorziening zoals geothermie, eventueel gecombineerd met een warmtepomp. De stimulering van zulke energie-efficiënte investeringen kan via voorrang bij subsidies of netaansluiting, wat bedrijven prikkelt hun energievraag zo efficiënt mogelijk in te richten.

Arbeid

Een cruciale voorwaarde voor versnelling van de industriële transitie is voldoende beschikbaarheid van technisch personeel. Dit is nodig voor zowel de verduurzaming van de industrie zelf als de versnelde aanleg van energie-infrastructuur. De overheid moet daarom op korte termijn beleid ontwikkelen om het aantal technische arbeidskrachten in Nederland substantieel te vergroten. Dit wordt verder besproken in hoofdstuk 5.4.

Financieel

Bedrijven die wel de middelen hebben om een investering te doen, maar waar de investeringen nog niet rendabel zijn, kunnen bijvoorbeeld de SDE++ subsidie aanvragen. Er zijn verschillende subsidies beschikbaar voor bedrijven die in emissiereductietechnieken willen investeren en de SDE++ wordt gezien als het “werkpaard” van de industriële transitie. De SDE++ dekt de onrendabele top van een investering, door bij te lage CO₂-prijzen - en dus minder besparing voor het bedrijf – het verschil tot een bepaald maximum uit te keren.

De huidige opzet van de SDE++ kent echter enkele knelpunten die tot vertraging leiden. Ten eerste opent de regeling slechts eenmaal per jaar. Wanneer het beschikbare budget ontoereikend is voor alle aanvragen - zoals in 2023 het geval was - worden projecten afgewezen vanwege geldgebrek. Deze projecten kunnen pas een jaar later opnieuw een aanvraag indienen, wat automatisch tot minimaal een jaar vertraging leidt. Een directe oplossing hiervoor zou zijn om de subsidiepot te vergroten en alle projecten die aan de voorwaarden voldoen toe te kennen.

Een tweede knelpunt is de timing van de subsidieaanvraag. Bedrijven kunnen pas SDE++ aanvragen als ze aan alle voorwaarden voldoen, waaronder het hebben van een toereikende netaansluiting. Dit creëert onnodige vertraging: wanneer een bedrijf eindelijk aan alle eisen voldoet, moet het wachten tot de volgende subsidieronde. Om deze vertraging te voorkomen zou de SDE++-systematiek kunnen worden aangepast, zodat projecten in een vroeger stadium subsidie alvast toegekend krijgen, waarbij de daadwerkelijke uitbetaling pas start na realisatie en het voldoen aan alle voorwaarden.

Bij het vormgeven van dit beleid is het cruciaal rekening te houden met de lange doorlooptijden van industriële elektrificatie (CE Delft, 2021). Zelfs zonder netwerkverzwaring beslaat dit proces 5 tot 7 jaar. Wanneer netverzwaring wel nodig is, wordt deze periode nog aanzienlijk langer. Dit benadrukt het belang van snelle actie: om de ETS2-industrie in 2040 op nul-emissie te krijgen, moet aanvullend beleid nu worden ingevoerd om bedrijven tijdig investeringszekerheid te bieden.

We concluderen dat de overheid op het gebied van beleid voldoende mogelijkheden heeft om de ETS2 industrie tot netto nul emissies in 2040 te leiden. Naast het maximaliseren of beprijsen van CO₂ uitstoot is aanvullend beleid nodig om aan de randvoorwaarden te voldoen die nodig zijn voor de industrie om te verduurzamen.

Beoordeling: **groen**

2. Economisch

De integrale kosten van het versnellen van de emissiereductie worden beschreven in een sector overstijgend hoofdstuk 5.2. We behandelen hier de specifieke zaken voor de ETS2 industrie. Aangezien deze bedrijven vanwege het ETS2-emissieplafond sowieso in 2045 emissievrij moeten zijn en fossiele brandstoffen steeds duurder worden, zijn investeringen in duurzame technologie hoe dan ook onvermijdelijk. Onze analyse richt zich daarom op de additionele effecten van het vervroegen van dit doel naar 2040.

De kosten die gemaakt moeten worden om vervroegd over te stappen naar een emissievrije productie bestaan vooral uit de investeringskosten (CAPEX). Hoewel het absolute investeringsbedrag bij versnelling naar 2040 voor de meeste bedrijven niet wezenlijk verandert, ontstaat er wel een timing-issue: bedrijven moeten eerder investeren dan het natuurlijke vervangingsmoment van hun huidige installaties. Dit leidt tot vervroegde afschrijving van bestaande activa, wat de winstgevendheid tijdelijk zal drukken.

Bij hun investeringsbeslissing wegen bedrijven de investeringskosten (CAPEX) af tegen operationele uitgaven (OPEX) zoals energieprijzen, netkosten en CO₂-kosten (ETS2-rechten plus eventuele nationale heffingen). Over het algemeen zijn de technologieën om emissies te reduceren in de ETS2 industrie beschikbaar, maar nu nog niet kostencompetitief (zie ook lens 5. Technologisch). De overheid biedt bedrijven de mogelijkheid om de onrendabele top af te dekken via de SDE++ subsidie, zie ook lens 1. Beleid. Met een toereikende subsidiepot kunnen bedrijven dus met relatieve zekerheid investeren in emissiereductie.

Echter is het wel een voorwaarde dat bedrijven het kapitaal hebben om de investering te doen. Zelfs als netcapaciteit en personeel geen belemmering vormen, kunnen bedrijven vastlopen op gebrek aan financiering. Dit speelt op twee niveaus: eigen kapitaal kan ontbreken en externe financiering is niet altijd beschikbaar. Het belangrijkste obstakel hier is dat kredietverstrekkers minder geneigd zijn om investeringen te financieren waarvan de technologie onzeker is of welke een lange afschrijvingstermijn hebben, en nog minder wanneer de investering een relatief lage cashflow heeft. Uit eerder onderzoek naar energietransitiefinanciering blijkt dat ongeveer driekwart van de benodigde industriële investeringen mogelijk onaantrekkelijk is voor kredietverstrekkers (Kalavasta, 2021). Daarnaast speelt mee dat bedrijven niet altijd kredietwaardig zijn, bijvoorbeeld na recente investeringen in bedrijfsgroei.

Dit financieringsprobleem, dat ook speelt bij het 2045-doel, wordt versterkt door versnelling naar 2040 omdat meer kapitaal tegelijkertijd beschikbaar moet komen. Met een garantiestelling van de overheid zou het kapitaal gemakkelijker beschikbaar komen. Echter om te voorkomen dat het als staatsteun wordt aangemerkt, kunnen garantstellingen alleen verleend worden onder strenge voorwaarden, zoals een gezonde financiële situatie in het bedrijf, een marktconforme vergoeding voor de overheid en de garantstelling dekt niet de volledige lening. Daarom zouden overheidsgaranties nog steeds niet alle financiële belemmeringen in de sector wegnemen.

Samenvattend is versnelling naar 2040 vanuit financieel perspectief problematisch. Naast vervroegde afschrijvingen speelt vooral het financieringsvraagstuk: veel bedrijven zonder eigen kapitaal zullen moeite hebben financiering te krijgen. Overheidsgaranties bieden slechts een gedeeltelijke oplossing vanwege de strenge voorwaarden.

Beoordeling: **oranje**

3. Sociaal-maatschappelijk en cultureel

De maatschappelijke context voor industriële verduurzaming is overwegend positief. Recent onderzoek onder ruim 18.000 Nederlanders toont breed draagvlak: bijna driekwart vindt dat grote bedrijven te weinig doen tegen klimaatverandering (CBS, 2023). De cruciale gedragsverandering die moet leiden tot verduurzaming van de industrie moet met name plaats (gaan) vinden in de directiekamers en bij aandeelhouders van de bedrijven. Deze transitie lijkt onvermijdelijk: door de aangekondigde stijging van de energiebelasting op aardgas en de invoering van ETS2 zullen bedrijven hoe dan ook moeten verduurzamen. We verwachten daarom dat directies, ongeacht of het doel 2040 of 2045 is, op korte termijn al zullen bepalen welke aanpassingen mogelijk en

noodzakelijk zijn. Dit betekent dat de benodigde gedragsveranderingen in het komende decennium plaatsvinden, onafhankelijk van de exacte deadline.

Een tweede relevante factor is het consumptiegedrag van Nederlandse en buitenlandse afnemers. Meer hergebruik, reparatie en recycling zou de vraag naar nieuwe producten verminderen en daarmee ook de industriële activiteit. Hoewel deze ontwikkeling gunstig zou zijn voor het klimaat en gestimuleerd kan worden door de overheid, gaat dit scenario niet uit van veranderende consumptiepatronen. Dit is een bewuste keuze: we nemen het niet mee als voorwaarde voor het behalen van reductiedoelen, maar erkennen wel de potentiële bijdrage. De overheid zou via voorlichting duurzaam consumentengedrag kunnen stimuleren, maar de effecten hiervan zijn lastig te voorspellen.

De arbeidsmarkteffecten zijn tweeledig. Tot 2040 leidt versnelde emissiereductie tot meer werkgelegenheid, zoals verder wordt uitgewerkt in hoofdstuk 5.4. Er bestaat wel een risico dat sommige bedrijven, ondanks stimulerend beleid, niet in Nederlandse emissiereductie investeren en hun activiteiten verplaatsen. Dit zou na 2040 negatieve werkgelegenheidseffecten hebben. Gezien de beperkte technische obstakels (zie lens 5. Technologisch) kan dit risico met gerichte overheidsondersteuning worden geminimaliseerd.

Concluderend zien we op sociaal-maatschappelijk en cultureel vlak geen significante obstakels voor een emissievrije industrie in 2040. De vereiste gedragsverandering in directiekamers wordt al afgedwongen door ETS2 en zal daarom hoe dan ook op korte termijn plaatsvinden.

Beoordeling: **groen**

4. Milieukundig

De verduurzaming van de industrie heeft overwegend positieve milieu-effecten. De primaire winst komt natuurlijk van CO₂-emissiereductie en de daaruit volgende beperking van klimaatverandering. Door de versnelling van 2045 naar 2040 wordt deze positieve impact nog eerder gerealiseerd.

Bij de technologische oplossingen voor emissiereductie (uitgebreid besproken in lens 5. Technologisch) verdient één specifiek aspect extra aandacht vanuit milieukundig perspectief. Het betreft de inzet van industriële warmtepompen, een veelbelovende technologie die echter wel koudemiddelen gebruikt voor warmtetransport. Deze koudemiddelen kennen twee risico's: sommige vormen een veiligheidsrisico, andere zijn zelf krachtige broeikasgassen. Milieuschade kan ontstaan wanneer deze middelen vrijkomen, hetzij door lekkages tijdens gebruik, hetzij bij onjuiste ontmanteling van installaties na hun levensduur.

De regelgeving rond koudemiddelen wordt echter steeds strenger: vanaf 2027 worden bepaalde specifieke koudemiddelen verboden en vanaf 2032 geldt een volledig verbod op synthetische koudemiddelen. Dit creëert een specifiek risico bij versnelling: bedrijven zouden kunnen investeren in installaties met koudemiddelen die bij latere investering

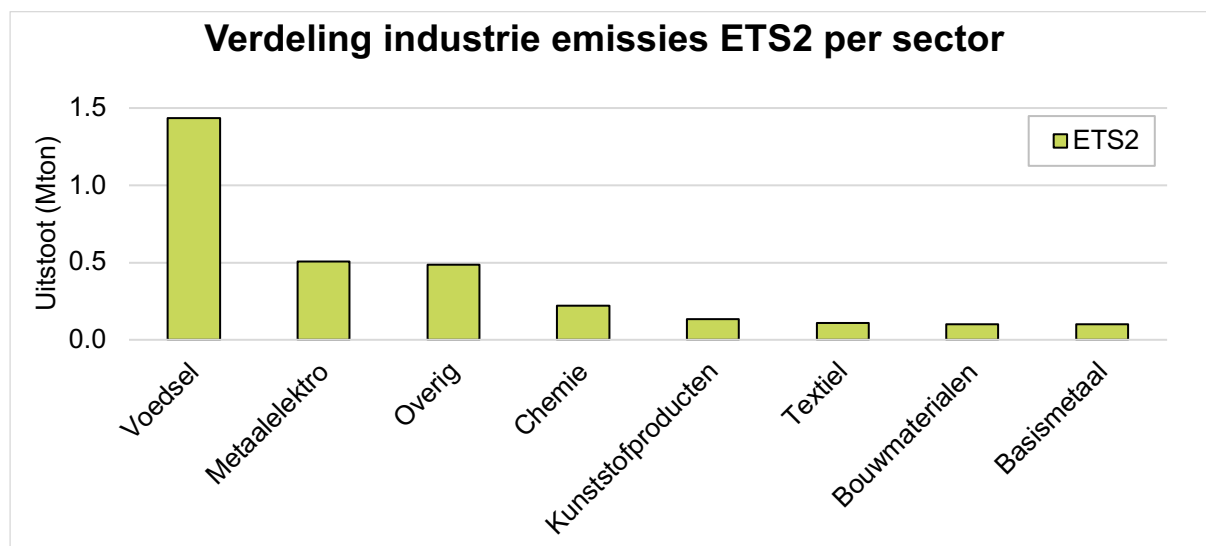
niet meer toegestaan zouden zijn. We beoordelen dit risico echter als beperkt, omdat het niet opweegt tegen de bredere milieuvoordelen van versnelde verduurzaming.

Samenvattend zijn er vanuit milieukundig perspectief geen significante belemmeringen voor het realiseren van een emissievrije ETS2-industrie in 2040.

Beoordeling: **groen**

5. Technologisch

De emissies in de ETS2-industrie komen voor ongeveer de helft uit de voedselindustrie, zoals te zien is in Figuur 17. De voedselindustrie bestaat uit diverse subsectoren, zoals zuivelverwerking, zetmeelproductie, olie- en vetverwerking, etc. Na de voedselindustrie is de metaal- en elektronica-industrie de sector met de meeste emissies. Deze sector omvat de vervaardiging van metaalproducten en elektronische apparatuur. Ongeveer een zesde van de emissies komt voor rekening van industriële sectoren waarvan de precieze indeling onbekend is (overig). De resterende emissies zijn verspreid over diverse andere sectoren, waarbij de chemie- en kunststofindustrie de grootste zijn. Een deel van deze sectoren, zoals de chemie, valt ook onder ETS1, dus de emissies in ETS2 betreffen voornamelijk de kleinere installaties binnen deze sectoren.



Figuur 17. De verdeling van de emissies binnen ETS2 industrie per industriële sector voor de emissies in 2023. Analyse Kalavasta, bron NEa en Emissieregistratie.

Het grootste deel van de emissies in de ETS2-industrie wordt veroorzaakt door de verbranding van aardgas voor warmteopwekking, met name door gasketels. Om de emissies tegen 2040 te verminderen, zal de warmtevraag moeten worden ingevuld met alternatieve technologieën. De industriële warmtevraag wordt vaak onderverdeeld in drie temperaturniveaus: laag (tot ~200°C), middel (tot ~500°C) en hoog (daarboven). We bespreken eerst de warmtevraag van de sectoren in ETS2 en vervolgens hoe deze emissievrij kan worden opgewekt.

De warmtevraag in de voedselindustrie valt voornamelijk in de lage temperatuur categorie. Processen zoals indampen, koken, drogen en pasteuriseren vinden plaats onder de 200°C. Bij de verwerking van olie en vetten zijn soms midden temperaturen

nodig. In de metaalektro-industrie is en deel van de warmtevraag hoger, bijvoorbeeld bij het smeden of gieten van metalen. Voor elektronicaproductie is de warmtevraag over het algemeen laag. In de chemiesector heft een deel van de processen een hoge temperatuurvraag. Bij kunststofproducten is een midden temperatuur nodig en bij de vervaardiging van textiel is een lage temperatuurvraag nodig. De warmtevraag in de bouwmaterialenindustrie is divers, van laag voor asfalt tot hoog voor keramiek. Tot slot is in de basismetalen industrie een hoge temperatuur nodig. Als we de gevraagde temperatuur vergelijken met de emissies per sector, zien we dat het overgrote deel van de emissies in de ETS2 industrie tot stand komt bij het genereren van lage en midden temperatuur warmte. We schatten in dat het grootste deel van de emissies in de ETS2-industrie vrijkomen bij het opwekken van lage en middelhoge temperatuurwarmte, zo'n 2,5 Mton van de totale 3 Mton.

Tabel 15. Voornaamste temperatuurniveau warmtevraag in ETS2 sectoren

Sector	Temperatuurniveau
Voedsel	Laag
Metaalektro	Deels hoog, deels laag
Overig	Onbekend
Chemie	Deels hoog, deels laag
Kunststofproducten	Midden
Textiel	Laag
Bouwmaterialen	Deels hoog, deels laag
Basismetaal	Hoog

Voor het opwekken van lage en midden temperatuurwarmte zijn elektrische alternatieven beschikbaar. Over het algemeen geldt dat lage temperatuur warmte makkelijker en efficiënter elektrisch kan worden gegenereerd dan hoge temperatuur warmte. Industriële warmtepompen die warmte tot zo'n 200°C kunnen opwekken zijn commercieel beschikbaar. Warmtepompen kunnen met behulp van elektriciteit restwarmte opwaarderen tot een hogere temperatuur. Zij maken hierdoor zeer efficiënt gebruik van de elektriciteit. De verwachting is dat deze technologie de komende jaren door ontwikkelt, waardoor nog hogere eindtemperaturen bereikt worden of warmtepompen een grotere overbrugging qua temperatuur kunnen maken. Daarmee is deze technologie uitermate geschikt om de lage en in de toekomst wellicht middentemperatuur warmtevraag in te vullen. Elektrische boilers zijn minder efficiënt dan warmtepompen, maar kunnen hogere temperaturen bereiken en zijn geschikt tot in ieder geval het invullen van de middentemperatuur warmtevraag.

Dit betekent dat het grootste deel van de warmtevraag in de ETS2 industrie met behulp van bestaande, elektrisch-gedreven technologie kan worden gegenereerd. Ook op hogere temperatuurniveaus kan elektriciteit ingezet worden. In dat geval kan stoom niet als warmtemedium gebruikt worden, maar is directe verhitting nodig. Anders dan warmtepompen en elektrische boilers vraagt dit om specifiekere installaties die niet altijd op de markt beschikbaar zijn, maar waar momenteel wel ontwikkeling plaatsvindt. De verwachting is dat de komende 15 jaar steeds meer elektrisch gedreven hoge temperatuur technologie op de markt beschikbaar komt.

Voor lage en middentemperatuur zijn elektrische alternatieven over het algemeen beschikbaar en voor hoge temperatuur zijn deze soms beschikbaar en soms in ontwikkeling. Dit betekent dat emissiereductie in de ETS2 industrie voor een heel groot deel gerealiseerd kan worden door elektrificatie. De belangrijkste voorwaarde voor elektrificatie - en dus verduurzaming - is de tijdige beschikbaarheid van elektriciteitsinfrastructuur, waar we dieper op ingaan in lens 1. Beleid, lens 6. Infrastructureel en het overkoepelende hoofdstuk 5.3.

Wanneer bovenstaande elektrificatie technologieën geen mogelijkheid zijn, bijvoorbeeld omdat zeer hoge temperaturen nodig zijn, zijn andere technologische aanpassingen denkbaar om emissies te reduceren. Er kan gekozen worden voor een emissievrije brandstof, zoals waterstof, groengas of biomassa. Een brandstofwissel naar groengas kan over het algemeen met beperkte aanpassingen aan de installaties. Om over te stappen op waterstof moet een deel van de installaties wel vervangen worden. Bedrijven zullen hierin alleen investeren als de emissievrije brandstoffen en bijbehorende infrastructuur beschikbaar zijn.

Daarnaast is CO₂ afvang een mogelijkheid om emissies te reduceren. De efficiëntie, en dus de kosten, van deze technologie hangt mede af van de zuiverheid CO₂ in de af te vangen gassen. Bij aardgasverbranding komt geen pure CO₂ vrij, en bij de kleinere ETS2-installaties weegt de investering in afvanginstallaties en infrastructuur vaak niet op tegen de gerealiseerde emissiereductie. CO₂ afvang zal in de ETS2 industrie daarom op de meeste plekken geen logische keuze zijn om emissies te reduceren. De technologie zou in sommige specifieke situaties toch uitkomst kunnen bieden, als er bijvoorbeeld geen waterstof ingezet kan worden vanwege interacties met het product, maar er wel zeer hoge temperaturen bereikt moeten worden.

Samenvattend zijn de beperkende factoren om de ETS2 industrie te verduurzamen met name de beschikbaarheid van infrastructuur en in mindere mate emissievrije energiebronnen, en niet de technologie zelf. Er zijn over het algemeen voldoende technologische mogelijkheden om emissies te reduceren in de ETS2 industrie of de verwachting is dat deze de komende 15 jaar op de markt zullen komen. Alleen in sommige gevallen bij een hoge temperatuur warmtevraag zou de technologie voor 2040 een beperkende factor kunnen zijn.

Beoordeling: **groen**

6. Infrastructureel

Om de netto-nul-emissies in de ETS2-industrie in 2040 te bereiken, is de tijdige beschikbaarheid van infrastructuur voor elektriciteit, en in mindere mate waterstof of CO₂, cruciaal. Het feit dat industrie over het algemeen vrij geconcentreerd is op bedrijventerreinen, kan in dit geval gunstig zijn, aangezien de industrie dan relatief vroeg kan worden aangesloten. Zeker is dit echter allerminst. We behandelen de infrastructuur overkoepelend in hoofdstuk 5.3 en doen een aantal voorstellen om elektrificatie in de industrie te versnellen in lens 1. Beleid, gegeven de beperkingen van het elektriciteitsnet. De opgave hier is enorm. Ook met de voorgestelde oplossingen is het niet gegarandeerd

dat de elektriciteitsinfrastructuur vóór 2040 toereikend zal zijn om de volledige ETS2-industrie emissievrij te maken.

Zonder de beschikbare infrastructuur heeft een deel van de ETS2 industrie onvoldoende handelingsperspectief om tijdig te verduurzamen.

Beoordeling: **oranje**

7. Ruimtelijk

De technische aanpassingen aan de ETS2 industrie, zoals installatie van warmtepompen of elektrische boilers, zullen voor het overgrote deel in te passen zijn binnen de bestaande gebouwen of terreinen. We concluderen dat ruimte geen beperking vormt voor het versnellen van de emissiereductie in de ETS2 industrie.

Beoordeling: **groen**

4.4.3. Conclusie en discussie

1. Hoe komen we uit op de emissieraming voor 2040?

We schatten de restemissies van de ETS2-industrie in 2040 op 0 tot 0,7 Mton, met een verwachtingswaarde van 0,3 Mton. De ondergrens van deze bandbreedte is de situatie waarin de gehele ETS2-industrie erin slaagt om in 2040 emissievrij te opereren en komt overeen met het Klimaatzaak 2040 scenario. De verwachtingswaarde van 0,3 Mton is gebaseerd op de verwachting dat de lage en middelhoge temperatuurvraag vrijwel volledig kan worden verduurzaamd, terwijl de hoge temperatuurindustrie grotendeels emissievrij wordt, maar een deel van de bedrijven nog niet de mogelijkheid heeft om te elektrificeren of op een andere manier te verduurzamen. Er is daarom nog een klein deel bedrijven dat aardgas gebruikt in 2040, wat in de daaropvolgende jaren ook wordt afgebouwd. De bovengrens van 0,7 Mton is gebaseerd op de huidige emissies van 3 Mton en de verplichting dat de ETS2-emissies uiterlijk in 2045 nul moeten zijn. Bij een lineair afbouwpad zouden de emissies in 2040 dan ongeveer 0,7 Mton bedragen. We gaan er in dat geval van uit dat Nederland niet achterblijft ten opzichte van de gemiddelde Europese ETS2-reductie.

De mogelijke restemissies in de industrie in 2040 zijn tijdelijk van aard en verdwijnen als de laatste bedrijven ook de mogelijkheid hebben om te verduurzamen. In het eindbeeld zijn er geen scope 1 emissies in de industrie. Dit eindbeeld kan mogelijk in 2040 worden bereikt, en zeker voor 2045.

2. Waarom is versnelling haalbaar en wat zijn de voornaamste beperkingen?

Het versneld afbouwen van emissies in de ETS2-industrie is volgens ons haalbaar, omdat de benodigde technologie voor emissiereductie beschikbaar is. De voornaamste beperking is de beschikbaarheid van infrastructuur. Zonder verzwaring van de elektriciteitsaansluitingen hebben de meeste ETS2-bedrijven onvoldoende handelingsperspectief. Een andere belangrijke beperking is dat sommige bedrijven bestaande activa versneld moeten afschrijven, wat kapitaalverlies betekent, of dat bedrijven het kapitaal niet hebben om te investeren.

Tabel 16. Haalbaarheidsinschatting per lens voor de sector ETS2 industrie

Lens	Beoordeling haalbaarheid
Beleid	Groen
Economisch	Oranje
Sociaal maatschappelijk en cultureel	Groen
Milieukundig	Groen
Infrastructureel	Oranje
Technologisch	Groen
Ruimtelijk	Groen

Wat in deze analyse niet is meegenomen, maar wel tot aanzienlijke versnelling zou kunnen leiden, is een drastische gedragsverandering bij de Nederlandse consument. Als Nederlanders minder spullen zouden kopen, meer zouden laten repareren en minder voorbewerkt voedsel zouden willen consumeren, zou de ETS2-industrie krimpen en daarmee ook de emissies. Hetzelfde geldt voor de ETS1-industrie, al gaat het hier deels om andere producten en gedragsveranderingen. Dit vraagt om een aanpassing van de manier waarop de meeste Nederlanders nu leven en consumeren. Omdat recente geschiedenis niet laat zien dat dit een waarschijnlijk toekomstbeeld is, gaan we hier in deze analyse niet van uit. Wel is het belangrijk om te beseffen dat het consumptiegedrag van iedereen bijdraagt aan de energievraag en uitstoot van de industrie.

In de beleidslens hebben we verschillende maatregelen opgenomen welke emissiereductie in de ETS2 industrie zouden versnellen.

Tabel 17. Voorgestelde beleidsmaatregelen voor de sector ETS2 industrie

Categorie	Maatregel
Normeren	Emissieplafond met verhandelbare emissierechten voor de ETS2 industrie in Nederland
Beprijzen	Emissieheffing voor de ETS2 industrie (alternatief voor emissieplafond)
Stimuleren	Compensatie voor meerkosten elektrificatie bij non-firm ATO
Stimuleren	Stimuleren van energie-efficiënte maatregelen bij subsidieaanvraag
Stimuleren	Vergroten SDE++ subsidiebudgetten, zodat alle projecten die voldoen aan de voorwaarden worden toegekend
Stimuleren	SDE++ subsidietoekenning vervroegen naar eerder stadium, zodat vertraging wordt voorkomen.

3. Wat is de omvang van de restemissies?

Voor de ETS2-industrie ramen we de restemissies in 2040 op 0,3 Mton, met een bandbreedte van 0 tot 0,7 Mton.

4.4.4. Geraadpleegde bronnen

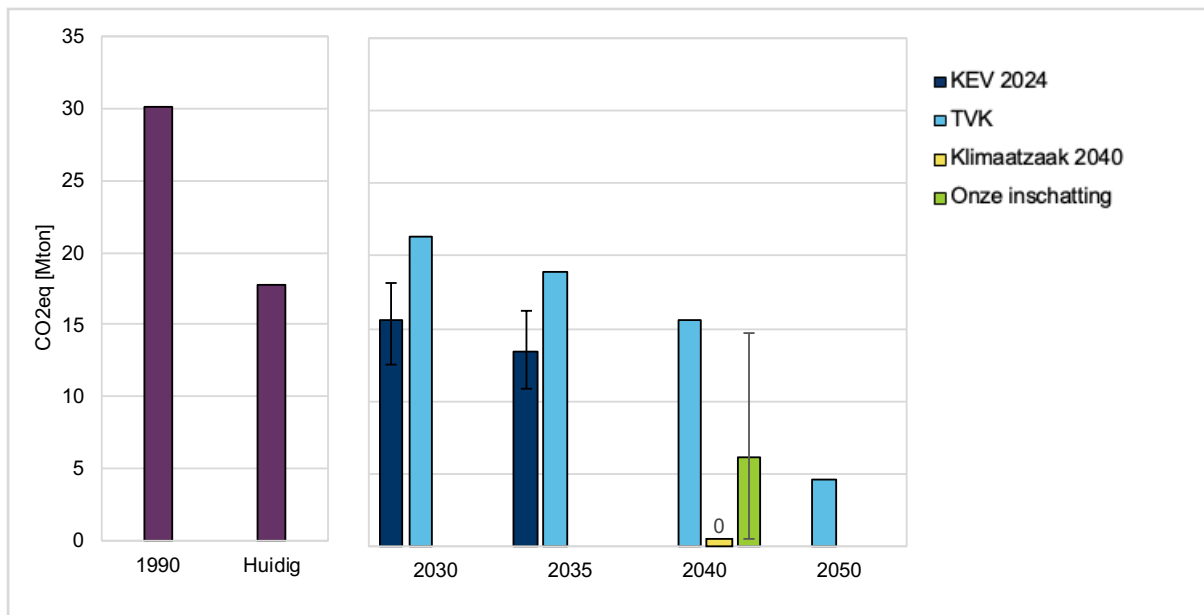
- Centraal Bureau voor de Statistiek. Klimaatverandering en energietransitie: opvattingen en gedrag van Nederlanders in 2023. (2023)
- CE Delft, Nationaal emissieplafond voor ESR-sectoren (2024)
- CE Delft, Doorlooptijden investeringen elektrificatie (2021)

- Kalavasta, Een essay over de financiering van de Energietransitie tussen 2020 en 2050 (2021)
- Netbeheer Nederland, Integrale Infrastructuurverkenning 3050 – II3050 (2023)
- PBL, Klimaat- en Energieverkenning 2024 (2024)
- Analyse tarief CO₂-heffing industrie – tariefstudie 2024
- PBL, Transitieverkenning klimaatneutraal 2050 (2024)
- TNO & PBL, MIDDEN publicaties en database (2019 – 2023)
- Tweede Kamer, vergaderjaar 2022–2023, 36 407, nr. 3

4.5. Analyse sector: Gebouwde omgeving

4.5.1. Inleiding

De uitstoot van de gebouwde omgeving is met name afhankelijk van het aantal en type (leeftijd, etc) woningen en gebouwen, hun isolatiegraad en de warmtebron. Waar in 1990 de gebouwde omgeving nagenoeg volledig verwarmd werd door aardgas (direct via de CV ketel of indirect door warmtenetten verward met een centrale ketel), nam dit vandaag de dag af door duurzamere warmtebronnen zoals een hybride warmtepomp. De sector kent koop, huur, private gebouwen en publieke gebouwen die veelal andere vormen, maten, leeftijden en type installaties kennen. De verduurzaming van deze sector vraagt naast veel geld ook veel arbeidskrachten en nieuwe manieren van beprijzen van verbruik (elektrisch en gas). Ook valt deze sector onder het Europese ETS2 mechanisme. Door Europese en (de implementatie in) nationale regelgeving wordt additionele CO₂ reductie de komende jaren gerealiseerd (zie Figuur 18). We verwachten dat additioneel beleid vanuit de overheid de CO₂-reductie verder kan terugbrengen dan nu wordt geprognostiseerd, maar dat het terugbrengen van de emissies naar nul in 2040 niet realistisch is, mede vanwege een tekort aan arbeid. In onderstaande paragraaf lichten we de prognoses van de KEV, II3050 en de trajectverkenning 2050 van PBL verder toe. Daarna lichten we toe hoeveel CO₂-reductie nog extra mogelijk is in 2040 met additioneel beleid, economische incentives en meer draagvlak voor de verbouwing van Nederland (m.n. onder eigenaren van een woning of gebouw met beperkte financiële middelen).



Figuur 18. Ontwikkeling emissies sector gebouwde omgeving tussen 1990 en 2050 op basis van verschillende bronnen

1. Ontwikkeling emissies 1990-2030

De uitstoot van de gebouwde omgeving bedroeg 30,1 Mton CO₂eq in 1990, respectievelijk 21,0 Mton afkomstig vanuit woningen en 9,1 Mton vanuit gebouwen/utiliteiten (temperatuurgecorrigeerd was dit 30,7 Mton). De broeikasgasemissies in de gebouwde omgeving in Nederland zijn tussen 1990 en 2022 gestaag afgenomen, maar de reductie verliep langzamer dan in andere sectoren, voornamelijk door het intensieve gebruik van aardgas voor verwarming van woningen en gebouwen. Het verbruik van aardgas in de

gebouwde omgeving (en in andere sectoren) is sinds de jaren zestig flink toegenomen vanwege de winning in Groningen (goedkoop aardgas), bevolkingsgroei, slechte isolatie en een goed vertakt gasnetwerk c.q. hoge bebouwingsdichtheid.

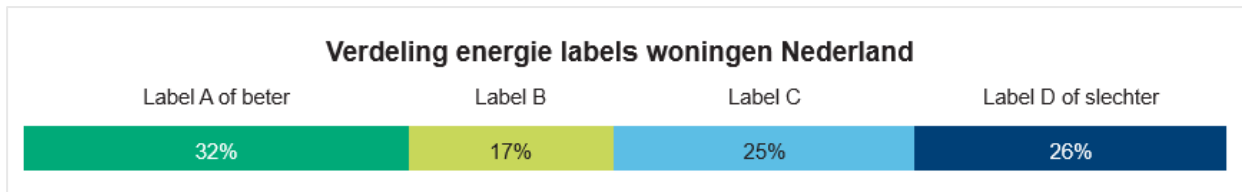
Sinds 1990 is de aandacht voor energiebesparing en verduurzaming van gebouwen langzaam toegenomen, mede door Europese en nationale regelgeving, zoals de Energieprestatie van Gebouwen-richtlijn, de gestage introductie en adoptie van energielabels, afname winning in Nederland vanwege aardbevingen in Groningen en gestegen belasting op aardgas. In de jaren 2000 en 2010 zijn stappen gezet met het verbeteren van de isolatie ter vergroting van het wooncomfort en het efficiënter maken van verwarmingssystemen. Het gebruik van aardgas was echter ook nog in deze periode de dominante vorm van verwarmen van woningen en gebouwen.

Na het Parijsakkoord van 2015, het nationale Klimaatakkoord van 2019, en met name door toedoen van de hoge gasprijs als gevolg van de oorlog in Oekraïne, versnelde de uitstootvermindering. Dit werd mogelijk door de opkomst van (hybride) warmtepompen in combinatie met zon-op-dak, de verduurzaming van nieuwbouwwoningen en energiebesparingsmaatregelen zoals isolatie en het verlagen van de thermostaat. Deze ontwikkelingen zijn mede tot stand gekomen door kostenbesparing en een groeiende bewustwording van de effecten van klimaatverandering.

Gemeenten werken aan plannen voor het uitfaseren van aardgas (de zgn. Transitievisies Warmte en Warmtevisie). Beleidsvoornemens voortkomend uit de nationale Klimaatakkoord-afspraken in 2019, gericht op het verduurzamen van bestaande woningen en het aardgasvrij maken van wijken, begonnen langzamerhand ook impact te krijgen. Al blijkt uit de evaluatie van de pilots 'aardgasvrije wijken' dat de gewenste standaardisatie, bijvoorbeeld bij het isoleren van veelvoorkomende wijken, lastiger is dan eerst gehoopt. Ook stopt de ontwikkeling van duurzame warmteprojecten op het moment van schrijven, dit komt met name door de onzekerheid omtrent eigenaarschap van warmtenetten (publiek of privaat) en door een verschil in verdeling van private en maatschappelijke kosten van all-electric versus warmtenetten.

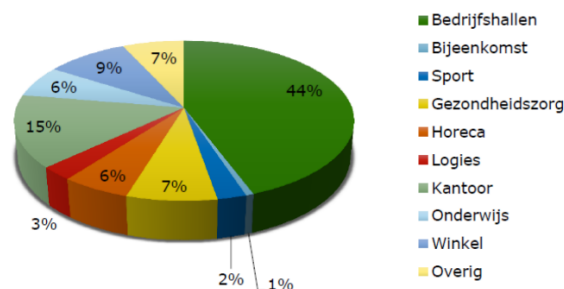
De recente oorlog in Oekraïne, de sancties gericht tegen Rusland en de stijging van de gasprijs tot een factor tien van het 'normaal', had na 2020 ook een groot effect op het verbruik, al nam het aantal mensen in energiearmoede als gevolg van hoge prijzen ook aanzienlijk toe. Vanwege al deze ontwikkelingen zijn de emissies in de gebouwde omgeving tussen 1990 en 2023 met iets meer dan een kwart afgenomen, van 30,1 naar 22,0 Mt CO₂-eq.

Nederland kent op dit moment ongeveer 8 miljoen woningen waarvan ongeveer 90% is aangesloten op het aardgasnet. Van 4,8 miljoen woningen is het energielabel bekend, zie de verdeling in onderstaande Figuur 19.



Figuur 19. Verdeling energielabels woningen Nederland

Naast woningen zijn er in Nederland ongeveer 480.000 utiliteits- en kantoorgebouwen. Deze lopen uiteen van grote bedrijfshallen tot kleinere winkels of kantoren (zie Figuur 20), dus verschillen logischerwijs veel in energievraag en verduurzamingsopgave. In 2017 had 42% van deze gebouwen een energielabel D of lager.



Figuur 20. Verdeling van utiliteitsgebouwen in Nederland op basis van oppervlakte. Bron: Sectortafel gebouwde omgeving (2018)

De uitstoot neemt in 2030 volgens de PBL KEV 2024 af tot 15,6 Mton (bandbreedte 12,6 – 18,2). De uitstoot neemt volgens de laatste prognoses dus over een periode van 6 jaar met 0,5 Mton per jaar af, de bandbreedte is aanzienlijk en wordt sterk beïnvloed door de onzekerheid omtrent ontwikkeling van de gasprijs, betere isolatie van woningen, de publiekscampagne ‘de knop om’ (thermostaat een graadje lager) en ook doordat woningen van het gas af gaan, al blijkt dat dit moeizamer gaat dan eerst gedacht en de kwantitatieve resultaten vallen tegen⁵³.

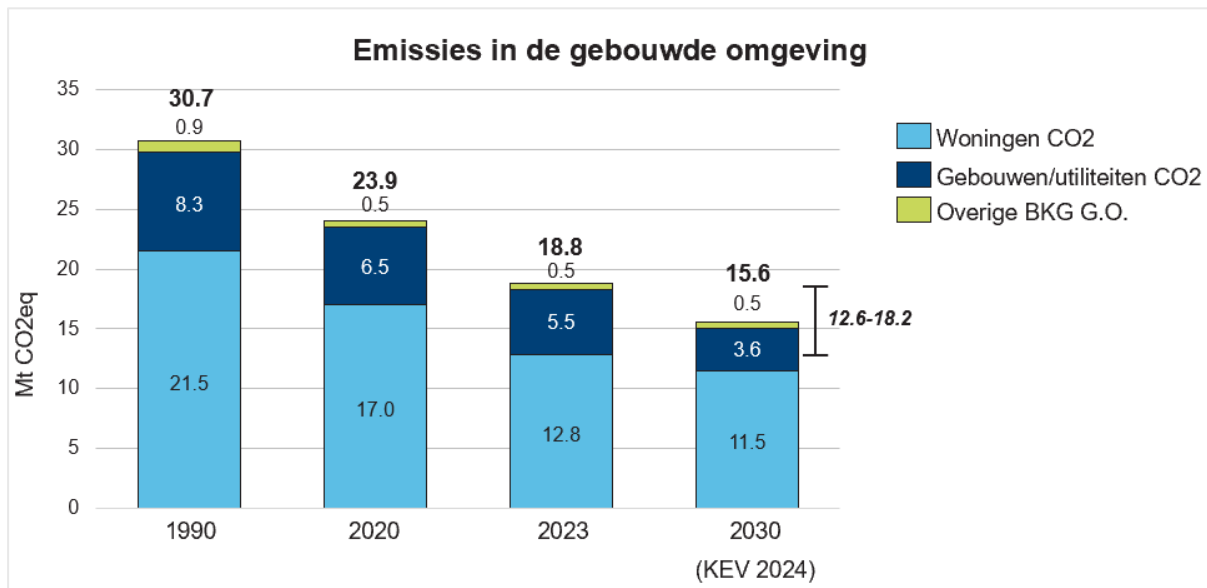
De grote reductie in de periode 2020 en 2023 is waarschijnlijk niet nog een keer te realiseren, de groothandelsprijs was tot een factor 10 hoger tijdens de gascrisis als gevolg van de sancties tegen Rusland (in de maand augustus) en veel relatief eenvoudige isolatiemaatregelen die goed renderen (isolatiestrips etc.) zijn deels al genomen. De reductie leert dat de vraag naar aardgas sterk beïnvloed wordt door de prijs, al heeft een prijs van een factor 10 ook invloed op de betaalbaarheid (sterk afhankelijk van type en looptijd van het afgesloten energiecontract) en niet iedereen heeft op dit moment de mogelijkheid om de woning duurzaam(er) te verwarmen.

De gemiddelde uitstoot van een woning per jaar bedraagt 2,230 kg CO₂. Dit betekent dat voor de reductie van 3,2 Mton tussen 2023 en 2030 er per jaar het equivalent van 225.000 woningen verduurzaamd (moeten gaan) worden, oftewel 1,3 miljoen woningen in een periode van 6 jaar (de reductie kan ook komen vanuit hybride systemen en isolatie). De huidige snelheid van verduurzamen van bestaande woningen is zo’n 50.000 per jaar.⁵⁴

⁵³ https://www.rli.nl/sites/default/files/casusrapport_programma_aardgasvrije_wijken_0.pdf

⁵⁴ <https://dashboardklimaatbeleid.nl/mosaic/mosaic/gebouwde-omgeving>

Inclusief nieuwbouw is het aantal aardgasvrije woningen tussen 2017 en 2023 verdubbeld van 5 tot 10% procent van het totaal.



Figuur 21. De ontwikkeling van emissies in de gebouwde omgeving

2. Transitie sector 2030-2050 (Klimaatzaak 2040 scenario)

Momenteel is ongeveer 90% van de 8 miljoen woningen aangesloten op het aardgasnet. Deze woningen moeten vanuit Europese ETS2 wetgeving voor 2045 jaar vrijwel volledig op een duurzame manier verwarmd worden. Dit scenario gaat er vanuit dat er na 2045 geen ETS2 rechten meer geveild worden en dat eventuele restemissies door aanschaf van negatieve emissies moet worden gecompenseerd.

In het Klimaatzaak 2040 scenario wordt de energievraag als volgt ingevuld: 25% elektrische warmtepompen (eWP), 30% warmtenetten (grotendeels gevoed door geothermie en groen gas/biomassa), 5% via HR-ketels gevoed met groen gas, 1% pelletkachels op basis van biofuels, 4% elektrische boilers en 35% met hybride warmtepompen (HWP) op basis van groen gas. Driekwart van de oplossing op basis van hybride warmtepompen is een tijdelijke oplossing. Richting 2050 gaan de wijken met hybride systemen over op all-electric. Reden voor deze tijdelijke oplossing is het maakbaarheidsgat (zie ook 4.2) waardoor niet alle wijken tijdig direct naar een eWP over kunnen gaan.

In het Klimaatzaak 2040 scenario speelt elektrificatie van de gebouwde omgeving een cruciale rol. De energievraag van woningen daalt aanzienlijk door het landelijk isolatieprogramma. Het aantal woningen dat wordt voorzien van duurzame warmte stijgt sterk in de periode na 2030 tot 25% in 2040 (gevoed voor 70% door geothermie, 15% groen gas, 10% biomassa en 5% door restwarmte AVI's). Ook wordt de renovatie van bestaande woningen fors opgeschaald om de energie-efficiëntie te verbeteren, met een sterke focus op het terugdringen van energieverbruik. Apparaten en verlichting worden ook zuiniger.

De netbedrijven voorzien dat de toenemende vraag naar elektriciteit, door de massale overstap naar elektrische verwarming, om aanzienlijke versterkingen van de

elektriciteitsinfrastructuur vraagt. Dit vergt menskracht, investeringen en tijd om de nodige verzwaringen uit te voeren. Slimme netten, vraagsturing en lokale opslagtechnologieën worden essentieel om de variabele elektriciteitsvraag te balanceren.

Tegen 2040 is de gebouwde omgeving volgens dit scenario grotendeels emissievrij, ondersteund door een mix van decentrale energieopwekking (zoals zonnepanelen), efficiënte elektrische oplossingen en duurzame warmtevoorzieningen. De transitie vereist echter forse investeringen en een sterke nationale regie om tijdige uitvoering van renovaties en infrastructuuraanpassingen te waarborgen. Er is grote onzekerheid t.a.v de beschikbaarheid van voldoende groen gas. Het alternatief voor groen gas is aardgas, als bron voor HWP en HR-ketels.

3. Transitiepad volgens PBL TVKN

Ook het PBL-rapport TVKN schetst hoe de gebouwde omgeving in Nederland tussen 2030 en 2050 stappen zet richting klimaatneutraliteit. Voor de transitie is met name van belang hoe het ETS2-systeem wordt ingevoerd en gehandhaafd, evenals de rol van aanvullend normerend en stimulerend beleid. Volgens het PBL wordt de warmtevraag grotendeels ingevuld door warmtepompen, warmtenetten en in sommige gevallen groen gas of waterstof. De verdeling tussen deze bronnen hangt af van het gekozen scenario. Realisatie van de verwachte reductie hangt voor een groot deel af van de mate waarin renovatie van bestaande woningen en gebouwen plaatsvindt, dit is noodzakelijk om de energie-efficiëntie aanzienlijk te verhogen. Dit omvat maatregelen zoals isolatie, het vervangen van traditionele verwarmingssystemen en het verduurzamen en het slimmer maken van huishoudelijke apparaten.

Het PBL neemt ook aan dat de transitie gepaard gaat met een forse toename in de elektrificatie van de gebouwde omgeving, wat leidt tot een stijgende elektriciteitsvraag. Dit vereist versterking van de elektriciteitsnetten en slimme energieoplossingen om piekbelastingen te voorkomen. Ook is er een belangrijke rol weggelegd voor lokale energieopwekking, zoals zon-op-dak, om de afhankelijkheid van het centrale energienet te verminderen. Het PBL geeft aan dat klimaatneutraliteit van de gebouwde omgeving in 2050 alleen haalbaar is met gerichte beleidsinterventies, tijdige investeringen en een goede coördinatie tussen nationale en lokale overheden, bedrijven en burgers.

Het PBL schat in dat het ETS2 alleen onvoldoende is (vanwege beperkte handhaving c.q. door het veilen van extra emissies c.q. een cap op de prijs van de rechten te plaatsen door de politiek door zorgen over betaalbaarheid), en dat er restemissies in 2050 in de orde van 0,7 tot 11,7 Mton CO₂ zijn (zie p. 121). De bandbreedte is afhankelijk (volgens het PBL) van de hoeveelheid CCS in het scenario. De restemissies dienen door negatieve emissies (en emissiehandel) elders gecompenseerd te worden.

Het PBL baseert zijn ramingen doorgaans op bestaand en voorgenomen beleid en hanteert daarbij vaak een voorzichtige benadering met betrekking tot toekomstige ontwikkelingen bijvoorbeeld omtrent gedragsverandering. De inschatting qua restemissies in 2040 is 15,6 Mton, dit is gelijk aan de PBL KEV 2024 inschatting voor 2030. Dit soort inconsistentie tussen twee recente prognoses van het PBL voor de restemissies

in de gebouwde omgeving zijn lastig met elkaar te rijmen. Een aanzienlijke versnelling van de transitie ten opzichte van TVKN2050 voor 2040 lijkt volgens de KEV dus goed mogelijk.

4.5.2. Beoordeling haalbaarheid

Algemeen – ETS2: Voor de gehele gebouwde omgeving, mobiliteit en industrie die nog niet onder ETS1 valt, geldt dat vanaf 2027 of 2028 het ETS2 van toepassing is. Het ETS2 zorgt voor een redelijk lineaire en voorspelbare toename van de prijs van fossiele brandstoffen in deze sectoren, het is de verwachting dat het ETS2 een deel van de belasting op energie (EB) vervangt. Dit betekent dat een toename van de ETS2 prijs voor differentiatie tussen de belasting op elektriciteit en gas gaat zorgen. Wij hebben aangenomen dat het laatste jaar van de ETS2 veiling in 2044 is. Dit is conform de ETS2 wettekst en dit is stringenter dan waar het PBL in haar TVKN studie vanuit lijkt te gaan⁵⁵. Verder stelt het PBL dat additioneel normerend en stimulerend beleid nodig is om emissiereductie te realiseren, met name in de gebouwde omgeving. Er zijn diverse aspecten waar aanvullend aan het ETS2 actie nodig is om versnelling te realiseren. Deze conclusies onderschrijven wij.

Om de afbouw van rechten te versnellen kan Nederland bedrijven die ETS2 rechten kopen verbieden om dit te doen; dat betekent dat de uitstoot eerder omlaag zal moeten. Hoeveel inkomsten ze hier precies mee mislopen is afhankelijk van veel factoren en onzeker, een indicatieve berekening toont aan dat het om meerdere miljarden gaat. Algemeen verwachten we dat de overheid verschillend om zal gaan met het ETS2 in verschillende sectoren, omdat een hoge prijs voor CO₂ (via aardgas) in de gebouwde omgeving politiek of maatschappelijk minder acceptabel is dan in bijvoorbeeld de industrie. Wij verwachten dus dat de overheid ervoor kiest om deze inkomsten deels te innen, voor de emissies in de sectoren die niet netto nul uitstoot in 2040 kunnen realiseren, en te gebruiken om de verdere verduurzaming mee te financieren in het kader van betaalbaarheid. Om zo sneller verduurzaming te realiseren door enerzijds beprijzing vanuit het ETS2 en anderzijds door subsidies te verstrekken. Ook verwachten we niet dat – in contrast met bijv. de industrie – er een additionele heffing op de gebouwde omgeving wordt geplaatst. We lichten de emissiereductiemogelijkheden in de gebouwde omgeving in dit hoofdstuk verder toe.

Algemeen – de verbouwing vraagt om menskracht:

De verbouwing van de Nederlandse woning- en gebouwenvoorraad is een forse opgave. Het gaat namelijk om zo'n 7 miljoen woningen en veel gebouwen (qua uitstoot een equivalent van 3,5 miljoen woningen). De woningen verschillen in leeftijd, locatie waar de meterkast en CV-ketel staat en staan lang niet allemaal dicht genoeg op elkaar om een collectieve optie rendabel te laten zijn. De gebouwen zijn veelal uniek en voor een deel van de gebouwen zal gelden dat nagenoeg de volledige kosten van verduurzaming vanuit externe financiering bekostigd moet worden. Voor deze opgave zijn veel mensen nodig met een veelal praktische opleiding. In hoofdstuk 5.4 wordt nader ingegaan op de

⁵⁵ Het PBL gaat er vanuit dat de restemissies nog tussen de 7 en 16 Mton zijn in 2045 en tussen de 0,7 en 11, 6 Mton in 2050 in de gebouwde omgeving. Ook bij mobiliteit zijn nog restemissies. Dit kan in TVKN vanwege de forse omvang van negatieve emissies als gevolg van forse hoeveelheden CCS.

omvang van de opgave. Een fors deel van de daar berekende additionele menskracht is nodig om de gebouwde omgeving (en de benodigde infra) te verduurzamen.

Algemeen – bijmengverplichting groen gas: Voor alle gebouw- en woningtypen zal de bijmengverplichting van groen gas, die in 2030 een volume van 0,5 miljard kubieke meter (BCM) moet bereiken, bijdragen aan de verlaging van de uitstoot in de gebouwde omgeving⁵⁶. Verwacht is dat 72% van dit groene gas in de gebouwde omgeving wordt ingezet, waardoor de emissies naar verwachting met ongeveer 1 megaton (Mt) dalen in 2030. Een tweede effect van de bijmengverplichting is een stijging van de gasprijs met 12 tot 17 cent per kubieke meter, wat de businesscase voor verduurzaming verbetert. Na 2030 is er nog geen beleid voor verdere opschaling van de productie van groen gas en daadwerkelijke realisatie van nieuwe projecten lijkt erg lastig (PBL KEV 2024).

Algemeen - warmtenetten versus warmtepompen: Er zijn twee voorname opties om de gebouwde omgeving te verduurzamen: een warmtenet op basis van een duurzame warmtebron (collectief) en een elektrische of hybride warmtepomp (individueel⁵⁷). In veel gemeenten wordt onderzocht of de collectieve of juist de individuele optie het meest kansrijk is, waarbij kansrijk een som is van betaalbaarheid, technisch mogelijk en draagvlak. De keuzes die gemaakt worden door gemeenten hebben veel invloed op het tempo en de wijze waarop de verduurzaming plaatsvindt. Deze keuzes worden met name beïnvloedt door landelijk beleid, de beschikbaarheid van lokale warmtebronnen, de dichtheid van woningen c.q. de totale warmtevraag en de leeftijd van gebouwen.

Uit recent onderzoek (Berenschot, 2024) blijkt echter dat de verhouding tussen de maatschappelijke kosten en de kosten voor eindgebruikers momenteel ongelijk is. Bij een warmtenet komt momenteel een groter deel van de rekening bij de eindgebruiker terecht, waar de kosten voor verzwaring van het elektriciteitsnet ten behoeve van elektrificatie over alle netgebruikers wordt afgewenteld. Dit maakt dat gemeenten in hun Transitievisies Warmte niet altijd een optimale keuze maken gezien vanuit maatschappelijk oogpunt, aangezien ze anders hun eigen inwoners met hoge vaste lasten na verduurzaming opzadelen. Indien niet een integrale kostenafweging wordt gemaakt dan zijn de totale maatschappelijke kosten hoger dan noodzakelijk. Mede als reactie op deze conclusie stelt het ACM in een recent position paper het volgende voor: *“Wanneer warmte maatschappelijk gezien het goedkoopste alternatief voor gas is, zouden de warmtetarieven volgens de ACM niet hoger moeten zijn dan het minder maatschappelijk efficiënte tarief (voor all-electric)”*. Om dit probleem deels aan te pakken en de nettarieven rechtvaardiger te maken en tegelijkertijd netcongestie te verminderen, stelt Netbeheer Nederland (2024) een alternatief model voor elektriciteitsnettarieven voor: In plaats van een vast tarief per aansluiting worden de kosten bepaald door zowel de hoeveelheid verbruikte stroom als het tijdstip van afname. Hierdoor dragen grotere gebruikers, zoals eigenaren van warmtepompen, meer bij aan

⁵⁶ In de KEV24-raming wordt verwacht dat de groengasproductie en bijmenging in het aardgasnet zal toenemen van 0,3 miljard kubieke meter in 2023 naar 0,5 miljard kubieke meter in 2030. Daarvan komt ruim 0,3 miljard kubieke meter uit (co)vergisting van mest en bijna 0,2 miljard kubieke meter uit overige vergisting. Dit komt neer op 1 Mton reductie vanwege vervanging van aardgas in het leidingnet.

⁵⁷ In het eindbeeld wordt ook gebruik gemaakt van E-boilers, HR-ketels en pelletkachels, deze individuele oplossing zijn samen goed voor een kleine 10% procent van het totale aanbod aan energie.

de netverzwaring dan kleinere gebruikers, zoals mensen die zijn aangesloten op een warmtenet. Daarnaast is door de Minister aangekondigd dat nagedacht wordt over het introduceren van een vereveningsfonds warmte en om een prijsplafond te introduceren om betaalbaarheid te garanderen en verschillen tussen de kosten voor warmte tussen locaties te beperken. Achter dit alles zit tevens de gedachte dat verwarmen op basis van een CV-ketel en aardgas niet de goedkopere optie is, dit kan door tariefdifferentiatie en de bijmengverplichting van het relatief duurdere groen gas bewerkstelligd worden.⁵⁸

Uiteraard is er nog veel meer mogelijk. Zo pleiten gemeenten en andere partijen voor een verruiming van de WIS, de regelingen voor gebouw gebonden kosten voor collectieve warmte (SAH, SVVE, ISDE) en voor het volledig publiek financieren van hoofdtransportleidingen. Daardoor wordt de hoge CAPEX van warmte gesocialiseerd en domineren de GJ-kosten die doorgaans lager dan bij aardgas zullen zijn. In aanvulling en vooruitlopend op het aanpassen van de nettarieven zou een bijdrage per warmteaansluiting kunnen worden ingesteld, als reflectie van de maatschappelijke meerwaarde rond netcongestie. Ook dient goed gecommuniceerd te worden wat de ontwikkeling van de gasprijs, als gevolg van ETS2, de komende jaren is – dit is aanvullend op de al verwachte toename van de gasprijs richting 2030.

Dit en andere zienswijzen van betrokken partijen moeten terugkomen in de nieuwe warmtewet, de Wet Collectieve Warmte (WcW) en Wet Gemeentelijke Instrumenten Warmtetransitie (WGIW). Deze wet is recent door de Eerste Kamer aangenomen. In deze wet moet onder andere worden vastgelegd hoe de nu private warmtenetten overgaan in publieke handen. De verschillende voorstellen vanuit partijen moeten er allen aan bijdragen dat er weer geïnvesteerd wordt in de warmtemarkt. Dit zodat het aantal woningen per jaar van het aardgas af aanzienlijk toeneemt om zo reductie in broeikasgasemissies te realiseren. Een snelle inwerkingtreding van deze wet is belangrijk om versnelling te realiseren binnen de gebouwde omgeving. Afhankelijk van het tempo van het wetgevingstraject en de concrete uitwerking daarvan wordt een groter of een kleiner deel van de warmtevraag via warmtenetten geregeld of via een warmtepomp.

De verdeling tussen de verschillende individuele opties wordt sterk beïnvloed door het tempo waarop het elektriciteitsnet kan worden verzwaaard. Hoe groter het aandeel verwarmen met een elektrische warmtepomp is, hoe langer het duurt voordat het elektriciteitsnet in Nederland verzwaaard is om dit aan te kunnen. In het scenario is hier voor zover mogelijk rekening mee gehouden door voor 2040 een groter deel van de warmtevraag middels een hybride warmtepomp in te vullen als tijdelijke oplossing. Richting 2050 worden deze hybride varianten voor all-electric vervangen.

1. Beleid

In de vier sub-sectoren (koopwoning, huurwoning, publieke gebouwen en private gebouwen) komen specifieke uitdagingen naar voren, die alleen met gedifferentieerd beleid kunnen worden geadresseerd. Deze sectie bespreekt de volgens ons

⁵⁸ Ter illustratie, volgens VEH: In 2025 daalt het energiebelastingtarief over het stroomverbruik met 7%. Voor een gemiddelde huiseigenaar betekent dit een verlaging van € 21,35. Het energiebelastingtarief over het gasverbruik daalt met bijna 1% in 2025. Voor een gemiddelde huiseigenaar betekent dit een energiebelastingverlaging van 6,63 per jaar.

voornaamste uitdagingen. Tevens beschrijven we welke wet- of regelgeving aangepast of ingevoerd zou moeten worden om de versnelling van emissiereductie richting 2040 te realiseren.

Koopwoningen: Momenteel zijn huiseigenaren niet verplicht om hun woning te verduurzamen. De keuze om te isoleren of over te stappen op een duurzame warmtebron ligt daarmee bij de huiseigenaar zelf. Recentelijk heeft ook de Eerste Kamer de Wet gemeentelijke instrumenten warmtetransitie (WGIW) aangenomen, waarmee gemeenten de mogelijkheid krijgen om woningen van het gasnet af te sluiten. Dit voorkomt dat het gasnetwerk in een wijk in stand moet worden gehouden voor een beperkt aantal bewoners, terwijl het op termijn ook een signaal afgeeft aan huiseigenaren. Nadat gemeenten dit aankondigen, geldt er een overgangperiode van acht jaar voordat de afsluiting daadwerkelijk plaatsvindt. Dit betekent dat indien gemeenten voor 2033 een wijk aardgasloos aanwijzen dat in 2040 het aardgasnet in die wijk buiten werking kan worden gesteld. Voor bewoners betekent dit dat zij minimaal acht jaar hebben om eventuele aanpassingen aan de woning ten behoeve van de nieuwe warmtebron door te voeren. In veel van de huidige Transitievisies Warmte (TVWs) is nog geen definitieve keuze gemaakt voor een warmteoplossing op wijkniveau, dit komt mede door onduidelijkheid over wanneer het elektriciteitsnet voldoende verzaamd is en/of in hoeverre lokaal voldoende (rest)warmte beschikbaar is om een warmtenet te voeden. De verwachting is dat in het Warmteprogramma dat in 2026 opgeleverd moet worden er per gemeente meer duidelijkheid ontstaat. Zie ook het Natuur en Milieu rapport met aanbevelingen: de warmtetransitie in beeld, 2024. Gezien de ontwikkeltijd van dit soort plannen bij gemeenten verwachten we dat uiterlijk rond 2032 alle gemeenten een concreet plan beschikbaar hebben op wijk- of buurniveau. Als stok achter de deur zou een mogelijke beleidsmaatregel kunnen zijn dat deze keuze ook voor 2032 gemaakt moet zijn, zodat in wijken waar een alternatief voor 2040 mogelijk is er daadwerkelijk uiterlijk in 2040 een transitie heeft plaatsgevonden.

De financiering van deze verduurzaming (zie lens economie) vraagt ook om beleid. Onderzoek van TNO laat zien dat huishoudens zonder voldoende financiële middelen vaak blijven wonen in slecht geïsoleerde woningen, wat door stijgende energieprijzen op termijn tot energiearmoede kan leiden. Hetzelfde onderzoek wijst ook op de uiteenlopende kosten van duurzame warmteopties, die in sommige gevallen tot hoge energierekeningen kunnen leiden en daarmee eveneens het risico op energiearmoede vergroten. Er zijn verschillende financieringsinstrumenten waarmee wordt geprobeerd om dit probleem op te lossen:

- 1 Via het nationaal warmtefonds zijn verduurzamingsleningen beschikbaar, waarbij huishoudens met een gezamenlijk inkomen tot €60.000 een lening tegen 0% rente kunnen krijgen. In sommige regio's zoals bijvoorbeeld de provincie Drenthe of de gemeente Den Haag wordt ook op het reguliere rentetarief korting gegeven. Toch blijft het, ondanks deze gunstige rente, voor veel mensen een uitdaging om grote bedragen te investeren.

- 2 Daarnaast zijn er enkele subsidies beschikbaar, zoals de ISDE- en SVVE-subsidies, evenals de Nij Begûn (isolatie) Maatregel 29.⁵⁹
- 3 Ook vanuit het Social Climate Fund van de EU komt geld beschikbaar om energiearmoede tegen te gaan. Tegenover deze subsidies staan ook belastingen, waaronder de energiebelasting op aardgas en het ETS2-stelsel.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) stelt dat het huidige beleidspakket onvoldoende is om tot netto 0 uitstoot te komen in 2040. De prijsprikkel die uit het ETS2-stelsel en de verdiensten van verduurzaming voortvloeit is te gering om verduurzaming effectief te stimuleren. Dit betekent dat aanvullend beleid noodzakelijk is om verdere emissiereducties te realiseren. Een voorbeeld van normerend beleid dat hieraan kan bijdragen is het verplichten van isolatie tot het aardgasvrij-ready-niveau bij de aanschaf van een woning. Er zijn zo'n 200.000 woningtransacties per jaar. Bij invoering van deze maatregel in 2030 en de aanname dat voor een periode van 10 jaar de helft van deze woningen geïsoleerd moeten worden na aanschaf, levert de maatregel 1 miljoen aan extra geïsoleerde woningen op, bij eerdere introductie van deze maatregel is het effect natuurlijk groter. Dit heeft vooral effect op de waarde van woningen met een slecht energielabel. Daarnaast is het van belang om bij de keuze voor een verwarmingsoptie per buurt integraal af te wegen wat maatschappelijk wenselijk is en de juiste financiële prikkels en beleidsregels te ontwikkelen die dit ondersteunen, zie bijvoorbeeld het eerder opgeschreven standpunt van de ACM.

Er blijft echter een groep huiseigenaren voor wie isolatie economisch niet rendabel is, of die om sociaal-maatschappelijke redenen liever niet (vergaand) willen isoleren. Een combinatie van belasting, subsidiering en normering kan een deel van deze groep toch overtuigen te verduurzamen. Het blijft echter beleidsmatig uitdagend om alle woningeigenaren nog voor 2040 te verplichten tot verduurzaming, o.a. vanwege het Eigendomsrecht (BWB art 5.1) en beschikbaarheid van gekwalificeerde arbeiders.

Huurwoningen: Ook de verduurzaming van de private verhuurmarkt verdient aandacht. Voor een huurder loont het vaak niet om grootschalige investeringen in de warmtebron en het energielabel van de huurwoning te doen.⁶⁰ Beleid dat op korte termijn effect heeft is de energielabelverplichting voor verhuurders⁶¹, deze richt zich echter op label D en voor veel warmteoplossingen (warmtepomp of lage temperatuur warmtenet) is dit onvoldoende (minimaal label B). Dit betekent dus dat deze verplichting tussen nu en 2040 aangescherpt moet worden naar het isolatieniveau dat past bij de warmteoplossing van de gemeente voor de wijk waarin de woning staat.

⁵⁹ De investeringssubsidie duurzame energie en energiebesparing (ISDE) stimuleert investeringen in duurzame energie en energiebesparing voor woningeigenaren en zakelijke gebruikers met ongeveer 30% van het aanschafbedrag. De subsidieregeling verduurzaming voor verenigingen van eigenaars (SVVE) is een vergelijkbare regeling voor VVE's. Maatregel 29 is een verdergaande subsidie van ongeveer 50%, specifiek voor de gemeenten die overlast hebben als gevolg van aardbevingen door gaswinning in Groningen.

⁶⁰ Een huurder heeft initiatiefrecht, wat het mogelijk maakt verduurzaming aan te vragen bij de verhuurder tegen een redelijke huurverhoging. De verhuurder moet hier mee akkoord gaan als het aan de voorwaarden voldoet. Het is onduidelijk in hoeverre dit recht wordt ingezet of op gehandhaafd.

⁶¹ Verhuurders zijn verplicht om hun woningen vóór 2030 naar minimaal energielabel D te brengen en ze kunnen verduurzamingsmaatregelen financieren via de energieprestatievergoeding (EPV) voor sociale huurwoningen.

Veel huurwoningen zijn daarnaast in corporatiebezit. Corporaties hebben als doelstelling dat al hun ruim 2,5 miljoen huurwoningen CO₂-neutraal zijn in 2050. Dit betekent dat corporaties gemiddeld 70.000 woningen per jaar willen verbeteren (gerekend vanaf 2015, dus een periode van zo'n 35 jaar). Dit wordt onder andere gerealiseerd door woningen beter te isoleren, zonnepanelen te installeren, en stapsgewijs over te schakelen op duurzame warmtebronnen zoals warmtepompen of aansluiting op warmtenetten. Daarnaast investeren corporaties in verduurzamingsmaatregelen tijdens reguliere onderhoudswerkzaamheden, waarbij woningen bij renovatie naar hogere energieprestaties worden gebracht, vaak op of rond energielabel A. Er zijn ook pilots waarin corporaties experimenteren met nieuwe technologieën en aanpakken om verduurzaming op grotere schaal en tegen lagere kosten te realiseren. Een versnelling van 10 jaar betekent dat niet 70.000 maar 100.000 woningen gemiddeld per jaar moeten worden aangepakt (over een periode van 25 jaar). Om deze transitie te versnellen, pleiten woningcorporaties voor gerichte subsidies en regelgeving die verduurzaming financieel haalbaar maakt voor zowel de corporaties als de huurders, waarbij extra aandacht uitgaat naar betaalbaarheid en het voorkomen van energiearmoede. Om te versnellen voor 2040 zal dit gevolgd moeten worden.

Private gebouwen: Ook voor private gebouwen is beleid opgesteld om de verduurzaming te realiseren. Voor kantoorgebouwen geldt sinds 2023 dat ze minimaal energielabel C moeten hebben om in gebruik te blijven. Voor 2030 wordt verwacht dat dit verder zal worden aangescherpt naar energielabel A, wat eigenaren dwingt om te investeren in verduurzaming. Volgens vastgoedadviseur Envalue gaat het om een investering van 1,5 miljard om dit te realiseren. In 2050 dienen kantoren een A+++-label te hebben, hiervan zijn de totale kosten geraamd op 4,5 miljard. Op basis van het huidig beleid zijn volgens Envalue “*deze investeringen momenteel onhaalbaar, onder meer door de gestegen rentelasten en de beschikbare capaciteit in de bouwsector*”. Dit betekent dus dat er zonder extra beleid richting 2030 een achterstand ontstaat en er een versnelling moet optreden richting 2040. Snellere emissiereductie kan gerealiseerd worden indien de A+++-label verplichting 10 jaar naar voren wordt gehaald en dat hier streng op wordt gehandhaafd, bijvoorbeeld door een gebouw niet meer bruikbaar te verklaren. Dit zorgt ervoor dat er een ‘level-playing-field’ voor duurzamere kantoren ontstaat, zo bestraf je eventuele voorlopers niet en beboet je achterblijvers. Deze maatregel zorgt er mogelijk wel voor dat gebouwen leeg komen te staan en de vraag is of dat wenselijk is.

Maatschappelijk vastgoed: Deze categorie omvat gebouwen die worden gebruikt voor het leveren van diensten en voorzieningen op het gebied van publieke of maatschappelijke functies. Dit type vastgoed heeft vaak een gemeenschappelijk of sociaal doel en wordt doorgaans beheerd door overheden, non-profitorganisaties of instellingen die diensten aanbieden in het belang van de gemeenschap. Voorbeelden hiervan zijn scholen, kerken, sportclubs of overheidsgebouwen.

Voor Rijksvastgoed zijn via de Routekaart Verduurzaming Rijksvastgoed ambitieuze plannen opgesteld, met doelen die tegen 2030 onder andere een gemiddeld energielabel A nastreven. Indien dit doel voor 2030 gehaald wordt, verwachten we dat richting 2040 al het Rijksvastgoed verduurzaamd zal zijn zonder additioneel beleid. Indien vertraging optreedt zorgt dat voor restemissies in en na 2040. De overheid is vaak zelf eigenaar of

aandeelhouder dus realisatie van doelen bij beschikbaar stellen van voldoende middelen lijkt haalbaar.

Voor andere maatschappelijke gebouwen lijkt de uitdaging om te verduurzamen groter. Dit type gebouwen is vaak niet kapitaalkrchtig en daarnaast zijn het vaak lastig te verduurzamen gebouwen, zoals monumentale panden. Er zijn echter diverse subsidieregelingen beschikbaar, zoals de Subsidieregeling duurzaam maatschappelijk vastgoed (DUMAVA), een regeling die vergelijkbaar is met de ISDE regeling. Desondanks is er nog steeds een aanzienlijke investering vereist. Normering in combinatie met maatschappelijke leningen zou hier een oplossing kunnen zijn. Net als voor private gebouwen geldt dat voor een deel van de gebouwen zal gelden dat verduurzamen niet loont, de functies die deze gebouwen huidig vervullen (kantoor) kunnen in de toekomst dan niet meer vervuld worden, een andere functie (bijv. sportschool) is wel denkbaar.

Naast woning- of gebouwtypespecifiek beleid is er voor al deze categorieën ook breed beleid nodig om ervoor te zorgen dat er voldoende arbeidskrachten zijn om de grote hoeveelheid verduurzamingsmaatregelen (isolatie, andere verwarmingsbron en het daarvoor nodige netwerk) uit te voeren. Denk hierbij aan het stimuleren van jongeren om te kiezen voor een technische opleiding en om-/herscholingstrajecten. Daarnaast kan het ondersteunen van innovatie in de bouw- en installatiesector helpen om effectiever te werken.

Beoordeling: **oranje** voor zowel woningen als gebouwen. Er is beleid aanwezig en veel additionaal beleid mogelijk wat de verduurzaming van de gebouwde omgeving stimuleert. Dit moet in sommige gevallen aangescherpt worden om de verduurzaming te versnellen. De belangrijkste concrete beleidssuggesties zijn een normering van woningen bij aankoop, maar ook verdergaande normering van huurwoningen en gebouwen. Ook zullen belastingen en financiële stimulering in de vorm van een verhoogde subsidie of aantrekkelijkere maatschappelijke leningen helpen voor de verschillende bouwtypes. Echter, kan dit beleid niet alle economische en sociaal-maatschappelijke uitdagingen overkomen en zeer belangrijk: zelfs als die knelpunten worden weggenomen, kan beleid geen verduurzaming afdwingen achter de voordeur. Bovendien kan een stijging van de belasting op aardgas tot bijvoorbeeld het niveau van augustus 2022 zorgen voor hoge kosten bij consumenten, die op zeer korte termijn niet allemaal over kunnen stappen op een duurzame optie. Het eventueel verhogen van de belasting op aardgas dient hier rekening mee te houden en vooral grotere verbruikers additioneel te belasten.

2. Economisch

Voor de gehele gebouwde omgeving geldt dat het ETS2 van toepassing is, wat zorgt voor een stijgende belasting op fossiele brandstoffen. We nemen aan dat de belasting op aardgas na introductie van ETS2 niet lager is dan huidig, en dat deze mede door het ETS2 in de tijd toeneemt. ETS2 belast fossiele emissies en hierdoor neemt de belasting op aardgas toe en die op elektriciteit af. De rechten binnen ETS2 lopen af richting 0 in 2045. Op den duur is door het ETS2 en de bijmengverplichting groen gas een duurzaam alternatief voor de meeste woningen en gebouwen goedkoper (dit hangt mede samen met het verbruik en de kosten voor isolatie).

We gaan hieronder in op enkele voornamelijk investeringsposten en in hoeverre deze lijkt te passen binnen beschikbare budgetten en beschikbare financieringsondersteuning en wat het effect is van versnelling met 10 jaar. Het integrale beeld van de investering is uitgewerkt in hoofdstuk 5. Deze sectie is opgedeeld in koop- en huurwoningen en gebouwen.

Koopwoningen: Wij zien aan de kostenkant drie voornamelijk kostenposten: de isolatie van de woning, de benodigde infrastructuur en de aanschaf van nieuwe apparatuur. We schetsen de investeringsopgave van elk van deze drie posten:

Om woningen voldoende te isoleren om zonder aardgas te verwarmen (de isolatiestandaard), is een gemiddelde investering van €18.000 per woning nodig (CPB, 2024). De totale kosten voor woningisolatie worden geschat op €86 miljard, waarvan €16 miljard bestemd is voor corporaties. Van de resterende €70 miljard wordt 30% gedragen door de overheid via subsidies zoals ISDE en SVOH, en de rest door de woningeigenaren en verhuurders zelf. Deze kosten zijn grotendeels terug te verdienen vanwege een lagere energierekening (afhankelijk van factoren zoals het woningtype en de gasprijs) en per maatregel is er wel een groot verschil in de terugverdientijd. Verduurzamen van de woning zorgt ook voor een stijging van de woningwaarde, sommige banken kijken recent daarom naar de totale woonlasten (hypotheek+energierekening) bij bepalen van de rente. Voor veel Nederlanders loont isolatie economisch gezien. Voor vrijstaande woningen en tussenwoningen is het rendement echter gemiddeld negatief (tussen 0% en -0,2%). Zo'n 15% van particuliere huurders en woningeigenaren zal er meer dan 1% op achteruitgaan. Deze waarden gaan uit van een annuïtaire hypotheek met 4% rente, een looptijd van 25 jaar en de gasprijsprognose van de KEV 2023 van PBL. Voor een deel van deze woningen kan dit negatieve rendement echter worden gecompenseerd door besparingen die voortvloeien uit het gebruik van een duurzame warmteoplossing, zoals we hieronder uitleggen. Economisch beleid, zoals verdergaande subsidie, een hogere belasting op aardgas (deels volgt dit vanuit ETS2) of een lening met een lager rentepercentage verkleint deze groep. Het verschil in rente van bijvoorbeeld 0% t.o.v. de marktrente betekent wel dat de overheid het verschil (deels) moet bijleggen. Zoals het PBL stelt is het de vraag of dit een doelmatige besteding van schaarse middelen is. Het Rijk zal een keuze moeten maken waar beschikbare middelen het effectiefst zorgen voor emissiereductie, het budget/of de ruimte om te lenen van het Rijk is namelijk niet oneindig; zo moet het Rijk bijvoorbeeld aan Europese financiële richtlijnen t.a.v. het begrotingstekort en staatsschuld-ratio voldoen. Duitsland wilde recent van de eigen begrotingsregels afwijken t.b.v. klimaatmaatregelen, maar werd door hun constitutioneel hof (in Nederland komt de Raad van State het dichtst in de buurt als instantie) teruggefloten⁶².

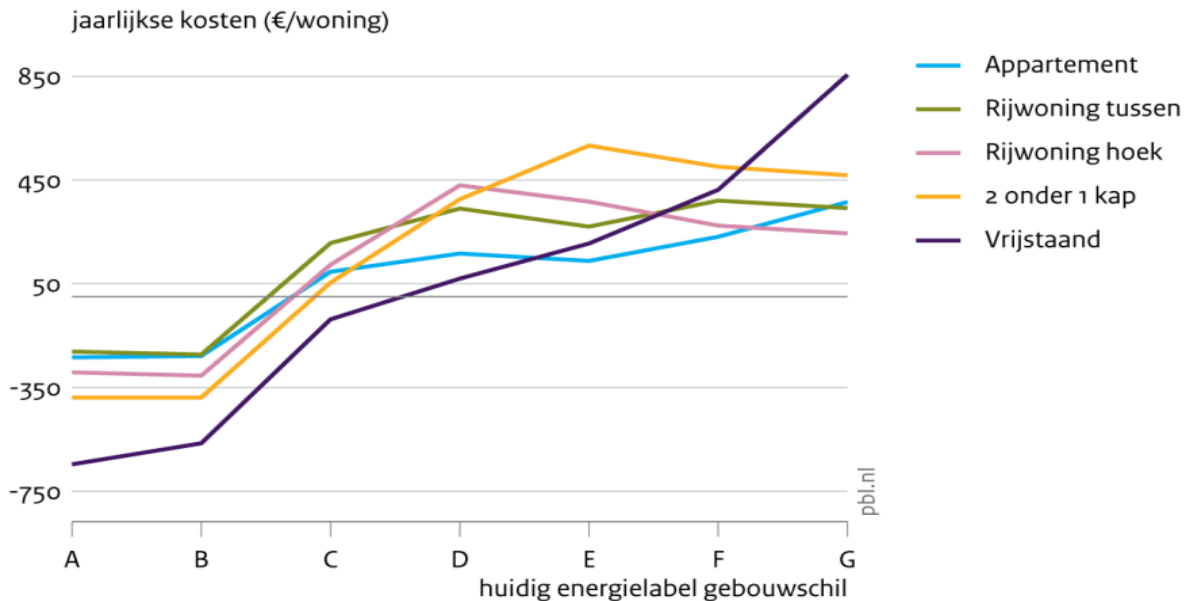
Toegang tot de juiste infrastructuur is randvoorwaardelijk voor het kunnen verduurzamen van het merendeel van de Nederlandse woningvoorraad. De twee voornaamste opties zijn aansluiting op een collectief warmtenet of de installatie van een elektrische of hybride warmtepomp. De aanlegkosten van warmtenetten en de noodzakelijke versterking van het elektriciteitsnet worden doorberekend aan de eindgebruikers, die

⁶² In Duitsland was 60 miljard beoogd voor coronasteun over, dit geld wilde de regering inzetten voor klimaatbeleid (o.a. aanschaf TenneT Duitsland). Echter, het land heeft een wet die een rem op schulden moet zetten. Mede hierdoor is het kabinet in Duitsland recent gevallen.

hierdoor een aanzienlijke vaste kostenpost op hun energierekening zien. Dit maakt het momenteel vaak lastig om warmtenetten concurrerend te maken ten opzichte van aardgas, al neemt dit verschil richting 2045 af door introductie van ETS2.

Volgens het Planbureau voor de Leefomgeving (TNO, 2024 – zie Figuur 22) is in 2030 het gebruik van een elektrische warmtepomp economisch aantrekkelijk voor alle woningtypen met energielabel A of B. Omdat CV-ketels doorgaans elke 15 tot 20 jaar worden vervangen, kan vrijwel elke woning op een natuurlijk vervangingsmoment (dus zonder of met beperkte vervroegde afschrijving) de oude ketel inruilen voor een duurzamer alternatief. Dit betekent economisch gezien dat een investering in een warmtepomp rendabel is op moment dat ook voldoende geïsoleerd is. Wel moet hiervoor het elektriciteitsnetwerk tijdig verzwafd zijn, zie het infrastructuur hoofdstuk met de uitdagingen die hier spelen. Voor woningen die collectief met een warmtenet verwarmd worden zijn er mogelijk wel hogere vervroegde afschrijving van de CV-ketel. De wijze waarop het Rijk, producenten en/of de ontwikkelaar van een warmtenet hiermee omgaan bepaalt de meerkosten die ontstaan voor een woningeigenaar. Aan de andere kant zorgen investeringen in met name isolatie tot een toename in wooncomfort en afhankelijk van de hoogte van de gasprijs tot lagere variabele kosten voor verwarmen.

De rendabiliteit van deze investeringen hangt sterk af van de kosten van het alternatief (een aardgasgestookte CV-ketel), van de hoogte van de aardgasprijs inclusief de keuze over de hoogte van de energiebelasting en van de financiële mogelijkheden van huiseigenaren of verhuurders om deze investeringen te dragen. Belasting op aardgas is daarom een belangrijke knop om aan te draaien om de investering in duurzame alternatieven aantrekkelijker te maken, hier speelt het ETS2 een belangrijke rol. Een groot deel van deze investeringen kan gefinancierd worden via financiële instrumenten zoals de gebouwgebonden financiering en leningen vanuit het warmtefonds. De kosten variëren echter sterk per woning, afhankelijk van de technologie, het woningtype en de locatie (PBL, 2024; CPB, 2024; Berenschot, 2024). Dit betekent dat verduurzaming voor een deel van de huiseigenaren, ook met aanvullend beleid, waarschijnlijk niet rendabel is. Een zeer forse stijging van de belasting op aardgas zal woningeigenaren die de mogelijkheid hebben om te verduurzamen hiertoe bewegen, er zijn echter ook een flink aantal woningeigenaren die geen HWP of eWP kunnen plaatsen en/of wachten op een warmtenet of beschikbaarheid van groen gas. Voor deze groep betekent een aanzienlijke verhoging van de belasting op aardgas dat ze meer kosten maken zonder daar veel invloed op te hebben. Een zeer forse stijging van de belasting op aardgas zorgt ervoor dat groter aantal mensen moeite zal hebben met betalen van de energierekening, en dit heeft een negatieve invloed op het draagvlak voor de energietransitie.



Figuur 22. Kosten of juist baten van de investering in een elektrische warmtepomp in 2030 voor verschillende energielabels en woningtypen. Bron: TNO, Dashboard eindgebruikerskosten

Een versnelling van 10 jaar lijkt – met name vanwege de interactie van deze sector met het ETS2 en het feit dat er zeer veel arbeiders nodig zijn (zie ook H5.4) – niet realistisch. Wel verwachten we dat de emissies die het PBL in haar TVKN studie voor 2050 aanhoudt grotendeels in 2045 gerealiseerd kunnen worden en er dus restemissies zullen zijn na 2040 die gecompenseerd moeten worden.

Woningen (huur): Hoewel de kosten voor verduurzaming gelijk blijven, worden deze bij huurwoningen anders verdeeld, wat ook een andere economische uitdaging met zich meebrengt. De grootste uitdaging hierbij is het doorberekenen van de kosten aan de huurder. Wanneer de huurder bespaart op energiekosten, maar de verhuurder de huurprijs niet direct kan verhogen, ontbreekt de financiële prikkel voor de verhuurder om te investeren in verduurzaming. De regeling ‘huurverhoging na woningverbetering’ biedt verhuurders de mogelijkheid om de besparing op de energierekening deels te verrekenen in een huurverhoging. Deze verhoging moet wel redelijk zijn en zal mogelijk niet altijd alle kosten dekken. Voor een corporatie kan dit een uitdaging vormen en zal in sommige gevallen additionele financiële steun nodig zijn. Tussen de branchevereniging van Nederlandse woningcorporaties, Aedes, en het Rijk zijn afspraken gemaakt over de verduurzaming van de woningen in beheer.

Voor een particulier huurhuis is de uitdaging minder groot. De woningwaarde stijgt door verduurzaming, wat zeker bij een huurhuis dat als investering wordt benaderd direct waarde oplevert. Daarnaast kan er in de opvolgende jaren een jaarlijkse huurverhoging worden doorgevoerd om de kosten op langere termijn terug te verdienen. Indien de isolatie van particuliere verhuur zich niet tijdig richting de Standaard beweegt, kan het Rijk een norm introduceren welke voorschrijft dat een woning niet verhuurd mag worden of dat een halvering van de huur plaatsvindt omtrent 2035.

Gebouwen: Voor de verduurzaming van de 480.000 utiliteitsgebouwen (Sectortafel klimaatakkoord, 2018) is volgens DGMR een investering van circa 35 miljard euro nodig

(PBL, 2024). Een groot deel van deze kosten kan worden terugverdiend door energiebesparing, maar de financiering kan in sommige gevallen een uitdaging vormen, omdat de terugverdientijd per gebouw verschilt. De meeste kantoorpanden hebben op dit moment al een goede of redelijk goede isolatiegraad. Bedrijfshallen/loodsen veelal (nog) niet, en hun oppervlak is ook aanzienlijk met soms beperkte noodzaak voor hoge isolatie. Voor deze laatste groep dient nader onderzocht te worden welke isolatiegraad gewenst is en hoe richting 2045 in de warmtebehoefte kan worden voorzien. Veel grote bedrijfshallen in Nederland zullen grotendeels geautomatiseerd worden, de noodzaak voor verwarming van deze grote hallen met dunne buitenmuren is dan niet nodig.

PBL (2024) benoemt daarnaast nog enkele andere uitdagingen. Zo kunnen gebouweigenaren soms andere investeringsprioriteiten hebben, en is het voor huurders niet altijd mogelijk om hun investeringen volledig door te berekenen aan de huurders. Dit laatste betekent dat mogelijk gebouwen die niet rendabel te isoleren zijn leeg komen te staan of voor doeleinden gebruikt worden zonder warmtevraag (opslag van goederen die goed tegen kou en vocht bestand zijn).

Beoordeling: oranje voor zowel woningen als gebouwen. Investeren in isolatie is noodzakelijk voor verduurzaming, maar de laatste isolatiestappen zijn niet voor alle woningen financieel rendabel en/of investeren is lastig voor kwetsbare groepen. Leningen, vooral 0%-leningen, maken deze investeringen toegankelijker. Zodra een woning energielabel A of B bereikt, wordt de installatie van een warmtepomp economisch aantrekkelijk, wat een deel van de isolatiekosten compenseert. Een bijkomend probleem is de oneerlijke verdeling van maatschappelijke en eindgebruikerslasten voor verschillende warmteoplossingen. Effectief beleid om de verduurzaming economisch aantrekkelijker te maken is erop gericht het verschil tussen de verduurzaming en het fossiele alternatief groter te maken door subsidie en belastingen (op aardgas). Toch blijft er altijd een kleine groep waarvoor verduurzaming economisch niet loont. Volledige financiële compensatie door het Rijk is onrealistisch, zie ook H5.

3. Sociaal-maatschappelijk en cultureel

Deze lens kijkt naar het draagvlak voor de (versnelde) transitie, de lasten-lustenverdeling en eventuele gedragsverandering die nodig is voor versnelling.

Woningen: De meeste burgers steunen het aardgasvrij maken van woningen, en onderzoek door het PBL (2024) toont aan dat zowel warmtepompen als warmtenetten als aanvaardbare oplossingen worden gezien. Dit geldt echter niet voor iedereen. Er is een initiële investering nodig, en het woongenot kan tijdelijk verminderen door ingrijpende maatregelen zoals isolatie of installatie van nieuwe systemen. In sommige gevallen moeten bewoners zelfs tijdelijk hun huis verlaten. De groep waarbij er om deze redenen geen draagvlak is, vormt een belangrijke sociaal-maatschappelijke uitdaging.

De verduurzaming vraagt ook aan oudere bewoners om maatregelen te nemen, en voor hen is gemiddeld minder animo voor zo'n grootschalige verbouwing. Dit komt door de overlast die ermee gepaard gaat en het feit dat ze minder energie hebben om zelf de verbouwing uit te voeren. Voor een deel van deze groep geldt dat hun verwachte

levensduur korter is dan de terugverdientijd van de investering, wat voor deze groep tot weinig motivatie leidt om te investeren in een toekomst waarin ze zelf geen actieve rol meer spelen. Tegelijk is een prettig warm huis voor mensen op leeftijd belangrijk, en is energiearmoede daarom ook voor deze groep een uitdaging. Tevens zorgt de stijging van de woningwaarde voor een grotere erfenis voor hun evt. kinderen. Daarom verdient deze doelgroep speciale aandacht, bijvoorbeeld door het banken te verplichten deze groep de verduurzaming via een aflossingsvrije hypotheek te laten financieren, zo nemen de maandlasten niet toe en de aflossing en rente over de extra lening volgt pas na verkoop van de woning.

Daarnaast is er zorg over de eerlijke verdeling van kosten tussen verschillende inkomensgroepen, omdat wijken en straten afhankelijk zijn van verschillende technieken voor het verwarmen van huizen. De kostenverschillen tussen deze oplossingen kunnen de steun onder druk zetten. Bovendien wordt het overheidsbeleid rondom verduurzaming vaak als inconsistent ervaren, wat het draagvlak verder vermindert (PBL, 2024). Wat betreft dit laatste zal consistent en duidelijk beleid helpen het draagvlak te vergroten, denk hierbij aan consistent beleid omtrent belasting op de gasprijs. Bij dit laatste speelt het nieuwe ETS2 een grote rol, aangezien de prijs onafhankelijker van de politiek tot stand komt (m.u.v. instellen van een veilingprijstop, maar dit gebeurt volgens het PBL waarschijnlijk pas wanneer de prijs 200 euro/ton overstijgt) en het zorgt voor een toename bij aardgas en een afname bij elektriciteit. Het ETS2 alleen is de komende jaren niet voldoende, verder ophoging van de belasting op aardgas zorgt voor een betere business case duurzame opties. Echter, zorgt het ook voor toename in kosten voor woningen die nog geen toegang hebben tot een alternatieve warmtebron (m.n. warmtenetten).

Verduurzaming van een eigen woning vereist vaak technische en financiële kennis, die niet altijd aanwezig is bij bewoners. Goed overheidsbeleid kan helpen burgers beter te informeren en hen meer te betrekken bij het proces. Onderzoek van het PBL (2024) laat bovendien zien dat isoleren positief bijdraagt aan brede welvaart. Een beter geïsoleerde woning of een duurzame warmtebron zorgt voor meer wooncomfort en het heeft ook grote positieve effecten op de volksgezondheid.

Specifiek voor huurders geldt dat ze sterk afhankelijk zijn van regelgeving die verhuurders verplicht woningen te verduurzamen. De verwachting is dat handhaving van deze verplichting huurders helpt, al kan dit (afhankelijk van de investeringskosten en de afschrijvingstermijn van de gedane investering) wel netto resulteren in hogere woonlasten (huur + energierekening).

Gebouwen: Sociaal-maatschappelijk gezien zijn de uitdagingen voor gebouwen relatief beperkt. Hoewel sommige gebouwen tijdelijk (deels) buiten gebruik zullen zijn tijdens verbouwingen, hebben deze geen bewoners, waardoor de impact minder groot is. Bovendien hebben bedrijven en organisaties doorgaans meer kennis over de businesscase en de benodigde activiteiten. Toch kan de tijdelijke sluiting van een onderneming het draagvlak voor verduurzaming verminderen. Door deze factoren lijkt de volledige verduurzaming van HDO-gebouwen in 2040 over het algemeen sociaal-maatschappelijk haalbaar.

Beoordeling: **oranje** voor woningen en **groen** voor gebouwen. Sociaal-maatschappelijk gezien is er doorgaans steun voor het verduurzamen van woningen. Ook zal isolatie doorgaans het woongemak aanzienlijk verbeteren en is het een effectieve manier om energiearmoede tegen te gaan. Wel kunnen de vereiste investeringen enerzijds tijdelijk het woongemak verminderen en anderzijds (te) lang duren om terug te verdienen. Dit kan voor een deel van de bevolking, met name ouderen en mensen met een kleine beurs, een drempel kan vormen (zonnepanelen zijn volgens de politiek pas ‘rendabel’ als deze een terugverdientijd hebben van 8 jaar of minder). Beleidsmatig is deze drempel moeilijk volledig weg te nemen, waardoor vanuit deze invalshoek restemissies in woningen in 2040 waarschijnlijk blijven bestaan.

4. Milieukundig

Woningen: Het isoleren van woningen kan nadelige gevolgen hebben voor insecten, vogels en vleermuizen, omdat er minder gaten en kieren overblijven waarin deze dieren schuilen. Als hier tijdens de isolatie rekening mee wordt gehouden, kan dit effect beperkt blijven, en de extra kosten zijn relatief laag in verhouding tot de totale isolatiekosten. Het huidige milieubeleid vormt echter een belemmering voor de noodzakelijke versnelling van isolatieprojecten. De Nederlandse Vereniging voor Duurzame Energie (NVDE) benadrukt daarom dat alternatieve opsporingsmethoden voor beschermde dieren erkend moeten worden om de transitie te versnellen. Huidig beleid lijkt dit te gaan realiseren.

Daarnaast is veel isolatiemateriaal tot op zekere hoogte giftig wanneer het als afval wordt verwerkt. Het stimuleren van circulaire en natuurlijke isolatiematerialen kan de milieuschade aan het einde van de levensduur van dit materiaal verminderen. Dit effect blijft echter beperkt, omdat de sloop van goed geïsoleerde woningen, en daarmee het verlies van veel kapitaal, relatief zeldzaam is.

Een ander aspect is dat elektrische warmtepompen (eWP) en hybride warmtepompen (HWP) gebruikmaken van verschillende metalen. Hoewel deze metalen redelijk beschikbaar zijn, is hun voorraad niet onbeperkt. Vergeleken met de vraag naar metalen in andere sectoren, zoals batterijen, elektrolyzers en stroomkabels, is de vraag vanuit de gebouwde omgeving echter relatief klein.

Gebouwen: Voor utiliteitsgebouwen geldt vanuit de milieukundige lens hetzelfde als voor woningen.

Beoordeling: **groen** voor zowel woningen als gebouwen. Milieukundig vormt het versnellen van de detectie van beschermde diersoorten een uitdaging, net als de end-of-life van bepaalde isolatiematerialen en de benodigde materialen voor warmtepompen. Dit lijkt de versnelling echter niet te hinderen, en wij verwachten dat de uitdagingen geïdentificeerd in deze lens overkoombaar zijn.

5. Technologisch

De technologische lens gaat in op de haalbaarheid van de benodigde innovatiesnelheid (en daarmee kostendaling) van technieken en de mate van robuustheid van het scenario klimaatneutraal 2040.

Woningen: De technologie voor het isoleren en duurzaam verwarmen van woningen is beschikbaar. En ook de technologie voor het verwarmen van woningen op basis van lage temperatuurwarmtebronnen en een warmtenet is tijdig beschikbaar.

Een aanzienlijk deel van de gebouwde omgeving wordt middels elektrische warmtepomp verwarmd in de toekomst. Dit vraagt echter veel van het elektriciteitsnet, waarbij op alle netniveaus aanzienlijke verzwaring nodig is. Wel suggereert onderzoek van Climate For Life dat de netbeheerders de benodigde verzwaring door warmtepompen mogelijk overschatten. Ook een slimmere inzet van het elektriciteitsnet kan de benodigde verzwaringen verlichten. Apparaten zoals warmtepompen kunnen ‘slim’ aangestuurd worden op basis van bijvoorbeeld beschikbare groene stroom of netcapaciteit (zie ook beleidssuggestie om te beprijzen op basis van ‘tijd’ en ‘locatie’). Op dit moment ontbreekt echter een financiële prikkel voor consumenten om dit te doen (m.u.v. consumenten die al een dynamisch leveringscontract hebben). Ook is er nog niet genoeg data om het effectief toe te passen. Beleid is daarom nodig dat nettarieven anders inricht en efficiënt gebruik van het net economisch stimuleert. Dit vraagt echter om grote veranderingen en is daarom mogelijk niet op korte termijn uitvoerbaar. Daarnaast vereist de hybride warmtepomp-oplossing (HWP) de beschikbaarheid van groene gassen zoals biogas en groene waterstof. De opschaling hiervan voor de periode 2020-2030 blijft achter, en het is onzeker of een versnelling tussen 2030 en 2045 haalbaar is.

Gebouwen: Net als voor woningen vormen arbeidskrachten een grote technische uitdaging in de verduurzaming van de gebouwde omgeving. Daarnaast speelt bij gebouwen mee dat het vaak om relatief unieke gebouwen gaat of om gebouwen met cultuurhistorische waarde. Voor dit soort gebouwen is maatwerk vereist, wat vaak meer arbeid en ook gespecialiseerde arbeidskrachten vraagt.

Beoordeling: groen voor zowel woningen als gebouwen. Alle benodigde technologie voor de verduurzaming van de gebouwde omgeving is momenteel beschikbaar. Verdere innovaties kunnen bijvoorbeeld helpen om het elektriciteitsnet effectiever in te zetten en daarnaast de kosten en benodigde arbeidskracht van deze verduurzaming te verlagen. Vanuit technologisch perspectief lijkt versnelling richting 2040 haalbaar.

6. Infrastructureel

Woningen: Op dit moment bedraagt de verduurzamingsnelheid zo’n 50.000 woningen per jaar⁶³, om in 2045 richting 0 restemissies te gaan betekent dit dat het tempo omhoog moet naar gemiddeld 350.000 vanaf 2025. Dit is een enorme uitdaging vanwege het aantal arbeidskrachten dat hiervoor nodig is, mede omdat er ook opgaven liggen op het gebied van de nieuwbouw van woningen (73.000 in 2023 en de ambitie is 100.000 per jaar tot 2030), verduurzaming in andere sectoren en bijvoorbeeld de zorg. Daarnaast is het isoleren van een bestaand gebouw, ook wel na-isolatie, vaak een complex proces dat meestal in stappen wordt uitgevoerd, met één maatregel per keer, wat het tempo vertraagt (PBL, 2024). Zie ook het hoofdstuk over arbeid voor meer informatie over de inschatting van het aantal arbeiders nodig om de transitie te realiseren, een aanzienlijk

⁶³ [Mosaic - Gebouwde omgeving](#) : “In 2023 zijn er 120 duizend aardgasvrije woningen bijgekomen. Het aantal nieuwbouwwoningen in 2023 bedroeg 74 duizend.”

deel hiervan is nodig voor isoleren en het verzwaren- en aanleggen van net-/warmteinfra. Netbeheerbedrijven verwachten dat zij de verzwaring van het elektriciteitsnet niet snel genoeg kunnen doorvoeren om de verwachte groei van elektrische warmtepompen bij te houden (PBL, 2024). Met dit laatste is in het ETM-Klimaatneutraal-2040 scenario rekening gehouden door niet 50% van alle woningen elektrisch te verwarmen, maar de helft hiervan over te laten stappen op een hybride warmtepomp op basis van gas. Hierdoor kan sneller overgestapt worden van een CV-ketel, al is het wel de verwachting dat in 2040 (nog) onvoldoende groen gas beschikbaar is om aan de vraag te voldoen. Een hybride warmtepomp op aardgas zorgt alsnog voor een reductie van 60% ten opzichte van een CV-ketel op aardgas.

Ambitieuw en consistent beleid is nodig om tijdig voldoende arbeidskrachten op te leiden en/of uit het buitenland aan te trekken. Wel kan een systematische aanpak en technologische vooruitgang er mogelijk voor zorgen dat de werkzaamheden minder arbeidsintensief worden. Alternatief kan ook nagedacht worden hoe bewoners meer zelf kunnen doen, bijvoorbeeld door productinnovatie. Dit scheelt aanzienlijk in de totale kosten (bewoners voeren werkzaamheden in eigen (vrije) tijd uit) en dit vergroot het aantal beschikbare arbeidsuren significant. Veel simpele isolatiewerkzaamheden zijn op deze wijze in 2021-2022 door woningeigenaren of vrijwilligers uitgevoerd.

Gebouwen: De uitdaging van netverzwaring die geldt voor woningen, speelt ook voor gebouwen. Echter, gebouwen zijn doorgaans groter en daarmee ook grotere warmteafnemers, wat een warmtenet aantrekkelijker maakt. Omdat de uitbreiding van het elektriciteitsnet de grootste uitdaging vormt, heeft het gebruik van een warmtenet een verlichtend effect op de infrastructurele druk. Dit maakt versnelling van verduurzaming van de warmtevoorziening voor gebouwen haalbaarder dan voor woningen vanuit dit perspectief.

Beoordeling: oranje voor zowel woningen als gebouwen. Infrastructureel vormt de transitie van de gebouwde omgeving een grote uitdaging, zowel voor de verzwaring van het elektriciteitsnet als voor de aanleg van warmtenetten en productie van groen gas. Het tekort aan beschikbare arbeidskrachten en/of tijd voor het uitvoeren van alle werkzaamheden zijn hierbij de grootste belemmeringen, zie ook H5. Dit maakt ook dat verhoging van de gasprijs voor woningen die geen toegang hebben tot een duurzame bron wel meer kosten hebben en geen optie om de kosten (m.u.v. isolatie) omlaag te brengen. Beleidsmatig adviseren we om effectieve inzet van het net te laten lonen en ervoor te zorgen dat investeringen van netbeheerders daarop kunnen worden aangepast.

7. Ruimtelijk

Woningen: De isolatie van de meeste woningen vereist dat er aan de buiten- of binnenkant van de woningruimte wordt ingenomen. Voor veel appartementen in steden betekent dit dat er (kostbare) vierkante meters aan woonruimte verloren kunnen gaan. Hoewel dit ongunstig is, lijkt het geen onoverkomelijk obstakel te zijn. Voor vrijstaande woningen verwachten wij vanuit dit perspectief geen probleem. In sommige gevallen is er in de straat geen ruimte voor de aanleg van een warmtenet, maar in dergelijke situaties zijn er andere duurzame verwarmingsopties beschikbaar. Voor elektriciteit zijn er in de wijk veel nieuwe transformatoren nodig, hiervoor moet tijdig een ruimtelijke reservering

worden getroffen. Ook betekent werk aan de infrastructuur tijdelijk overlast vanwege het openliggen van straten.

Gebouwen: Net als voor woningen geldt dat isolatie en duurzame verwarmingssystemen goed ruimtelijk in te passen zijn voor gebouwen.

Beoordeling: **groen** voor zowel woningen als gebouwen. De beschikbare ruimte beïnvloedt soms de keuzes voor isolatieopties en duurzame warmteoplossingen, maar dit lijkt geen beperkende factor voor de verduurzaming van de gebouwde omgeving.

4.5.3. Conclusie en discussie

1. Hoe komen we uit op de emissieraming voor 2040?

Onderstaand gaan we in op onze bandbreedte emissieraming voor 2040. Voor deze analyse maken we gebruik van de beoordeling op de lenzen zoals hierboven beschreven.

In 2023 zijn ongeveer 800.000 woningen aardgasvrij (eWP of warmtenet). De huidige snelheid van verduurzaming bedraagt circa 50.000 woningen per jaar. Wij verwachten dat met ambitieus beleid deze snelheid kan worden verdrievoudigd, naar gemiddeld 150.000 woningen in 2030 en dat dit vervolgens mogelijk door zou kunnen groeien tot gemiddeld 250.000 woningen per jaar in de periode van 2030-2040⁶⁴. Het gaat hier om een vervijfvoudiging in een periode van 7 jaar, dit is zeer uitdagend en realisatie van deze ontwikkeling is mede sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van gekwalificeerde arbeid. Deze woningen gaan over van een CV-ketel op een warmtenet of eWP. Vanwege het gesprek aan arbeid verwachten we dat warmtenetten in 2040 nog niet op het niveau kunnen zijn wat voor 2050 was voorzien in het scenario. Additioneel worden er tussen nu en 2040 in totaal 2,4 miljoen aan hybride warmtepompen geïnstalleerd. Dit is 0,4 miljoen minder dan beoogd voor het scenario van 2040. De inschatting van 2,8 miljoen hybride warmtepompen uit het originele 2050 scenario achten wij niet haalbaar met tien jaar versnelling. Hybride warmtepompen zijn grotendeels een tussenoplossing tot het moment dat overal in alle buurten het elektriciteitsnet voldoende is verzaagd voor een eWP. Tenslotte, gaan enkele woningen over op verwarming middels een pelletkachel of e-boiler.

Zoals zichtbaar in onderstaande Figuur 23 en Tabel 18 resulteert dit in ongeveer 4 miljoen woningen in 2040 van het aardgas af en een toename van het aantal woningen aangesloten op een duurzamere warmtevoorziening⁶⁵. Voor gebouwen verwachten we een vergelijkbare ontwikkeling, al zal hier een groot deel voor een bodemwarmtepomp kiezen als eindoplossing en verhoudingsgewijs verwachten we hier meer reductie in 2040 dan bij woningen, mede als gevolg van normering van verhuurde kantoorpanden.

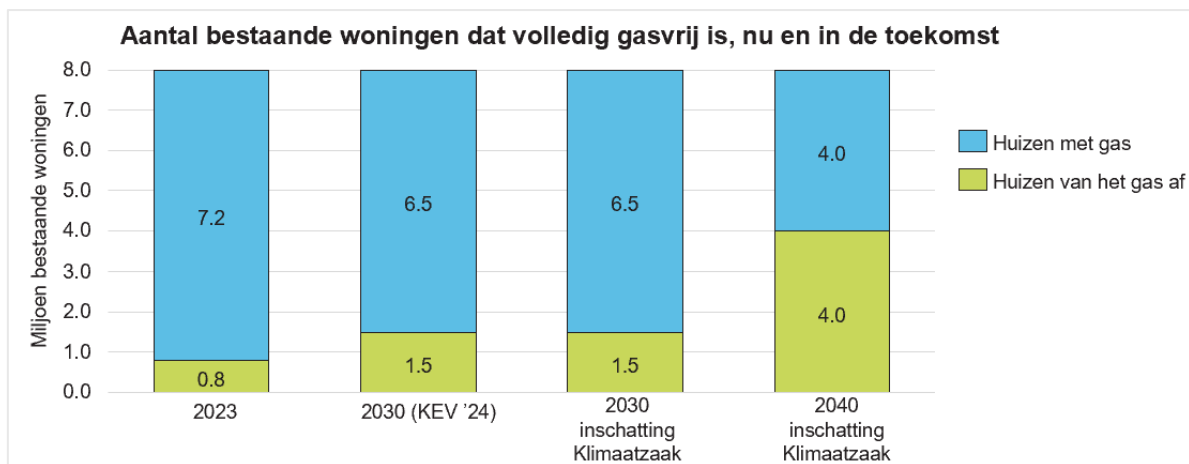
Deze ontwikkeling zorgt voor een emissiereductie van ca. 59% ten opzichte van 2023. Dit zorgt voor een afname van de gasvraag c.q. CO₂-uitstoot van 18,3 Mton in 2023 tot circa 7,5 Mton in 2040. Daarnaast wordt de totale gasvraag voor een deel ingevuld door groen

⁶⁴ Dit is exclusief nieuwbouw.

⁶⁵ Naast de bestaande 8 miljoen woningen is de verwachting dat additioneel de woningvoorraad met 1,2 miljoen woningen en 0,6% aantal gebouwen toeneemt.

gas, bandbreedte 0,7 tot 1,9 Mton (deel dat beschikbaar is voor de gebouwde omgeving). Uit de PBL KEV blijkt dat de ontwikkeling van nieuwe groen gas vergunningen stopt, we gaan daarom uit van een kleine groei van groen gas beschikbaar voor verduurzaming van het gasverbruik in de gebouwde omgeving van 0,7 Mton in 2030 (dit is 72% van de verwachte 1 Mton aan productie) tot 1,3 Mton in 2040, wat leidt tot een middenwaarde aan restemissies van 6,2 Mton.

Qua bandbreedte, gezien de vele onzekerheden (beoordeling 4 maal oranje) hanteren we de volgende bandbreedte: 5,6 – 8,5 Mton aan restemissies in 2040. De onderkant is lager op moment dat er meer groen gas beschikbaar komt (1,9 Mton) voor de gebouwde omgeving, de bovenkant is hoger vanwege het geïdentificeerd risico op vertraging op allerlei lenzen (50% reductie t.o.v. 2023 en ‘slechts’ 0,7 Mton groen gas beschikbaar).



Figuur 23. Het aantal bestaande woningen dat volledig gasvrij is, nu en in de toekomst. Excl. Nieuwbouw.

Tabel 18. Ontwikkeling verduurzaming gebouwde omgeving (woningen + gebouwen)

Warmtebronnen en maatregelen	Huidig aandeel	Scenario klimaatzaak 2040 (haalbaarheid inschatting)	Additionele HR-ketels vervangen in 2040	Verwachte CO ₂ reductie t.o.v. huidige emissies
Maatregelen tot aardgasvrij				
Elektrische warmtepomp	6%	25% (van 25%)	19%	-19%
Warmtenet (100% duurzaam)	6%	20% (van 30%)	14%	-14%*90% ⁶⁶ =12,6%
Pelletkachels & e-boiler	+/-1%	1% pellet & 4% e-boilers	4%	-4%
Verduurzaming bestaande warmtenetten	6%			-6%*65% ⁶⁷ *90%= 3,5%

⁶⁶ Voor pieklevering zijn warmtenetten afhankelijk van een gasgestookte boiler; wij verwachten dat de meeste warmtenetten niet aangesloten zijn op het regionale waterstofnet en dus nog gebruik maken van aardgas. Tijdens piekleveringsmomenten verwachten we grote druk op het elektriciteitsnet en is de meerprijs van e-boilers aanzienlijk. Dit is een conservatieve aanname.

⁶⁷ Bestaande warmtenetten worden deels al vanuit restwarmtebronnen voorzien, het gaat dus om een deels verduurzaming van de bestaande warmtenetten.

Warmtebronnen en maatregelen	Huidig aandeel	Scenario klimaatzaak 2040 (haalbaarheid inschatting)	Additionele HR-ketels vervangen in 2040	Verwachte CO ₂ reductie t.o.v. huidige emissies
Maatregelen voor emissieverzachting				
Inzet groen gas				1,3 Mt reductie ⁶⁸
Hybride warmtepomp (70% reductie aardgasverbruik)	1%	30% (van 35%)	29%	-60%*29%= -17%
Fossiele warmtevoorziening				
CV-/HR-ketels	87%	20%	17% ⁶⁹	-3,0%
Emissiereductie door verduurzaming				Ca. 59%
Emissies 2023				18,3 Mt
Emissies na overstap alternatieve warmtebron				7,5 Mt
Bijdrage groen gas				1,3 Mt
Resterende emissies in 2040 klimaatzaakscenario				6,2 Mt

2. Waarom is versnelling haalbaar en wat zijn de voorname beperkingen?

De hierboven genoemde versnelling van de transitie betekent dat er een aanzienlijke versnelling in aantal woningen en gebouwen verduurzaamd per jaar gerealiseerd moet worden vanaf 2025. Om te versnellen is naast een passend beleidskader, nadere uitwerking van de gemeentelijke transitieplannen en uitbreiding van het aantal warmtenetten, veel extra arbeidskracht nodig. Ook is draagvlak bij sommige burgers een uitdaging, bijvoorbeeld om economische of sociaal-maatschappelijke redenen.

Voor gebouwen in de private sector (kantoorpanden e.d.) verwachten we dat ze als eerst verduurzaamd zijn, hiervoor is en komt strenge normering en is er in veel gevallen een business case vanwege doorbelasting van de kosten aan een commerciële partij. De verduurzaming van de gebouwen van de overheid en het maatschappelijk vastgoed is complexer, dit moet volledig uit publieke middelen betaald worden en de terugverdienopties van deze investeringen zijn beperkt. Ook speelt bij gebouwen in het algemeen dat het vaak relatief unieke objecten zijn, of erfgoed dat erg oud is, en dat de verduurzaming hiervan maatwerk vraagt. Maatwerk betekent vaak hoge kosten (per m² t.o.v. een standaard gebouw) en veel arbeidsuren.

Tabel 19. Haalbaarheidsinschatting per lens voor de sector Gebouwde omgeving

Lens	Beoordeling haalbaarheid
Beleid	Oranje
Economisch	Oranje
Sociaal maatschappelijk en cultureel	Oranje
Milieukundig	Groen
Technologisch	Groen
Infrastructureel	Oranje
Ruimtelijk	Groen

⁶⁸ De bandbreedte beschikbaarheid groen gas bedraagt 1,3 tot 1,9 Mton volgens II3050-NAT 2040 en 2050. 1,3 Mton gebruiken we voor de middenwaarde en 1,9 Mton voor de onderwaarde en 0,7 Mton voor de bovenwaarde.

⁶⁹ Inschatting dat een deel van de woningen die later overstappen op een warmtenet en/of HWP (samen 10% van de 20%) zijn geïsoleerd tot de standaard, dit is een besparing van 32% volgens TNO en CPB (Inkomenseffecten van woningisolatie naar de isolatiestandaard, 2024).

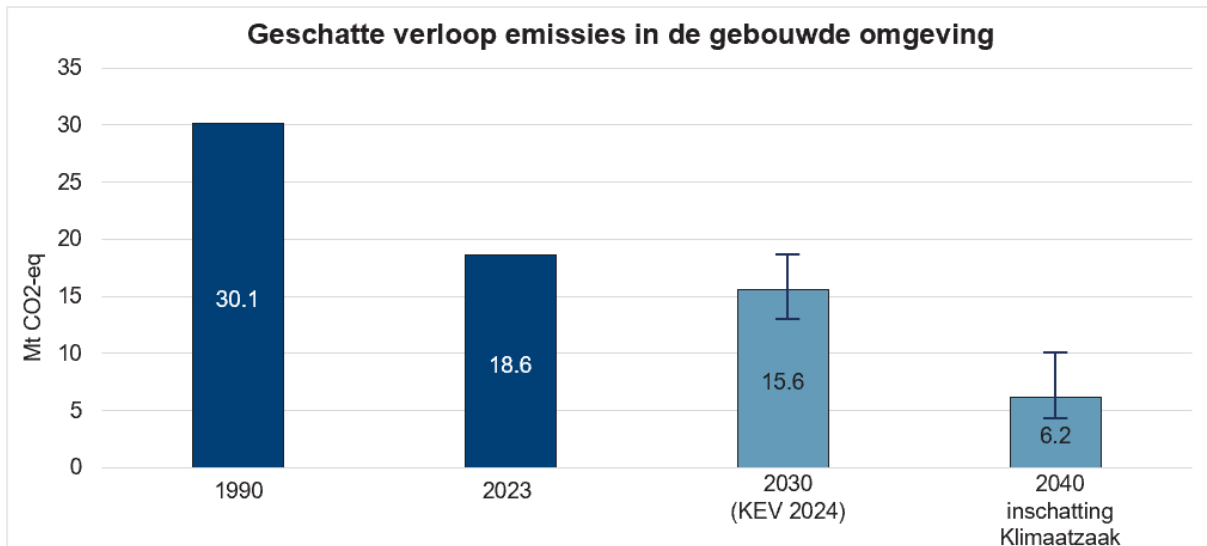
Om zowel de verduurzaming van woningen als gebouwen te versnellen gaan we ervanuit dat al de volgende acties ondernomen moeten worden:

Tabel 20. Voorgestelde beleidsmaatregelen voor de sector Gebouwde Omgeving

Type	Beleidsvoorstel
Overig	Duidelijk en consistent beleid rondom gemeentelijke keuze voor warmteoplossing, financieringsmogelijkheden en daarmee ook vooruitzicht in de arbeidsmarkt.
Beprijzen	Anders inrichten van nettarieven, voor eerlijke kostenverdeling en stimulering efficiënt netgebruik
Stimuleren	Gerichte subsidies die betaalbaarheid waarborgen voor sociale huur
Stimuleren	Verdere uitrol warmtefonds, met aantrekkelijke rentes voor kwetsbare groepen en uitdagend te verduurzamen woningen
Stimuleren	Maatwerksubsidies (bijv. door 0% leningen) voor publieke gebouwen, zoals sportclubs
Stimuleren	Maatwerkoplossingen en ontzorging voor ouderen
Normeren	Verplichte hybride warmtepomp bij natuurlijke vervanging van CV-ketel, daar waar HWP als een tussen- of eindoplossing kan dienen.
Normeren	Isolatiernormering voor koopwoningen
Normeren	Huurwoningen (privé en corporatie) verplicht naar label B, ruim voor 2040
Normeren	Labelnormering voor kantoren en private utiliteitsgebouwen
Beprijzen	Verhoogde energiebelasting op aardgas, zodat overstap op een warmtenet een gelijk of goedkoper alternatief is. Houdt hierbij rekening met ingroei van ETS2, al heeft deze de eerste jaren waarschijnlijk een beperkt effect.

3. Wat is de omvang van de restemissies?

Wij verwachten dat een verdere reductie van de emissies zeker haalbaar is en gaan als middenwaarde uit van zo'n 6,2 Mton. De emissies nemen na 2040 verder af. Waarschijnlijk zijn er nog beperkt restemissies na 2045, aangezien na 2040 de meest kostbare en/of lastig te verduurzamen woningen en gebouwen aan de beurt zijn en/of de maximale beschikbaarheid van groen gas bereikt is. Dit betekent dat er ten opzichte van de andere sectoren nog aanzienlijke restemissies zijn en dat de restemissies ten opzichte van vandaag met twee-derde zijn afgenomen. Voor de restemissies dienen ETS2 rechten aangeschaft te worden aangezien anders elders in Europa emissie plaatsvindt. Daarnaast zijn additioneel negatieve emissies nodig om klimaatneutraal in 2040 te worden. Het is aan het Rijk om te bezien hoe deze extra negatieve emissies aangeschaft worden; dit kan aan de gebouwde omgeving opgelegd worden of vanuit algemene middelen.



Figuur 24. Geschatte verloop emissies in de gebouwde omgeving

De som van de beoordeling is **rood** voor woningen. Voor vier van de zeven lenzen is de beoordeling op dit moment **oranje**. Wij verwachten dat te veel verandering nodig is om de uitstoot in deze sector voldoende terug te brengen wanneer al deze uitdagingen bij elkaar worden opgeteld. Dit komt mede doordat het tempo van 350.000 woningen per jaar van het gas af vanaf 2025 niet realistisch is, vanwege een tekort aan technisch personeel (zie ook hoofdstuk 5 thema arbeid). Realisatie van netto 0 emissies in 2040 achten wij dan ook niet haalbaar. Gezien het verduurzamingstempo is het ook niet zeker of in 2045 de restemissies van deze sector 0 zijn. De restemissies in 2040 moeten door middel van ETS2 en door aanschaf van negatieve emissies, en handel in de certificaten daarvan, gecompenseerd worden.

De som van de beoordeling is **oranje** voor Gebouwen: Een aantal van de lenzen geven een positiever beeld voor de gebouwen dan voor woningen. Klimaatneutraliteit is waarschijnlijk niet haalbaar in 2040, echter 2045 lijkt wel haalbaar. Al betekent dit wel dat een deel van de oudere bedrijfshallen of monumentale kantoorpanden niet meer in gebruik zijn c.q. geen functie meer hebben waar aan een bepaalde warmtevraag moet worden voldaan. Deze panden staan leeg of hebben alleen tijdens de warmere maanden hun huidige gebruiksfunctie.

4.5.4. Geraadpleegde bronnen

- Ecorys, De financiële gevolgen van de warmtetransitie (2019)
- Netbeheer Nederland, Integrale Infrastructuurverkenning 3050 – II3050 (2023)
- Sectortafel gebouwde omgeving, Werkdocument Verduurzaming utiliteitsbouw (2018)
- PBL, Klimaat- en Energieverkenning 2024 (2024)
- PBL, Transitieverkenning klimaatneutraal 2050 (2024)
- PBL, Aardgasvrij een goed idee maar... (2024)
- PBL, Brede Welvaartsanalyse van woningisolatie (2023)
- NVDE, Warmtenetten in vergelijking met andere warmteoplossingen (2024)
- TNO, De energiearmoedekloof in Nederland (2024)
- PBL, Hoe naar een aardgasvrije gebouwde omgeving in 2050? (2024)

- PBL, De transformatieopgave in de gebouwde omgeving (2023)
- Berenschot, De keuze voor warmtenetten of andere warmteoplossingen (2024)
- CPB, Inkomenseffecten van woningisolatie naar de isolatiestandaard (2024)
- EZK, Kamerbrief aanpassingen bijmengverplichting groen gas (2024)
- Climate For Life, Whitepaper Netcongestie-arme nieuwbouwwijken (2024)
- Berenschot, Verkenning alternatief nettariestelsel kleinverbruik (2024)

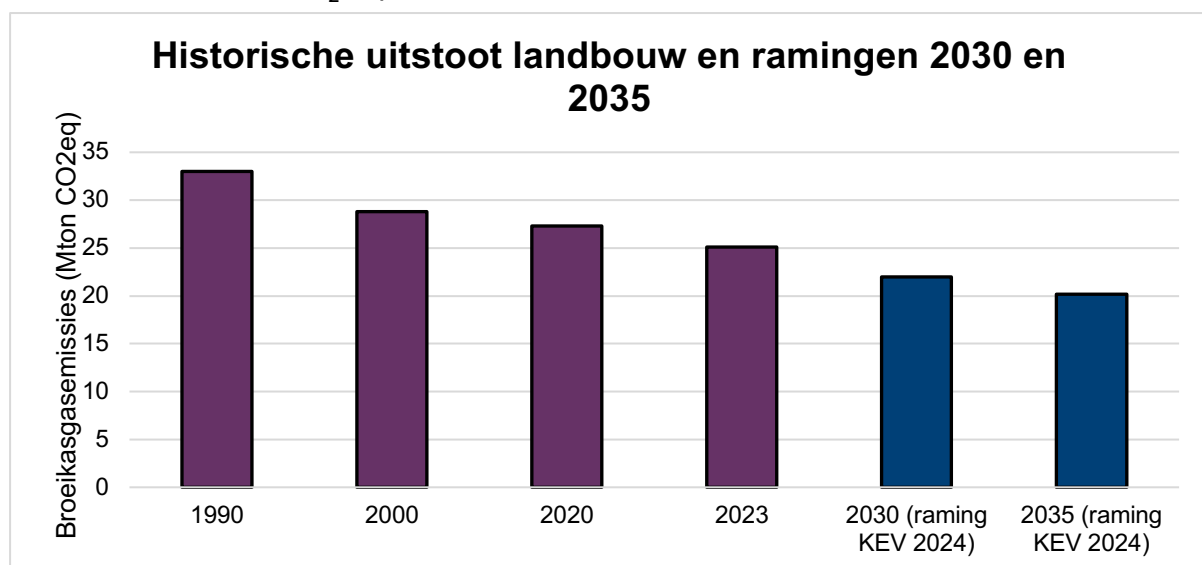
4.6. Analyse sector: Landbouw

4.6.1. Inleiding

De Nederlandse landbouwsector is divers en bestaat uit akkerbouw, veeteelt en (glas)tuinbouw. De uitstoot van broeikasgassen in deze sector is tussen 1990 en 2023 gedaald van 33 naar 24,5 Mton CO₂-equivalent, waarbij de grootste uitstoot wordt veroorzaakt door de veehouderij (met name rundvee), de toediening van mest en het energieverbruik in de glastuinbouw. Richting 2040 zal de sector nog significante emissies hebben door de aard van de processen die nodig zijn voor het produceren van landbouwproducten. De transitie naar een duurzamere landbouw kent verschillende uitdagingen: voor boeren zijn er significante economische uitdagingen door investeringen met onzekere opbrengsten, de glastuinbouw staat voor infrastructurele uitdagingen bij de overgang naar klimaatneutrale productie en er is breed maatschappelijk draagvlak en beleidskeuzes nodig voor de omvorming naar een meer plantaardig en extensief landbouwmodel. In het onderstaande wordt meer toelichting gegeven op de inschattingen vanuit de KEV, de I13050 studie en de trajectverkenning 2050 van PBL. Vervolgens wordt er met behulp van de lenzen beoordeeld op welke manier er emissiereductie mogelijk is binnen de landbouw en welke mogelijke knelpunten daarbij zijn.

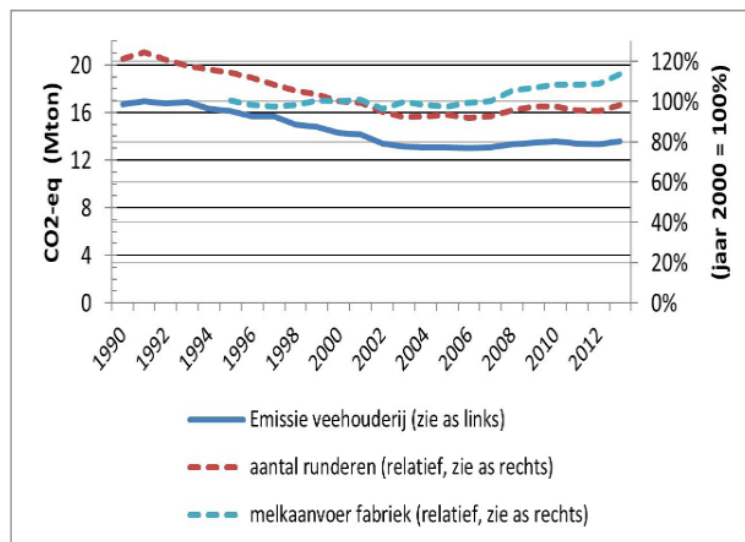
1. Ontwikkeling emissies 1990-2030

De Nederlandse landbouwsector wordt opgedeeld in een energetisch gedeelte (vooral energievraag van de glastuinbouw) en een niet-energetisch gedeelte (vooral veehouderij en bemesting). De emissies door landgebruik (LULUCF) vallen hier niet onder en worden in het volgende hoofdstuk behandeld. In 1990 bedroeg de uitstoot van de gehele landbouwsector 33 Mton CO₂-equivalent. Van de 33 Mton was 7,6 Mton afkomstig uit energiegerelateerde bronnen (met name glastuinbouw) en 25,5 Mton uit niet-energetische bronnen (zoals methaanemissies veehouderij en lachgasemissies van bemesting). De emissies zijn tussen 1990 en 2022 gedaald, grotendeels door een verkleining van de rundveestapel en de invoering van mestbeleid. In 2023 bedroegen de emissies 24,5 Mton CO₂-equivalent.



Figuur 25. Historische uitstoot sector landbouw en prognose vanuit de KEV 2024 voor 2030 en 2035.

Het niet-energetische deel van de emissies wordt vooral veroorzaakt door veehouderij en mesttoediening. Veevastapelgerelateerde emissies bedragen door de jaren heen tussen de 13-17 Mton CO₂-equivalent, waarbij de rundveestapel met meer dan 10 Mton de grootste bron vormt. De uitstoot van methaan loopt vrijwel parallel met de omvang van de rundveestapel en minder met factoren zoals melkproductie, zoals te zien is in Figuur 26 (RVO, 2016). Het aantal runderen daalde van 4,9 miljoen in 1990 naar 3,7 miljoen in 2006, waarna een stijging plaatsvond tot 4,3 miljoen in 2016. In 2022 stond de rundveepopulatie op 3,8 miljoen. Hoewel er verschillende ideeën zijn om de uitstoot te verminderen, zoals het gebruik van aangepast veevoer, innovatieve stallen en kennisontwikkeling rond pensfermentatie, hebben deze ideeën tot nu toe niet tot significante emissiereducties geleid.



Figuur 26. Emissies veehouderij en grootte van de rundveestapel door de jaren heen. De emissies volgen de lijn van het aantal runderen. Figuur overgenomen van RVO (2016), figuur 7.

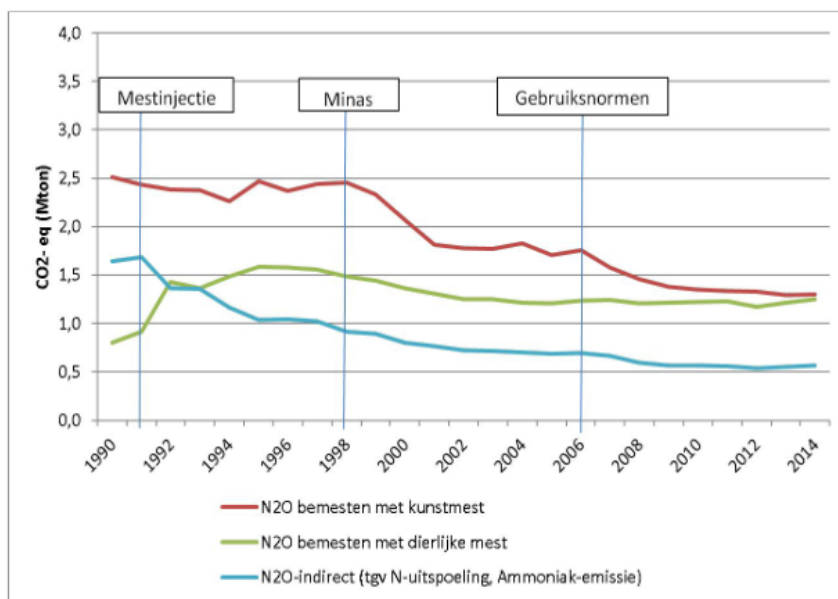
Een tweede grote bron van uitstoot is de toediening van meststoffen, met name dierlijke mest en kunstmest. Deze mest wordt op het land toegediend om de gewassen van diverse nutriënten te voorzien. Door bodemprocessen breekt het bodemleven zoals wormen, bacteriën en schimmels de aangevoerde mest af tot onder andere stikstofhoudende stoffen zoals nitraat en lachgas. Lachgas vervluchtigd en draagt daarbij direct bij aan het broeikasgaseffect.

In de Figuur 27 worden de emissies lachgas uit bemesting geduid. Vooral nationale en Europese regelgeving heeft de emissieontwikkeling beïnvloed. In 1991 werd emissiearme mestinjectie verplicht gesteld. Dit leidde echter tot een sterke toename van lachgasemissies door bodemprocessen. Het mineraalaangiftesysteem (MINAS), geïntroduceerd in 1998, leidde tot een vermindering van de algehele stikstoftoediening. In 2006 werden gebruiksnormen, een maximale hoeveelheid mest per gewas, ingevoerd die de dalende trend in emissies verder hebben voortgezet.

De uitstoot in het energiegedeelte van de landbouw, de glastuinbouw, is vrijwel constant gebleven sinds het jaar 1991. Deze energie-intensieve sector vereist aanzienlijke hoeveelheden warmte en licht voor de teelt. In de periode rond 2005 is de

warmtekrachtkoppeling (WKK) een belangrijk onderdeel van de bedrijfsvoering geworden. WKK-systemen leveren naast warmte ook elektriciteit en CO₂, die in de kas goed benut kunnen worden. Hoewel de totale emissies stabiel zijn gebleven, is de sector sterk geïntensiveerd (meer productie) en is de energiebehoefte per m² en per product aanzienlijk gedaald. Daarnaast is de WKK met de verkoop van elektriciteit een onderdeel van het verdienmodel van de tuinders geworden.

Tot slot wordt in de emissieregistratie een kleine extra post opgenomen onder overige niet-energetische CO₂, bestaande uit 0,1 Mton voor kunstmestgebruik en 0,2 Mton voor indirecte emissies van NMVOC's (niet-methaan vluchtige organische stoffen).



Figuur 27. Emissies uit bemesting door de jaren heen. De emissies zijn sterk afhankelijk van het mestbeleid dat gevoerd is. Figuur overgenomen van RVO (2016), figuur 9.

Het PBL verwacht in de KEV2024 dat de uitstoot in de landbouwsector tegen 2030 zal dalen naar 22 Mton CO₂-equivalent (bandbreedte van 20,0 tot 24,7 Mton). Deze afname wordt pas na 2025 voorzien, aangezien er tussen 2022 en 2025 een lichte stijging van de emissies wordt verwacht. De resterende emissies in 2030 blijven echter hoger dan de sectorale doelstelling van 18,9 Mton.

2. Transitie sector 2030-2050 (II3050-NAT)

In het Nationaal Leiderschap-scenario uit de II3050v2-studie is de aandacht voor de landbouwsector beperkt, met uitzondering van de glastuinbouw. Dit komt doordat de sectorale emissies vooral afkomstig zijn uit niet-energetische bronnen, die buiten het directe domein van de integrale energiesysteemverkenning vallen. Voor de glastuinbouw is wel een doorrekening gemaakt. In 2050 wordt de glastuinbouw geacht emissievrij te zijn. In het traject hiernaartoe zijn er nog circa 1,3 Mton aan emissies in 2040.

Voor de II3050v22 scenario's tot 2050 zijn echter wel een globale schattingen gemaakt van de restemissies, omdat deze van invloed zijn op de benodigde negatieve emissies en de bijbehorende extra energievraag. In deze inschatting worden de restemissies geraamd op 9 Mton CO₂-eq in het jaar 2050. Dit is inclusief landgebruik.

Omdat de analyse in de II3050v2-studie beperkt is, maken wij in het vervolg van dit gedeelte gebruik van een uitgebreider toekomstbeeld dat aansluit bij de II3050-scenario's, maar gedetailleerder is uitgewerkt. Het eindbeeld is gebaseerd op een visie van Urgenda op het Nederlandse landbouw- en voedselsysteem, zoals beschreven in het boek *Landinzicht*. Het eindjaar van deze visie is 2035, waardoor er geen sprake is van een 'versnelling'. Dit scenario geeft een integraal overzicht van het landbouw-, verwerkings- en voedselsysteem in Nederland, doorgerekend met het door Kalavasta ontwikkelde Agri-food Transition Model⁷⁰ (ATM). Het Urgenda scenario streeft naar een nieuwe, gezonde balans voor de bodem, boeren, gewassen, vee, mens, milieu en natuur.

In dit scenario wordt de veestapel afgestemd op lokaal beschikbare reststromen en grasland. Zowel de dierlijke als plantaardige productie wordt 20% minder intensief, met aandacht voor dierenwelzijn, bodemgezondheid, fors minder pesticidengebruik en een minder intensieve nutriëntenvoorziening. Om de kringlopen te sluiten wordt ook menselijke mest gebruikt op de akkers. De productie en consumptie van (dierlijke) producten worden bovendien beter op elkaar afgestemd. Op dit moment liggen de productie en consumptie van landbouwproducten binnen Nederland ver uit elkaar⁷¹, in het scenario worden deze dus dichters naar elkaar toe gebracht.

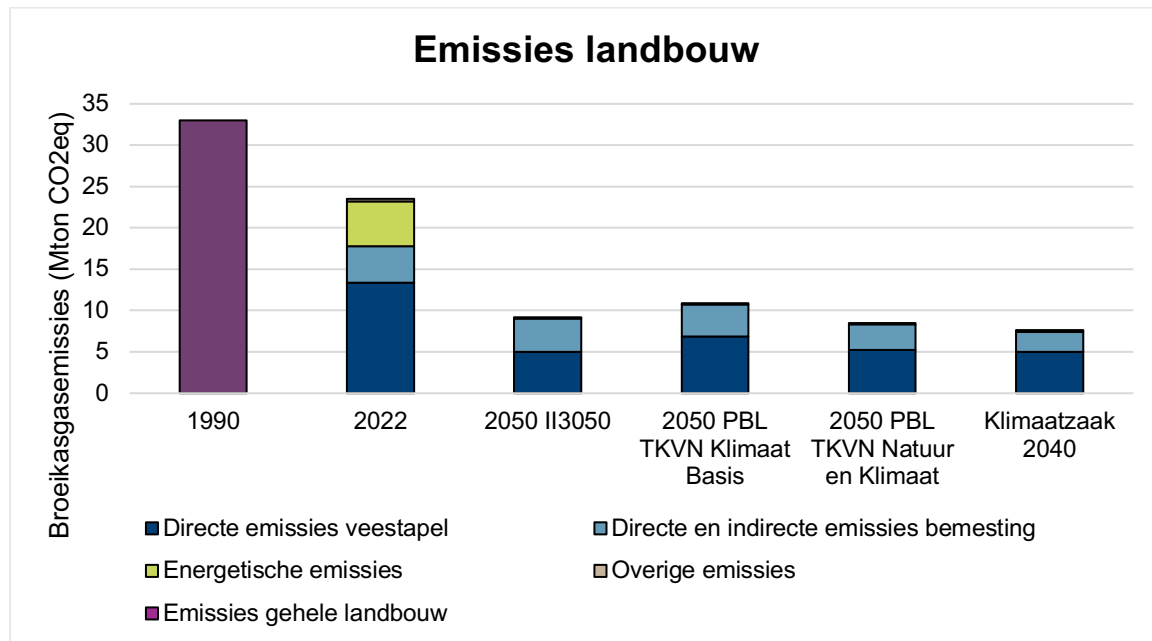
Deze aanpassing aan lokaal beschikbare reststromen en grasland leidt tot een reductie van de veestapel met ongeveer 50% voor rundvee en 80% voor varkens en kippen, waarbij de intensiteit van de productie eveneens met 20% daalt. Dit laatste betekent minder opbrengst per dier. Hierdoor nemen de methaanemissies evenredig af, zowel door de krimp van de veestapel als de lagere intensiteit (zowel door pensfermentatie als mest). De resterende emissies (4,2 Mton) zijn grotendeels toe te schrijven aan de rundveestapel. Aanvullende vermindering door wijzigingen in veevoer zijn mogelijk, maar moeilijk te kwantificeren en daarom niet meegenomen. Emissies van overige dieren (zoals schapen en geiten) dalen van 0,3 naar 0,2 Mton, en emissies van huisdieren zoals paarden blijven rond de 0,2 Mton.

De gewasproductie verschuift meer naar teelten voor directe humane consumptie ten koste van de productie van veevoer of andere doeleinden. Daarnaast worden 142.000 hectare aan bomen geplant, verdeeld over bestaande permanente graslanden (een equivalent aan 100.000 ha boomgaard), voedselbossen (50.000 ha), en nieuwe notenbomen, met name walnoot en hazelnoot (42.000 ha). Een derde van het veenweidegebied wordt ingezet voor extensieve veeteelt, een derde voor natte teelt en een derde voor natuur. Dit aspect wordt verder toegelicht in het hoofdstuk over landgebruik.

⁷⁰ <https://agrifoodtransitionmodel.com>

⁷¹ Voor veel dierlijke producten is de Nederlandse productie driemaal zo hoog als de binnenlandse consumptie.

Met deze visie wordt de landbouwemissie geraamd op 7,6 Mton CO₂-eq, zoals weergegeven in onderstaande Figuur 28. Ter vergelijking worden ook andere emissieramingen getoond. Deze 7,6 Mton is exclusief het landgebruik zoals de bomenaanplant die hierboven is beschreven. Deze komen in het volgende hoofdstuk aan bod.



Figuur 28. Emissies van de landbouwsector voor 1990 en 2022 en prognoses vanuit verschillende studies voor de emissies richting 2050.

Hoewel dit scenario een aanzienlijke krimp van de veestapel veronderstelt, biedt het een conservatieve schatting van de resterende emissies, zonder grote additionele effecten of andere ingrijpende wijzigingen. Dit maakt de inschatting in onze ogen robuust.

Een dergelijke transitie vereist echter wel maatschappelijk draagvlak en beleidskeuzes om de landbouw in Nederland om te vormen naar een plantaardiger en extensiever model. Het recente rapport 'Wat we gemeen hebben' van De Boer en Gosselink laat zien dat er, ondanks de soms gepolariseerde discussies, breed draagvlak bestaat voor een aantal fundamentele veranderingen in de landbouw (De Boer en Gosselink, 2024). In het rapport worden vijftien recente visies over de Nederlandse landbouw geanalyseerd en besproken. Er is brede consensus dat een gezonde bodem de basis vormt voor een duurzaam voedselsysteem, dat het gebruik van gewasbeschermingsmiddelen sterk moet worden beperkt, en dat dierlijke mest zoveel mogelijk regionaal moet worden benut. Ook is er steun voor een transitie naar meer plantaardige eiwitten in ons dieet en erkenning dat iedere schakel in de keten, inclusief de boer, een eerlijke boterham moet kunnen verdienen. Wel bestaan er nog verschillen van inzicht over bijvoorbeeld de precieze rol van Nederland in de wereldvoedselvoorziening en de schaal waarop kringlopen gesloten moeten worden. Het rapport onderstreept dat er meerdere wegen naar verduurzaming leiden - van strokenteelt tot precisielandbouw - en dat deze diversiteit aan oplossingsrichtingen moet worden omarmd. Dit biedt een constructieve basis voor het vormgeven van de transitie in de landbouw, die in het kader van emissiereductie nodig zal zijn.

3. Transitiepad volgens PBL TVKN

In het TVKN wordt gebruik gemaakt van een achtergrondrapport dat specifiek ingaat op emissiereductie in de landbouw. Daarin worden drie trajecten gepresenteerd: Klimaat Basis, Klimaat Plus, en Natuur & Klimaat. Deze trajecten verschillen in hun aanpak en maatregelen om broeikasgasemissies te reduceren, met de focus op technologische maatregelen, structurele aanpassingen in de landbouw en natuurlijke oplossingen. In de TVKN worden vervolgens alle drie de trajecten besproken, maar in de integrale trajecten in het hoofdrapport wordt uitgegaan van Klimaat Basis. Vervolgens is de landbouwsector met deze aannames in het OPERA model ingeladen, wat heeft geleid tot verschillende emissies binnen de integrale trajecten van de TVKN. In het onderstaande focussen we ons meer op de drie Klimaat Basis, Klimaat Plus, en Natuur & Klimaat die in de achtergrondstudie genoemd worden.

In de verschillende trajecten wordt uitgegaan van bewezen technieken in de sector. De trajecten kenmerken zich met de volgende eigenschappen:

1. Klimaat Basis

- Maatregelen: Beperkte aanpassing van de landbouwstructuur, met een sterke focus op technische maatregelen en managementoplossingen. Dit omvat technologieën zoals mestvergistings, stalmaatregelen en aanpassingen in veevoer.
- Veestapel: Krimp van de veestapel met 25% in 2050.
- Emissies in 2050: Rond de 11,0 megaton CO₂-equivalenten, waarbij methaanuitstoot wordt teruggebracht van 13,2 naar 6,9 megaton

2. Klimaat Plus

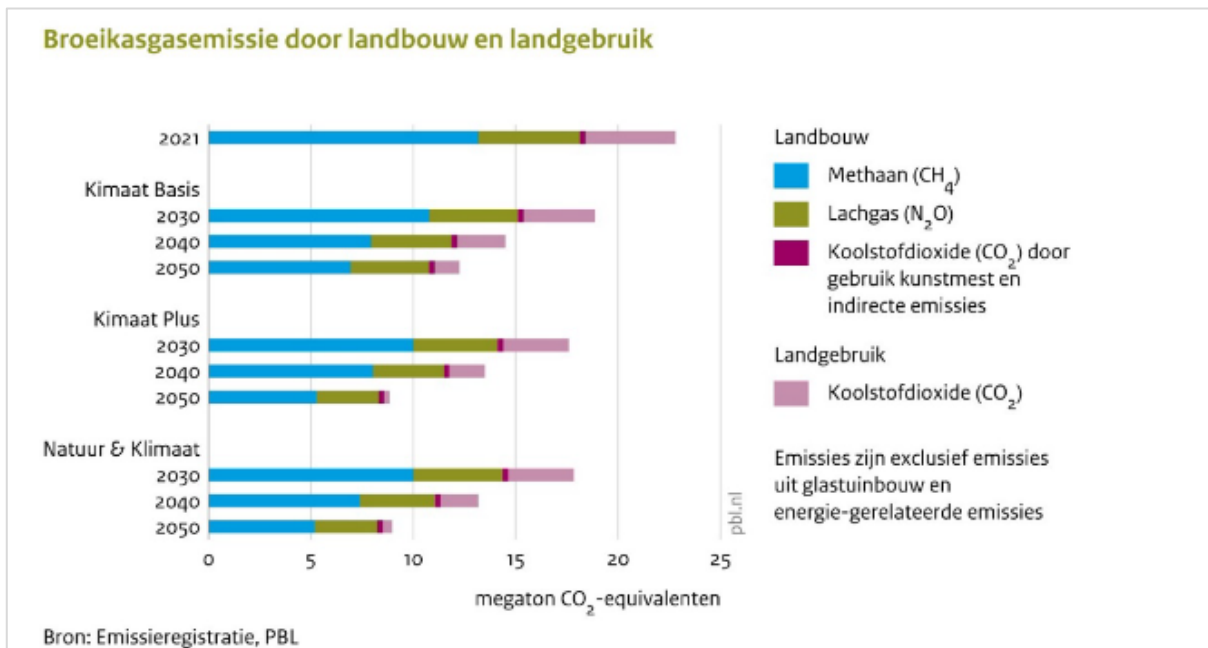
- Maatregelen: Sterkere aanpassing van de landbouwstructuur dan bij Klimaat Basis, gecombineerd met technische maatregelen. Er is ook meer focus op landgebruik, zoals extra bosaanplant en gedeeltelijke vernatting van veengebieden.
- Veestapel: Krimp van de veestapel met 40-50% in 2050.
- Emissies in 2050: 8,6 megaton CO₂-equivalenten, met een methaanuitstoot van 5,3 megaton

3. Natuur & Klimaat

- Maatregelen: Forse structurele aanpassingen in de landbouw met een sterke nadruk op biodiversiteit, dierenwelzijn en landschapskwaliteit. Minder inzet op technologische oplossingen en meer focus op natuurherstel, zoals een groter areaal bos en vernatting van veengebieden.
- Veestapel: Krimp van de veestapel met 50-60% in 2050.
- Emissies in 2050: 8,5 megaton CO₂-equivalenten, waarbij methaan wordt teruggebracht naar 5,2 megaton

Afhankelijk van het gekozen traject zijn de emissies ongeveer 8,5-11 Mton CO₂eq exclusief de glastuinbouw. PBL gaat er echter vanuit dat de glastuinbouw in 2050 ook geheel klimaatneutraal is en dat er voldoende mogelijkheden zijn voor de sector om dat te bereiken.

De trajecten hebben een implementatiepad en daardoor verschillen de emissies in de jaren 2030, 2040 en 2050. De inschattingen van de emissies worden getoond in onderstaande Figuur 29. We constateren dat in de rapportage geen toelichting lijkt te worden gegeven op het gekozen gefaseerde implementatiepad. Hoewel in sommige gevallen technologische overwegingen een rol kunnen spelen bij de gefaseerde invoering van maatregelen, lijkt er vaak geen expliciete reden voor deze fasering te worden vermeld. We gaan ervan uit dat dit gefaseerde pad is gekozen vanwege de complexiteit van de structurele veranderingen, het einddoel van 2050 en de noodzaak om de sector voldoende tijd te geven om zich geleidelijk aan te passen aan het gewenste eindbeeld.



Figuur 29. Emissies van de drie trajecten in PBL (2024c). Figuur overgenomen uit de bijbehorende rapportage.

4.6.2. Beoordeling haalbaarheid

De haalbaarheidsbeoordeling is hier anders dan in de vorige hoofdstukken. Omdat we uitgaan van het Urgenda-scenario met als eindjaar 2035, bespreken we hierin de op welke manier de doelstellingen uit het scenario bereikt kunnen worden en welke mogelijke knelpunten er verwacht worden. Voor de haalbaarheidsbeoordeling onderscheiden we de drie belangrijkste emissiebronnen binnen de sector: 1) de directe emissies van methaan en lachgas van de *veestapel*, 2) emissies door directe en indirecte *bemesting* en 3) de energetische emissies van de *glastuinbouw*, inclusief methaanslip. Bij de laatste kleine post overige niet-energetische emissies verwachten we het gedeelte door kunstmestgebruik te kunnen dalen naar 0 Mton door zorgvuldig te kiezen voor stikstofmeststoffen met ammoniumverbindingen in plaats van ureumverbindingen. Deze wordt verder niet besproken in de onderstaande analyse.

1. Beleid

Veestapel

In het Urgenda-scenario wordt uitgegaan van een aanzienlijke krimp van de veestapel. In het scenario is gekozen om zoveel mogelijk gewassen te produceren voor humane

consumptie. Dit betekent dat veestapel gevoerd wordt met hoofdzakelijk gras en reststromen, waardoor er zo min mogelijk primaire gewassen voor veevoer worden ingezet. Op basis van de doorgerekende inschattingen voor reststromen en beschikbaar grasland, leidt dit in het scenario tot een verwachte krimp van 50% voor de rundveestapel en 80% voor varkens en kippen. Verder ligt de nadruk op lokale veevoerproductie zonder krachtvoer voor rundvee.

Tussen 2000 en 2023 is het aantal graasdierbedrijven al gehalveerd (CBS, 2024). Als deze trend zich doorzet, zou dit kunnen leiden tot een natuurlijke afname van ongeveer 30% in de veestapel tegen 2040, mits de productierechten niet worden overgedragen. Bovendien bestaan er stoppersregelingen die mogelijk de komende jaren verder uitgebreid worden. Voor een grotere krimp, zoals het Urgenda-scenario voorstelt, zal echter aanvullende beleidssturing nodig zijn, met name voor de varkens- en pluimveesector. Politieke sturing zal essentieel zijn om deze reductie te realiseren, hoewel er deels sprake kan zijn van natuurlijk verloop.

Dit zijn geen gemakkelijke maatregelen en bij de invulling ervan is een zorgvuldige afweging nodig om zowel milieuwinst als sociaaleconomische rechtvaardigheid te waarborgen. Er zijn verschillende mogelijke manieren om tot een kleiner aantal dieren te komen. Het aanpassen van productie- en emissierechten is één van de opties, waarbij het essentieel is om boeren voldoende tijd, perspectief en middelen te geven voor deze transitie. Een andere route is het ondersteunen van extensivering van de veehouderij, wat kan bijdragen aan een lagere belasting van de natuur en een verbeterde milieukwaliteit. Bij doelsturing op landgebruik kan de boer zelf beslissen welke maatregelen het beste passen om aan emissiereductiedoelen te voldoen, wat meer ruimte biedt voor maatwerk. Het bevorderen van grondgebondenheid zorgt ervoor dat het aantal dieren beter wordt afgestemd op de beschikbare grond, wat bijdraagt aan een evenwichtig en duurzaam landgebruik. Ketenpartijen kunnen bij alle bovenstaande onderdelen een belangrijke rol spelen, bijvoorbeeld door het belonen van CO₂-reductie via een toeslag op het product zoals nu al gebeurt voor melk door FrieslandCampina. Tot slot zou ook onteigening overwogen kunnen worden, bijvoorbeeld als uiterste maatregel in gebieden waar natuurherstel essentieel is. Het combineren van verschillende instrumenten kan nodig zijn om de doelen te bereiken, waarbij het cruciaal is om dit in nauwe samenwerking met de agrarische sector vorm te geven en oog te hebben voor hun kennis, belangen en uitdagingen.

Aanvullend beleid kan verder gericht zijn op het versterken van kringlopen en verminderen van milieubelasting. Door normen in te voeren voor veevoer kan worden vereist dat boeren een bepaald percentage reststromen in het voer opnemen en deze van lokale bronnen betrekken. Dit onderdeel kan goed samengaan met meer grondgebonden melkveehouderij. Zo kan de veestapel afgestemd worden op de regionale beschikbaarheid van gras en reststromen, wat bijdraagt aan het sluiten van kringlopen op kleinere schaal. Daarnaast zou het gebruik van veevoeradditieven gestandaardiseerd kunnen worden. Dit zit niet in het huidige scenario en we verwachten dat meer onderzoek zal uitwijzen op welke manier veevoeradditieven een rol kunnen spelen in het reduceren van emissies. Verder kunnen instrumenten zoals een CO₂-heffing voor de sector, een consumentenheffing, of andere vormen van 'true pricing' helpen om de externe kosten

van dierlijke eiwitten door te berekenen aan de consument. Supermarkten kunnen verplicht worden een minimaal percentage plantaardige eiwitten aan te bieden, in lijn met initiatieven zoals het streven van Albert Heijn om in 2030 60% plantaardige eiwitten te verkopen.

Tot slot kunnen uitvoering van maatregelen juridische uitdagingen opleveren in relatie tot EU-regelgeving, met name bij het uitbreiden van stoppersregelingen of subsidies die mogelijk als staatssteun worden aangemerkt. Deze uitdagingen zijn te ondervangen door vroegtijdig overleg met de Europese Unie. Naar verwachting kan het merendeel van de regelgeving worden uitgevoerd, waarbij voor enkele specifieke maatregelen zoals nieuwe subsidies en stoppersregelingen een staatssteuntoets noodzakelijk is. Dit is een gebruikelijke procedure binnen de sector bij nieuwe regelgeving en is eerder succesvol toegepast bij de stoppersregelingen LBV en LBV-plus.

Bemesting

Via gewasnormen kan nu al worden gestuurd op de totale nutriëntenvoorziening, maar niet op specifieke bemestingsmethoden. Voor grasland, dat twee derde van het landbouwoppervlak beslaat, zou een combinatie van dierlijke mest en kruidenrijk grasland kunstmest grotendeels overbodig kunnen maken. Het uitbreiden van gewasnormen om kruidenrijk grasland te stimuleren en kunstmestgebruik te beperken is een optie. Een overstap naar biologische teelt kan eveneens bijdragen aan een lagere mestbehoefte vanwege de lagere productiedruk. Daarnaast zouden nieuwe technieken zoals RENURE of precisielandbouw kunnen zorgen voor een meer efficiënte en snelle levering van nutriënten, waarbij ook mogelijk minder kunstmestgebruik nodig is. Deze onderdelen zitten echter niet in het scenario, maar zouden ook bij kunnen dragen aan een versnelling van de transitie in de sector. Hiervoor zal eerst nog onderzoek nodig zijn om te bepalen welke invloed het toepassen van deze technieken heeft.

Glastuinbouw

Voor de glastuinbouwsector is recent veel beleid ontwikkeld, met mogelijk meer maatregelen op de agenda, om de doelen voor de energietransitie te behalen. De sector heeft samen met de overheid een convenant gesloten om tegen 2040 klimaatneutraal te zijn.

Belangrijke maatregelen zijn onder meer de afschaffing van de WKK-vrijstelling en het verlaagde tarief voor de glastuinbouw, wat zal resulteren in een stijging van de aardgasbelasting naar 18-30 cent per m³ tegen 2030. Dit betekent een stijging van 50-100% in kosten voor aardgas. Daarnaast is er een sectorspecifiek CO₂-heffingssysteem voor elke uitgestoten eenheid CO₂. Toekomstige stappen kunnen onder andere bestaan uit deelname aan ETS2 en opname van de sector in de bijmengverplichting voor groen gas in het netwerk, waarmee de overstap naar duurzame energiebronnen wordt gestimuleerd.

Daarbij zijn er ook kostenverlagende maatregelen. De SDE++-subsidie kent sinds 2023 een specifieke regeling voor warmtepompen en een aparte categorie voor geothermie. Andere subsidies, zoals de SWIG en het onderzoeksprogramma 'Kas als Energiebron,' ondersteunen innovaties in energiebesparing. De overheid heeft de afgelopen jaren dus

aanzienlijke inspanningen geleverd om beleid te ontwikkelen en de sector te ondersteunen bij de energietransitie.

Wel is het hierbij van belang dat er toegang komt voor tuinders tot deze alternatieve warmtebronnen. De sector kan goed verduurzamen, maar hiervoor zijn bronnen als geothermie, restwarmte en warmtepompen nodig die afhankelijk zijn van infrastructuur. Daarbij is het aanboren van een geothermiebron risicovol indien er bijvoorbeeld te weinig afnemers zijn of de boring kostbaarder is dan van tevoren ingeschat. De overheid kan hier met flankerend beleid extra ondersteuning bieden door bijvoorbeeld garant te staan voor boringen, het warmtenet financieel te ondersteunen en financieel te ondersteunen in het oplossen van de netcongestie.

Beoordeling: **groen**

Er lijken beleidstechnisch geen belemmeringen te zijn om te versnellen in de landbouwsector. Wat betreft de glastuinbouw is het beleid al (grotendeels) aanwezig. Voor de veestapel en bemesting is additioneel beleid nodig, waarbij gelet moet worden op staatsteunregels, maar er verder geen belemmeringen zijn. Als de wil er is, kan dit beleid ingezet worden. Dit beeld wordt bevestigd door het onlangs getekende landbouwakkoord in Denemarken, waarin 15% van de landbouwgrond wordt omgezet in natuur en er een CO₂-heffing komt voor de landbouw om broeikasgasemissies sterk te verminderen.

2. Economisch

Veestapel

De belangrijkste veranderingen in dit scenario met betrekking tot de economische lens zijn de krimp van de veestapel en een verminderde productie. Een krimp hoeft echter niet per se economische gevolgen te hebben voor individuele bedrijven. Zoals hierboven beschreven zou het natuurlijke verloop in de sector al leiden tot 30% vermindering, mits de productierechten niet worden overgedragen. Voor de blijvende boeren betekent dit dus geen andere bedrijfsvoering. De krimp in het scenario is echter nog groter dan deze trend suggereert. Het is waarschijnlijk dat er daarom aanvullende sturing nodig is, vooral voor een sterkere afname van de varkens- en pluimveestapel. Dit kan zowel betekenen dat er minder dieren per boer zijn (extensiever) of dat er meer bedrijven samenvoegen. Daarbij wordt er in het scenario meer extensief geproduceerd dan vandaag de dag, wat wel een grote impact heeft op de bedrijfsvoering.

De transitie naar duurzame landbouw heeft in algemene zin een grote impact op het verdienmodel van veehouders. Het Nationaal Klimaatplatform heeft hier recent een publicatie over geschreven op basis van de huidige beschikbare literatuur en inzichten van diverse experts (NKP, 2024). Voor een individuele veehouder kunnen nieuwe voermethoden en productiebeperkingen significant effect hebben op het verdienmodel. Zo kosten voeradditieven om methaanemissies te verminderen ongeveer €1 per 100 kilo melk. Lokale voerproductie kan duurder zijn, maar bij het gebruik van reststromen kan juist een kostenvoordeel ontstaan.

Hoewel extensieve productie minder inkomsten kan betekenen - voor melkveehouders gemiddeld €150-370 per hectare per jaar - zijn er diverse manieren om dit op te vangen. Boeren kunnen bijvoorbeeld extra inkomsten genereren door milieudiensten te leveren zoals natuurbeheer, waterbeheer of CO₂-opslag. De vergoeding voor agrarisch natuurbeheer (ANLb) dekt in principe de meerkosten en gedeerde inkomsten, maar de huidige looptijd van 6-7 jaar is vaak te kort voor een stabiel verdienmodel. Een periode van 10-18 jaar zou beter aansluiten bij de investeringscyclus van boeren.

Daarnaast kunnen boeren aanvullende nevendiensten ontwikkelen. Bedrijven met verbredingsactiviteiten zoals zorglandbouw (€91.000), verkoop aan huis (€70.000) of werk voor derden (€81.000) behalen een hoger bedrijfsresultaat dan bedrijven zonder deze activiteiten (€66.000).

Een andere optie is biologisch werken, waardoor de inkomsten per product stijgen. Hoewel omschakeling initieel investeringen vraagt en een overgangperiode van minimaal twee jaar kent, was het inkomen per arbeidsjaareenheid tussen 2015-2022 voor biologisch vergelijkbaar met gangbare bedrijven in de veehouderij en het was het structureel hoger in de akkerbouw. Andere strategieën zijn schaalvergroting met extensieve methoden of het werken binnen alternatieve boerderijmodellen zoals Herenboeren.

Voor een succesvolle transitie zijn twee randvoorwaarden cruciaal. Ten eerste is langetermijnzekerheid over beleid en vergoedingen essentieel, omdat boeren anders niet durven investeren. Ten tweede moet de meerwaarde van duurzame productie beter worden beloond in de markt via 'true pricing' waarbij ook maatschappelijke kosten en baten worden meegewogen. Subsidies kunnen eveneens helpen om investeringen te bekostigen. Ideeën hierover zijn opgenomen in het 'zevenvinkjes voorstel' in de visie Landinzicht.

Bemesting

Binnen het scenario worden de kosten voor nutriëntenvoorziening over het algemeen lager ingeschat. Dit komt met name doordat er minder dierlijke mest en kunstmest gebruikt wordt omdat er meer wordt overgestapt op vlinderbloemigen en kruidenrijk grasland. Deze laatste twee binden stikstof uit de lucht die vervolgens beschikbaar wordt gesteld aan de planten. Pilots op kruidenrijk grasland (1001 ha) laten zien dat deze methoden vaak lagere kosten en hogere opbrengsten kunnen hebben.

Naast de overstap op meer plantaardige bemesting, is de productie van gewassen 20% lager waardoor er minder nutriëntenbehoeften zijn bij de gewassen. Netto levert dit dus kostenbesparingen op voor de bemesting.

Glastuinbouw

De glastuinbouwsector staat zelf achter het plan om tegen 2040 emissievrij te opereren. Er zijn diverse duurzame aanpassingen mogelijk, en dankzij subsidies zoals de SDE++ hoeven de kosten hiervan niet volledig door de sector gedragen te worden. Het huidige beleid zorgt voor stijgende kosten, bijvoorbeeld door de afschaffing van de vrijstelling van energiebelasting voor aardgas in de WKK. De WKK blijft naar verwachting nog enkele jaren

rendabel binnen het energiesysteem, maar op termijn zullen duurzame alternatieven voordeliger worden (PBL, 2024a; Berenschot en Kalavasta, 2024; Trinomics en BlueTerra, 2024). De glastuinbouwsector staat bekend om zijn innovatiekracht, en er wordt verwacht dat de sector door middel van nieuwe technieken en technologieën een gezond verdienmodel kan behouden in 2040.

Beoordeling: **oranje**

Economisch zijn er verschillende uitdagingen, waarbij de grootste is om met minder inputs en minder outputs een goed verdienmodel te realiseren. Dit is zowel voor de hele sector als voor individuele boeren. Voor individuele boeren is met name de productieverlaging per hectare (door o.a. extensivering) het lastigste om mee om te gaan. Een lagere opbrengst per hectare leidt tot economische uitdagingen. Dit betekent dat er andere verdienmethoden gevonden moeten worden via de keten, via nevendiensten of andere werkzaamheden (buiten het bedrijf). Subsidies kunnen hierbij ook een grote rol spelen en er zullen mogelijk fondsen nodig zijn voor de transitieperiode. Er wordt op dit moment veel onderzoek gedaan naar die mogelijkheden, omdat het waarschijnlijk is dat er in de veeteelt en akkerbouw op termijn anders verdiend moet gaan worden. Voor de glastuinbouw voorzien we geen grote economische problemen. De sector is hoogtechnologisch, staat ook bekend om zeer hoge kwaliteitsproducten en innovatiekracht en heeft zelf als doelstelling om emissievrij te zijn in 2040.

3. Sociaal-maatschappelijk en cultureel

Veestapel

Er bestaat maatschappelijk draagvlak voor een kleinere veestapel, mede vanwege de milieu-impact en het hoge aandeel exportproductie. Recente studies, waaronder 'Wat we gemeen hebben', pleiten voor een transitie naar meer directe voedselproductie voor menselijke consumptie (De Boer en Gosselink, 2024). Tegelijkertijd roept een verplichte krimp van de veestapel weerstand op, deels omdat dit de keuzevrijheid van boeren beperkt. Dit spanningsveld is momenteel onderwerp van intensief politiek debat.

Een helder landbouwbeleid met concrete doelen, waarbij boeren keuzevrijheid behouden in de uitvoering, kan perspectief bieden voor de sector. De verwachte daling van werkgelegenheid in de veehouderij kan worden gecompenseerd door nieuwe activiteiten op vrijkomende landbouwgrond, zoals plantaardige teelt. De verschuiving naar een meer biologische bedrijfsvoering kan zelfs leiden tot extra arbeidsplaatsen in de agrarische sector omdat er over het algemeen meer arbeid nodig is in biologische bedrijfsvoering.

Aangezien Nederland momenteel driemaal zoveel dierlijke producten produceert als het consumeert, hoeft een krimp van de veestapel niet direct gevolgen te hebben voor het Nederlandse consumptiepatroon. Door de internationale handel in landbouwproducten staat de binnenlandse productie grotendeels los van de binnenlandse consumptie.

Bemesting

De veranderingen in de nutriëntenvoorziening worden niet verwacht grote sociale of maatschappelijke gevolgen te hebben. Het gebruik van meer weidegang en kruidenrijk

grasland zal waarschijnlijk positief ontvangen worden vanuit een landschappelijk perspectief. Hierbij worden ook veel minder pesticiden gebruikt, wat waarschijnlijk door veel mensen ook positief ontvangen zal worden. Er worden verder geen aanzienlijke effecten verwacht op werkgelegenheid, vaardigheden of kosten en baten in de sector. Wel kan de overgang naar kruidenrijk grasland een aanpassing vragen van boeren, maar uit pilots blijkt dat veel boeren na ervaring met kruidenrijk grasland geneigd zijn dit vaker te gebruiken (LTO en Urgenda, 2023).

Een aspect dat mogelijk maatschappelijke acceptatie vereist, is het hergebruik van nutriënten uit menselijke ontlasting voor de landbouw. Tot ongeveer 1900 was dit gebruikelijk, maar is sindsdien met de opkomst van rioolssystemen verdwenen. Het kan misschien even wennen zijn om deze menselijke mest weer te gebruiken.

Glastuinbouw

De glastuinbouwsector staat bekend om haar hoogtechnologische aanpak en wordt regelmatig gezien als een uithangbord voor Nederlandse innovatie. Het streven naar klimaatneutraliteit is breed geaccepteerd en levert naar verwachting geen maatschappelijke discussie op.

Beoordeling: **groen**

Sociaal-maatschappelijk en cultureel lijkt er geen reden te zijn om deze visie te bewerkstelligen in 2040. Hoewel er weerstand is voor gedwongen uitkoop van boeren, zijn er veel andere maatregelen die ook uitgevoerd kunnen worden waarbij de boer zelf de leiding heeft in het proces. Daarnaast zijn het consumptie en productiesysteem in Nederland redelijk losgekoppeld waardoor de producten in de supermarkt nog steeds dezelfde kunnen zijn als vandaag de dag. Het landschapsbeeld zal verder niet veel veranderen, meer kruidenrijk grasland en minder dieren die wel langer buiten zijn. Het uiteindelijke beeld van een meer natuurinclusieve landbouw met een goed verdienmodel voor de boer, minder pesticidegebruik en meer biodiversiteit is naar verwachting een beeld wat positief ontvangen wordt.

4. Milieukundig

Veestapel

Een kleinere veestapel levert aanzienlijke voordelen op voor biodiversiteit, natuur en milieu. Waar technische maatregelen zoals veevoeradditieven slechts enkele specifieke emissies beperken, draagt een kleinere veestapel bij aan een algehele vermindering van emissies. Dit betreft niet alleen broeikasgassen zoals lachgas, maar ook ammoniak, nitraatuitspoeling en fijnstof.

Bij de discussie over broeikasgasemissies wordt soms het argument van een weglekeffect aangevoerd: minder dieren in Nederland zou kunnen leiden tot meer dieren elders. Omdat de Nederlandse veehouderij al jaren efficiënt is geoptimaliseerd, zou dit per saldo tot hogere emissies kunnen leiden. Dit effect hangt echter sterk af van ontwikkelingen in de wereldwijde consumptie. Bij dalende zuivelconsumptie zal het weglekeffect grotendeels uitblijven. Bij stabiele consumptie blijft er kans op weglek,

waarbij Nederlandse boeren hun opgebouwde kennis op andere locaties kunnen toepassen.

Voor andere milieufactoren, zoals stikstofdepositie en biodiversiteit, is het weglekeffect zeer beperkt of afwezig. Dit zijn vooral lokale uitdagingen die specifiek zijn voor de Nederlandse situatie, terwijl andere landen hier op hun eigen manier mee omgaan.

Bemesting

De stikstofemissies nemen in dit scenario af, wat bijdraagt aan een verbeterde milieupact. Daarnaast daalt de behoefte aan externe input, zoals meststoffen uit eindige bronnen als fosfaatmijnen, wat de duurzaamheid bevordert en het milieu verder ontlast.

Glastuinbouw

Met betrekking tot het streven naar klimaatneutraliteit worden vanuit milieuperspectief geen problemen voorzien.

Beoordeling: **groen**. Milieukundig zullen de aanpassingen een positief effect hebben.

5. Technologisch

Veestapel

Het Landinzicht-scenario is zo ontworpen dat het beperkt leunt op technologische interventies, met het oog op robuustheid en gedegen onderbouwing, vergelijkbaar met de TVKN-scenario's van het PBL. Als de krimp van de veestapel minder ingrijpend wordt en er meer nadruk komt te liggen op technologische oplossingen, dan zou dat aanvullende aandacht voor verdere ontwikkeling vereisen. Hiervoor lijkt echter nog voldoende tijd beschikbaar, zodat technische oplossingen zoals veevoeradditieven en verbeterde stalsystemen verder kunnen worden getest en geoptimaliseerd.

Bemesting

Kruidrijk grasland heeft in verschillende pilots bewezen effectief te zijn. Daarnaast biedt recycling van menselijke afvalstoffen via waterzuiveringsinstallaties een waardevolle aanvulling als meststof, al vraagt dit aandacht voor het verwijderen van ongewenste stoffen zoals medicijnresten. Hoewel grootschalige toepassing in Nederland nog beperkt is, heeft recent onderzoek van Wageningen laten zien dat menselijke urine succesvol kan worden gebruikt bij aardappelteelt (NOS berichtgeving, 2024).

Glastuinbouw

Voor de verduurzaming van de glastuinbouw zijn geothermie, restwarmte en warmtepompen als belangrijkste warmtebronnen beschikbaar, en deze technieken zijn toepasbaar. Energiebesparing wordt bevorderd door het gebruik van energieschermen en LED-verlichting. De benodigde technologische middelen voor de verduurzaming van de glastuinbouw zijn daarmee grotendeels voorhanden, waardoor de sector de gestelde klimaatdoelen voor 2040 haalbaar kan bereiken.

Beoordeling: **groen**

Het scenario gaat niet uit van technologische verbeteringen of innovaties, waardoor versnellen goed mogelijk is.

Daarnaast willen we opmerken dat er wel degelijk technologische ontwikkelingen denkbaar zijn die de sector sterk kunnen verduurzamen. In sommige gevallen worden dezelfde producten gemaakt en gaat het vooral over emissies reduceren, in andere gevallen om vergelijkbare producten qua smaak. Voorbeelden van technieken zijn precisiefermentatie en luchtwassers. Grassa benut gras om hoogwaardige eiwitten en vezels te produceren, wat bijdraagt aan een circulaire landbouw en de afhankelijkheid van geïmporteerde eiwitten vermindert. Dit kan deels de traditionele veehouderij vervangen. Those Vegan Cowboys maken gebruik van micro-organismen om melkproteïnen en andere voedingsstoffen te produceren zonder dieren, wat een duurzamer alternatief biedt voor conventionele zuivelproductie en de uitstoot van broeikasgassen vermindert. In de veehouderij helpen luchtwassers om emissies zoals ammoniak te filteren, wat de impact op het milieu verlaagt en stikstofuitstoot vermindert. Deze technieken kunnen een grote impact hebben op de emissies, waarbij sommigen zelfs op het gehele landbouwvoedselsysteem.

6. Infrastructureel

Veestapel

Een kleinere veestapel sluit goed aan bij de huidige infrastructuur en vraagt geen nieuwe methoden of extra voorzieningen. Sterker nog, een meer lokaal gebonden veeteelt kan zelfs leiden tot een efficiëntere benutting van bestaande middelen en mogelijk minder infrastructurele behoeften doordat de transportafstanden korter zijn.

Bemesting

De vermindering van bemesting past op dezelfde manier goed binnen de bestaande structuren. Minder externe inputs zijn nodig, waardoor de focus kan verschuiven naar lokale bronnen en duurzamere bemestingsmethoden.

Glastuinbouw

Voor de glastuinbouwsector zijn er wel enkele potentiële knelpunten. De sector is in hoge mate afhankelijk van alternatieve warmtebronnen zoals geothermie, restwarmte en warmtepompen. Een uitdaging daarbij is dat tuinders CO₂ nodig hebben voor de plantengroei; als de warmtekrachtkoppeling (WKK) in gebruik vermindert, moet de CO₂-aanvoer uit andere bronnen worden verzorgd of zal er minder CO₂ toegediend moeten worden. Voor de toevoer kan bijvoorbeeld gebruik gemaakt worden van afgevangen biogene CO₂ of door biomassa of groen gas in de WKK te gebruiken.

Geothermie en restwarmte vereisen warmtenetten, waarvan nog niet alle noodzakelijke infrastructuur is aangelegd. Deze trajecten gaan vaak gepaard met lange doorlooptijden, onzekerheden en hoge investeringen. Bovendien kan in sommige gebieden vanwege aardbevingsrisico niet worden geboord voor geothermie. Zoals genoemd kan de overheid ondersteunen in het aanleggen van de verschillende netten en bijvoorbeeld garant staan voor misboringen bij geothermie. Bij een grotere afhankelijkheid van warmtepompen ontstaan mogelijke problemen met netcongestie, aangezien tuinders met hoge

elektriciteitsaansluitingen dan ook een hoge afnamecapaciteit nodig hebben (Berenschot en Kalavasta, 2024; Trinomics en Blueterra, 2024). Wel biedt de aanwezigheid van warmtebuffers de mogelijkheid om afspraken te maken over stroomafname, wat flexibiliteit kan bieden in de planning van elektriciteitsgebruik.

Daarnaast is de CO₂-toevoer naar de sector een punt van onzekerheid. Er is nog geen grootschalige infrastructuur voor de levering van CO₂. Mogelijke opties zijn het aanleggen van pijpleidingen, transport via vrachtwagens, of zelfvoorziening door tuinders met Direct Air Capture-installaties om CO₂ direct uit de lucht te halen.

Beoordeling: **oranje**

Enkel de glastuinbouw heeft een mogelijk knelpunt met betrekking tot de infrastructuur van ofwel warmtenetten of het elektriciteitsnet. Wanneer er tijdig gestuurd wordt, kunnen deze knelpunten op tijd geïdentificeerd worden waardoor de uitvoering mogelijk is.

7. Ruimtelijk

Veestapel

De reductie van de veestapel creëert ruimte die een agrarische bestemming behoudt en grotendeels wordt benut voor plantaardige teelten. Binnen het Urgenda-scenario is voorzien dat ongeveer 66.000 hectare wordt vrijgemaakt voor natuurontwikkeling en 50.000 hectare voor de aanleg van voedselbossen. Het scenario blijft binnen de haalbare bandbreedte voor Nederland en zorgt ervoor dat de voedselproductie behouden blijft binnen de beschikbare ruimte.

Bemesting

De veranderingen in nutriëntenvoorziening in dit scenario hebben geen aanzienlijke impact op het ruimtegebruik.

Glastuinbouw

De glastuinbouwsector neemt relatief weinig ruimte in beslag en past daarmee goed binnen Nederland. Met de inzet van verticale teeltmethoden wordt het ruimtegebruik mogelijk nog efficiënter. Hoewel er mogelijk enige ruimte nodig zal zijn voor het aanboren van geothermiebronnen en de aanleg van warmtenetten, blijft deze ruimtebehoefte op nationale schaal beperkt.

Beoordeling: **groen**

Ruimtelijk passen de aanpassingen van het scenario goed binnen Nederland.

4.6.3. Conclusie en discussie

1. Hoe komen we uit op de emissieraming voor 2040?

Alles overwegende komen we uit op een restemissie van 7,6 Mton CO₂eq voor het scenario. Hierbij gaan we uit van 5 Mton directe emissies methaan en lachgas uit de veestapel, 2,4 Mton vanuit bemesting en 0,2 Mton overig CO₂ niet energetisch.

2. Waarom is versnelling haalbaar en wat zijn de voornaamste beperkingen?

In de II3050v2 wordt geen expliciete invulling gegeven aan de landbouw buiten de glastuinbouw. Voor dit gedeelte maken we gebruik van het Urgenda-scenario Landinzicht.

In dit scenario wordt uitgegaan van een aanzienlijke krimp van de veestapel, lagere productievolumes en een verminderde mestbehoefte, onder andere door de inzet van kruidenrijk grasland. Voor de glastuinbouw wordt, in lijn met de eigen sectordoelen, een CO₂-neutrale status nagestreefd tegen 2040. In het II3050 scenario wordt uitgegaan van 9 Mton inclusief LULUCF (zie volgende hoofdstuk). In dit rapport is de gezamenlijke bijdrage 8,4 Mton CO₂-eq.

Tabel 21. Haalbaarheidsinschatting per lens voor de sector Landbouw

Lens	Beoordeling haalbaarheid
Beleid	Groen
Economisch	Oranje
Sociaal maatschappelijk en cultureel	Groen
Milieukundig	Groen
Technologisch	Groen
Infrastructureel	Oranje
Ruimtelijk	Groen

De grootste uitdagingen liggen in de politieke wil, de economische structuur van de veehouderij en akkerbouw, en de mogelijke infrastructurale knelpunten in de glastuinbouw.

De veestapelreductie blijft onderwerp van discussie, vooral omdat veel Nederlanders de verplichte bedrijfsbeëindiging problematisch vinden. Wanneer echter alleen bij bedrijfsbeëindigingen productierechten worden ingetrokken, kan de discussie anders verlopen. De haalbaarheid van dit soort regelgeving is inmiddels aangetoond binnen de oplossingen voor het huidige mestbeleid.

Het verdienmodel van akkerbouw en veeteelt zal echter moeten veranderen. De sector zal tijd nodig hebben om zich aan te passen aan nieuwe landbouwmethoden en de bijbehorende verdienmodellen. Er zijn alternatieven om boeren van inkomsten te voorzien. Deze verdienmodellen vereisen minder input, waardoor lagere productie niet per se leidt tot lagere inkomsten.

De Nederlandse glastuinbouw heeft sterke verduurzamingsmogelijkheden, maar is wel afhankelijk van aanvullende infrastructurale voorzieningen. Dit betreft de aanvoer van warmte via warmtenetten of warmtepompen en de CO₂-toevoer voor productie. Dankzij warmtebuffers is de sector flexibel, en naar verwachting zullen de meeste knelpunten voor 2040 kunnen worden opgelost.

Hoewel dit knelpunten zijn, verwachten we dat dit scenario zeker mogelijk is. Het is voor veel experts duidelijk dat er andere verdienmodellen nodig zijn in de landbouwsector om deze te verduurzamen. Hoe de sector eruitziet in 2040 hangt daardoor sterk af van politieke keuzes die de komende jaren gemaakt gaan worden. Het recente

landbouwakkoord in Denemarken laat zien dat het mogelijk is om met verschillende partijen tot vergaande afspraken te komen. In dit akkoord hebben boerenorganisaties, natuurorganisaties en de regering gezamenlijk besloten tot een ambitieuze transformatie van de landbouwsector, inclusief een CO₂-belasting voor boeren en het omzetten van 15 procent van de landbouwgrond naar natuur. Dit voorbeeld toont aan dat met wederzijds begrip, voldoende financiële middelen en een duidelijke langetermijnvisie ook in Nederland een breed gedragen landbouwakkoord mogelijk moet zijn.

De concrete beleidsvoorstellen uit dit stuk worden hieronder samengevat in Tabel 22.

Tabel 22. Voorgestelde beleidsmaatregelen voor de sector landbouw

Categorie	Beschrijving
Normeren, stimuleren en beprizen	Een samenhangend pakket van maatregelen (productierechten verminderen, stoppersregelingen, extensivering, grondgebondenheid en mogelijk onteigening) gericht op het verkleinen van de Nederlandse veestapel. Dit leidt direct tot minder methaan- en ammoniakemissies uit dieren en mest, en indirect tot minder emissies uit voerproductie en mesttoediening
Normeren	Minimumeis voor gebruik van restproducten als veevoer. Vermindert emissies uit specifieke voerproductie.
Onderzoek	Onderzoeken of en op welke manier gebruik gemaakt kan worden van methaanemissie-reducerende toevoegingen. Een standaardisatie van additieven zit niet in het scenario, maar zou additioneel kunnen werken om meer emissies te reduceren.
Stimuleren	Stimuleren regionale voerproductie. Vermindert transportemissies en verbetert nutriëntenkringlopen.
Normeren	Maxima stellen aan krachtvoergebruik. Vermindert emissies uit intensieve voerproductie.
Beprijzen	Belasting per ton CO ₂ -uitstoot via een heffing. Stimuleert emissiereductie via financiële prikkel.
Beprijzen	Extra belasting op dierlijke producten. Vermindert consumptie en daarmee productie en emissies. Is niet per se nodig omdat productie en consumptie in Nederlands voedselsysteem losgekoppeld zijn, maar het kan wel helpen om de sociaalmaatschappelijke discussie te voeren en mogelijk om boeren een betere prijs te geven.
Beprijzen	Milieukosten doorberekenen in productprijs. Maakt duurzame productie concurrerder
Normeren	Verplicht aandeel plantaardige producten in supermarkten. Stimuleert verschuiving naar plantaardige consumptie.
Normeren	Aanscherping bemestingseisen per gewas, eventueel afgestemd op meer extensieve productie. Leidt tot efficiënter mestgebruik en minder emissies.
Stimuleren	Subsidies voor biodivers grasland. Vermindert kunstmestgebruik en daarmee emissies.
Onderzoeken	Onderzoeken of bewerkte mest als kunstmestvervanger geschikt is om emissies te reduceren en, indien dit zo is, stappen zetten om bewerkte mest toe te laten. Vermindert mogelijk kunstmestproductie-emissies.
Stimuleren en beprizen	Voorzetten van huidige pakket aan maatregelen glastuinbouw van o.a. SDE++, EG-regeling, verhoogde aardgasbelasting, afbouwen vrijstelling belasting WKK, CO ₂ -heffing binnen de sector.
Stimuleren	De glastuinbouw heeft de benodigde infrastructuur nodig omtrent warmte, elektra en CO ₂ -levering. De overheid kan via (extra) subsidies en onderzoek bijdragen aan het voorzien van deze randvoorwaarde

3. Wat is de omvang van de restemissies?

Wanneer er geen belemmeringen zijn, schatten we de emissies 7,6 Mton. PBL komt in het achtergrondrapport van TKVN op 8,0-8,1 Mton voor landbouwemissies in de scenario's met een sterke krimp van de veestapel. In de bovenwaarde gaan we uit van het Klimaat Basis scenario, wat 11,0 Mton emissies heeft.

4.6.4. Geraadpleegde bronnen

- Netbeheer Nederland, Integrale Infrastructuurverkenning 3050 – II3050 (2023)
- PBL, Klimaat- en Energieverkenning 2024 (2024a)
- PBL, Transitieverkenning klimaatneutraal 2050 (2024b)
- Urgenda, LandInzicht (2024)
- PBL, Trajecten naar een 'klimaatneutrale' landbouw, landgebruik en glastuinbouw in 2050 (2024c)
- RVO, De Nederlandse landbouw en het klimaat (2016)
- Nationaal Klimaat Platform, Bestaanszekerheid van boeren - verdienvermogen nu en in de toekomst (2024)
- Convenantpartijen Ministeries Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Klimaat en Energie en Financiën – Fiscaliteit en Belastingdienst, Glastuinbouw Nederland, Stichting Greenports Nederland, Convenant Energietransitie Glastuinbouw 2022-2030 (2022)
- Berenschot en Kalavasta, Tariefstudie CO₂-heffing glastuinbouw (2024)
- Trinomics en BlueTerra, WKK-onderzoek; Onderzoek naar de effecten van de beperking van de inputvrijstelling voor warmtekrachtkoppelingssystemen (2024)
- CBS, tabel Landbouw; gewassen, dieren, grondgebruik en arbeid op nationaal niveau (2024)
- LTO en Urgenda, 1001ha.nl kruidenrijk grasland; evaluatie na 4.700 hectare ervaring (2023)
- NOS, Aardappels geteeld met menselijke urine: 'Zuiverder dan dierlijke mest' (2024)

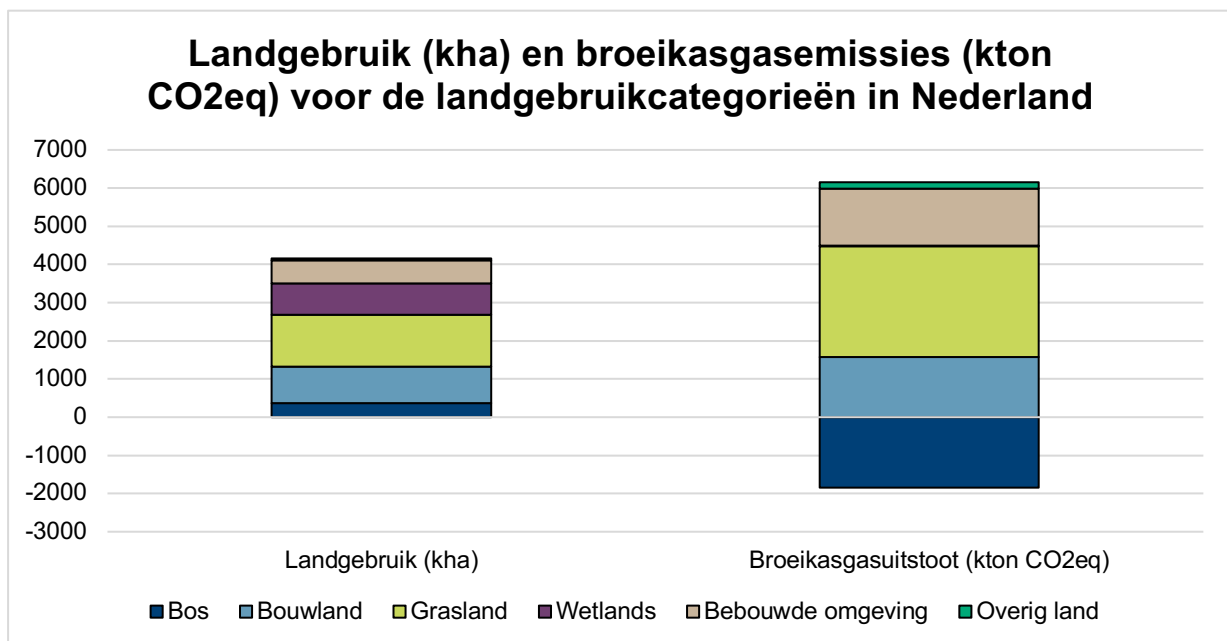
4.7. Analyse sector: Landgebruik

4.7.1. Inleiding

De Nederlandse Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF)-sector omvat alle emissies en vastlegging van broeikasgassen door landgebruik. Tot nu toe is er beperkt beleid geweest om deze emissies te verminderen. Het scenario richt zich op drie hoofdmaatregelen: verhoging van het waterpeil in veenweidegebieden om oxidatie en daarmee CO₂-uitstoot te verminderen, grootschalige aanplant van bomen voor CO₂-vastlegging, en het verhogen van koolstofopslag in landbouwbodems door aangepast bodembeheer. Ondanks deze interventies blijven er restemissies bestaan. De grootste uitdaging ligt bij het verhogen van het waterpeil in veenweidegebieden, omdat dit leidt tot waardevermindering van landbouwgrond en aanpassing van bedrijfsmodellen vraagt. In het vervolg van dit hoofdstuk wordt ingegaan op de inschattingen vanuit de KEV, de II3050 studie en de trajectverkenning 2050 van PBL. Daarna wordt er een inschatting gegeven van de haalbaarheid van het scenario in de bespreking van de lenzen.

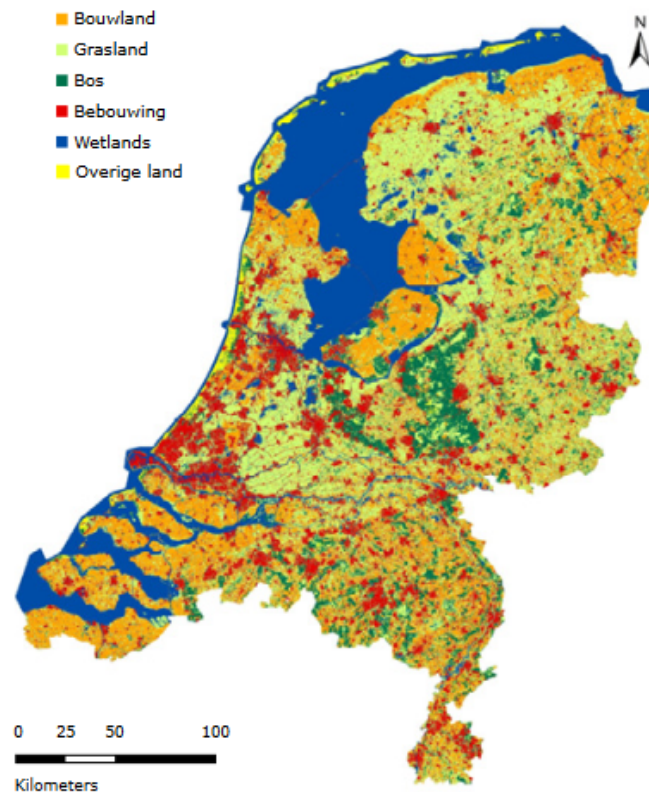
1. Ontwikkeling emissies 1990-2030

De LULUCF-sector in Nederland omvat de emissies van zes verschillende landgebruikscategorieën: bos, bouwland, grasland, wetlands (inclusief open water en rietmoerassen), bebouwde omgeving en overig land. Emissies in deze sector ontstaan door de aanwezigheid en het gebruik van deze gebieden, evenals door veranderingen in landgebruik. De grootste bron van uitstoot is het veen, waarvan er ongeveer 200 kha is in Nederland. Veen bestaat uit veel koolstof. Wanneer dat het waterpeil laag is, breekt deze koolstof af en vormt het CO₂. Veen is in Nederland vooral te vinden in de categorieën bouwland en grasland. Uniek aan deze sector is dat bos zorgt voor negatieve emissies, met een jaarlijkse opname van ongeveer 2 megaton CO₂. In de EU worden voor de



Figuur 30. Landgebruik (kha) in 2017 en broeikasgasemissies (kton CO₂eq) in 2019 voor de landgebruikscategorieën in Nederland. Bovenstaande figuur is ter indicatie van verschillende onderdelen en welke daarvan een grote en kleine bijdrage aan de emissies hebben. Data overgenomen uit WUR (2021)

LULUCF-sector specifieke boekhoudregels per landgebruikscategorie gevolgd, op basis van basiswaarden en historische data.⁷² De uitstoot en opname van CO₂, CH₄ en N₂O worden gemeten en gerapporteerd in CO₂-equivalenten om de impact van verschillende broeikasgassen te kunnen vergelijken. Om een idee te krijgen van de verschillende onderdelen en emissies wordt in aan de linkerkant getoond hoeveel land er in Nederland is en aan de rechterkant hoeveel broeikasgasemissies in kton CO₂eq daar vervolgens bij horen. In Figuur 31 is een kaart van Nederland te zien met de daarbij behorende indeling.



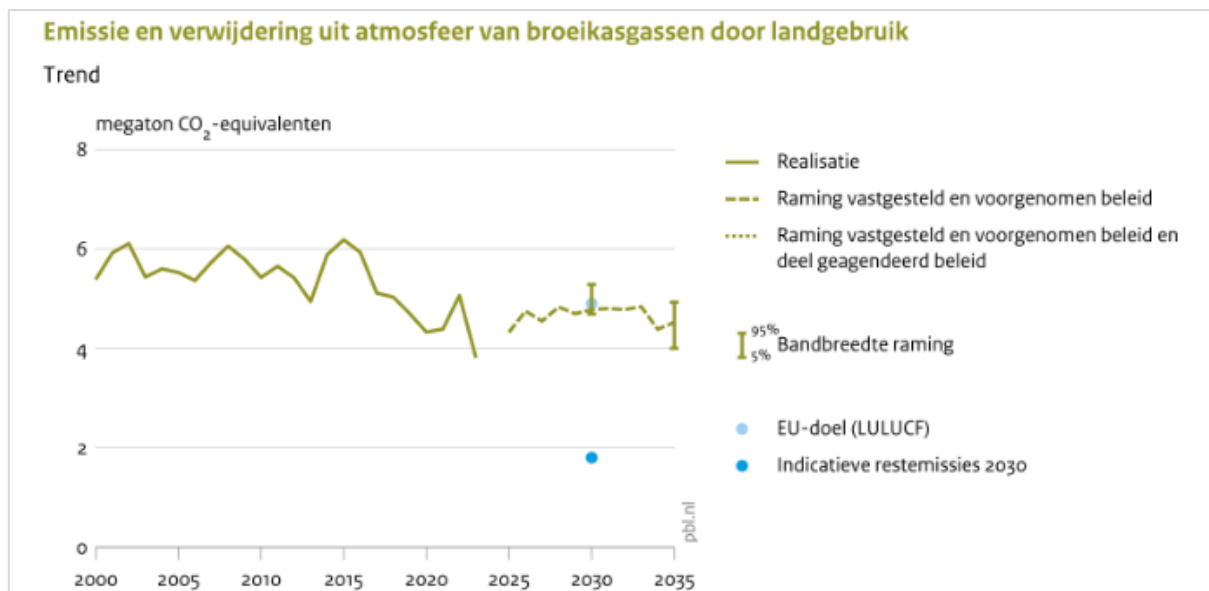
Figuur 31. Kaart van grondgebruik in Nederland, figuur overgenomen van WUR (2021)

In 1990 bedroeg de netto-uitstoot in deze sector 5,4 megaton CO₂-equivalent. Dit aantal is de afgelopen jaren iets gedaald tot 4,5 megaton in 2021, maar steeg weer naar 5,1 megaton in 2022 en daalde vervolgens naar 3,8 megaton in 2023. De fluctuaties hangen samen met klimatologische invloeden; door droogte in 2022 konden bossen bijvoorbeeld weinig CO₂ opnemen, terwijl er in 2023 juist extra veel werd vastgelegd (PBL, 2024a). Vanwege deze schommelingen is het in deze sector logischer om te spreken over

⁷² Het Kyoto-protocol uit 1997 legt juridische verplichtingen op aan ontwikkelde landen om hun uitstoot van broeikasgassen in de periode 2008-2012 te verminderen. In 2012 werd het aangepast met het Doha-amendement voor de periode 2013-2020. Onder dit protocol zijn er specifieke regels voor de LULUCF-sector (Land Use, Land-Use Change and Forestry), waarin emissies en verwijderingen uit landgebruik worden beoordeeld. Het Klimaatakkoord van Parijs, streeft naar een balans tussen emissies en verwijderingen van broeikasgassen tegen de tweede helft van deze eeuw. Hierbinnen bepalen landen hun doelen in de vorm van "Nationally Determined Contributions" (NDC's), met enige flexibiliteit. In de EU worden deze doelen gezamenlijk vastgelegd, waarbij emissiereducties worden verdeeld onder lidstaten via het EU-emissiehandelssysteem, de "effort sharing," en LULUCF-regelgeving (EU-verordening 2018/841).

langjarige trends of gemiddelde emissies. Zo bedroegen de gemiddelde emissies 5,4 megaton in de periode 2009-2013 en daalden deze naar 4,5 megaton in 2019-2023, vooral door lagere emissies in bouw- en grasland (WUR, 2020). Dit komt doordat oxidatie van aanwezige veenlagen in de loop der tijd tot lagere emissies leidt.

Het PBL verwacht dat de uitstoot van de LULUCF-sector in 2030 rond de 4,8 megaton zal liggen (met een bandbreedte van 4,7 tot 5,3 megaton). Dit zou een lichte stijging zijn ten opzichte van de huidige uitstoot en beduidend meer dan het nationale doel voor de sector, dat op 1,8 tot 2,7 megaton is gesteld (EZK, 2023). Het Europese doel van 4,9 megaton, wat een reductie van 0,435 megaton ten opzichte van de periode 2016-2018 inhoudt, lijkt daarentegen haalbaar. De stijging wordt vooral verwacht door een gedeeltelijke omzetting van grasland naar bouwland, mede als gevolg van het wegvallen van de derogatieregeling, waardoor melkveehouders minder mest op hun land mogen uitrijden. Dit kan ertoe leiden dat er meer bouwland wordt gecreëerd, wat minder koolstof vasthoudt dan grasland. Naar verwachting blijft het bosareaal stabiel en zullen de emissies van veen slechts beperkt dalen.



Figuur 32. Emissies van LULUCF in Nederland, figuur overgenomen van de KEV 2024, PBL (2024a).

2. Transitie sector 2030-2050 (II3050-NAT)

Net als bij het onderdeel landbouw, zit landgebruik veelal niet expliciet in het II3050v2-scenario. We hanteren hier wederom de leidraad van het Urgenda-scenario. Voor het landgebruik gedeelte is hierbij de veenweidestrategie en bossenstrategie in het scenario van belang.

In het scenario wordt het veengebied nu op ongeveer 200 kha geschat (zie ook TVKN (PBL, 2024c)). Dit gebied zorgt voor ongeveer 3 Mton aan emissies (PBL, 2024c). In het scenario wordt vervolgens 1/3 ingezet voor extensieve melkveehouderij, 1/3 voor natte teelten zoals lisdodde en 1/3 voor natuur. Hierbij wordt het grondwaterpeil sterk verhoogd waardoor de emissies van koolstofdioxide afnemen. Tijdelijk worden hiermee de

methaanemissies wel sterk verhoogd doordat er moerasgas vrijkomt.⁷³ Echter blijkt uit de literatuur dat het vrijwel altijd beter is om het waterpeil te verhogen, en daarmee potentieel ook weer koolstof op te slaan, dan om het veen langzaam de laten oxideren. Doordat methaan sneller afbreekt dan CO₂ in de atmosfeer, ontstaat er al vrij snel een evenwicht waarvan de zogenaamde *radiative forcing* (een maat voor de sterkte van het de broeikasgassen) lager is met een hoger waterpeil dan met een laag waterpeil. De emissies ramen we op basis van de TVKN-inschattingen voor veenemissies. Dit betekent ongeveer 1/3 van de emissies wanneer er wordt geëxtensiveerd of het veen wordt omgezet in een natuurgebied met een hoog waterpeil.

Daarnaast is de aanplant van extra bomen in het scenario van belang. In het originele Urgenda scenario worden 92 kha aan bomen extra geplant in de periode 2025-2035, waarvan 50 kha op de graslanden. Deze laatste aanname is intussen wat conservatief ingeschat.⁷⁴ Daarom nemen we in het Klimaatzaak 2040 scenario aan dat er voor ongeveer 142 kha aan boomgaarden kunnen worden aangeplant, waarvan 100 kha op graslanden. Daarnaast staat er 50 kha aan voedselbossen in het scenario. We ramen de extra opslag van de bijna 192 kha bomen op 1,9 Mton CO₂-eq per jaar.⁷⁵ In totaal slaan bomen daarmee ongeveer 4 Mton per jaar op in 2040.

⁷³ Moerasgas (methaan) komt vrij als organisch materiaal in veenweidegebieden onder zuurstofarme omstandigheden wordt afgebroken. Dit gebeurt bijvoorbeeld als veengrond onder water wordt gezet. De bacteriën in de bodem gebruiken dan andere stoffen dan zuurstof bij het afbreken van plantenresten, waarbij methaan wordt gevormd. Het is wat betreft broeikasgasuitstoot altijd beter om een veenweidegebied onder water te zetten ten opzichte van het droogleggen van veen (Günther et al., 2020)

⁷⁴ De 50 kha is gebaseerd op de oude gemeenschappelijk landbouwbeleid (GLB) richtlijnen voor aantal bomen op grasland. Het uitgangspunt is om zoveel mogelijk bomen te planten op grasland, zonder dat daarbij de hoofdactiviteit en de bijbehorende subsidies worden aangepast. Voor 2022 konden er 50 bomen worden aangeplant zonder dat daarmee minder subsidies ter beschikking worden gesteld voor het landbouwperceel. In de nieuwe GLB-richtlijnen, die sinds 2023 geldig zijn, is het mogelijk om 100 bomen per hectare te planten, zonder dat daardoor de GLB-subsidies worden aangepast. Dit betekent dat het aantal bomen op graslanden in het scenario zou kunnen verdubbelen.

⁷⁵ Het is lastig om een exact getal te geven voor de opslag van bomen in het scenario. Gedeeltelijk omdat elke boom anders is, anders functioneert en de leeftijd en grootte van bomen van belang is, maar ook omdat de rekenmethodes voor opslag soms uiteenlopen en het nog niet duidelijk is hoeveel een voedselbos gemiddeld zou kunnen opslaan wanneer daarop geselecteerd wordt in het type gewas. We baseren ons hier op WUR-berekening voor emissieregistratie voor de omzetting naar bos (WUR, 2021). Hierin levert elke kha nieuw bos ongeveer 10 kton emissieopslag op. Voor ongeveer 192 kha bomen, waarvan in het scenario 100 kha op grasland staat, levert dit dus 1,9 Mton opslag op.

Het is niet geheel duidelijk of deze waarden ook voor voedselbossen en bomen op grasland gebruikt kunnen worden. Bomen in een agroforestry opstelling zijn in staat meer koolstof te binden dan in een bos (WUR, 2023). Daarnaast kan een voedselbos ook meer of minder CO₂ opslaan, afhankelijk van het type boom, struiken en andere gewassen.

Een andere berekening leidt tot hetzelfde resultaat. Deze berekening bestaat uit drie stappen voor de drie onderdelen. Op 425 kha grasland staan 100 bomen per ha. Een boom neemt gemiddeld 25 kg op (WUR, 2023). Dit leidt tot $425.000 * 100 * 25 = 1,06$ Mton. De 42 kha walnoot en hazelnootbomen hebben ongeveer 400 bomen per ha, walnoten 100-200 bomen per ha en hazelnootbomen 600-1000 (CropEye et al., Noten 4 Gelderland). Gemiddeld zou dit conservatief 400 bomen/ha zijn. Dit levert additioneel $42.000 * 400 * 25 = 0,42$ Mton op. Tot slot de 50.000 ha voedselbos, met een opname van 8 ton/ha geeft $50.000 * 8 = 0,4$ Mton. Samen is dit ongeveer 1,9 Mton opslag.

Tot slot gaan we, net als PBL in de TKVN, uit van een opslag van CO₂ in de bouw- en graslanden. Hierbij wordt er meer aandacht gegeven aan het toevoeren van meer organische stof zoals gewasresten en mest, meer groenbemesters inzaaien (een tussengewas die voorkomt dat het land braak ligt en organische stof toevoegt) en rekening houden met vruchtwisseling. Wanneer de landbouwpraktijk meer gericht wordt op koolstofopslag, is de potentie ongeveer 0,7 Mton per jaar (CE-Delft 2023; PBL, 2018).

In dit scenario wordt een aanzienlijk deel van het grasland omgezet naar bouwland, ongeveer 300.000 hectare. Ter vergelijking: volgens het LULUCF-overzicht van de WUR wordt er momenteel jaarlijks ongeveer 300.000 hectare bouwland omgezet naar grasland (WUR, 2021). Deze omzetting veroorzaakt een emissie van ongeveer 1,25 megaton CO₂-equivalenten. Tot nu toe waren de netto-emissies van landconversies beperkt, omdat er ook veel grasland werd aangelegd op voormalig bouwland. In dit scenario is de omzetting van grasland naar bouwland echter permanent, waardoor deze emissies volledig moeten worden meegenomen in de ramingen.

Voor de sector levert dit in het geheel een geschatte reductie op van $2+1,9+0,7-1,25 = 3,4$ Mton. Aangezien de afgelopen periode de netto emissies rond de 4,5 Mton waren, betekent dit een netto uitstoot van ongeveer 1,1 Mton in 2040. De exacte emissies zullen per jaar verschillen doordat de emissies sterk afhankelijk zijn van jaarlijkse omstandigheden zoals het weer.

3. Transitiepad volgens PBL TVKN

In de TVKN worden voor de drie scenario's verschillende pakketten ingericht, zie ook hoofdstuk 4.6. In alle pakketten is er extra aandacht voor koolstofvastlegging in de bodem. Dit leidt tot 0,7 Mton CO₂ vastlegging per jaar. In Klimaat Basis is vervolgens de minste groei in het bosgebied (ongeveer gelijk als in de nationale bossenstrategie), terwijl de groei in Klimaat Plus en Natuur & Klimaat aanzienlijk is. Verder is er in alle scenario's verhoging van het waterpeil in de veengebieden. Het verschilt per scenario op welke hoogte het waterpeil staat en of er omzetting naar natuur plaatsvindt.

Tabel 23. Invulling van landgebruik in de TKVN voor de drie verschillende scenario's, tabel overgenomen uit de bijbehorende rapportage.

Aspect	Klimaat Basis	Klimaat Plus	Natuur & Klimaat
Gebruik veengronden (voornaamste ingreep, voor details zie hoofdstuk 3)	Verhoging grondwaterpeil tot -40 cm, deels in combinatie met infiltratie	Verhoging grondwaterpeil tot -40 cm in combinatie met infiltratie, plus omzetting naar natuur	Verhoging grondwaterpeil tot -20 cm, plus omzetting naar natuur
Koolstofvastlegging in landbouwgronden	Extra aandacht, 0,7 Megaton CO ₂ -equivalenten CO ₂ vastlegging per jaar	Extra aandacht, 0,7 Megaton CO ₂ -equivalenten CO ₂ vastlegging per jaar	Extra aandacht, 0,7 Megaton CO ₂ -equivalenten CO ₂ vastlegging per jaar
Extra areaal bossen, en bomen buiten bos	38.500 ha bos en bomen buiten bos	98.000 ha bos en bomen buiten bos	98.000 ha bos en bomen buiten bos

2021-2050

Het resultaat is dat in de drie scenario's de totale emissies in de sector sterk afnemen. In Klimaat Basis komen de netto-emissies uit op 1,2 Mton en in de andere scenario's tussen de 0,3 en 0,5 Mton per jaar. Echter, zoals PBL zelf aangeeft zijn de ramingen van deze emissies sterk vereenvoudigt en is er meer onderzoek nodig om beter zicht te krijgen op de potentie van de LULUCF-sector. Het verhogen van het waterpeil van veengronden en aanplanten van bos heeft een sterk effect, maar de manier waarop maakt sterk uit en is ook afhankelijk van andere externe factoren zoals langdurige droogte, neerslag en temperatuur.

4.7.2. Beoordeling haalbaarheid

1. Beleid

Het huidige beleid voor landgebruik is beperkt en concentreert zich voornamelijk op twee hoofdlijnen: de Bossenstrategie en de regionale veenweidestrategieën, beide onderdeel van het Nationale Programma Landelijk Gebied (NPLG). De Bossenstrategie streeft naar 37.000 hectare extra bos in Nederland voor 2030. De veenweidestrategieën zijn regionale plannen met maatregelen zoals drainage, natte teelten, waterfiltratie en het aanbrengen van klei op veen, waarvoor overheidsmiddelen beschikbaar waren.

Door het stopzetten van het NPLG is de financiering voor nieuwe initiatieven onzeker geworden, hoewel reeds toegezegde projecten doorgang kunnen vinden. Deze situatie creëert onduidelijkheid over toekomstig beleid in deze sector, terwijl verschillende onderdelen juist specifiek beleid en overheidsfinanciering vereisen.

Het zal daarom nodig zijn om extra beleid te ontwikkelen voor veenweide, bossen en koolstofopslag in de landbouwbodems. Deze worden hieronder besproken.

Voor het veenweidegebied moet het waterpeil verhoogd worden. Dit is een ingrijpende maatregel, maar wel noodzakelijk om de emissies van het veen te verlagen. Een mogelijk knelpunt kan echter ontstaan bij de invoering van verplichtend beleid rondom het verhogen van het waterpeil in het veenweidegebied. Voor veel boeren betekent een hogere grondwaterstand mogelijk een directe beperking van de bedrijfsvoering, lagere productiviteit, en in sommige gevallen aanzienlijke financiële lasten.

De verplichtende aard van het waterpeilbeleid kan dus weerstand oproepen, met name onder boeren die zich zorgen maken over de economische levensvatbaarheid van hun bedrijf en de verminderde flexibiliteit van hun landgebruik. De implementatie van dit beleid zou daarom gebaat zijn bij een zorgvuldige aanpak, waarin belangen van agrariërs worden meegenomen en er mogelijkheden worden geboden voor compensatie en ondersteuning, bijvoorbeeld via subsidies, technische ondersteuning, en financiële regelingen.

Andere maatregelen hebben een minder ingrijpend karakter en passen binnen het huidige landbouwsysteem in Nederland. Voor meer bomen is er 92 kha aan land nodig, met name grasland, voor de omzetting naar volledig bos (42 kha) of voedselbos (50 kha). Dit gaat om ongeveer 5% van het landbouwareaal. Voor omzetting naar bos zal ook een afwaardering van de grond moeten plaatsvinden in combinatie met een gefaseerde ingroei tussen tot en met 2035-2040. Afhankelijk van het type bos, kan het hout worden ingezet voor biobased bouwen (zie volgende hoofdstuk). Voor voedselbossen is aanvullend beleid nodig om de eerste jaren door te komen, aangezien een voedselbos in

de aanvangsfase niet productief is. Mede door de hoge grondprijzen in Nederland kan de drempel om een voedselbos aan te leggen anders te hoog zijn. Extra subsidies en voorlichting kunnen hieraan bijdragen. Op het overige grasland worden 50-100 bomen per hectare aangeplant. Dit laatste aspect sluit aan bij de GLB-subsidies, waarbij landschapselementen zoals bomen en houtwallen meetellen voor ECO-punten. Door meer subsidies aan dergelijke initiatieven toe te kennen, kan de realisatie van deze omzettingen worden vergemakkelijkt.

Voor koolstofvastlegging bestaan ideeën om een CO₂-vergoedingssysteem te introduceren, waarbij boeren compensatie ontvangen voor de CO₂ die in de bodem wordt vastgelegd. CE-Delft schat de kosten voor boeren op 0-50 euro per ton (CE-Delft, 2023). De invoering van dit systeem met een prijs boven deze waarde zou meer boeren kunnen motiveren om maatregelen te nemen ter verbetering van de koolstofopslag in de bodem. Daarnaast kan voorlichting goed werken aangezien een hoger organisch stofgehalte vaak gepaard gaat met een gezonde bodem en hogere opbrengsten.

Tot slot kan ook een CO₂-heffing helpen om beleidsmatig CO₂-neutralere activiteiten te stimuleren. Wanneer een boer vanwege meer bomen op het land minder heffing hoeft te betalen, kan dat een extra stimulans zijn om meer bomen in het bedrijfsplan op te nemen. Daarnaast zouden ook bossen en voedselbossen hiervan kunnen profiteren om extra inkomsten te genereren.

Beoordeling: **groen**. Beleidstechnisch zal er echter veel sturing nodig zijn, met name voor het veenweidegebied. Dit kan echter gedaan worden en er zijn nu ook al plannen voor gemaakt in het kader van de NPLG. Voor meer bomen en koolstofvastlegging zijn beprijzen en subsidies goede routes om in te zetten.

2. Economisch

De economische impact zal met name groot zijn in het veenweidegebied. Dit komt doordat land hier wordt afgewaardeerd en ingezet voor alternatieve bestemmingen die doorgaans minder winstgevend zijn dan conventionele landbouw. De overgang naar bijvoorbeeld extensieve veeteelt, natte teelten of natuurbeheer kan een negatieve invloed hebben op de inkomsten van agrariërs, aangezien deze activiteiten minder opbrengsten genereren dan de huidige intensieve landbouw.

Agroforestry, zoals het aanplanten van houtwallen, bomen of voedselbossen, biedt echter economische kansen. Bomen helpen om het waterpeil beter in stand te houden, wat kan leiden tot een vermindering van watergerelateerde kosten, zoals voor drainage. Bovendien bieden agroforestry-systemen mogelijkheden voor aanvullende inkomstenbronnen: oogsten uit voedselbossen, notenbomen en houtproductie kunnen verkocht worden. Daarnaast wordt door de integratie van bomen in het agrarische landschap de biodiversiteit bevorderd en wordt het ecosysteem veerkrachtiger. Op langere termijn kan een krachtiger ecosysteem leiden tot hogere opbrengsten van het hoofdgewas.

Ook de koolstofvastlegging biedt economische perspectieven voor boeren. Door koolstofopslag in de bodem kunnen boeren profiteren van een CO₂-creditsysteem. Dit

systeem biedt financiële compensatie voor de hoeveelheid CO₂ die wordt vastgelegd, waardoor zij een nieuwe inkomstenstroom kunnen aanboren. Voor de toepassing van andere methodes voor koolstofvastlegging kan een carbon creditsysteem extra inkomsten genereren, mits de CO₂-prijs hoger ligt dan de kosten voor boeren om deze methoden toe te passen.

Beoordeling: **oranje**. Grond wordt afgewaardeerd en er zullen nieuwe verdienmodellen moeten komen voor veenweidegebied. Dit zal per saldo minder opbrengsten generen en daardoor minder geld opleveren dan de huidige praktijk. Andere maatregelen zoals carbon farming en agroforestry kunnen (op termijn) juist meer inkomsten generen. De verwachting is echter dat over het algemeen met minder intensieve teelten en minder opbrengsten, de totale bruto toegevoegde waarde minder zal zijn op deze landbouwgronden en dat het economisch gezien voor een krimp zal zorgen.

3. Sociaal-maatschappelijk en cultureel

Er wordt verwacht dat er relatief weinig weerstand zal zijn tegen het eindbeeld, aangezien de toename van bomen en bossen over het algemeen als een positieve ontwikkeling wordt ervaren. Bossen en beplanting dragen niet alleen bij aan het behoud van biodiversiteit en de kwaliteit van het landschap, maar versterken ook het natuurlijke karakter van de omgeving. Bovendien zal de beoogde uitbreiding slechts een beperkt oppervlak van Nederland beslaan, waardoor de impact op bestaande landbouwgebieden en woongebieden gering blijft. De voordelen van extra groen, zoals betere luchtkwaliteit, klimaatregulatie, en recreatiemogelijkheden, worden doorgaans breed gedragen in de samenleving.

Vanuit sociaalmaatschappelijk perspectief vormt de eerdergenoemde verhoging van het waterpeil in veenweidegebied een belangrijk aandachtspunt. Dit heeft significante impact op de bedrijfsvoering van boeren door lagere productiviteit en mogelijke financiële gevolgen. Het raakt direct aan de bestaanszekerheid van agrarische gezinnen die soms al generaties lang in het gebied boeren. Een zorgvuldige implementatie met oog voor compensatie en ondersteuning is daarom essentieel, waarbij niet alleen naar technische oplossingen moet worden gekeken maar ook naar de sociale aspecten van deze transitie.

Door aandacht te besteden aan transparante communicatie over de langetermijnvoordelen, zoals de bijdrage aan klimaatdoelstellingen, bodemgezondheid en waterbeheer, kan de algemene acceptatie van het beleid worden vergroot. Daarnaast kan onderzoek naar succesvolle voorbeelden van waterbeheer in veenweidegebieden helpen om vertrouwen te winnen en te laten zien dat bedrijfsvoering in een natter landschap mogelijk is.

Beoordeling: **groen**. Naar verwachting kunnen veel Nederlanders zich vinden in het eindbeeld. Er zal voldoende aandacht geschonken moeten worden aan de communicatie over de doelstellingen en zorgvuldige uitleg bij het waterpeil in het veenweidegebied.

4. Milieukundig

Vanuit milieukundig perspectief zal dit beeld positieve effecten hebben. Het verhogen van het waterpeil in het veenweidegebied bevordert de biodiversiteit, vooral wanneer een derde van het gebied wordt ingericht als natuur. Daarnaast draagt de extensieve bewerking van het land bij aan een vermindering van emissies. De aanplant van meer bossen zal zowel de CO₂-vastlegging bevorderen als de waterhuishouding in Nederland verbeteren.

Een neveneffect van het verhogen van het waterpeil is echter de uitstoot van moerasgas, waarbij aanzienlijke hoeveelheden methaan vrijkomen. Uit onderzoek blijkt echter dat het met betrekking tot broeikasgassen beter is om het waterpeil te verhogen dan het laag te houden en dat een alternatieve invulling van het veenweidelandschap nodig zal zijn om minder emissies te realiseren (Gunther et al., 2020; Smolders et al., 2019).

Beoordeling: **groen**. De maatregelen in de LULUCF-sector zullen overwegend een positief effect hebben op het milieu, zowel in termen van CO₂ als in waterhuishouding en biodiversiteit.

5. Technologisch

De voorgestelde maatregelen zijn niet technologisch van aard, en er is al veel kennis beschikbaar om deze plannen te implementeren. Voor de monitoring van koolstofvastlegging in de bodem zal echter een gestandaardiseerde rekenmethode ontwikkeld moeten worden. Het moment en de locatie van de meting hebben namelijk grote invloed op de resultaten (bijvoorbeeld of het recent heeft geregend, er net is gemaaid of mest is uitgereden). Hoewel er al verschillende ideeën bestaan, is er nog geen uniforme methode voorhanden.

Beoordeling: **groen**. Er wordt niet uitgegaan van technische versnellingen in het scenario.

6. Infrastructureel

Er zijn geen infrastructurele veranderingen nodig voor deze voorstellen.

Beoordeling: **groen**

7. Ruimtelijk

De maatregelen passen in het Nederlandse landbouwoppervlak zoals voorgesteld in de Urgenda-visie.

Beoordeling: **groen**

4.7.3. Conclusie en discussie

1. Hoe komen we uit op de emissieraming voor 2040?

Op basis van de inschattingen vanuit de Urgenda-visie, ondersteund door de ramingen van PBL in de TKVN, verwachten we dat de emissies sterk kunnen worden gereduceerd. De netto-emissies van de sector worden geraamd op 0,75-1,25 Mton, met als middenwaarde 1,1 Mton.

2. Waarom is versnelling haalbaar en wat zijn de voorname beperkingen?

In de II3050v2 wordt geen expliciete invulling gegeven aan de landbouw buiten de glastuinbouw. Voor dit gedeelte maken we gebruik van het Urgenda-scenario Landinzicht.

Voor de LULUCF-sector ligt de focus op drie hoofdmaatregelen: verhoging van het waterpeil in veenweidegebieden, uitbreiding van het bosareaal en verbetering van koolstofopslag in landbouwbodems. Deze maatregelen kunnen significant bijdragen aan emissiereductie, al moet rekening worden gehouden met tijdelijke extra emissies bij conversie van grasland naar bouwland.

Tabel 24. Haalbaarheidsinschatting per lens voor de sector Landgebruik

Lens	Beoordeling haalbaarheid
Beleid	Groen
Economisch	Oranje
Sociaal maatschappelijk en cultureel	Groen
Milieukundig	Groen
Technologisch	Groen
Infrastructureel	Groen
Ruimtelijk	Groen

Alle lenzen behalve de economische hebben we op groen gezet. De economische impact van deze maatregelen is gemengd. In veenweidegebieden leidt de noodzakelijke extensivering tot lagere directe inkomsten voor boeren. Nieuwe verdienmodellen via agroforestry en CO₂-credits bieden alternatieve inkomstenbronnen, terwijl verbeterde ecosystemen kunnen leiden tot lagere beheerskosten en stabielere opbrengsten. Hoewel de totale economische waarde van deze landbouwgronden waarschijnlijk zal dalen, zijn er voldoende beleidsinstrumenten en praktische handvatten beschikbaar om deze transitie te realiseren.

De combinatie van duidelijke technische oplossingen, beschikbare beleidsinstrumenten en nieuwe verdienmodellen maakt het mogelijk om deze veranderingen in landgebruik succesvol door te voeren. Met adequate ondersteuning voor boeren en voldoende implementatietijd kan een duurzamer landgebruikssysteem worden gerealiseerd dat bijdraagt aan de klimaatdoelstellingen.

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de mogelijke beleidsopties die genoemd zijn in de tekst.

Tabel 25. Voorgestelde beleidsmaatregelen voor de sector LULUCF-sector

Categorie	Beschrijving
Normeren	Verplichte verhoging grondwaterstand in veenweidegebieden, gecombineerd met compensatieregelingen voor boeren. Vermindert oxidatie van veen en daarmee CO ₂ -uitstoot.
Stimuleren en normeren	Subsidies en regelingen voor transformatie van 42.000 hectare landbouwgrond naar bos, inclusief grondafwaardering. Vergroot CO ₂ -vastlegging.
Stimuleren	Financiële ondersteuning voor aanleg 50.000 hectare voedselbos, met specifieke subsidies voor aanloopperiode in de beginjaren. Combineert voedselproductie met CO ₂ -vastlegging.

Categorie	Beschrijving
Stimuleren	Stimuleren aanplant 100 bomen per hectare grasland via bijvoorbeeld GLB-subsidies en ECO-punten. Vergroot CO ₂ -vastlegging in agrarisch gebied.
Stimuleren en beprijsen	Compensatiesysteem voor vastlegging CO ₂ in landbouwbodems met vergoeding boven 50 euro per ton. Stimuleert koolstofvastlegging in bodems.
Voorlichten	Kennisverspreiding over voordelen hoger organisch stofgehalte, agroforestry en kruidenrijk grasland voor bodemkwaliteit en opbrengsten. Bevordert vrijwillige adoptie van deze opties.
Stimuleren en beprijsen	Belasting op CO ₂ -uitstoot met korting voor CO ₂ -vastlegging via bomen en bossen. Dit kan ook via een toeslag/subsidie gerealiseerd worden. Financiële prikkel voor meer vastlegging.

3. Wat is de omvang van de restemissies?

We schatten de restemissies op 0,75-1,25 Mton, met als middenwaarde 1,1 Mton. De bovenwaarde komt overeen met de TVKN-achtergrondstudie in het klimaat basis scenario. De inschatting gaat echter gepaard met onzekerheden. Het effect van het vernatten van het veenweidegebied kan mogelijk iets anders uitvallen dan geraamd in de PBL-studie. Er is nog veel onduidelijkheid over de exacte emissies bij natte teelten en over hoeveel CO₂-opslag mogelijk is binnen agroforestry. Gedetailleerde keuzes, zoals de specifieke invulling van koolstofopslag en de selectie van boomsoorten, kunnen een aanzienlijke invloed hebben. De raming biedt echter een waardevolle indicatie, en daarnaast komt de TKVN tot een vergelijkbare schatting.

4.7.4. Geraadpleegde bronnen

- Netbeheer Nederland, Integrale Infrastructuurverkenning 3050 – II3050 (2023)
- PBL, Klimaat- en Energieverkenning 2024 (2024a)
- PBL, Transitieverkenning klimaatneutraal 2050 (2024b)
- Urgenda, LandInzicht (2024)
- PBL, Trajecten naar een 'klimaatneutrale' landbouw, landgebruik en glastuinbouw in 2050 (2024c)
- WUR, LULUCF (interactieve pdf) (2021)
- WUR, Greenhouse gas reporting of the LULUCF sector in the Netherlands (2024)
- RVO, Eco-activiteiten, punten en waarde 2024 (2024)
- Interprovinciaal Overleg en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Bos voor de toekomst (2020)
- Ministerie van Economische Zaken, Kamerbrief over de Voorjaarsbesluitvorming Klimaat, 26 april 2023 (2023)
- WUR, FACTSHEETS Klimaatmaatregelen met Bomen, Bos en Natuur (2020)
- Nationaal Monitoringsprogramma voedselbossen, Voedselbossen: Bodem, biodiversiteit, biomassa, business & beweging (2023)
- CE Delft, Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. Analyse van behoefte, aanbod en beleid voor negatieve emissies in Nederland (2023)
- Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V. et al., Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nat Commun* **11**, 1644 (2020).
- Smolders, A.J.P., van de Riet, B.P., van Diggelen, J.M.H., et al., De toekomst van ons veenweidelandschap (2019)

4.8. Analyse potentie negatieve emissies

4.8.1. Inleiding

Negatieve emissies zijn technieken waarbij CO₂ actief uit de atmosfeer wordt gehaald en langdurig wordt opgeslagen. Veel van deze technieken worden nu nog niet toegepast, maar zullen op termijn noodzakelijk zijn voor het bereiken van klimaatneutraliteit. Zelfs met de meest ambitieuze reductiemaatregelen zullen sectoren zoals landbouw nog restemissies hebben. In deze studie schatten we de restemissies op 18,5 Mton in 2040, en zullen deze emissies richting 2050 verder afnemen. Deze emissies kunnen worden gecompenseerd door een mix van technieken, variërend van natuurlijke oplossingen zoals mineralisatie met olivijn tot technische oplossingen zoals CO₂-afvang bij biobrandstofproductie en Direct Air Capture (DAC).

Studies van CE Delft en PBL tonen aan dat er in Nederland voldoende potentieel is voor deze negatieve emissies. In het scenario wordt ingezet op opties die goed aansluiten bij de Nederlandse context. Wel zijn er twee belangrijke aandachtspunten: de hoge kosten van DAC en de druk op de beschikbare biomassa voor energietoepassingen en negatieve emissies.

Er zijn echter meerdere routes mogelijk om het doel te bereiken mochten bepaalde technieken toch niet ingezet kunnen worden of als er meer restemissies zijn dan geraamd. Naast het uitbreiden van negatieve emissies kan er ook worden ingezet op extra emissiereductie in sectoren, bijvoorbeeld door meer groengas of hybride warmtepompen in de gebouwde omgeving, de inzet van meer biodiesel bij mobiliteit of CO₂-afvang bij gascentrales. Ook kan het potentieel voor negatieve emissies verder worden vergroot via extra biobrandstofproductie met CCS, meer bosaanplant of grotere inzet van AVI's. De overheid kan deze verschillende routes stimuleren door een helder beleidskader te ontwikkelen, inclusief een systeem voor het belonen van negatieve emissies.

Met gericht beleid en tijdige ontwikkeling van deze technieken lijkt het daarom haalbaar om de benodigde negatieve emissies in 2040 te realiseren.

In het vervolg van dit hoofdstuk wordt ingegaan welke type negatieve emissies er mogelijk zijn, worden er verschillende studies besproken die ingaan op negatieve emissies en wordt wederom gekeken naar de lenzen om te beoordelen in hoeverre dit scenario haalbaar lijkt te zijn.

4.8.2. Negatieve emissies in klimaatzaak 2040

Negatieve emissies verwijzen naar een scala aan processen die CO₂ uit de atmosfeer verwijderen en voor langere tijd opslaan. Deze processen zijn essentieel om het klimaatdoel van netto-nul uitstoot te behalen. Dit komt doordat sommige sectoren, zoals de landbouw en bepaalde industriële processen, nog steeds restemissies zullen hebben, zelfs met de meest ambitieuze reductiemaatregelen. Zo wordt ook een grote post aan negatieve emissies in de TVKN van PBL beschreven (PBL, 2024a). Ook in het bovenstaande scenario zijn er nog 18,5 Mton broeikgasemissies die zullen moeten worden gecompenseerd om klimaatneutraliteit te waarborgen.

Er bestaan diverse technieken om negatieve emissies te realiseren, elk met eigen kenmerken en uitdagingen. Een van de bekendste methoden is bebossing, waarbij nieuwe bossen worden aangeplant of bestaande bossen worden hersteld (extra bomen planten is vaak ook een van de onderdelen bij carbon creditsystemen). Dit natuurlijke proces haalt CO₂ uit de lucht via fotosynthese en biedt een bewezen manier om koolstof vast te leggen. Het vraagt echter veel ruimte en goed beheer om effectief te zijn.

Een andere benadering is biochar, waarbij organisch materiaal onder zuurstofarme omstandigheden wordt verhit om een koolstofrijk residu te vormen. Dit residu kan in de bodem worden opgenomen, waar het niet alleen CO₂ vasthoudt maar ook de bodemkwaliteit verbetert. Deze methode kan een nuttige aanvulling zijn in de landbouw. Eenzelfde effect heeft verhogen van koolstofopslag in de bodem door aangepaste landbouwpraktijken. Hierdoor wordt meer CO₂ in de bodem opgeslagen, wat de bodemgezondheid ten goede komt.

Daarnaast zijn er methoden zoals mineralisatie, waarbij CO₂ chemisch bindt met mineralen om stabiele, niet-oplosbare verbindingen te vormen. Met name silicaten, o.a. olivijn, vallen in deze categorie en kunnen bijvoorbeeld toegepast worden in bouwmaterialen zoals beton of als vervanger van ophoogzand bij kustverdediging.

Tot slot zijn er technologisch geavanceerdere methoden. Hieronder vallen Biobased Energy with Carbon Capture and Storage (BECCS), waarbij biomassa wordt ingezet om energie op te wekken terwijl de vrijgekomen CO₂ wordt opgevangen en opgeslagen. BECCS is een breed begrip en eronder vallen bijvoorbeeld zowel biomassacentrales met CCS, maar ook het produceren van groengas en bio-nafta met CCS. Dit systeem heeft het potentieel om negatieve emissies te genereren, maar is sterk afhankelijk van de beschikbaarheid van duurzame biomassa en infrastructuur voor CO₂-opslag. Eveneens in de categorie high-tech valt Direct Air Capture met Carbon Capture and Storage (DACCS), dat CO₂ direct uit de lucht haalt en opslaat. Hoewel dit een veelbelovende oplossing is, blijven de kosten en de hoge energievraag uitdagingen.

Het effectief inzetten van negatieve emissies vereist een mix van strategieën. Elk van deze methoden heeft zijn eigen voordelen, beperkingen en toepassingsgebieden. De uitdaging ligt in het combineren van deze technieken, rekening houdend met de beperkte beschikbaarheid van hulpbronnen zoals biomassa, de benodigde ruimte, de energievraag en de nodige infrastructuur voor CO₂-opslag. Daarnaast moeten sociale en economische factoren meegewogen worden om de transitie naar een klimaatneutrale samenleving succesvol te laten verlopen. Het samenbrengen van deze verschillende oplossingen is als het leggen van een complexe puzzel: alle stukken moeten in elkaar passen om het volledige potentieel te benutten.

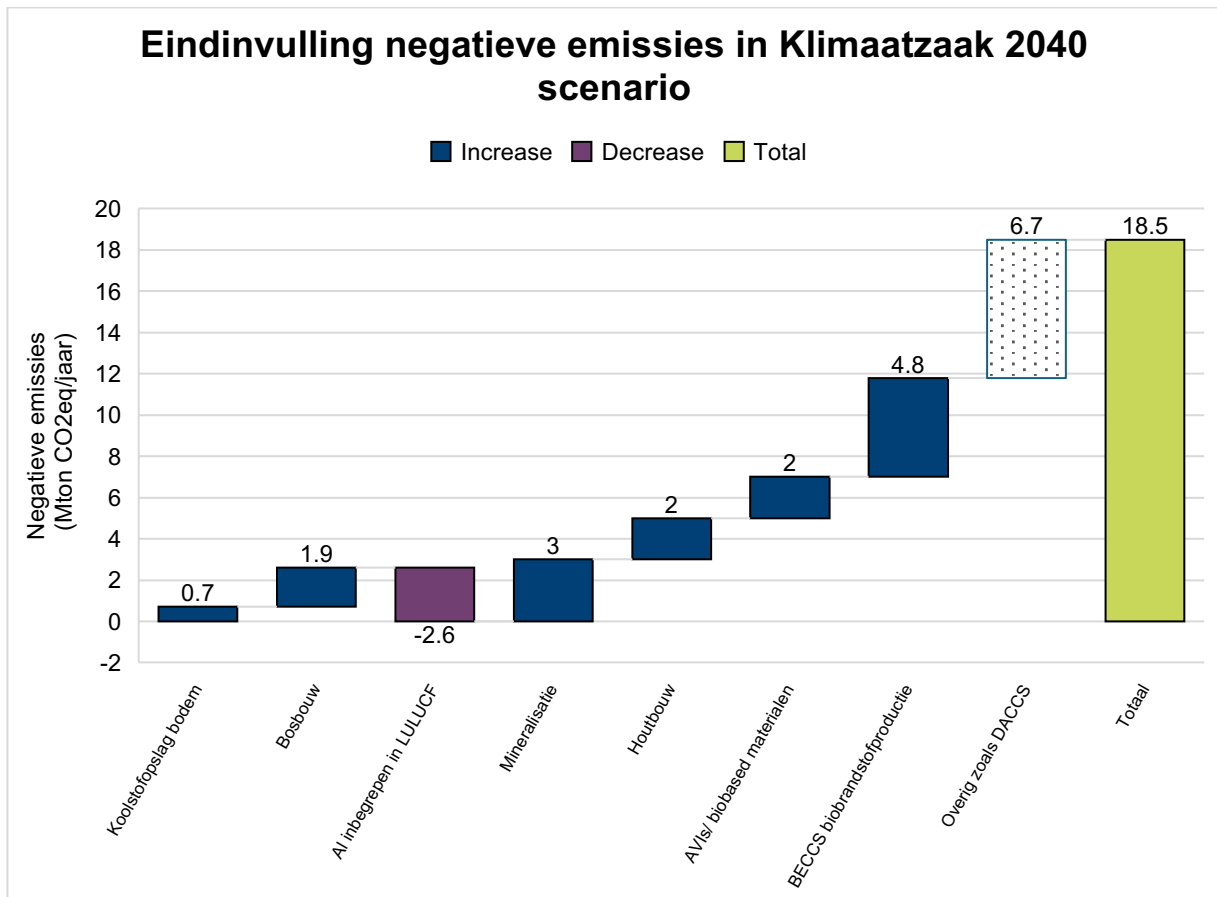
In deze studie wordt onderzocht op welke manier negatieve emissies in staat zijn om de restemissies in 2040 te compenseren. Hierbij worden wederom de lenzen meegenomen die in de voorgaande stukken beschreven zijn, omdat elke methode voor negatieve emissies andere eigenschappen heeft. De eigenschappen van de verschillende methoden worden met name gehaald uit het onderzoek 'Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid' van CE Delft (CE Delft, 2023). CE Delft heeft daarin, in opdracht van het

ministerie van Economische Zaken ter ondersteuning van het Nationaal Plan Energiesysteem, een overzicht gegeven van de mogelijkheden van negatieve emissies in Nederland, de daarbij behorende potentie, kosten en andere eigenschappen. Daarnaast zijn er drie scenario's gemaakt die inzicht geven in de mogelijkheden die er zijn. We gebruiken in onze analyse met name die studie om de eigenschappen van de negatieve emissie-opties in te schatten. Daarnaast gebruiken we ook veelvuldig de studie van PBL (2018) en de opties die worden besproken in de trajectverkenning (PBL, 2024a).

In de analyse zijn we steeds uitgegaan van impactvolle maatregelen die goed in het scenario in te passen zijn. Dit betekent geen grote aanpassingen wat betreft energievraag, landgebruik of andere grote wijzigingen ten opzichte van het huidige II3050v2 scenario. Dit levert een aantal negatieve emissies op die in ieder geval goed te realiseren zijn. De overige restemissies zullen vervolgens met duurdere en kostbare methoden weggehaald kunnen worden, waarbij er meerdere routes mogelijk zijn. Hierbij zullen we met name beschrijven en een indicatie geven welke opties er zijn. Vervolgens geven we een voorbeeldinvulling in het scenario om deze overige restemissies te verwijderen.

In de sector landbouw en LULUCF zijn al twee methoden gebruikt binnen de sector. Dit zijn koolstofopslag in de bodem en het aanplanten van extra bomen. Voor de volledigheid worden die hieronder wel getoond in de grafiek, maar vervolgens niet meegenomen in de extra negatieve emissies die nodig zijn voor het gehele systeem. Ze worden verder ook niet in dit hoofdstuk besproken.

Het eindbeeld voor negatieve emissies waar we op uitkomen is weergegeven in Figuur 33. Van de 18,5 Mton, zijn 11,8 Mton goed in het scenario in te passen. Er resteert vervolgens nog 6,7 Mton waarvan we meer open laten op welke manier dit het beste kan worden ingevuld. In het scenario kiezen we voor DACCS, maar er zijn ook andere opties om deze laatste emissies te reduceren of te compenseren. Deze afwegingen worden beschreven in het vervolg van het hoofdstuk.



Figuur 33. Negatieve emissies in het scenario. De koolstofopslag bodem en extra bomenaanplant zijn al behandeld in het onderdeel LULUCF en tellen daarom niet mee als extra negatieve emissies. In het scenario wordt verder ingezet op mineralisatie, houtbouw, AVI's en biobased materialen, BECCS bij biobrandstofproductie (met het aanbod van biomassa uit het huidige IJ3050v2 scenario) en overige methoden voor reduceren restemissie of extra negatieve emissies.

4.8.3. De bandbreedte van potentie negatieve emissies Nederland

Overzicht van potentie van negatieve emissies

Om een overzicht te geven in de verschillende opties, hoever de technologie ontwikkeld is en de bijbehorende kosten, gebruiken we de factsheets van CE Delft die zijn opgenomen in hun recente rapport over negatieve emissies. In dit onderzoek is onder meer ook gekeken naar de bevindingen van PBL in 2018 en het rapport bevat verder nieuwe inzichten en ontwikkelingen over dit onderwerp (PBL, 2018).

In het rapport van CE Delft worden verschillende mogelijkheden beschreven en de daarbij behorende kanttekeningen. Ook worden er technische en realistisch inschattingen gegeven van het potentieel, waarbij de volgende definities gehanteerd worden:

- Het technische potentieel, dat mogelijk gerealiseerd kan worden onder de juiste omstandigheden (bijv. beleid, succesvolle technische ontwikkeling, maatschappelijk draagvlak).
- Het realistisch potentieel, dat ook rekening houdt met verwachtingen over toekomstige marktomstandigheden, beleid en maatschappelijk draagvlak.

In ons scenario passen echter niet alle methoden voor negatieve emissies. Voorbeelden hiervan zijn BECCS bij het Hisarna proces bij Tata steel, aangezien dit proces niet meer

aanwezig is in het scenario. Verder worden BECCS bij biomassacentrales en biogascentrales ook niet meegenomen in dit onderzoek, omdat het geschikter is deze biomassa voor andere doeleinden in te zetten (zie verderop). De hoeveelheid afvang via BECCS is daarom beperkt tot de biomassastromen die op dit moment in het model zitten. De onderstaande tabel geeft de processen weer die wel worden meegenomen in dit onderzoek. Hierin wordt ook de TRL genoemd. Dit staat voor Technological Readiness Level en het is een getal tussen de 1 en 9 dat aangeeft in hoeverre een technologie ver genoeg ontwikkeld is om toegepast te kunnen worden. Hierbij is level 1 de fundamentele onderzoeksfase en level 9 de marktintroductie van de technologie.

Tabel 26. Overzicht van mogelijke technologieën voor negatieve emissies uit de CE Delft (2023)- en PBL(2018) - rapporten.

Technologie	Nederlands potentieel			Kosten (€/ton)	TRL	Inschatting benodigde biomassa (PJ/MT)*
	Technisch	Realistisch 2030	Realistisch 2050			
Bebossing	3,6	0,35	0,7	50-1.000	Nvt	Nvt
Biogeen deel AVI's		1,4	4,8	60-80	7-8*	Nvt
BECCS - Biomassavergassing i.c.m. brandstofproductie	>45-55*	2,3	6	0*	5-6*	18-22
Koolstofopslag in de bodem	2,3	0,6	0,9	0-50	8-9	Nvt
Biochar	5,5	0	0,05	200-1.500	3-6	18
Mineralisatie	14	0,7	5,4	50-70	4-9	Nvt
Houtbouw	3,9	0,4	3,9	Goedkoper tot 20% duurder	8-9	9
Biomaterialen (chemie)	16*	0,4	0	60-80*	4-9	~ 31
DACCS	17	0	>0	85-540	4-9	Nvt

* Afwezig in rapport CE Delft, overgenomen uit PBL (2018)

Zowel bebossing als koolstofopslag in de bodem zijn in andere hoofdstukken besproken. Voor bebossing komt Klimaatzaak 2040 scenario hoger uit dan de inschattingen in bovenstaande tabel. Dat komt met name doordat de LULUCF-sector in dit rapport is gebaseerd op een integrale visie, waarbij veel ruimte is voor bomen en bossen. Een korte samenvatting van de overige technieken volgt hieronder. Een uitgebreidere beschrijving is te vinden in het CE Delft rapport.

Biogeen deel AVI's: Afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) verwerken gemengd afval met een toenemend aandeel biogeen afval. Bij verbranding van deze materialen is er administratief sprake van nul emissies, omdat de CO₂ eerst door de biomassa is opgenomen. Met de overgang naar een circulaire economie zal de hoeveelheid verbrand

afval afnemen en het aandeel biogene CO₂ toenemen. Als deze biogene uitstoot wordt afgevangen en opgeslagen, leidt dit tot negatieve emissies. Verwacht wordt dat AVI's tegen 2040 hun uitstoot afvangen en opslaan, wat hen een belangrijke rol geeft in het realiseren van negatieve emissies. Daarom worden ze in de analyse van negatieve emissies meegenomen in plaats van het hoofdstuk over de industrie.

BECCS - Biomassavergassing i.c.m. brandstofproductie: Dit proces omvat de vergassing van biomassa om brandstoffen te produceren, gecombineerd met CO₂-afvang en -opslag. Hierdoor kan de CO₂ die in de biomassa is opgenomen, permanent worden vastgelegd, wat netto negatieve emissies oplevert.

Biochar: Een koolstofrijk materiaal dat ontstaat door pyrolyse van biomassa (verbranding zonder zuurstof). Biochar kan in de bodem worden toegepast, waar het CO₂ vastlegt en de bodemvruchtbaarheid verbetert.

Houtbouw: Het gebruik van hout als bouw materiaal legt koolstof langdurig vast in gebouwen. Dit vervangt materialen met een hogere CO₂-voetafdruk, zoals beton en staal.

Biomaterialen (chemie): Het gebruik van biomassa als grondstof voor de productie van materialen zoals bioplastics. Dit kan helpen om CO₂ vast te leggen in producten, hoewel de opslag vaak niet permanent is. De periode van opslag is in sommige gevallen echter wel een dusdanig lang, zeker wanneer de materialen gerecycled en opnieuw ingezet kunnen worden, dat er sprake kan zijn van negatieve emissies.

Direct Air Capture (DAC): Een geavanceerde technologie die CO₂ direct uit de lucht haalt en opslaat in geologische formaties. Hoewel veelbelovend, is DAC momenteel kostbaar en energie-intensief, met beperkte grootschalige toepassing. Het wordt momenteel op kleine schaal toegepast en er worden regelmatig onderzoeken gepubliceerd met daarin de huidige stand van zaken en nieuwe inzichten in de methodes om CO₂ zo efficiënt mogelijk uit de lucht te filteren (zoals bijvoorbeeld gedaan wordt bij Carbyon of Climeworks). Aangezien tweederde van de kosten voor DAC bestaat uit kapitaalkosten (CAPEX), is er significant potentieel voor kostenreductie door technologische ontwikkeling en opschaling.

Scenario's CE Delft en TVKN

Naast een inschatting van negatieve emissies in de TVKN, heeft CE Delft ook drie scenario's gemaakt voor negatieve emissies met inschattingen voor 2030, 2040 en 2050. Aangezien de precieze invulling van de combinatie van technieken sterk uiteenloopt en deels een (politieke) keuze is, bespreken we deze scenario's van CE Delft ook.

In het TVKN-scenario wordt veel nadruk gelegd op BECCS met biobrandstofproductie. Afhankelijk van de vraag van de industrie, kan een gedeelte hiervoor ook als biograndstof worden gebruikt. Het PBL beschouwt dit als een van de meest efficiënte manieren om negatieve emissies te genereren, omdat CO₂ eenvoudig kan worden afgevangen als onderdeel van het Fischer-Tropsch-proces, zonder extra kosten voor afvang. Dit scenario wordt in het TVKN-rapport vaak vergeleken met het de recente Impact Assessment van de Europese Commissie. Dit is het achterliggende rapport dat hoort bij de berichtgeving

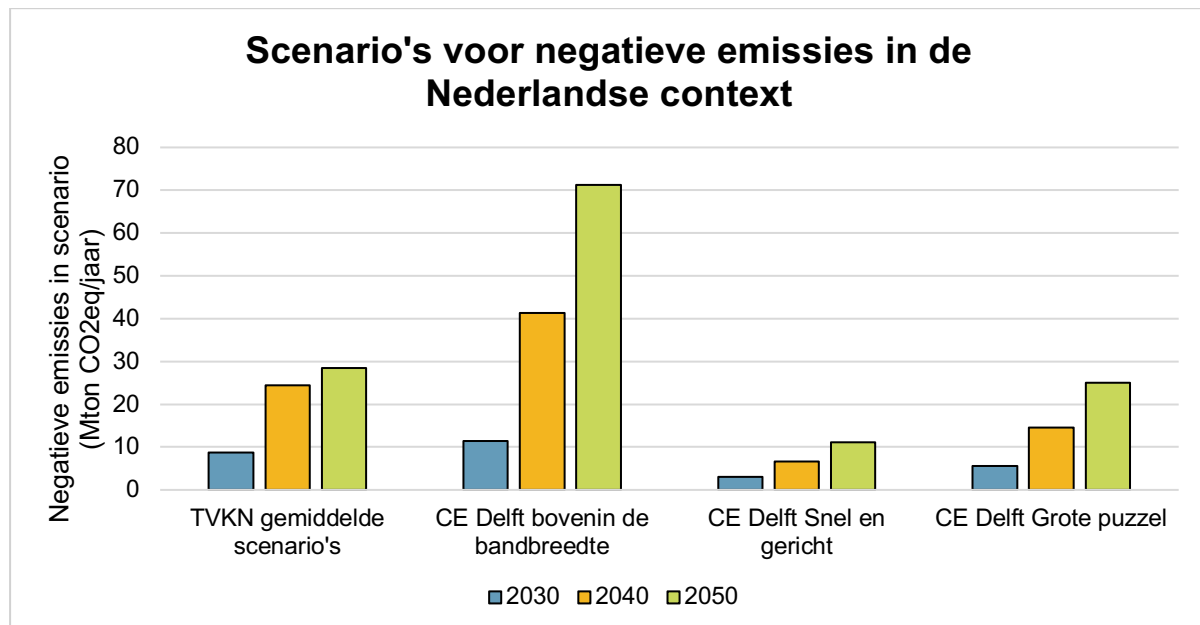
over het emissiereductiedoel van 90% in 2040 ten opzichte van 1990. In het scenario van de Impact Assessment is gekeken naar de Europese invulling van negatieve emissies, waarbij veel gebruik wordt gemaakt van BECCS voor elektriciteitsproductie en DACCS, maar niet van biogene CO₂-afvang voor vloeibare biobrandstofproductie. Het TVKN-scenario stelt echter dat de focus op biogene CO₂-afvang bij biobrandstofproductie een kosteneffectieve en haalbare route biedt om negatieve emissies te bereiken.

CE Delft schetst drie tijdpaden voor negatieve emissies:

Tijdpad 1 – Boven in de bandbreedte: Dit scenario veronderstelt dat de emissies niet snel genoeg worden verminderd, wat resulteert in een grote behoefte aan negatieve emissies. Om deze uitstoot te compenseren, moeten alle beschikbare technologieën maximaal worden ingezet. Dit vereist een aanzienlijke uitbreiding van de CCS-opslagcapaciteit om de benodigde CO₂ te bergen.

Tijdpad 2 – Snel en gericht: Dit scenario beschrijft een situatie waarin de emissies snel worden gereduceerd en er een succesvolle transitie naar een fossielvrije economie plaatsvindt. De behoefte aan negatieve emissies blijft daardoor beperkt. In dit tijdpad wordt CCS gericht ingezet, vooral door middel van BECCS en DACCS. Er is voldoende opslagcapaciteit beschikbaar om deze beperkte behoefte op te vangen.

Tijdpad 3 – Grote puzzel: Dit scenario gaat uit van een gematigde behoefte aan negatieve emissies. Er wordt geen specifieke inzet van biomassa of DAC voor negatieve emissies voorzien, maar de nadruk ligt op innovaties en het benutten van koppelkansen met de circulaire economie. Dit scenario benadrukt de synergie tussen negatieve emissies en circulaire processen om een evenwichtige aanpak te realiseren.



Figuur 34. Scenario's voor negatieve emissies in de Nederlandse context. Waarden overgenomen uit PBL (2024a) en CE Delft (2023). Voor de TVKN-waarde gaan we ervan uit dat de negatieve emissies komen door biobrandstofproductie en afvalverwerking. De negatieve emissies zijn evenredig geschaald met de koolstof bestemd voor opslag (in het rapport zijn er namelijk ook andere routes voor toepassing van de koolstof zoals synfuels).

In totaal leidt dit tot verschillende beelden met negatieve emissies. De waarden hiervan worden weergegeven Figuur 34. Het scenario ‘Snel en gericht’ heeft de minste negatieve emissies (6,6 in 2040 en 11,1 in 2050), terwijl de ‘Bovenin de bandbreedte’ verreweg de meeste heeft met 40 Mton in 2040 en 70 Mton in 2050. In de TVKN komen ze uit op 24,5 in 2040 en 28,4 Mton in 2050. Over het algemeen zitten de resterende emissies van het Klimaatzaak 2040 scenario met 18,5 Mton restemissies hier tussenin. In de TVKN zijn deze negatieve emissies met name afkomstig van BECCS met biobrandstofproductie, die variëren van 17-24 Mton opgeslagen emissies uit biobrandstofproductie voor de scenario’s die gehanteerd worden. De resulterende biobrandstoffen worden bijvoorbeeld gebruikt in transport en in de industrie.

Negatieve emissies in dit scenario

Op basis van de mogelijkheden die er zijn, is er gekozen voor een afweging tussen kosten en onderdelen die goed ingezet kunnen worden zonder grote druk op het systeem. Hierbij zijn bovenstaande rapporten en kanttekeningen erbij goed bestudeerd.

Dit leidt tot de volgende overwegingen:

- DACCS en BECCS-biobrandstofproductie hebben veel potentie
 - Ze leggen echter ook een grote druk op de energievraag, kosten en/of biomassa die ook voor andere doeleinden ingezet kan worden
 - Daarnaast is infrastructuur nodig om de CO₂ te transporteren en op te slaan
- Vandaar dat er eerst wordt gekozen voor methodes die goed inpasbaar zijn en relatief weinig kosten
- Vervolgens wordt onderzocht hoeveel afgevangen kan worden via BECCS-biobrandstofproductie in het huidige scenario
- Voor de eventuele resterende restemissie zijn verschillende (technologische) routes mogelijk. Dit kan worden ingevuld met DACCS, uitbreiding van biobrandstofproductie met CO₂-afvang (zoals biodiesel of groengas), meer bosbouw of een combinatie van deze en andere opties. Elk van deze routes heeft zijn eigen voor- en nadelen wat betreft kosteneffectiviteit, ruimtegebruik en technische haalbaarheid. In deze analyse kiezen we voor DACCS als hoofdroute, omdat deze technologie goed schaalbaar is en relatief eenvoudig kan worden geïntegreerd in het toekomstige energiesysteem van het ETM. DACCS is bovendien niet afhankelijk van de beschikbaarheid van biomassa of landbouwgrond. De uiteindelijke keuze voor de optimale technologische route zal echter afhangen van toekomstige ontwikkelingen in technologie, kosten en beleid.

Op basis van de bestaande rapporten, lijken olivijn bij ophoogzand, afvang bij AVI's en houtbouw logische keuzes die goed inpasbaar zijn in het Nederlandse systeem.

Voor olivijn volgen we de inschattingen van PBL/CE Delft. Er wordt in de scenario's 'Bovenin de bandbreedte' en 'De grote puzzel' van CE Delft ingeschat dat er 2,6 Mton CO₂/jaar in olivijn in ophoogzand kan worden opgeslagen en 0,5 Mton CO₂/jaar in beton. Hierbij wordt in de berekening ervan uitgegaan dat olivijn sinds 2023 wordt toegepast in het ophoogzand. Wanneer er enige versnelling optreedt, verwachten we dat dit doel nog steeds te halen is met beperkte extra inspanningen. We schatten daarom de afvang via mineralisatie in op 3 Mton/jaar in 2040.

De AVI's zullen in 2040 nog steeds operationeel zijn voor de verwerking van restafval. Bij de verbranding van biogeen afval kan CO₂-afvang worden toegepast, wat leidt tot negatieve emissies. De drie CE Delft scenario's gaan uit van 1,6, 2,6 en 3,1 Mton CO₂ per jaar in 2040. We gaan in onze analyse daarom conservatief uit van 2 Mton CO₂ per jaar. De daadwerkelijke hoeveelheid zal sterk afhangen van ontwikkelingen in het energie- en transportsysteem, maar ook hoeveel biogeen afval beschikbaar is. Een verschuiving naar een meer circulaire economie zal leiden tot minder biogeen afval bij AVI's, omdat materialen langer worden gebruikt en gerecycled. Deze periode in de materiaalcyclus kan gezien worden als tijdelijke CO₂-opslag, waarna de materialen uiteindelijk alsnog in de AVI's terecht zouden komen.

Houtbouw is een techniek die zichzelf al bewezen heeft. CE Delft kwantificeert het potentieel op 3,9 Mton per jaar in 2050 en in twee scenario's op 2,2 Mton in 2040. Vanwege het hoge beroep op biomassa en de waarden die in 2040 in de scenario's 'Bovenin de bandbreedte' en 'De grote puzzel' genoemd worden, zetten we deze op 2 Mton CO₂/jaar. Deze extra houtbouw gaat mogelijk ten koste van andere bouwmaterialen. Aangezien de industrie echter vrijwel volledig is geëlektrificeerd, zal dit niet leiden tot minder emissies elders.

In het Klimaatzaak 2040 scenario wordt biomassavergassing op twee manieren ingezet voor negatieve emissies. We hebben hierbij gekeken naar de huidige inzet van biomassa in het II3050v2 scenario. Er wordt 63 PJ biomassa vergast voor de industrie. Dit is vooral droge, houtige biomassa. Daarnaast is er ongeveer 100 PJ groengas, waarvan de helft wordt gemaakt via vergisting en de andere helft via superkritische vergassing. Voor de groengas productie wordt meer voornamelijk gebruik gemaakt van natte biomassa. We nemen aan dat er geen afvang mogelijk zal zijn bij de vergisting. Dit gaat meestal om relatief kleinere installaties, waardoor het niet realistisch is om te verwachten dat er een gehele infrastructuur beschikbaar is om de afvang en opslag te realiseren (CE Delft, 2023). Bij superkritische vergassing is dit echter wel mogelijk.

Voor een inschatting van de negatieve emissies bij deze processen, gaan we uit van het volgende. Ten eerste wordt 63 PJ biomassa vergast voor de productie van biobased grondstoffen. Dit levert ongeveer 38 PJ aan producten op, waarvan bijvoorbeeld 85% nafta voor de stoomkrakers (32 PJ) en 15% andere producten zoals kerosine. De precieze invulling van de eindproducten kan gewijzigd worden indien de industrie toch een andere vraag zou hebben. Bij dit proces kan 3,95 Mton CO₂ worden afgevangen.⁷⁶ Daarnaast wordt 50 PJ biomassa via superkritische vergassing omgezet in groengas. Bij dit proces kan per PJ biomassa ongeveer 16,5 kton CO₂ worden afgevangen, wat neerkomt op 0,83 Mton CO₂ voor de totale productie van 50 PJ groengas.⁷⁷ Samen leveren deze vergassingsroutes dus 4,8 Mton aan negatieve emissies op.

⁷⁶ Inschatting gedaan op basis van Fischer-Tropsch processen. Hierbij zorgt 1 PJ biomassa voor 0,6 PJ bioproducten, waarbij er een stuurbaar productportfolie is. Tegelijkertijd ontstaat er 62 kton CO₂ die afgevangen kan worden.

⁷⁷ Eigen inschattingen gedaan op basis van de achtergronddocumentatie over superkritische vergassing in het ETM (TNO, 2020). Hierbij gaan we ervan uit dat er bij superkritische vergassing per PJ 16,5 kton kan worden afgevangen.

In totaal levert dit $3+2+2+4,8 = 11,8$ Mton negatieve emissies op. In het scenario zijn er echter 18,5 Mton restemissies. Dit betekent dat er nog 6,7 Mton restemissies zijn die gecompenseerd moeten worden.

Er zijn verschillende routes mogelijk om de resterende emissiereductie te realiseren. Een eerste optie is verdere emissiereductie in bestaande sectoren. Dit kan door extra aanplant van bomen, de emissies in de elektriciteitssector via CCS richting nul brengen, meer inzet van groengas in de gebouwde omgeving, meer inzet van tijdelijke hybride warmtepompen, verhoogd gebruik van biodiesel in mobiliteit of aanpassingen in de landbouw via andere bemesting of extensivering. Bij verhoogde productie van biobrandstoffen kunnen bovendien extra emissies worden afgevangen.

Een tweede optie is het uitbreiden van negatieve emissies. Dit kan via uitbreiding van CO₂-afvang bij AVI's (tot mogelijk 3 Mton volgens CE Delft scenario's), toepassing van biochar, verhoogde productie van biobrandstoffen met CO₂-afvang net zoals in het TVKN-scenario, of inzet van DACCS.

In deze analyse gaan we uit van DACCS voor de resterende 6,7 Mton. DACCS is een technologie waarbij CO₂ direct uit de lucht wordt afgevangen. De huidige technologie bevindt zich in een fase van demonstratie en vroege commercialisatie. Er zijn verschillende pilot- en demonstratieprojecten wereldwijd actief, zoals de installaties van Climeworks in Europa en Carbon Engineering in Canada. Deze projecten tonen aan dat de technologie technisch haalbaar is, maar nog niet op schaal kan concurreren met andere emissiereductiemaatregelen vanwege de hoge kosten (geraamd op 85-540 euro/ton in 2050) en energie-intensiteit. Het is daarom goed mogelijk dat er in 2040 kosteneffectievere alternatieven beschikbaar zijn. Een goed functionerende CO₂-beprijzingsmarkt kan helpen bij het selecteren van de meest kostenefficiënte oplossingen. Dit wordt verder uitgewerkt in het onderdeel beleid.

Gebaseerd op de middenwaarden van kosten uit de CE Delft rapportage, komen we uit op een kostenpost van $3 * 60 + 2 * 70 + 2 * 0 + 4,8 * 0 + 6,7 * 312,5 = 2,4$ mld euro/jaar, waarvan 2,1 mld euro kosten voor DACCS zijn. De kosten zijn een indicatie, omdat deze hoogte van de kosten geraamd is in 2050 in de CE Delft rapportage. In 2040 zullen de kosten naar verwachting anders zijn. Daarnaast zijn kosten tijdelijk van aard en hangen sterk samen met de restemissies in de overige sectoren. Op het moment dat alle sectoren het eindbeeld hebben bereikt, zijn de restemissies rond de 8,7 Mton en is er geen DACCS meer nodig voor compensatie. Dit betekent dat de kosten snel kunnen afnemen richting de 0,3 mld euro/jaar, afhankelijk van de precieze invulling van de restemissies en negatieve emissies na 2040. De DACCS kunnen vervolgens ingezet worden om emissies van andere landen of uitstoters te compenseren en zullen waarschijnlijk nog steeds nodig zijn op mondiale schaal. De energievraag van DACCS is opgenomen in het ETM-scenario. Verder is er 16 PJ hout nodig voor de bouw en ongeveer 63+100 PJ biomassa voor de biobrandstofproductie. De beschikbaarheid voor biomassa en fair share voor Nederland wordt verder behandeld onder de lens 'Milieukundig'.

4.8.4. Beoordeling haalbaarheid

De invulling en afwegingen voor de invulling van het scenario zijn hierboven beschreven. In het vervolg wordt de invulling van de negatieve emissies getoetst aan de hand van de lenzen.

1. Beleid

Om de noodzakelijke negatieve emissies tijdig te realiseren is gericht beleid noodzakelijk. Dit beleid moet zorgen voor zowel de juiste economische prikkels als de benodigde infrastructuur en regelgeving. Het huidige beleid is nog niet specifiek gericht op het stimuleren van negatieve emissies. Hoewel initiatieven zoals Porthos en Aramis belangrijke stappen zetten in de ontwikkeling van CO₂-opslagfaciliteiten, zijn aanvullende beleidsmaatregelen nodig om de benodigde technologieën op te schalen. Dit kan via gerichte financiële ondersteuning voor technologieën zoals BECCS en DACCS, bijvoorbeeld door uitbreiding van de SDE++ regeling of nieuwe subsidieregelingen specifiek voor negatieve emissies.

Een belangrijk element is de ontwikkeling van een marktprijs voor negatieve emissies. Dit kan op verschillende manieren worden vormgegeven en op verschillende schaalgroottes zoals binnen Europa of binnen Nederland. Een optie is om per sectorspecifieke doelen voor maximale restemissies vast te stellen. Als een sector meer uitstoot, zou deze het surplus moeten compenseren door negatieve emissies in te kopen tegen de marginale kosten van deze technologieën. Een andere mogelijkheid is om negatieve emissies te koppelen aan het EU ETS, waarbij bedrijven kunnen kiezen tussen emissiereductie of het inkopen van negatieve emissies. De prijs van negatieve emissies zou dan gekoppeld zijn aan de ETS-prijs, wat zorgt voor een stabiel economisch signaal. Bij een dergelijke koppeling moet wel worden geborgd dat het gebruik van negatieve emissies niet ten koste gaat van noodzakelijke emissiereducties in de sectoren. Dit zou kunnen worden ondervangen door beleidsmatig in te grijpen als blijkt dat er in bepaalde sectoren vanwege kostenoverwegingen structureel gekozen wordt voor negatieve emissies in plaats van het reduceren van hun uitstoot. Ook zou er een apart handelssysteem voor negatieve emissies kunnen worden opgezet, waarbij de vraag wordt gecreëerd door verplichte compensatie van bepaalde emissies. Elk type systeem zal voor- en nadelen hebben en het zal van belang zijn om de specifieke invulling zorgvuldig af te wegen.

Ook zal er vanuit de overheid sturing nodig zijn voor de infrastructuur om CO₂-transport en -opslag te faciliteren. Zonder adequate infrastructuur kunnen technologieën als BECCS en DACCS niet grootschalig worden toegepast. Tijdige investeringen in pijpleidingen en opslagfaciliteiten zijn daarom essentieel. Dit vraagt om een lange-termijnvisie op de rol van CO₂-infrastructuur en mogelijk publieke investeringen om de eerste projecten mogelijk te maken.

Een ander belangrijk aandachtspunt is de beschikbaarheid van biomassa. Omdat biomassa in verschillende sectoren wordt gebruikt, zijn duidelijke afspraken nodig over de prioritering van toepassingen. Meer hierover is te vinden bij de lens 'Milieu'. Het huidige duurzaamheidskader voor biomassa zou kunnen worden uitgebreid met criteria voor de inzet van biomassa voor negatieve emissies. Hierbij moet worden gekeken naar de efficiëntie van verschillende toepassingen en de beschikbaarheid van alternatieven. Ook

moet worden vastgelegd hoe CO₂-afvang bij biobrandstofproductie kan worden gestimuleerd (door middel van beleid) en onder welke voorwaarden dit als negatieve emissie kan worden geteld.

Tot slot is er behoefte aan heldere definities en criteria voor negatieve emissies. Vooral bij technieken zoals koolstofopslag in de bodem is het belangrijk dat de opslag langdurig is. Als de opgeslagen koolstof later weer vrijkomt, draagt deze alsnog bij aan het broeikaseffect. Er zijn daarom duidelijke regels nodig over wat telt als korte- en langetermijnopslag, en hoe deze opslag kan worden gemonitord en geverifieerd. Dit vraagt om een robuust systeem van monitoring, rapportage en verificatie (MRV).

Beoordeling: **groen**. Beleidstechnisch zijn er geen grote belemmeringen. Er zullen zeker stappen gezet moeten worden in het stimuleren voor deze opties, maar dat zal met name betekenen dat er vanuit de overheid randvoorwaarden schetst wanneer iets telt als negatieve emissies en welke compensatie daartegenover staat. Daarnaast lijkt een financiële waardering voor negatieve emissies noodzakelijk. Aangezien de focus op dit moment ligt op reduceren, is er relatief weinig aandacht geweest voor compenseren. Negatieve emissies zullen de komende jaren echter steeds belangrijker worden om de doelen te behalen.

2. Economisch

Economisch gezien zullen er extra kosten komen door de afvang van emissies. Dit komt onder meer doordat er ofwel kosten zullen zijn voor de opslag van CO₂, of er zullen bronnen nodig zijn waar de CO₂ in opgeslagen wordt. Deze bronnen kunnen duurder zijn dan de alternatieven, waardoor er meer kosten in het systeem zijn dan zonder.

De kostenstructuur is hierbij van belang, met hoge initiële kosten voor technieken zoals DACCS door hun energie-intensieve aard, terwijl houtbouw kostenneutraal kan zijn door het vervangen van traditionele materialen. Bij BECCS wordt de CO₂ al in het productieproces geproduceerd, maar zal de afvang en opslag mogelijk tot kosten leiden.

Een hogere CO₂-prijs stimuleert investeringen in deze technologieën, waardoor de terugverdientijd korter wordt en de economische voordelen toenemen. Dit hangt sterk samen met het CO₂-systeem waarin negatieve emissies ook beloond worden. Op dit moment zitten negatieve emissies niet in ETS. Op het moment dat dit wel het geval is, kunnen deze methoden interessanter worden omdat er dan de ETS prijs te verdienen is met negatieve emissies. Dit geldt vooral voor BECCS, houtbouw en AVI's, aangezien de kosten in Nederland daarvoor relatief laag zijn en op dit moment qua inschatting lager dan de ETS prijs. Schaalvoordelen en leercurves zijn ook belangrijk: grotere toepassing van technieken zoals DACCS en BECCS kan leiden tot lagere kosten per ton CO₂.

Naast ETS zijn er ook andere prijzen voor CO₂ waarnaar gekeken kan worden. In de literatuur wordt het onderscheid gemaakt tussen preventie-, herstel, of schadekosten. Deze prijzen variëren sterk in doelstelling en in methodiek, waardoor de uitkomsten ook sterk verschillen. In het tekstblok op de volgende pagina worden de verschillende prijzen uitgelicht. Afhankelijk van welke prijs precies wordt gehanteerd, zal het wel of niet rendabel zijn om bijvoorbeeld grootschalig DACCS toe te passen. Op dit moment is de

enige niet schaduwprijs die veelvuldig wordt gebruikt de ETS prijs. De prijs in 2040 zal naar verwachting toenemen omdat het aantal rechten steeds minder zal zijn. Op het moment dat de kosten van DACCS hieronder komen, kan het snel gaan met de ontwikkeling omdat het dan goedkoper is om emissies af te (laten) vangen dan om ze in te kopen via het ETS systeem. Mocht deze situatie zich voordoen, dan kan het mogelijk zijn dat er via beleid geborgd moet worden dat er binnen sectoren geïnvesteerd blijft worden in emissiereductie, aangezien beide sporen - zowel reductie als negatieve emissies - nodig zijn om klimaatneutraliteit te bereiken.

Deze prijzen kunnen ook gebruikt worden om een handelssysteem te ontwikkelen waarbij negatieve emissies beloond worden, zoals is toegelicht in de beleidslenzen.

De beschikbaarheid van infrastructuur, zoals transportleidingen en opslagfaciliteiten, beïnvloedt de economische haalbaarheid van negatieve emissies. Zoals beschreven in de beleidssectie kan de overheid deze infrastructuur ondersteunen door publieke investeringen in CO₂-transportnetwerken en het faciliteren van opslaglocaties. Voor houtbouw en biomaterialen kan een stabiele marktvraag worden gecreëerd door bijvoorbeeld een minimaal percentage biobased materialen in openbare aanbestedingen te eisen of door CO₂-prestatie-eisen in de bouw aan te scherpen.

Ten slotte is de beschikbaarheid van hulpbronnen, zoals duurzame biomassa, essentieel voor technieken als BECCS en houtbouw. Schaarste kan de kosten verhogen en leiden tot concurrentie met andere sectoren. Het zal hierbij van belang blijven om rekening te houden met de andere toepassingen van biomassa (de biomassa cascadering) en pas in een laat stadium de biomassa in te zetten voor energetische toepassingen.

Beoordeling: **oranje**. Ondanks de mogelijke extra kosten voor het realiseren van negatieve emissies, zitten veel opties onder de huidige ETS-prijs. Er zijn echter naar verwachting ook duurdere opties nodig om de restemissies te compenseren. Als deze prijs sterk stijgt en de kosten van de negatieve emissietechnieken dalen, of als er gekozen wordt om een ander type prijs te hanteren voor veel organisaties, zijn er economisch geen belemmeringen voor grootschalige toepassingen van negatieve emissies. We verwachten echter wel hogere kosten voor het realiseren van negatieve emissies, waardoor we deze lens op oranje zetten.

Verschillende type CO₂-prijzen

De **preventieprijs** is bedoeld om de uitstoot van CO₂ te voorkomen door een financiële prikkel te geven die investeringen in emissiereductie rendabel maakt. Een van de bekendste toepassingen van de preventieprijs is het Europese emissiehandelssysteem (ETS). Het ETS is opgezet om een marktprijs voor CO₂ te creëren en bedrijven te stimuleren hun uitstoot te verminderen door middel van handel in emissierechten. De prijs per ton CO₂ in het ETS varieert afhankelijk van vraag en aanbod, en heeft de laatste jaren een stijgende trend laten zien, wat wijst op toenemende druk om uitstoot te beperken en te investeren in schonere technologieën. Industriële spelers en energiebedrijven gebruiken de ETS-prijs om hun investeringen in energiebesparing, hernieuwbare energie en CO₂-afvangtechnologieën te onderbouwen. Het doel is om de overgang naar een koolstofarme economie te versnellen voordat de klimaatimpact verergert. Deze prijs is op dit moment rond de 70 euro/ton. Andere preventieprijsen van bijvoorbeeld CPB/PBL uit 2016 komen uit op 200 euro/ton en de Europese Investeringsbank zit rond de 150 euro/ton.

De **herstelprijs** verwijst naar de kosten die verbonden zijn aan het ongedaan maken van de klimaatschade door CO₂-uitstoot. Dit is de prijs die nodig is om CO₂ uit de atmosfeer te halen via negatieve emissietechnologieën zoals BECCS en DACCS. De herstelprijs is doorgaans hoger dan de preventieprijs omdat het actieve CO₂-verwijdering betreft, wat technisch complexer en energie-intensiever is. Beleidsmakers en klimaatfondsen hanteren de herstelprijs om projecten te financieren die bijdragen aan negatieve emissies. Dit helpt bij het bevorderen van technologieën die de reeds uitgestoten CO₂ neutraliseren en langdurig opslaan. Het doel van de herstelprijs is het aanpakken van de opbouw van CO₂ in de atmosfeer, wat cruciaal is om overschotten te compenseren en de opwarming van de aarde tegen te gaan.

De **schadeprijs** is een maatstaf voor de economische kosten van de schade die een ton CO₂-uitstoot veroorzaakt. Dit omvat de impact op gezondheid, ecosystemen, economie en het klimaat als geheel. De schadeprijs wordt vaak gebruikt door overheden en internationale organisaties om de werkelijke maatschappelijke kosten van CO₂-uitstoot te berekenen. Deze prijs kan aanzienlijk hoger zijn dan de preventieprijs en herstelprijs, omdat het alle langetermijngevolgen van klimaatverandering weerspiegelt. De schadeprijs dient als basis voor beleid dat gericht is op het internaliseren van externe kosten, zoals belastingmaatregelen en langetermijnplannen om uitstoot te verminderen. Door de schadeprijs in overweging te nemen, kunnen beleidsmakers beter begrijpen wat de economische rechtvaardiging is voor strengere reguleringen en investeringen in duurzame technologieën. Schadeprijzen worden op veel diverse manieren berekend en er is een grote bandbreedte tussen de 250-13.000 euro/ton. Een concreet voorbeeld is de provincie Utrecht, die een prijs hanteert van 875 euro/ton.

3. Sociaalmaatschappelijk-cultureel

Voor deze lens voorzien we relatief weinig belemmeringen. Voor de infrastructuur en leidingen zullen er duidelijke afspraken gemaakt moeten worden met de maatschappij. Ook zal er mogelijk aandacht moeten zijn over het nut en de noodzaak van het afvangen van deze emissies, omdat de aandacht ervoor nog niet grootschalig is geweest. Wanneer er veel biomassa wordt gebruikt voor biobrandstoffen, kan dat eveneens leiden tot mogelijke weerstand. Desalniettemin kunnen veel van deze factoren worden weggenomen met voldoende toelichting en duidelijke keuzes vanuit de overheid.

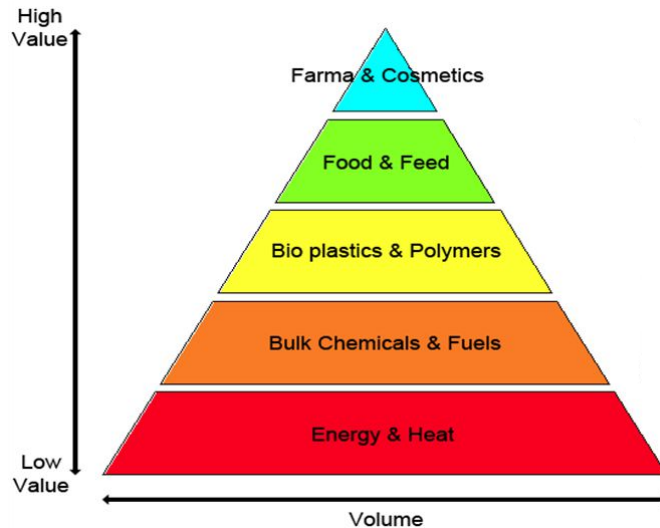
Beoordeling **groen**. Op basis van onze inschatting zijn bovengenoemde kanttekeningen goed weg te halen met voorlichting en weloverwogen keuzes die toegelicht worden. Veel van de maatregelen passen goed in Nederland en in meerdere routes die Nederland zou kunnen nemen.

4. Milieukundig

De beschikbaarheid en verdeling van biomassa is vanuit milieukundig perspectief een cruciale factor bij de inzet van technieken zoals houtbouw en BECCS. In het beschouwde scenario is er 16 PJ hout en 164 PJ biomassa nodig voor BECCS-vergassing en superkritische vergassing. Samen met de biomassa die al is opgenomen voor pelletkachels, akkerbouw en transport, komt het totale gebruik op ongeveer 216 PJ. Deze hoeveelheid is reeds onderdeel van het ii3050v2 scenario, zonder additionele biomassa-inzet.

Deze vraag naar biomassa creëert druk op de beschikbare grondstoffen. Om een inschatting te maken, maken we gebruik van het rapport Bio-scope van CE-Delft (Ce Delft, 2020). Dit is een rapport vanuit 2020 waarin op zeer gedetailleerde wijze zo goed mogelijk in kaart is gebracht hoeveel potentie biomassa zou kunnen hebben in Nederland. Het CE Delft-rapport benadrukt dat Nederland bij biomassa-inzet moet uitgaan van een "fair share" benadering, zowel nationaal als internationaal. Dit betekent dat rekening gehouden moet worden met de mondiale beschikbaarheid en de concurrentie met andere landen en sectoren. Hierbij geldt een duidelijke prioritering: eerst farmaceutische toepassingen en voedsel, daarna pas industriële processen en energie. Dit staat ook wel bekend als de biomassa piramide, zoals weergegeven in de onderstaande Figuur.

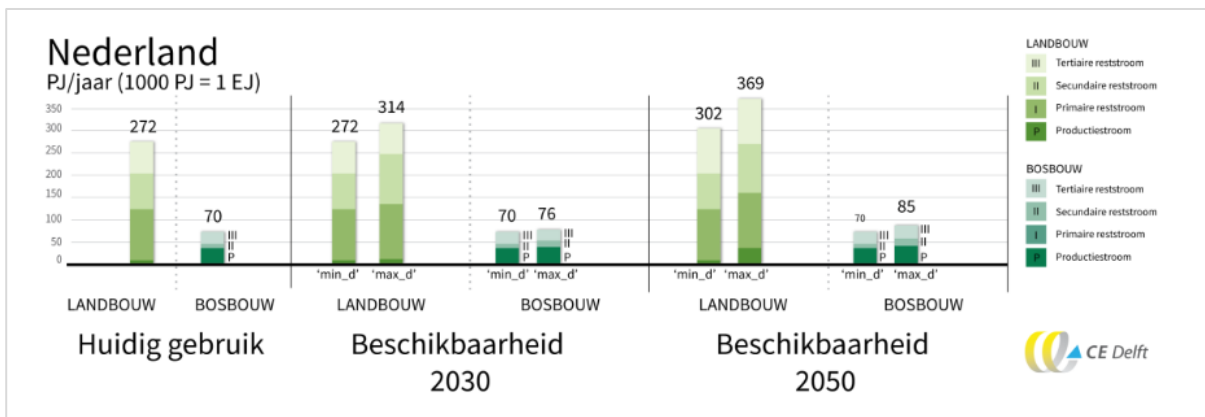
De beschikbaarheid van duurzame biomassa heeft implicaties voor de hoeveelheid groengas en biobrandstoffen, en voor negatieve emissies specifiek de haalbaarheid van zowel houtbouw als BECCS. Hoewel houtbouw en bio-energie niet direct concurreren - constructiehout heeft een hogere economische waarde dan energiehout - zijn er wel indirecte risico's. Een grote energievraag kan leiden tot intensievere bosbouw, inclusief laagwaardig hout. Dit kan de biodiversiteit schaden en de koolstofopslag in bossen verminderen, resulterend in een koolstofschuld. Duurzaam biomassagebruik vereist daarom strikte regelgeving die ook de bredere effecten op bosesystemen en hun rol in koolstofopslag meeneemt.



Figuur 35. Biomassa piramide, cascadering is belangrijk, figuur overgenomen van WISE (2024).

In het vervolg analyseren we of de benodigde hoeveelheid biomassa in het versnellingscenario past binnen een realistische en eerlijke verdeling van de beschikbare biomassa. Dit is een complexe vraag waarbij vele factoren een rol spelen, zoals de totale beschikbaarheid van duurzame biomassa, de verdeling tussen landen op basis van een "fair share" principe, concurrerende toepassingen, en strenge duurzaamheidscriteria. Voor deze analyse baseren we ons op drie recente studies die elk een eigen perspectief bieden: het Bio-scope rapport van CE Delft uit 2020, een achtergrondrapportage van de TVKN van PBL (PBL, 2024b), en de standaardinstellingen van het ETM. Door deze studies samen te bekijken, kunnen we een inschatting doen of de benodigde 216 PJ voor het energiesysteem en negatieve emissies past binnen een realistische inschatting van de beschikbare biomassa voor Nederland.

Het CE Delft rapport raamt de binnenlandse beschikbaarheid van biomassa in Nederland voor 2050 op 372-454 PJ per jaar. Deze beschikbaarheid komt uit twee hoofdstromen: landbouw (inclusief reststromen) met 302-369 PJ per jaar en bosbouw (inclusief reststromen) met 70-85 PJ per jaar. Dit wordt weergegeven in de onderstaande Figuur 36.



Figuur 36. Potentie van biomassa in Nederland, figuur overgenomen uit CE Delft (2020)

Deze beschikbaarheid is gebonden aan belangrijke voorwaarden: strenge duurzaamheidscriteria, een effectieve toepassing van cascadering, en doorlopende innovatie in teelt en verwerking. Ondanks de substantiële binnenlandse beschikbaarheid, zal Nederland volgens het rapport een netto-importeur van biomassa blijven. Dit vraagt om een internationale benadering van biomassagebruik en een eerlijke verdeling van beschikbare biomassa op mondiale schaal, waarin Nederland en de overheid een grote rol in kunnen spelen om deze verdeling mogelijk te maken.

Het PBL komt in haar TVKN-achtergrondrapport tot een beduidend lagere beschikbaarheid voor 2050 van 125-231 PJ voor energie en feedstock, plus 18-26 PJ voor materialen afkomstig uit Nederland, maar op 628-1304 PJ voor energie en feedstock en 243-309 PJ voor materialen wanneer er ook import vanuit andere EU-landen mogelijk is (PBL, 2024b). Deze verdeling van Europese biomassa is met name gemaakt op basis van de huidige primaire productie van koolwaterstoffen. De analyse houdt verder rekening met een internationale verdeling van biomassa op basis van BNP en gaat ervan uit dat Nederland vooral afhankelijk zal zijn van Europese import naast binnenlandse productie. PBL benadrukt dat import van buiten de EU niet is meegenomen, aangezien andere wereldregio's hun biomassa zelf nodig zullen hebben voor verduurzaming.

Bij deze ramingen plaatst PBL enkele belangrijke kanttekeningen. De grote bandbreedtes komen voort uit onzekerheden rond factoren als landbouwproductiviteit, beschikbaarheid van marginale gronden en de benodigde hoeveelheid biomassa-resten voor bodemkwaliteit. De bovenkant van de bandbreedte is alleen haalbaar bij het oplossen van grote logistieke uitdagingen en het ontwikkelen van nieuwe verwerkingscapaciteit. Daarbij benadrukt PBL dat biomassaproductie niet mag concurreren met voedsel- en veevoerproductie, en dat maatschappelijk draagvlak en strikte duurzaamheidscriteria essentieel zijn.

Tot slot heeft TNO voor het Energietransitiemodel een meer technische analyse gemaakt die zich richt op lokaal beschikbare biomassastromen. Voor 2030/2035 komt deze analyse tot ongeveer 204 PJ, verdeeld over natte biomassa (110 PJ), droge biomassa (62 PJ), vethoudende biomassa (11 PJ) en biogeen afval (21 PJ). Deze analyse kijkt echter niet naar internationale verdelingsvraagstukken of bredere duurzaamheidscriteria. Op basis van de aantallen in het ETM zou er ongeveer 40 PJ droge biomassa geïmporteerd moeten worden.

De benodigde 216 PJ voor het energiesysteem en negatieve emissies in het versnellingscenario past binnen de bovengrens van de PBL-ramingen voor 2050 voor biomassa binnen Nederland (125-231 PJ voor energie en feedstock en 18-26 PJ voor materialen) en ligt ook ruim onder de PBL-ramingen met import vanuit Europa en de eerdere ramingen van CE Delft (372-454 PJ). Bij deze laatste inschatting moet echter ook meegenomen worden dat er een substantieel deel van de biomassa (ongeveer 100PJ volgens CE Delft in 2050) beschikbaar is voor de landbouw als bodemverbeteraar (bemesting).

Echter, het realiseren van deze beschikbaarheid is een complexe opgave die alleen haalbaar lijkt te zijn onder strikte voorwaarden. Het vereist een goed functionerend

systeem van cascadering volgens de biomassa-piramide, waarbij hoogwaardige toepassingen prioriteit krijgen. Ook zijn er forse inspanningen nodig op het gebied van innovatie in teelt en verwerking, en moet er een effectieve logistieke infrastructuur worden ontwikkeld voor het inzamelen en verwerken van biomassastromen. Hoewel de benodigde hoeveelheid biomassa dus in principe beschikbaar kan komen, is het van belang dat Nederland inzet op een internationale benadering die bijdraagt aan een eerlijke mondiale verdeling van biomassa en tegelijkertijd werkt aan het wegnemen van praktische belemmeringen voor het benutten van het beschikbare potentieel.

Beoordeling: **oranje**. Milieukundig zorgen negatieve emissies voor minder CO₂ in de lucht en dragen daardoor bij aan minder klimaatverandering. Zorg moet gedragen worden voor biomassatoepassingen en de beperkte beschikbare hoeveelheid. Wanneer hier (internationale/)Europese/Nederlandse afspraken over gemaakt worden en de landen gebruik maken van een fair share principe, zou dit goed geregeld moeten kunnen worden. Dit zal echter een enorme opgave zijn die zeer veel inspanningen vraagt vanuit Nederland en Europa om de beschikbare biomassa op een goede manier te verdelen. Qua potentie lijkt het echter wel goed binnen de bandbreedtes te passen, maar dit zal alsnog een grote druk op de beschikbare biomassa leggen.

5. Technologisch

Technologische belemmeringen vormen een uitdaging voor de grootschalige inzet van negatieve emissietechnieken zoals mineralisatie, DACCS en de veilige opslag van CO₂. De ander technieken hebben beperkte verbeteringen nodig en zullen daardoor goed inzetbaar zijn voor negatieve emissies.

Bij mineralisatie ligt de uitdaging vooral in het gebruik van fijne korrels van reactieve mineralen zoals olivijn. Deze fijne korrels hebben een groot oppervlak dat nodig is voor een efficiëntere chemische reactie met CO₂. Echter, de productie en verwerking van deze fijne deeltjes vereisen energie, wat de duurzaamheid van het proces kan ondermijnen. Daarnaast is de grootschalige verspreiding van deze mineralen een logistieke en milieukundige uitdaging, waarbij factoren zoals stofvorming en de ecologische impact van grootschalige winning en transport moeten worden meegenomen. Om mineralisatie op schaal rendabel en duurzaam te maken, zullen er mogelijk doorbraken nodig zijn in het verbeteren van de energie-efficiëntie en het minimaliseren van de ecologische voetafdruk van de mijnbouw.

DACCS heeft eveneens technologische belemmeringen, ondanks zijn grote potentieel voor het verwijderen van CO₂ direct uit de atmosfeer. De huidige technieken voor DACCS zijn zeer energie-intensief, wat de kosten per ton verwijderde CO₂ aanzienlijk verhoogt. Er is behoefte aan verbeteringen in de energie-efficiëntie van het proces, bijvoorbeeld door nieuwe chemische absorptiematerialen te ontwikkelen die effectiever werken bij lagere temperaturen. Innovaties op dit gebied zouden de energiebehoefte en daarmee de operationele kosten van DACCS kunnen verlagen, waardoor de technologie aantrekkelijker wordt voor grootschalige implementatie. Verschillende instanties kijken ook anders aan tegen DACCS, waar bijvoorbeeld PBL in de TVKN stelt dat de technologie nog veel tijd nodig heeft en inzet op BECCS, stelt de Impact Assessment van de Europese Commissie juist dat DACCS een sleutelrol gaat spelen in negatieve emissies in Europa.

De uiteindelijke rol van DACCS zal afhangen van technologische ontwikkelingen en kostendalingen, waarbij vooral doorbraken in energie-efficiëntie en kapitaalkosten bepalend zullen zijn.

Een andere kritieke factor is de veilige opslag van CO₂. Om de opgeslagen CO₂ permanent en veilig te houden, zijn geologische opslaglocaties zoals lege gasvelden of aquifers nodig. Hoewel deze opslagtechnieken al operationeel zijn, blijft er bezorgdheid over de lange termijn stabiliteit en het risico van lekkage. Dit vraagt om streng toezicht en geavanceerde monitoringssystemen om de integriteit van de opslagfaciliteiten te waarborgen. Innovaties in seismische monitoring en drukbeheersing zijn noodzakelijk om de veiligheid van CO₂-opslag te garanderen en het vertrouwen van het publiek en investeerders in deze oplossing te versterken.

Samenvattend moeten de technologische barrières voor mineralisatie, DACCS en veilige CO₂-opslag worden aangepakt door middel van onderzoek en ontwikkeling, met een focus op energie-efficiëntie, kostenreductie en verbeterde monitoringtechnieken. Het overwinnen van deze uitdagingen is essentieel om de rol van deze technieken in het behalen van klimaatdoelen te vergroten en ze op schaal te implementeren. Echter zijn er ook andere maatregelen te nemen. DACCS wordt bijvoorbeeld al toegepast. Wel tegen een hoge kostprijs van 1350 euro/ton (Climeworks). Op het moment dat bijvoorbeeld een techniek toch niet voldoende levert, of als er meer negatieve emissies nodig zijn, zal dat voornamelijk meer financiële middelen vragen van de Nederlandse samenleving.

Beoordeling: **groen**. De technologieën voor negatieve emissies bevinden zich in verschillende stadia van ontwikkeling. Veel basistechnieken zijn al beschikbaar, maar vereisen nog verdere ontwikkeling om kosteneffectief en grootschalig toegepast te kunnen worden. Een voordeel is dat de verschillende methodes voor negatieve emissies onafhankelijk van elkaar ontwikkeld kunnen worden, waardoor parallel aan meerdere oplossingsrichtingen gewerkt kan worden. Dit maakt het mogelijk om uiteindelijk de meest effectieve opties te selecteren en te implementeren. Voor de laatste restemissies is nu DACCS als oplossing gekozen, een relatief dure techniek. Het is echter waarschijnlijk dat door innovatie en schaalvergroting de kosten zullen dalen. Ook kunnen er alternatieve technieken beschikbaar komen die deze emissies effectiever kunnen reduceren. De sleutel tot succes ligt in een combinatie van technologische innovatie, het realiseren van leercurves door praktijkervaring, en het organiseren van voldoende financiering om deze ontwikkelingen mogelijk te maken. Dit zal ingewikkeld zijn, maar zeker haalbaar binnen de gestelde andere maatregelen die er zijn om emissies te reduceren.

6. Infrastructureel

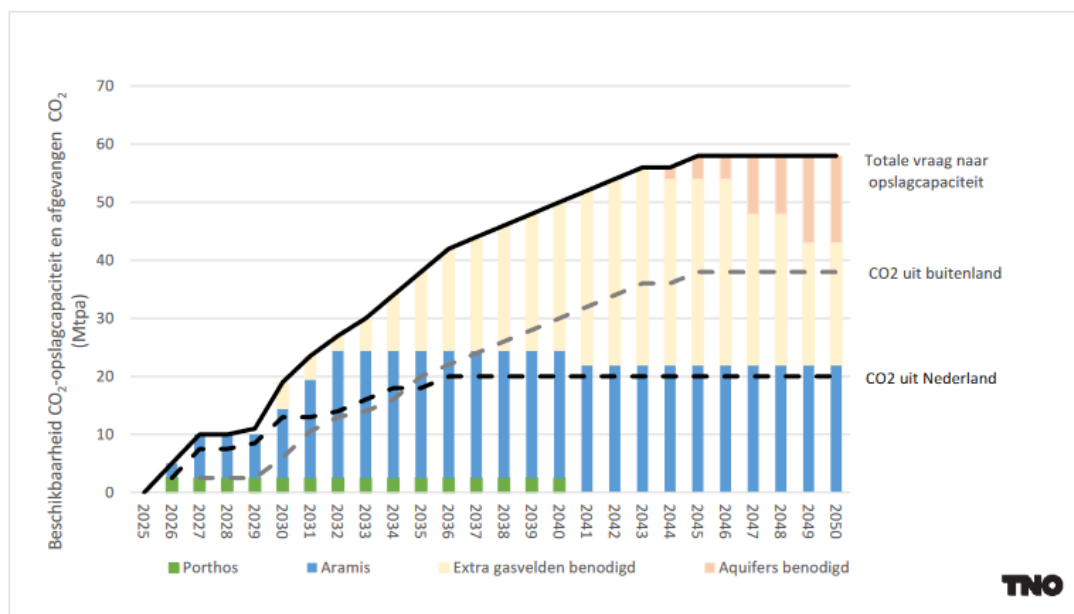
Voor enkele van de technieken van negatieve emissies, is het nodig om de afgevangen CO₂ vervolgens effectief en veilig op te slaan voor een lange periode. Dit geldt voor de BECCS, de AVI's en de DACCS. In de prognoses zijn dit de technieken die de meeste hoeveelheden negatieve emissies kunnen realiseren. Echter, de capaciteit om de CO₂ op te slaan moet daarvoor wel aanwezig zijn.

Nederland heeft het voordeel van aanzienlijke opslagcapaciteit in lege gasvelden onder de Noordzee. De totale opslagcapaciteit in deze offshore gasvelden wordt geschat op 1.700 Mton CO₂, waarvan momenteel ongeveer 400 Mton in ontwikkeling is via concrete projecten. Twee belangrijke projecten zijn Porthos en Aramis. (CE Delft, 2023; PBL, 2018).

Het Porthos-project, een samenwerking tussen EBN, Gasunie en het Havenbedrijf Rotterdam, zal vanaf 2026 jaarlijks 2,5 Mton CO₂ opslaan. Het Aramis-project, ontwikkeld door Shell, TotalEnergies, EBN en Gasunie, zal vanaf 2030 mogelijk 22 Mton CO₂ per jaar opslaan.

De ontwikkeling van opslaglocaties vergt tijd: voor gasvelden varieert dit van 5 tot 7 jaar, terwijl opslag in aquifers nog meer tijd vergt. Dit betekent dat een tijdige start van de ontwikkeling van nieuwe opslaglocaties essentieel is om aan de toekomstige vraag te voldoen.

Een belangrijk aandachtspunt is de concurrentie om opslagcapaciteit. Op basis van de rapporten lijkt er tot 2050 voldoende capaciteit beschikbaar, maar daarna komt de grens van de Nederlandse opslagcapaciteit in zicht. Dit maakt internationale samenwerking nodig, bijvoorbeeld met Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk, die ook opslagfaciliteiten ontwikkelen waar Nederlandse CO₂ mogelijk naartoe geëxporteerd kan worden. Daarnaast stelt het beleidsmakers voor de uitdaging om prioriteiten te stellen tussen het gebruik van opslagcapaciteit voor emissiereductie en voor negatieve emissies.



Figuur 37. Opslagcapaciteit in ontwikkeling en het verwachte aanbod van afgevangen CO₂ tot 2050, Figuur overgenomen uit CE Delft (2023).

In het Klimaatzaak 2040 scenario worden er emissies vanuit de AVI's, BECCS en DACCS opgeslagen. De emissies uit de industrie die worden opgeslagen zijn zeer klein, aangezien de koolstof daar voornamelijk wordt hergebruikt. Dit betekent als raming een opslag van $2 + 4,8 + 6,7 = 13,5$ Mton in 2040. Afhankelijk van de restemissies in de sectoren en de inzet van DACCS in de jaren erna, kan deze jaarlijkse opslag naar verwachting afnemen

richting 2050 tot 6,8 Mton per jaar, gebaseerd op de verwachte inzet van AVI's en biobrandstofproductie. Daar lijkt met Aramis en mogelijke andere opslag tegen 2040 voldoende capaciteit voor te zijn.

Beoordeling: **groen**. Wanneer er tijdig wordt nagedacht over de juiste netwerken en veilige opslag voldoende wordt onderzocht, is het waarschijnlijk dat er voldoende opslagmogelijkheden zijn voor CO₂ in Nederland.

7. Ruimtelijk

Ruimtelijk is met name biomassa een mogelijk probleem. In het ETM-scenario komen we uit op ongeveer 216 PJ voor energetische toepassingen en negatieve emissies. Op basis van de inschattingen die gedaan zijn door o.a. CE Delft, PBL en TNO, lijken deze waarden acceptabel aangezien deze stromen wel beschikbaar zijn. Dit betekent met betrekking tot ruimtegebruik ook dat deze stromen er kunnen zijn en passen binnen de ruimtelijke indeling van Nederland. De overige technieken zoals BECCS-installaties, olivijn, AVI's houtbouw en DACCS-installaties vereisen geen of een zeer beperkte hoeveelheid extra ruimte.

Beoordeling: **groen**. Biomassa kan een mogelijk ruimteprobleem geven, de andere technieken niet. Voor biomassa is de inschatting dat het binnen bandbreedtes van andere studies past, waarbij ook het ruimteaspect van biomassa is meegewogen.

4.8.5. Conclusie en discussie

1. Hoe komen we uit op de emissieraming voor 2040?

De negatieve emissies hebben als doel de restemissies uit de overige sectoren te compenseren. In de sector landbouw en LULUCF zitten al negatieve emissies, die zijn verder niet meegenomen in deze analyse.

Voor het realiseren van negatieve emissies is gekozen voor een mix van bewezen technologieën die op korte termijn significante impact kunnen maken. Deze mix bestaat uit verschillende componenten. Ten eerste kan olivijn worden toegepast in de kustverdediging voor CO₂-vastlegging. Ten tweede biedt houtbouw een mogelijkheid om CO₂ langdurig vast te leggen in de gebouwde omgeving. Als derde route kunnen de bestaande AVI's worden uitgerust met CO₂-afvang om de biogene CO₂ uit afvalverbranding op te slaan. Ook in een meer circulaire economie, waarbij materialen langer in gebruik blijven, zal deze biomassa uiteindelijk in de AVI's terechtkomen waardoor vergelijkbare negatieve emissies kunnen worden gerealiseerd.

Een vierde belangrijke route is de afvang van CO₂ bij biobrandstofproductie, wat ongeveer 4,8 Mton aan negatieve emissies kan opleveren. Voor de resterende 6,7 Mton zijn verschillende opties mogelijk, zoals extra emissiereductie in sectoren door verhoogd gebruik van biobrandstoffen of extra CO₂-afvang. In dit scenario kiezen we voor DACCS, maar de uiteindelijke invulling zal afhangen van de meest kosteneffectieve opties. Om de juiste keuzes te faciliteren stellen we een marktmechanisme voor negatieve emissies voor, waarbij extra uitstoot moet worden gecompenseerd tegen de marginale kosten van negatieve emissies.

2. Waarom is versnelling haalbaar en wat zijn de voorname beperkingen?

Deze versnelling naar negatieve emissies is technisch haalbaar, maar kent wel belangrijke randvoorwaarden. Voor verschillende technologieën zoals AVI's met CCS en BECCS met biobrandstofproductie is de techniek beschikbaar en kan implementatie op relatief korte termijn starten. Ook de toepassing van olivijn in kustverdediging is technisch relatief eenvoudig. DACCS vereist nog verdere ontwikkeling, maar toont veelbelovende potentie voor grootschalige toepassing.

Tabel 27. Haalbaarheidsinschatting per lens voor de potentie negatieve emissies.

Lens	Beoordeling haalbaarheid
Beleid	Groen
Economisch	Oranje
Sociaal maatschappelijk en cultureel	Groen
Milieukundig	Oranje
Technologisch	Groen
Infrastructureel	Groen
Ruimtelijk	Groen

De belangrijkste beperkingen zijn economisch en milieukundig van aard. De kosten van negatieve emissies zijn mogelijk substantieel, met name voor DACCS waar de kosten kunnen oplopen tot 500 euro per ton CO₂. In een scenario waarin bijna 7 Mton zou moeten worden afgevangen tegen deze prijs, zouden de jaarlijkse kosten ongeveer 3,5 miljard euro bedragen. Dit vraagt om een fundamentele herijking van CO₂-beprijzing, waarbij niet alleen naar preventiekosten (zoals in het huidige ETS) wordt gekeken, maar ook naar herstellkosten. Daarnaast zijn er significante milieukundige uitdagingen, zoals de beschikbaarheid van duurzame biomassa voor energetische en materiaaltoepassingen en het energiegebruik van DACCS. Deze aspecten vereisen zorgvuldige afweging en monitoring bij de implementatie.

Tabel 28. Voorgestelde beleidsmaatregelen voor de potentie negatieve emissies.

Categorie	Maatregel
Beprijzen	Er wordt een systeem ontwikkeld waarbij sectoren verplicht worden om hun restemissies te compenseren door negatieve emissies in te kopen tegen marktconforme tarieven, een zogenaamde herstellprijs. Hierdoor komt er een handelsmarkt op gang waardoor tegen de laagste kosten de restemissies of gereduceerd worden of via negatieve emissies gecompenseerd worden. Dit systeem zal er wel voor moeten zorgen dat het reduceren van de benodigde restemissies niet ten koste gaat van de inzet van negatieve emissies.
Normeren	De overheid kan sturend optreden bij de ontwikkeling van infrastructuur voor CO ₂ -transport en -opslag, met als doel het mogelijk maken van grootschalige toepassing van negatieve emissietechnologieën.
Normeren	Er worden heldere en strenge criteria vastgesteld voor wat gekwalificeerd kan worden als negatieve emissies, met bijzondere aandacht voor de langetermijnopslag van CO ₂ .

Categorie	Maatregel
Normeren	Het huidige duurzaamheidskader voor biomassa wordt uitgebreid met specifieke richtlijnen voor de inzet van biomassa bij negatieve emissietechnologieën.
Stimuleren	Er worden gerichte financiële steunmaatregelen ontwikkeld voor opkomende negatieve emissietechnologieën, met name voor BECCS en DACCS, door bijvoorbeeld bestaande subsidieregelingen uit te breiden.

3. Wat is de omvang van de restemissies?

De totale negatieve emissies in het scenario zijn -18,5 Mton CO₂eq, waarvan 11,8 direct in het scenario in te passen is en 6,7 Mton meer open staat. Op basis van de sectorale analyses schatten we in dat de restemissies tussen de 14 en 26 Mton kunnen uitkomen, Voor het invullen van zowel de open 6,7 Mton als eventuele extra benodigde negatieve emissies zijn verschillende routes mogelijk. In het huidige scenario gaan we uit van DACCS, maar er zijn ook alternatieven, variërend van extra emissiereductie tot meer negatieve emissies. Er zou bijvoorbeeld meer groengas geproduceerd kunnen worden, of een hogere inzet van hybride warmtepompen in de gebouwde omgeving. Ook zou er CCS kunnen worden toegepast bij gascentrales die weinig draaiuren hebben. Aan de andere kant kunnen er ook meer negatieve emissies worden gerealiseerd. Dit kan bijvoorbeeld door meer biobrandstofproductie met CCS, meer aanplanten van bomen of een grotere inzet van AVI's in het elektriciteitsnet. Zo zijn er meerdere routes mogelijk, waarbij de overheid een grote rol kan spelen in het reguleren en creëren van spelregels met betrekking tot een beloningssysteem voor negatieve emissies.

4.8.6. Geraadpleegde bronnen

- Netbeheer Nederland, Integrale Infrastructuurverkenning 3050 – II3050 (2023)
- PBL, Transitieverkenning klimaatneutraal 2050 (2024a)
- CE Delft, Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid (2023)
- PBL, NEGATIEVE EMISSIES Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland (2018)
- Ecorys Methodes voor CO₂-verwijdering - Vergelijkend literatuuronderzoek naar toepassing in de Nederlandse context (2023)
- WKR, De lucht klaren? (2024)
- RoyalHaskoning, Quicksan behoefte naar een onderzoeksprogramma gericht op negatieve CO₂-emissie (2022)
- Europese Commissie, Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT. IMPACT ASSESSMENT REPORT. Part 1 (2024)
- CE Delft, Bioscope. Toepassingen en beschikbaarheid van duurzame biomassa (2020)
- TNO, TNO-rapport Biomassa gegevens voor energietransitiemodel (ETM) van Quintel (2020)
- WISE, Biomassa voor energie, een tricky business (2024)

- PBL, Beschikbaarheid biograndstoffen in Nederland en de Europese unie, Notitie bij studie Trajectverkenning klimaatneutraal Nederland 2050 TVKN achtergrondrapport (2024b)

5. Sector overstijgende thema's

5.1. Inleiding

Een aantal thema's is niet beperkt tot een sector, maar is nationaal of komt terug in meerdere sectoren. Zo is inzicht in nationale kosten en investeringen iets dat per definitie het beste gedaan kan worden op nationaal niveau. En thema's als beschikbaarheid van arbeid, beschikbaarheid van schaarse grondstoffen en materialen en de aanleg van infrastructuur voor elektriciteit komen terug in meerdere sectoren. We gaan in dit hoofdstuk één voor één in op deze thema's en bekijken in welke mate deze onderwerpen invloed hebben op de haalbaarheid van netto klimaatneutraliteit in Nederland in 2040.

5.2. Nationale kosten en investeringen

De opgave om klimaatneutraliteit 10 jaar eerder te halen legt druk op publieke en private partijen om te investeren in de periode 2025-2040. Deze investeringen veranderen het energiesysteem dusdanig dat de nadruk op- en hoogte van verschillende kostenposten verschuiven binnen de jaarlijkse nationale kosten van het energiesysteem.

Tabel 29. Toelichting bij de begrippen 'investeringen' en 'nationale jaarlijkse kosten'.

Begrip	Toelichting
Investeringen	Met investeringen refereren we naar de som van publieke én private investeringen in individuele assets (zie Tabel 30) die het gehele energiesysteem opnieuw opbouwen, een zogenaamde greenfield benadering.
Nationale jaarlijkse kosten	Nationale jaarlijkse kosten zijn het saldo van financiële gevolgen van het energiesysteem voor Nederland als geheel (publiek en privaat). Concreet zijn de nationale jaarlijkse kosten de som van jaarlijkse nationale afschrijvings- en financieringskosten van een investering (CAPEX) en de som van alle operationele kosten (OPEX), exclusief belastingen en subsidies maar inclusief besparingen.

Om de nationale kosten en investeringen te kunnen bepalen is er in dit hoofdstuk gebruik gemaakt van de methodiek die is uitgewerkt in het essay van Kalavasta en Berenschot over de financiering van de Energietransitie^{78/79}. In deze methodiek wordt het Energietransitiemodel (ETM) gebruikt en aangevuld om de nationale kosten van- en investeringen in een energiesysteem te kwantificeren voor een referentiejaar en een toekomstig scenario. In het vervolg is het referentiejaar 2019 gebruikt en het toekomstige energiesysteem volgens het Klimaatzaak 2040 scenario in het ETM.

Allereerst zullen de nationale investeringen in kaart worden gebracht, als ook de kwantitatieve omvang van deze investeringen. Ten tweede worden de jaarlijkse nationale kosten gegeven en verheldert waar deze kosten (met name) vandaan komen. Voor zowel de investeringen als de jaarlijkse nationale kosten in 2040 wordt er een vergelijking

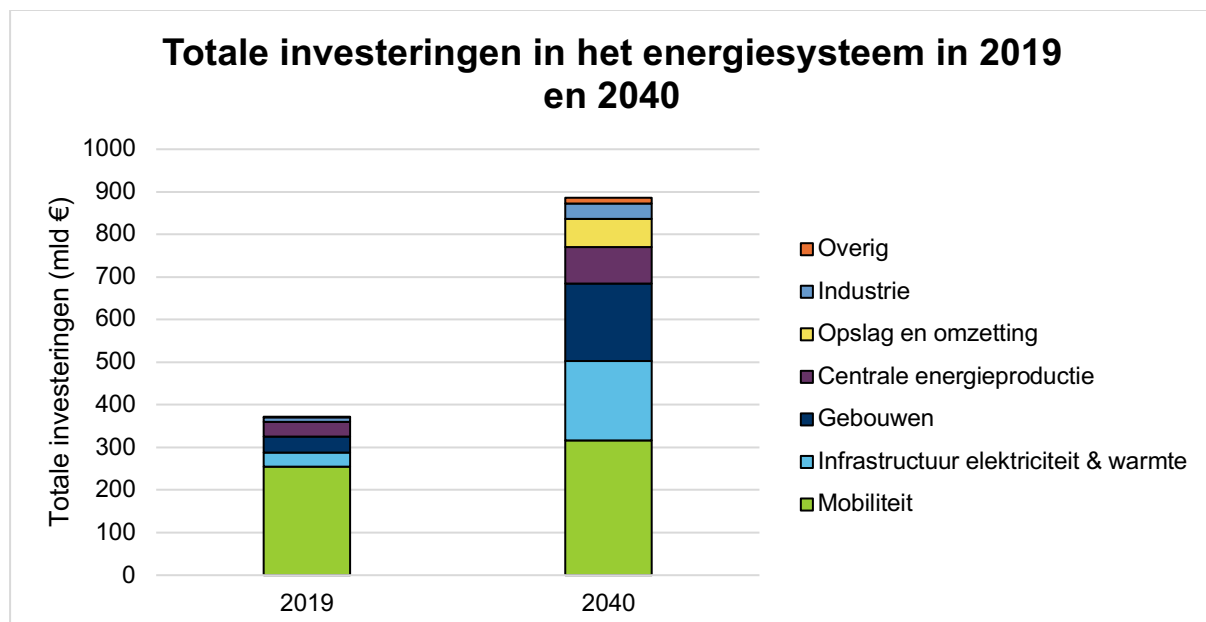
⁷⁸ Duyster, H. Terwel, R. (2021, 12 februari) [Een essay over de financiering van de Energietransitie tussen 2020 en 2050](#)

⁷⁹ Mocht een beschrijving van een onderdeel van de methodiek in dit hoofdstuk niet expliciet te vinden zijn, dan is dit terug te vinden in het essay of de documentatie van het Energietransitiemodel.

gemaakt met het referentiejaar 2019 om te zien hoe het energiesysteem zal veranderen en wat de consequenties hiervan zijn. Ook kijken we naar de uitkomsten van andere recente studies op dit gebied. Als laatst wordt er bekeken hoe Nederland de nationale kosten zal dragen en of de voorziene investeringen gedaan kunnen worden. Deze blik wordt aangevuld met additionele beleidsmaatregelen die wij nodig achten en een haalbaarheidsoordeel voor de landelijke opgave van nationale kosten en investeringen bij transitie die 10 jaar versneld.

5.2.1. Totale investeringen in het energiesysteem in 2019 en 2040

In Figuur 38 zijn de totale publieke én private investeringen gegeven die vandaag de dag gedaan zouden moeten worden om de energiesystemen van het referentiejaar 2019 en het jaar 2040 volgens het Klimaatzaak 2040 scenario te realiseren. Deze figuur veronderstelt dus dat alle benodigde investeringen voor 2040 gerealiseerd worden. Belastingen en subsidies zijn op nationaal niveau geen kosten of opbrengsten, maar enkel een herverdeling van geld in de maatschappij, en zijn daarom niet inbegrepen.



Figuur 38. Totaal benodigde investeringen om het energiesysteem in 2019 en 2040 opnieuw te bouwen. Hierbij is een greenfield benadering gebruikt, zodat de som van alle investeringen het energiesysteem opnieuw opbouwen.

Bij het interpreteren van de investeringen voor 2040 moet rekening worden gehouden met de volgende punten:

- De benodigde investeringen zijn investeringen om het energiesysteem in zijn geheel op te bouwen, een zogenaamde greenfield benadering. Er wordt daarmee geen rekening gehouden met de technische levensduur van de nieuwe (of bestaande) installaties en infrastructuur. Voor het Klimaatzaak 2040 scenario is dit niet problematisch. Verreweg de meeste installaties en infrastructuur hebben een levensduur van 15 jaar of meer. De transitie naar klimaatneutraliteit in 2040 neemt in de komende 15 jaar plaats (2025-2040). Investeringen zullen dus niet al een keer aan vervanging toe zijn voor 2040 o.b.v. de technische levensduur. Daarom zal een eenmalige investering voor verreweg de meeste installaties en infrastructuur volstaan.

- Investerings berekent in het Energietransitiemodel bevatten (eventuele) prijsdalingen of -stijgingen⁸⁰ o.b.v. het 2050 I13050v2 NAT-scenario. Deze investeringen worden dus gedaan met veronderstelde 2050 prijzen en de figuur is daarom misschien te positief (= te lage investeringen). In realiteit zal er namelijk geleidelijk geïnvesteerd worden tegen prijzen o.b.v. eerdere jaren. Prijzen uit eerdere jaren zijn potentieel hoger als gevolg van technologische vooruitgang en opschaling van productiemethoden (zogenaamde leercurves).
- Investerings die niet in het Energietransitiemodel zijn berekend, maar welke zijn aangevuld⁸¹, houden geen rekening met prijsdalingen of stijgingen. Specifiek gaat dit om de mobiliteit sector, een groot deel van de industrie en isolatie- en lage temperatuur verwarmingssystemen in gebouwen. Voor deze investeringen is de figuur misschien te somber (= te hoge investeringen), omdat er prijsdalingen te verwachten zijn.

De installaties en infrastructuur die zijn inbegrepen per sector, staan bondig beschreven in Tabel 30.

Tabel 30. De installaties en infrastructuur meegenomen bij het berekenen van investeringen binnen het energiesysteem in 2019 en 2040.

Sectoren	Installaties en infrastructuur
Mobiliteit	Personenauto's en bedrijfsauto's
Infrastructuur elektriciteit & warmte	Elektriciteitsnetten, gasnetten, warmtelevering en -distributie systemen
Gebouwen	Verwarming- en koeling apparaten, isolatie, zonnepanelen, zonthermie, thuisbatterijen
Centrale energieproductie	Zonnepanelen, windturbines, gasturbines, nucleaire centrales, kool centrales, WKKs
Industrie	Bestaande installaties (burners, hoogovens, ...), CCUS, nieuwe technieken in 2040 (DRI, elektrische ovens, ...)
Opslag en omzetting	Batterijen, power-to-gas, e-boiler, hybride-boiler, warmtepompen, waterstof opslag
Overig	Installaties en warmte voor Landbouw, waterstof distributie, CCUS (DAC)

In 2019 betreffen de totale investeringen in het energiesysteem ongeveer 372 miljard euro. Voor infrastructuur is dit een onderschatting, omdat het elektriciteitsnet van 2019 niet is meegenomen in de figuur. Uit Figuur 38 is het duidelijk dat het overgrote deel van de investeringen in het wagenpark zit, zo'n 254 miljard euro. Deze totale investeringen kunnen gezien worden als een referentiekader voor de manier hoe de samenleving vandaag de dag gewend is om met zijn assets om te gaan. Specifiek is de samenleving

⁸⁰ Dit gaat specifiek om prijzen van investeringen, niet energieprijzen of andere prijzen.

⁸¹ Zie bladzijde 13 in Duyster, H. Terwel, R. (2021, 12 februari) [Een essay over de financiering van de Energietransitie tussen 2020 en 2050](#). Op deze bladzijde staan de specifieke type aangevulde investeringen voor het Klimaatzaak 2040 scenario. Voor de meerinvesteringen per type elektrisch voertuig is van het essay afgeweken, en zijn de meerinvesteringen per type voertuig volgens Tabel 7 in het sectorhoofdstuk over mobiliteit gebruikt.

gewend elk jaar een deel van deze assets te vervangen, zodat het energiesysteem in stand kan worden gehouden.

In 2040 betreffen de totale investeringen ongeveer 886 miljard euro. Een aanzienlijke toename t.o.v. het referentiejaar als gevolg van de benodigde investeringen om het energiesysteem in 2040 vorm te geven. O.b.v. een lineaire verdeling tussen 2019 en 2040 betekent dit ongeveer 42 miljard euro aan jaarlijkse investeringen. Ter vergelijking, Quintel heeft in opdracht van Invest-NL een onderzoek gedaan naar de kosten- en investeringsstructuur van het energiesysteem tussen 2019 en 2050⁸². Hoewel het onderzoek van Quintel en dit hoofdstuk methodologisch verschillen, is het onderzoek van Quintel ook gebaseerd op de kosten en investeringsberekeningen van het Energietransitiemodel. De belangrijkste methodologische verschillen zijn:

- In dit hoofdstuk wordt een greenfield benadering gebruikt, beschreven onder Figuur 38. De investeringen in het onderzoek van Quintel zijn opgebouwd uit de som van vervangingsinvesteringen en nieuwe investeringen tussen twee periodes (bijv. 2019 en 2025, of 2025 en 2030). Hiermee tracht Quintel rekening te houden met de levensduur- en leercurve van investeringen.
- Dit hoofdstuk beschouwt onder andere investeringen in de mobiliteit sector, een groot deel van de industrie, isolatie- en lage temperatuur verwarmingssystemen in de gebouwde omgeving. Het onderzoek van Quintel houdt deze investeringen buiten beschouwing.

Voor de 2050 II3050v2 scenario's Internationale Handel (IH) en Decentrale Initiatieven (DI) heeft Quintel een transitiepad opgesteld met jaarlijkse investeringen van 2019 t/m 2050. Over deze gehele periode zijn de jaarlijkse investeringen voor deze scenario's respectievelijk gemiddeld 20 miljard en 25 miljard euro⁸³. SEO economisch onderzoek heeft recentelijk de jaarlijkse investeringen van het gemiddelde van die twee scenario's berekent, voor twee periodes. Tussen 2019 en 2025 is dit 23 miljard euro en tussen 2025 en 2030 is dit 31 miljard euro⁸⁴.

Investeringen voor het Klimaatzaak 2040 scenario zijn gebaseerd op een aangepast II3050v2 Nationaal Leiderschap (NL) scenario en zijn daardoor minder goed te vergelijken met investeringen gebaseerd op andere II3050v2 scenario's. Desalniettemin verhelderen de verschillende onderzoeken (zie Tabel 31) de orde grootte van jaarlijkse investeringen die Nederland kan verwachten bij de transitie naar klimaatneutraliteit.

⁸² Van Bemmelen, K. Berkhout, J. Wirtz, A. Kooiman, A. Halstead, M. mei 2024: [Financieel inzicht in de Energietransitie \(FIT\)](#)

⁸³ O.b.v. bijlage 7.4: Van Bemmelen, K. Berkhout, J. Wirtz, A. Kooiman, A. Halstead, M. mei 2024: [Financieel inzicht in de Energietransitie \(FIT\)](#)

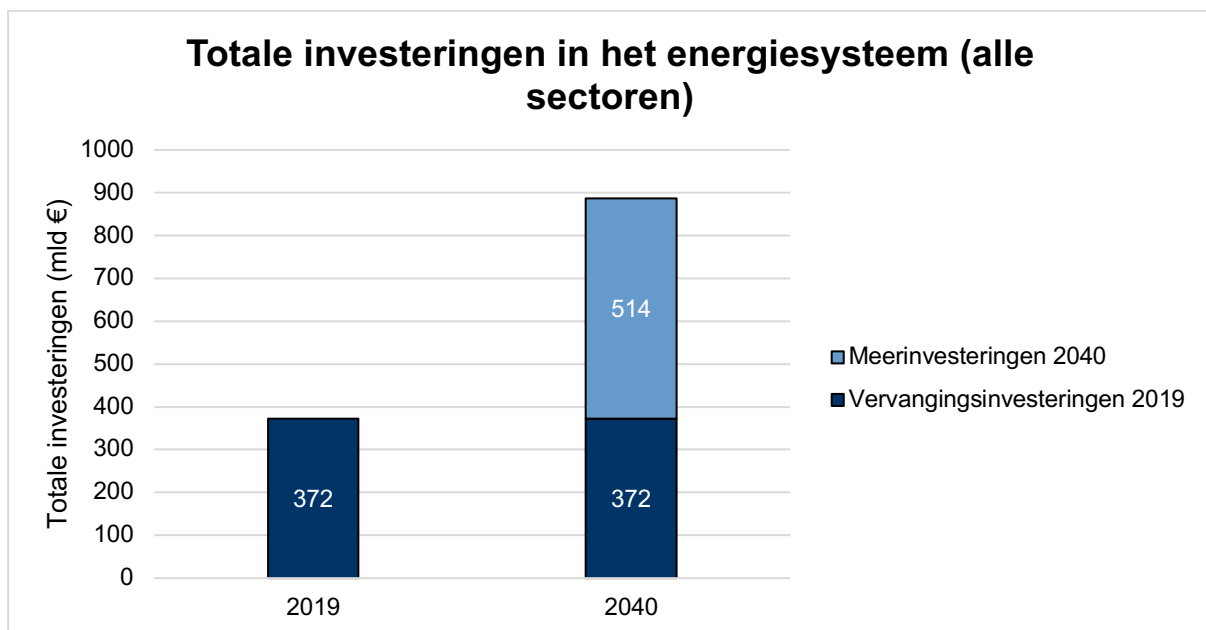
⁸⁴ Koeman, N. Konijn, S. Lenders, E. oktober 2024: [Investeringsmonitor Energietransitie 2023](#)

Tabel 31. De gemiddelde jaarlijkse investeringen volgens verschillende recente onderzoeken

Onderzoek	Klimaatzaak 2040	Klimaatzaak 2040	Quintel	Quintel	SEO	SEO
Scenario	Klimaatzaak 2040 scenario (o.b.v. aangepaste II3050 v2 NL)	Klimaatzaak 2040 scenario (o.b.v. aangepaste II3050 v2 NL)	Transitiepad naar 2050 II3050 v2 Decentrale Initiatieven	Transitiepad naar 2050 II3050 v2 Internationale Handel	Een gemiddelde van Quintel's transitiepad naar 2050 II3050 v2 DI en IH	Een gemiddelde van Quintel's transitiepad naar 2050 II3050 v2 DI en IH
Periode	2019 -2040	2019 - 2040	2019 - 2050	2019 - 2050	2019-2025	2025-2030
Omvat	Inclusief	Exclusief: mobiliteit, een groot deel van de industrie, isolatie- en lage temperatuur verwarmingssystemen in gebouwen				
Investerings (mld / jaar)	€ 42	€ 22 ⁸⁵	€ 25	€ 20	€ 23	€ 31

5.2.2. Meerinvesteringen in het energiesysteem van 2040

Het nieuwe energiesysteem van het Klimaatzaak 2040 scenario vraagt om een grotere totale investering dan het oude energiesysteem in 2019. Dat deel van de totale investeringen in het nieuwe energiesysteem dat groter is dan de totale investeringen van het oude energiesysteem worden beschouwd als *meerinvesteringen* (zie Figuur 39).



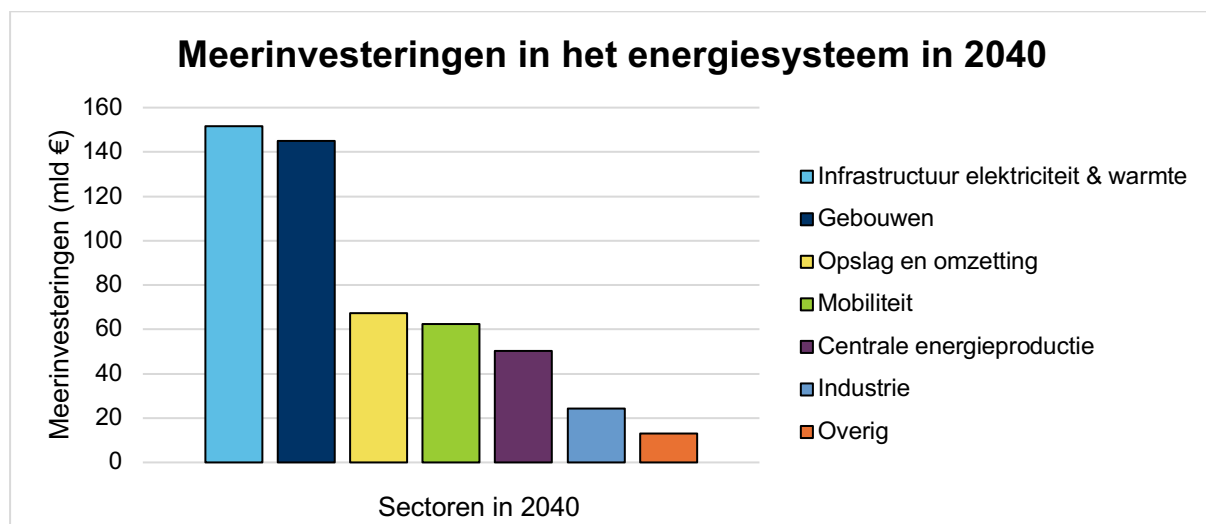
Figuur 39. De totale investeringen die nodig zijn om het energiesysteem van 2019 en 2040 in zijn geheel en op één moment opnieuw op te bouwen, een zogenaamde greenfield benadering (in mld € vandaag de dag). De totale investeringen voor 2019 zijn gedefinieerd als de vervangingsinvesteringen voor dezelfde assets die in 2019 bestonden. Een vervangingsinvestering is de investering nodig om een bestaande asset te vervangen door een andere asset. De totale investeringen voor 2040 zijn gedefinieerd als de hoogte van vervangingsinvesteringen voor 2019 (bestaande uit mogelijk andere assetinvesteringen dan in 2019) plus meerinvesteringen die hier bovenop nodig zijn.

⁸⁵ Berekent o.b.v. een lineaire verdeling tussen 2019 en 2040 van de totale investeringen in Figuur 38 exclusief mobiliteit, een groot deel van de industrie en isolatie- en lage temperatuurverwarmingssystemen in gebouwen. Berekening gaat als volgt 886 (totaal inv) - 317 (mobiliteit inv) - 33 (deel industrie inv) - 71 (deel gebouwen inv) / 21 (jaren) = 465 / 21 = 22 mld euro.

De meerinvesteringen voor 2040 komen uit op ongeveer 514 miljard euro. Meerinvesteringen van ongeveer 514 miljard euro betekent dat er t.o.v. 2019 gemiddeld ongeveer 24 miljard euro per jaar *extra* in het energiesysteem moet worden geïnvesteerd. Dit getal zal nog eens hoger uitvallen omdat sinds 2019 tot vandaag de dag relatief minder investeringen zijn gedaan dan wordt voorzien voor de periode na 2024 in het energiesysteem. In de hypothetische situatie dat er nog geen meerinvestering was gedaan tussen 2019 en nu, zou het gaan om 34 miljard euro per jaar tussen 2025 en 2040. In werkelijkheid zullen de benodigde jaarinvesteringen vanaf nu dus tussen de 24 en 34 miljard liggen.

De meerinvesteringen zijn uitgesplitst naar sector in Figuur 40 om een beter beeld te geven van welke type investeringen verantwoordelijk zijn voor de meerinvesteringen.

Infrastructuur, elektriciteit & warmte en gebouwen kennen de hoogste meerinvesteringen. Maar ook voor andere sectoren moet veel worden geïnvesteerd.



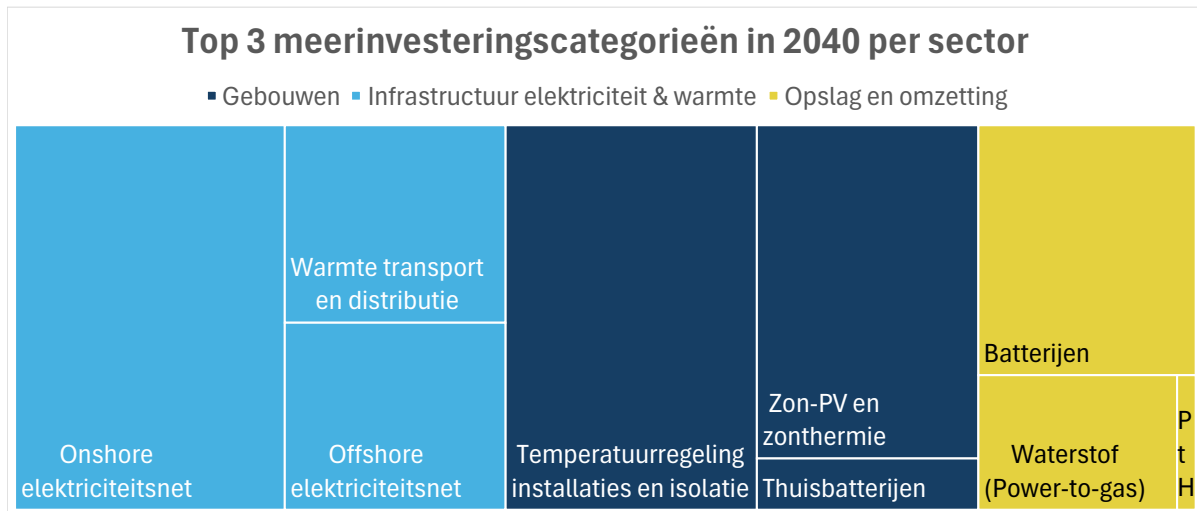
Figuur 40. Meerinvesteringen in het energiesysteem per sector in 2040.

Het energiesysteem elektrificeert omdat de emissiereductie in het Klimaatzaak 2040 scenario veelal plaatsvindt door installaties in gebouwen-, de industrie- en voertuigen vaak (indirect) op elektriciteit te laten werken i.p.v. fossiele brandstoffen. Deze nieuwe installaties vragen om een hogere investering dan de referentie installaties, waardoor de meerinvesteringen toenemen in de sectoren (ook al krimpt de industrie deels).

Er zijn ook meerinvesteringen omdat wordt aangenomen dat er meer voertuigen, gebouwen etc. nodig zijn om de groeiende populatie (19,5 miljoen inwoners in 2040) in hun vraag naar woningen, reiskilometers etc. te voorzien. Daarnaast moet er geïnvesteerd worden in isolatie en kierdichtheid van gebouwen.

Om het energiesysteem van genoeg elektriciteit te voorzien wordt de centrale energieproductie gevormd door met name windmolens en zonnepanelen. Opnieuw zijn dit installaties met een hogere investering dan de referentie installaties van de huidige centrale energieproductie per eenheid opgewekte elektriciteit, waardoor de meerinvesteringen toenemen in deze sector. Als laatst heeft de sector opslag en

omzetting meerinvesteringen omdat het een sector is die niet tot nauwelijks bestond in 2019 en dus als vrijwel nieuwe sector in het energiesysteem wordt geïntroduceerd. De centrale energieproductie maakt een transitie naar variabele energieopwekking (de zon schijnt soms niet en de wind waait soms niet), waardoor de sector opslag en omzetting zich ontwikkelt voor leveringszekerheid van energie en het benutten van “overschotten” van elektriciteit op momenten met meer elektriciteit uit wind en zon dan vraag.

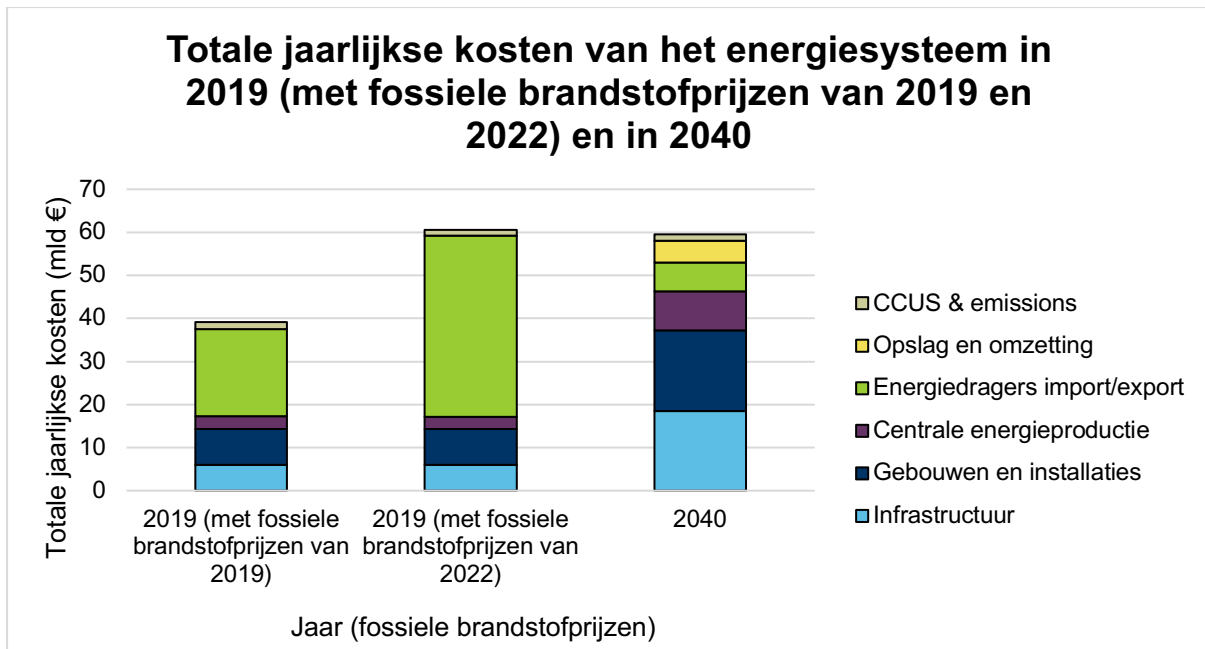


Figuur 41. De top 3 meerinvesteringscategorieën in 2040 voor de drie sectoren met de hoogste meerinvesteringen; infrastructuur elektriciteit & warmte, mobiliteit gebouwen en opslag en omzetting. Het oppervlak representeert de som van de meerinvesteringen. PtH = power to heat.

5.2.3. Nationale kosten van het energiesysteem in 2019 en 2040

De totale jaarlijkse kosten van het energiesysteem in de jaren 2019 en 2040 zijn weergegeven in Figuur 42, uitgesplitst naar sectoren zoals het Energietransitiemodel weergeeft voor het 2040 Klimaatzaak scenario. Nationale jaarlijkse kosten zijn het saldo van financiële gevolgen van het energiesysteem voor Nederland als geheel (publiek en privaat). Concreet zijn de nationale jaarlijkse kosten de som van jaarlijkse nationale afschrijvings- en financieringskosten van een investering (CAPEX) en de som van alle operationele kosten (OPEX), exclusief belastingen en subsidies maar inclusief besparingen. Hierbij zijn voor het energiesysteem van het jaar 2019 de fossiele brandstofprijzen (aardgas, olie en steenkolen) van 2019 én van 2022 gebruikt, gecorrigeerd voor inflatie ⁸⁶.

⁸⁶ De fossiele brandstofprijzen in 2019 en 2022 kunnen teruggevonden worden in de KEV2023 marktprijzen tabellen: <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2024/15/marktprijzen-energie-2000-2023>



Figuur 42. De totale jaarlijkse van het energiesysteem in 2019 en 2040. Voor 2019 is onderscheid gemaakt tussen 2019 met de fossiele brandstofprijzen van 2019 en 2022 (gecorrigeerd voor inflatie). De sectoren zijn anders ingedeeld dan in voorgaande figuren, en de import en export van energiedragers is toegevoegd

In 2019 waren de jaarlijkse kosten van het energiesysteem ongeveer 39 miljard euro met fossiele brandstofprijzen van 2019. Een groot deel van de jaarlijkse kosten zijn import van energiedragers, welke een volatiele prijs kennen. Bijvoorbeeld, in 2022 zijn de fossiele brandstofprijzen gestegen als gevolg van de oorlog in Oekraïne en de opleving van de wereldwijde economie na de coronacrisis. Als we deze hogere brandstofprijzen meenemen, zouden de jaarlijkse kosten van 2019 61 miljard euro zijn. De consequentie van hogere fossiele brandstofprijzen is dus een drastische kostenstijging van het 2019 energiesysteem met 56%. Het is overduidelijk dat de totale kosten worden gedomineerd door de import- en export van energiedragers, wat dus met name fossiele brand- en grondstoffen zijn voor de Nederlandse industrie, voertuigen en installaties in gebouwen.

Dit geeft aan dat de kosten van een energiesysteem gebaseerd op geïmporteerde aardolie en aardgas onzeker zijn en sterk afhangen van mondiale ontwikkelingen.

Voor het klimaatzaak 2040 scenario zijn de jaarlijkse nationale kosten zo'n 60 miljard euro. Dit is ongeveer gelijk aan de jaarlijkse nationale kosten van 2019 met brandstofprijzen van 2022. Het Klimaatzaak 2040 scenario is daarentegen vrijwel compleet onafhankelijk van fossiele brandstoffen. Volatiele prijsschommelingen van fossiele brandstoffen hebben dus een nihil (direct) effect op dit scenario. In 2040 is er wel nog een importafhankelijkheid, deze is wel fors kleiner dan huidig.

In 2040 vinden de hogere totale CAPEX door de meerinvesteringen hun weg terug in een stijging in kosten t.o.v. 2019 (met brandstofprijzen van 2019). Toch stijgen deze jaarlijkse kosten niet zo hard als verwacht zou worden door de gestegen jaarlijkse investeringen. Een verklaring hiervoor is de totale OPEX in het energiesysteem die daalt. In brede zin daalt de vraag naar fossiele brand- en grondstoffen en daarmee de variabele kosten als gevolg van de meerinvesteringen. De druk om investeringen uit te voeren gaat dus

omhoog, maar de jaarlijkse kosten staan onder minder druk en zijn onafhankelijk van prijsschommelingen van fossiele brandstoffen. Een voorbeeld hoe de wisselwerking tussen CAPEX en OPEX werkt:

De vraag naar een kWh aan elektriciteit zou in 2019 geleverd kunnen worden doordat een kolencentrale gaat draaien. De kolencentrale heeft een relatief lage CAPEX voor het produceren van een kWh aan elektriciteit, maar de kolencentrale kent ook kosten voor de steenkool die wordt gebruikt als brandstof (OPEX). In 2040 zou deze kolencentrale vervangen kunnen zijn door een windmolenpark. Het windmolenpark heeft een relatief hoge CAPEX voor het produceren van een kWh aan elektriciteit, maar als de wind waait zijn er geen extra kosten voor het produceren van eenzelfde kWh elektriciteit (zeer lage OPEX).

De financiering van de meerinvesteringen en het dragen van nationale jaarlijkse kosten van het energiesysteem in 2040 wordt hieronder op ingegaan.

5.2.4. Financieringsopgave nationale kosten en investeringen

De financiering van meerinvesteringen zal op een integrale manier benaderd moeten worden. Want om de transitie naar klimaatneutraal 2040 te doen slagen, is het van belang dat *vrijwel alle* bovengenoemde meerinvesteringen worden gedaan. Allereerst is dit van belang vanuit een reductionistisch oogpunt; elke meerinvestering in een sector draagt bij aan emissiereductie en de som van deze meerinvesteringen brengt het energiesysteem van Nederland tot klimaatneutraliteit in 2040. Maar, het is ook cruciaal om een holistische blik te nemen; de meerinvesteringen in een sector kunnen alleen plaatsvinden als er ook meerinvesteringen bij een andere sector gedaan worden en zo door. Hieronder staat een voorbeeld beschreven hoe deze afhankelijkheden van meerinvesteringen eruitzien tussen enkele sectoren:

Een grote industriële partij aan de Noordzeekust wil de fossiele uitstoot van zijn productieproces verlagen door zijn aardgasgestookte verwarmingsinstallatie te vervangen door een elektrische installatie (een meerinvestering), waarvoor de partij een continue en goedkope stroomvoorziening wil voor de komende 10 à 15 jaar.

Tegelijkertijd overweegt een eigenaar van een offshore windmolenpark meerinvesteringen in extra windmolens, op voorwaarde van langdurige klantbinding met een grote stroomafnemer. De industriële partij ziet de goedkope elektriciteit afkomstig van nabijgelegen windmolens als aantrekkelijk, maar maakt zich zorgen over de leveringszekerheid door de afhankelijkheid van wind.

Een derde partij, die wel al elektriciteit van het windpark afneemt, wil een elektrolyser aanschaffen om elektriciteit om te zetten in groene waterstof voor afzet van waterstof aan de industrie en flexibele elektriciteitsproductie in hun elektriciteitscentrale. Voor een rendabele meerinvestering heeft deze partij toegang tot goedkope stroom en een afzetmarkt voor flexibele elektriciteitsproductie nodig.

Door de vraag van de industriële partij naar stroom en de overeenkomst tussen de derde partij met het windpark (die door binding met de industriële partij gaat uitbreiden), ontstaat de situatie dat de kosten van de meerinvesteringen voor alle partijen maximaal worden gedekt vanuit een integraal oogpunt. Als de toekomstplannen helder zijn van deze partijen kunnen netbeheerders met minder risico's meerinvesteringen doen in offshore-elektriciteitsnetten.

Een mogelijk knelpunt alvorens partijen investeringen kunnen doen, is de onrendabele top. Een investering heeft een onrendabele top als deze over zijn levensduur tot hogere kosten leidt (CAPEX plus OPEX) dan de referentie investering. Aangezien de opgave nu is om de emissiereductie doelstelling 10 jaar te vervroegen, moeten investeringen naar voren worden gehaald. Dit vergroot de kans op het aantreffen van investeringen met een onrendabele top, omdat investeren in nieuwe technologieën in een vroeger stadium duurder kan zijn en referentie investeringen eerder moeten worden afgeschreven. Onder andere het wegnemen van deze top door de overheid stelt de sectoren in staat hun transitie pad af te gaan.

Om te zorgen dat de risico's van investeringen dalen is het van cruciaal belang dat er goed inzicht is in wat alle partijen die betrokken zijn bij de systeemverandering willen gaan doen en dat er duidelijkheid is over wat de overheid aan klimaatbeleid tot 2040 denkt te gaan voeren. Het steeds bijsturen op voorjaarsnota's en op Prinsjesdag is niet de manier om een duidelijk beleid te voeren. De schade van zwalkend beleid in de transitie is momenteel al aanzienlijk in de vorm van investeerders die uitwijken naar het buitenland of een afwachtende houding aannemen in Nederland.

Integraal beleid is dus van cruciaal belang om verschillende partijen integraal zicht te bieden op het dekken van de jaarlijkse kosten die gepaard gaan met de investeringen in de energietransitie.

Zoals eerder genoemd zijn de nationale jaarlijkse kosten van het energiesysteem in het Klimaatzaak 2040 scenario ongeveer 60 miljard euro. In verhouding tot het BBP van Nederland vandaag de dag is dit ongeveer 6%. Dit is een beperkte toename, aangezien in 2019 de jaarlijkse kosten van het energiesysteem 4% van het BBP bedroeg. Voor het jaar 2019 met fossiele brandstofprijzen van 2022 zijn de nationale jaarlijkse kosten (ongeveer 61 miljard euro) ook 6% in verhouding tot het BBP. Alleen al door te kijken naar recente prijsstijgingen van fossiele brandstoffen is het dus onzeker of het nieuwe energiesysteem daadwerkelijk hogere kosten zal hebben. Daarnaast zijn er potentieel nevenkosten in een fossiel energiesysteem die minder voorkomen in een klimaatneutraal energiesysteem. Denk hierbij aan hogere kosten van het zorgsysteem door vervuilde lucht of kosten voor fysieke risico's als bodemverzakking, overstromingen en zo door.

Het nieuwe energiesysteem zal ook een positieve impact hebben op de economie in het licht van de veranderingen die de transitie naar het Klimaatzaak 2040 scenario teweegbrengt. Door o.a. extra werkgelegenheid, extra bedrijvigheid en extra innovatie zal er namelijk ook een extra groei van het BPP zijn die moeilijk te kwantificeren is op een termijn van 15 jaar. Indien het BBP de komende jaren toeneemt is het best mogelijk dat in

2040 de jaarlijkse kosten van het energiesysteem uitkomen op 4% van het BBP. Dit is ook niet geheel verwonderlijk, aangezien een deel van de meerkosten voortkomt vanuit het feit dat er meer mensen, woningen en auto's nodig zijn dan vandaag de dag.

5.2.5. Uitwerking in beleid

De totale nationale investeringen zijn volgens onze analyse in de orde grootte van 40 - 50 miljard per jaar, waarvan 24 miljard per jaar aan meerinvesteringen. De totale nationale kosten zijn ongeveer 60 miljard euro per jaar, hoger dan wij volgens het referentiejaar 2019 gewend zijn. Uit onze analyse volgen vier additionele beleidsvoorstellen die de uitdagingen gepaard met deze meerinvesteringen en hogere kosten het hoofd kunnen bieden:

1. *Een agenda opstellen samen met de financiële sector voor het in zicht krijgen en monitoren van investeringen voor de transitie.*

We hebben laten zien dat integraal beleid en zicht bieden op het dekken van jaarlijkse kosten cruciaal is. Het voorstel is het opstellen van een agenda samen met de financiële sector die jaarlijks 40-50 miljard aan investeringen in zicht krijgt voor de transitie. De agenda zal integraal beeld moeten hebben voor de gelijktijdige behartiging van alle belangen van alle betrokken partijen. De Rijksoverheid zal zich dienen in te spannen om daar waar nodig (tijdelijk) de onrendabele top van investeringen weg te nemen (zoals nu al gebeurt met de SDE++) en contractvormen verplicht te stellen (bijvoorbeeld two-sided contract for difference) waarbij de downside risico's van een investering worden afgedekt door de Rijksoverheid door betalen van de strike price, maar de upside ("overwinsten") weer ten goede komen aan de staatskas. De Rijksoverheid is overigens al proactief op het gebied van het wegnemen van onrendabele toppen en werkt toe naar (two-sided) contract for differences. De agenda zal scherp moeten monitoren wanneer investeringen tegen knelpunten aanlopen, ookal zijn onrendabele toppen weggenomen. Knelpunten zoals kredietwaardigheid, onzekere technologieën (met name in de industrie), onzekere/lage cashflow en extra lang kapitaal. Met extra lang kapitaal bedoelen we investeringen waarvan de assets hun originele investering terugverdienen in 10 of meer jaar tijd.

2. *Kostenvoordelen rondom- en gedurende de transitie bij eindgebruikers positioneren (burgers, MKBs en de industrie).*

Binnen de jaarlijkse nationale kosten van het Klimaatzaak 2040 scenario (60 miljard euro) heeft er een verschuiving plaatsgevonden van een OPEX naar CAPEX gedreven systeem t.o.v. het referentiejaar. Voor burgers, MKBs en de industrie betekent dit het investeren in efficiëntere installaties, betere isolatie, nieuwe technieken en zo door. Als deze groepen naast hogere investeringen ook de financiële voordelen rondom en gedurende de transitie terugzien in hun jaarlijkse kosten, dan kan de participatie in- en draagvlak voor de transitie in stand blijven en groeien. Dit laatste is ook van cruciaal belang voor de volgende twee genoemde additionele beleidsvoorstellen die de afhankelijkheid van private participatie in de transitie blootstellen. De Rijksoverheid hecht waarde aan draagvlak en is zich

bewust van de lasten van het energiesysteem die momenteel bij genoemde groepen aanwezig zijn. Bijvoorbeeld, zoals eerder laten zien, met het uitvoeren van acties rondom het wegnemen van onrendabele toppen en het toewerken naar CfDs. Extra stappen moeten worden gezet zodat niet alleen lasten worden weggenomen maar ook financiële voordelen van de energietransitie terug te zien zijn. Als voorbeeld een jaarlijkse energierekening waar de lage marginale kosten van hernieuwbare energieproductie (zon en wind) sterker naar voren komen bij eindgebruikers. De prijs van aardgas en hernieuwbare energie moet beter worden ontkoppeld door de vergoeding voor energieopwekking uit hernieuwbare bronnen te ontkoppelen met energieopwekking uit fossiele brandstoffen ⁸⁷.

3. *Het gericht verstrekken van fiscale voordelen zodat private partijen gaan investeren in de transitie.*

De orde grootte van investeringen die nodig zijn (40-50 miljard euro) kan niet alleen op de rekening van de overheid komen. Daarnaast zullen deze investeringen tegen knelpunten aanlopen, zoals eerder genoemd. Om te zorgen dat private partijen gaan investeren zal de Rijksoverheid het overkomen van deze knelpunten moeten stimuleren. Additioneel aan het wegnemen van onrendabele toppen en toewerken naar CfDs zal het investeringsklimaat aantrekkelijker moeten worden gemaakt. Hiervoor is het nodig dat private partijen tijdelijke fiscale voordelen krijgen om te investeren en dat de (Europese) kapitaalmarkt wordt versterkt. Het verstrekken van fiscale voordelen zal wel gericht moeten plaatsvinden zodat (op lange termijn) gezonde overheidsfinanciën gewaarborgd blijven. Dit is mogelijk door investeringen te toetsen naar consequente toename in bedrijvigheid, innovatie, efficiënt energieverbruik en, zoals het Draghi-rapport ⁸⁸ benadrukt, productiviteit dat de staatskas ten goede komt.

4. *(Durf)kapitaal uit privaat eigen vermogen aanwakkeren en lang kapitaal makkelijker beschikbaar maken voor de energietransitie.*

De transitie naar klimaatneutraliteit in 2040 vraagt om een versnelling van investeringen in innovatieve projecten met veelal lange termijnen waarmee geld terugverdiend kan worden. Om dit soort projecten van de grond te krijgen zal de Rijksoverheid het inzetten van meer lang- en durfkapitaal voor de energietransitie moeten stimuleren. De overheid is hier al mee bezig, met als voorbeeld Invest-NL, maar hier moeten verdere stappen in worden gemaakt. Binnen de financiële sector in Nederland kunnen banken een groot deel van het uit te lenen kapitaal dat nodig is voor de transitie beschikbaar maken ⁸⁹. Maar banken, en de financiële sector in het algemeen, hebben sinds de kredietcrisis strengere eisen voor het uitlenen van kapitaal. Ook hebben banken een rendement doelstelling, moeten ze geleend kapitaal spreiden over sectoren om risico's af te dekken en zijn ze gebonden aan relatief korte termijnen van uitgeleend kapitaal. Een bank zal

⁸⁷ Voor een uitgebreider uitleg, zie bladzijde 50 in september, 2024: [The future of European competitiveness](#)

⁸⁸ September, 2024: [The future of European competitiveness](#)

⁸⁹ Zie H4.3 in Duyster, H. Terwel, R. (2021, 12 februari) [Een essay over de financiering van de Energietransitie tussen 2020 en 2050](#)

namelijk geld uitlenen dat hen is toevertrouwd door spaarders die over het algemeen weer op korte termijn over hun spaargeld willen beschikken. Banken, die onder deze regels en beweegredenen werken, zijn minder geschikt om lang- en durfkapitaal uit te strekken. Een transitie waardoor er versneld geïnvesteerd moet worden in innovatieve projecten met veelal lange termijnen is dus gebaat om minder afhankelijk te zijn van financiering door banken. De Rijksoverheid zal dus prikkels moeten implementeren waardoor meer investeringen kunnen worden gefinancierd met (durf)kapitaal uit privaat eigen vermogen en/of zodat er meer lang kapitaal beschikbaar komt. Als voorbeeld kunnen meer private pensioen beleggingen gestimuleerd worden. Pensioenfondsen hebben meer lang kapitaal beschikbaar omdat pensioengelden voor langere termijn aan hen worden toevertrouwd.

Tabel 32. Voorgestelde aanvullende beleidsmaatregelen

Categorie	Maatregel
Faciliterend	Een agenda opstellen samen met de financiële sector voor het inzicht krijgen en monitoren van investeringen voor de transitie.
Normeren	Kostenvoordelen rondom- en gedurende de transitie bij eindgebruikers positioneren (burgers, MKBs en de industrie).
Stimuleren	Het gericht verstrekken van fiscale voordelen zodat private partijen gaan investeren in de transitie.
Stimuleren	(Durf)kapitaal uit privaat eigen vermogen aanwakkeren en lang kapitaal makkelijker beschikbaar maken voor de transitie.

5.2.6. Oordeel haalbaarheid

De financiële investeringsopgave van 40-50 miljard euro per jaar vormt een complexe uitdaging voor de Nederlandse economie. De vereiste herallocatie van kapitaal en middelen is omvangrijk en vraagt zorgvuldige planning. Met een Bruto Nationaal Product van meer dan 1000 miljard in 2024 lijkt deze opgave echter wel haalbaar, al vergen de jaarlijkse nationale kosten van ongeveer 60 miljard een gedegen aanpak. Deze investeringen zetten ons op een pad naar meer onafhankelijkheid van landen die fossiele brandstoffen leveren. Dit vermindert onze kwetsbaarheid voor extreme prijsschommelingen van meer dan 100%. De transitie biedt ook kansen voor innovatie, productiviteit en een competitieve duurzamere economie. Met goede planning en een gezamenlijke inspanning kunnen we deze uitdaging aan en er sterker uitkomen als samenleving. We beoordelen deze analyse als **oranje**: met zeer grote inspanningen kan klimaatneutraliteit in 2040 wat betreft financiering bereikt worden.

5.3. Infrastructuur

Het Klimaatneutraal 2040 scenario laat, vergeleken met 2019, een dominante trend zien: het finaal elektriciteitsgebruik stijgt sterk, terwijl het primair energiegebruik juist fors daalt. Dit heeft belangrijke implicaties voor de benodigde verzwaring van het elektriciteitsnet. We leggen nu eerst uit hoe deze ogenschijnlijke tegenstelling te verklaren is:

Energie geeft aan hoeveel arbeid een systeem kan verrichten of heeft verricht. De daling in het primair en finaal energiegebruik die we zien in het scenario van 2040 t.o.v. 2019 is niet toe te schrijven aan een lagere energiebehoefte voor dezelfde toepassingen, maar komt doordat elektrische apparaten en processen de energie veel efficiënter kunnen omzetten in nuttige arbeid dan systemen die gebruik maken van de verbranding van brandstoffen. Drie voorbeelden illustreren dit:

- *Transport: Een elektrische auto rijdt ongeveer 5 km op 1 kWh elektriciteit, terwijl een benzineauto 15 km aflegt op 1 liter benzine (≈ 10 kWh). De elektrische auto gebruikt dus 30% van de energie voor dezelfde afstand.*
- *Verwarming: Een cv-ketel produceert met 1 m³ aardgas (≈ 10 kWh) ongeveer 10 kWh warmte. Een warmtepomp levert met 1 kWh elektriciteit ongeveer 4 kWh warmte, door gebruik van omgevingswarmte. Voor dezelfde warmteproductie gebruikt een warmtepomp dus slechts 25% van de energie.*
- *Elektriciteitsproductie: Een aardgascentrale zet 1 m³ gas (≈ 10 kWh) om in ongeveer 5 kWh elektriciteit - een rendement van 50%. Windmolens en zonnepanelen produceren elektriciteit met 100% rendement, omdat de onbenutte wind- en zonne-energie niet als verlies wordt gerekend.*

Daarnaast daalt het energiegebruik in de gebouwde omgeving en landbouw door algemene efficiëntieverbeteringen, zoals betere isolatie en LED-verlichting.

In een klimaatneutraal scenario stijgt het elektriciteitsgebruik dus wel significant, maar blijft de stijging onder 50% van het huidige fossiele energiegebruik. Dit betekent dat het elektriciteitsnet niet evenredig hoeft te worden verzwaaard met de afname van fossiele brandstoffen.

5.3.1. De elektriciteitsvraag in het Klimaatzaak 2040 scenario

Tabel 33 toont de elektriciteitsvraag in 2019 en in het Klimaatzaak 2040 scenario.

Tabel 33. Energetisch elektriciteitsgebruik in het referentiejaar 2019 en het Klimaatzaak 2040 scenario

Sector	2019 (PJ)	2040 (PJ)	Stijging
Energiesector	13	20	154%
Gebouwde omgeving	202	233	115%
Nationaal transport	9	201	2233%
Industrie	163	570	350%
Landbouw	41	50	122%
Totaal	428	1074	251%

De belangrijkste stijging van het elektriciteitsgebruik zit in de industrie. Binnen de industrie zijn grote delen van de elektriciteitsvraag toe te wijzen aan een beperkt aantal activiteiten, namelijk verregaande elektrificatie van de basisindustrie die actief blijft in Nederland in het Klimaatzaak scenario, de productie van synthetische brandstoffen, en een sterke groei van datacenters. Deze industriële veranderingen zijn onzeker en dat maakt de toename van de elektriciteitsvraag ook onzeker. We lichten dit toe in onderstaand kader. In dit onderzoek gaan we uit van de elektrificatie in dit scenario, dus de basisindustrie blijft (hier gaat de regering, het NPE en PBL ook vanuit), er worden synthetische brandstoffen geproduceerd en datacenters groeien. Als de beschreven activiteiten niet (meer) plaatsvinden in Nederland, dan kan de opgave van netverzwaring ineens veel lager uitvallen.

Onzekerheden elektrificatie industrie

In het Klimaatneutraal 2040 scenario maakt de Nederlandse industrie een fundamentele transitie door, waarbij elektrificatie en waterstof de belangrijkste pijlers zijn. Deze transitie bevat drie elementen die een substantieel deel bepalen van de elektriciteitsvraag: de basisindustrie, de productie van synthetische brandstoffen en de groei van datacenters, zie ook Figuur 43.

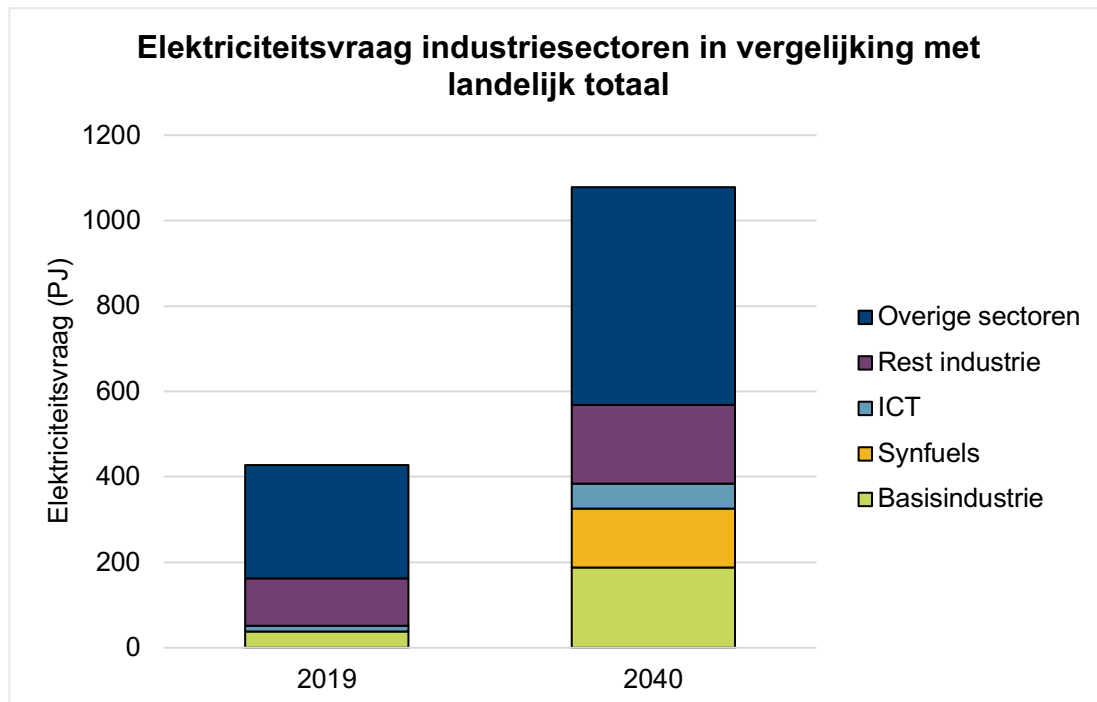
De basisindustrie bestaat uit 14 grote bedrijven in de sectoren Staal, Raffinage en Chemie (waaronder stoomkrakers, organische basischemie en kunstmest). Deze bedrijven zijn momenteel verantwoordelijk voor meer dan de helft van de industriële emissies. In het scenario groeit hun aandeel in de elektriciteitsvraag tot ongeveer 17% van het landelijk totaal, voornamelijk door twee technologische ontwikkelingen: elektrolyse en elektrische kraken. Bij elektrolyse gaat het om de overstap van traditionele waterstofproductie (via SMRs en ATRs) naar productie van waterstof met elektriciteit bij raffinaderijen, kunstmest- en chemische bedrijven. Elektrisch kraken is een nieuwe technologie die wordt ontwikkeld om de huidige stoomkrakers, die koolstofhoudende restgassen gebruiken, te vervangen.

De toekomstige elektriciteitsvraag van deze basisindustrie kent twee belangrijke onzekerheden. Ten eerste hebben deze bedrijven vaak internationale vestigingen, waardoor investeringslocaties nog niet vaststaan. Het is mogelijk dat deze bedrijven ervoor kiezen niet te vergroenen in Nederland en hun activiteiten naar het buitenland verplaatsen. Ten tweede bestaan er alternatieve technologieën die dezelfde emissiereductie kunnen bereiken met minder directe elektriciteitsvraag, zoals waterstofimport in plaats van elektrolyse in Nederland (waarbij de elektriciteitsvraag vervalt bij blauwe waterstof of verplaatst bij groene waterstof) of waterstof als alternatief voor elektrisch kraken. Een beperkt aantal strategische keuzes van deze bedrijven kan dus bijna een vijfde van de landelijke elektriciteitsvraag bepalen.

Daarnaast vraagt de productie van synthetische brandstoffen ongeveer 13% van de landelijke elektriciteitsvraag. Het scenario voorziet in de productie van 0,8 miljoen ton synthetische kerosine en 1,5 miljoen ton synthetische scheepsbrandstof. Dit vormt een belangrijk onderdeel van de verduurzaming van de internationale transportsector. Ter vergelijking: Schiphol gebruikt in de jaren voor corona (2015 – 2018) tussen de 3,5 en 4 miljoen ton kerosine. De elektriciteits- en waterstofvraag

van deze activiteiten is echter hoog. De productie zou ook elders kunnen plaatsvinden, bijvoorbeeld in gebieden met overvloedige zonne-energie, waarna de synthetische brandstoffen, net als nu met aardolie en LNG gebeurt, naar Nederland worden getransporteerd.

Tot slot groeit het elektriciteitsverbruik van datacenters, ondanks strenge efficiëntie-eisen, naar 59 PJ (6% van de landelijke elektriciteitsvraag). Hoewel de ICT-sector naar verwachting blijft groeien, is de exacte toename en ook de toekomstige locatie van deze activiteiten onzeker.



Figuur 43. Een overzicht van de elektriciteitsvraag voor verschillende activiteiten in de industrie in vergelijking met de landelijke vraag naar elektriciteit.

5.3.2. Gelijktijdigheid van elektriciteitsvraag

De mate waarin netverzwaring nodig is wordt voor een deel bepaald door de gelijktijdigheid van de vraag - het moment waarop verschillende gebruikers tegelijk elektriciteit vragen. Deze gelijktijdigheid bepaalt de piekbelasting van het net en daarmee de benodigde netcapaciteit.

Het beheersen van deze piekbelasting kan op drie manieren: door verschuiving van de vraag in tijd, verlaging van de maximale vermogensvraag per apparaat, en spreiding van gelijktijdig gebruik. Een praktisch voorbeeld:

Neem een straat met 10 inwoners, die allemaal rond zes uur thuiskomen en dan hun elektrische auto opladen (met ongeveer 10 kW). Dat geeft boven op de reguliere avondpiek in de winter (verwarming aan, elektrisch eten koken en lichten aan) ook nog eens 100 kW aan vraag voor het laden van de auto's. Die avondpiek is vaak al rond 9 uur voorbij en de ochtendpiek begint pas om 6 of 7

uur 's ochtends. Voor de eenvoud van het voorbeeld gaan we ervan uit dat iedere auto gemiddeld ongeveer 2 uur moet laden om de volgende dag weer een rit te kunnen maken. Dat betekent dat je in de 10 uur tussen de ochtenden en avondpiek je ook iedere auto om de beurt automatisch kunt laten laden. Alternatief of aanvullend op deze verschuiving van het gebruik, kun je ook op bepaalde momenten de laadpalen opdracht geven om met minder vermogen te laden, dus bijvoorbeeld max 5 kW in plaats van 10 kW, waardoor je de piekvraag reduceert met 50%. Ook kun je de gelijktijdigheid reduceren door bijvoorbeeld aan te geven dat maar 5 van de 10 auto's tegelijk mogen laden. Kortom, er zijn drie manieren om de piek te verlagen: verschuiven van de vraag, verminderen van de maximale vermogensvraag per apparaat en het spreiden van de gelijktijdigheid.

Deze flexibiliteit is niet beperkt tot elektrische auto's. In de gebouwde omgeving kunnen warmtepompen flexibel opereren. In de industrie zijn er ook mogelijkheden om de elektriciteitsvraag flexibel in te richten, zoals grote batterijen, elektrolyzers, warmteopslag, e-boilers en hybride installaties die bedrijven in staat kunnen stellen om de piekmomenten in de infrastructuur te vermijden. In sommige gevallen kan zelfs het verlagen of verschuiven van de productiecapaciteit van een fabriek in de tijd een optie zijn.

De mate waarin je kunt sturen (door prijsprikkels of rechtstreekse sturing) waardoor gelijktijdigheid minder wordt of de vermogenspiek per apparaat minder hoog, bepaalt voor een belangrijk deel hoe sterk je de netten moet verzwaren.

In het Klimaatzaak scenario 2040 zijn diverse van deze flexmiddelen ingezet en is een zekere mate van sturing van het gebruik van elektrische apparaten door prijsprikkels veronderstelt. Productieverlaging en verschuiving worden niet meegenomen omdat de kosten hiervan over het algemeen hoger zijn dan de besparingen op het energiegebruik⁹⁰.

Dat alles betekent dus dat door flexibiliteit de procentuele stijging van de piekbelasting van de elektriciteitsinfrastructuur lager kan zijn dan de procentuele stijging in het elektriciteitsgebruik.

Een belangrijke factor is ook de locatie van grote elektriciteitsgebruikers. De grootste stijging van het elektriciteitsgebruik in de industrie vindt voornamelijk plaats in de basisindustrie (raffinaderijen, stoomkrakers, kunstmest, chemie en staal). Deze industrie is geconcentreerd in 5 clusters in Nederland en heeft een bijna volcontinue vraag naar elektriciteit in de toekomst. Vier van de clusters zijn gelegen aan de kust. Door de offshore windparken te laten aanlanden in de buurt van de 4 clusters kan worden voorkomen dat een deel van de elektriciteit van de offshore windparken moet worden getransporteerd door Nederland en naar het buitenland. Door aan de kust ook de elektrolyzers te plaatsen kan op momenten met een grotere elektriciteitsproductie uit offshore wind dan vraag in een nabijgelegen industriecluster, worden gezorgd dat ook deze stroom niet over het

⁹⁰ Flattening the Curve, Kalavasta en Berenschot, 2023

hoogspanningsnet hoeft te worden getransporteerd voorbij het cluster⁹¹. En door het plaatsen van backup centrales op waterstof in of dicht bij de industrieclusters kan de elektriciteit “ter plekke” worden opgewekt op momenten dat wind- en zon niet beschikbaar zijn. Deze locatiesturing is een belangrijk element in het voorkomen van netverzwaring ten behoeve van Wind op Zee en de industrieclusters.

Een groot deel van de infrastructuur uitbreiding en verzwaring vindt plaats op de Noordzee en onze analyses laten zien dat dit niet alleen een grote investering vraagt, maar ook dat de beschikbaarheid van voldoende elektrolyse capaciteit aan de kust en op de Noordzee, alsmede voldoende opslag van waterstof in zoutcavernes en lege gasvelden in 2040 uitdagend zal zijn. Totdat er voldoende capaciteit van elektrolyzers en waterstofopslag is, kunnen ATR-installaties met CO₂-afvang als overbrugging) worden ingezet, die on-demand en indien nodig volcontinue blauwe waterstof kunnen maken uit aardgas. Door de ATRs in de nabijheid van de waterstofbackbone te plaatsen en in de nabijheid van CO₂ transportleidingen, kan deze blauwe waterstof geleverd worden aan elk daarop aangesloten industriecluster.

Door al deze ontwikkelingen hoeft het elektriciteitsnet niet als geheel en niet zoveel als het toenemende elektriciteitsgebruik suggereert overal evenveel te worden verzaaid. Desondanks is verzwaring wel nodig en wel in die mate dat nu al verwacht wordt dat de komende vijf tot tien jaar de netbeheerders niet tijdig alle netverzwaring zullen kunnen uitvoeren. Ergens na 2030, maar in ieder geval rond 2035, verwacht men weer bij te zijn, ervan uitgaande dat er tot 2050 tijd is om klimaatneutraliteit te bereiken. Maar in dit scenario versnellen we klimaatneutraliteit naar 2040. Dat betekent dat de netbeheerders tot 2040 waarschijnlijk achter zullen liggen in dat wat er aan netverzwaring nodig is. Dat betekent ook dat we een periode van 15 jaar in zullen gaan waarin er netcongestie zal zijn en plannen voor elektrificatie van een sector niet altijd onmiddellijk overal door kunnen gaan. Het zal ook betekenen dat de waarde van flexibiliteit en sturing van zware elektrische apparaten in iedere sector nog meer aandacht moet krijgen om de piekbelasting van het net te verlagen. Bovendien moet gestuurd worden op energiehubs, waarbinnen elektriciteitsproductie, warmteproductie en vraag zodanig geregeld zijn dat een groot deel van de energiebalans geregeld wordt binnen het gebied van de hub zelf. Dit reduceert de aansluiting op het elektriciteitsnet van de netbeheerders aanzienlijk ten opzichte van de situatie waarin alle bedrijven binnen een hub een individuele aansluiting nodig hebben.

5.3.3. Sturing van elektrische apparaten

Het belangrijkste dat de Rijksoverheid moet doen is eisen opstellen om de sturing van (nieuwe) zware elektrische apparaten mogelijk te maken. Het gaat dan bijvoorbeeld om laadpalen, warmtepompen en zon-PV inverters, wellicht in uitzonderlijke gevallen ook inductiekookplaten. Er zijn meerdere vormen van sturing mogelijk.

- Gerichte sturing door Netbeheerders vanuit lokale transformatorstations:
Dit is volgens ons de meest kansrijke route en is na een pilot bij ElaadNL Gridshield genoemd. Neem als voorbeeld een transformatorstation in een wijk. In

⁹¹ Power to Industry (VAWOZ), Kalavasta, 2023

dat station kan zowel de belasting op de zekeringen in het station als de belasting van de daaraan verbonden kabels worden gemeten. Indien er wordt geconstateerd dat de belasting van de kabels en/of het station een bepaalde grens (<100% belasting) overschrijdt kan er een stuursignaal worden uitgestuurd (via bijvoorbeeld LORA, een soort lange afstand wifi), waarmee zware apparaten, die gekoppeld zijn aan de kritieke kabel en/of station, om de vermogensvraag terug te brengen. Er zijn drie voordelen van deze methode. Ten eerste er wordt alleen gestuurd op die plekken en momenten dat het net overbelast dreigt te raken. Ten tweede er is een garantie dat het net niet overbelast kan raken. Ten derde het signaal is niet te hacken door derden, omdat het los kan opereren van het internet. Als het systeem gehackt wordt, dan kan een derde dat alleen doen door zelf een sterker LORA signaal met dezelfde encryptie te produceren in een wijk of straat, maar niet op een groter niveau. Daarmee kan er geen situatie worden gecreëerd waarmee de stroom uitvalt in grote delen van Nederland. Deze methode van sturing op basis van lokale metingen in transformatorstations kan plaatsvinden op alle netvlakken en voor alle sectoren. Wij veronderstellen dat deze vorm van sturing op termijn op de meeste maatschappelijke acceptatie kan rekenen, omdat de gevolgen alleen merkbaar zijn op die plekken zijn waar het net daadwerkelijk overbelast dreigt te worden. Het is hiermee mogelijk om netverzwaring voor kortere of langere tijd uit te stellen. De keuze tussen wel of niet netverzwaren wordt daarmee een afweging waarin de kosten van netverzwaring worden afgewogen tegen het aantal keer en de duur waarmee Gridshield ingrijpt en welk ongemak dit veroorzaakt voor de eigenaren/gebruikers van de zware apparaten.

- Generieke sturing door de Netbeheerders:
Dit zou bijvoorbeeld het geval zijn als de Netbeheerders de mogelijkheid zouden krijgen om laadpalen aan te sturen die in handen zijn van commerciële partijen. Deze aanpak heeft twee grote nadelen. Namelijk je stuurt overal bij, niet alleen op die plekken waar het nodig is. Het net is namelijk niet overal tegelijk evenveel belast. En er ontstaat, omdat deze aansturing via internet verloopt, een mogelijkheid door derden om de aansturing te hacken en op grote schaal zware apparaten aan en uit te zetten. Hierdoor kan een niet te managen situatie voor de netbeheerders ontstaan die mogelijk tot uitval van de elektriciteit kan leiden.
- Sturing via financiële prikkels:
Dit is ons inziens een additionele route op de bovenstaande vormen van sturing. Alleen sturen op financiële prikkels levert geen garantie op voldoende reductie van de vermogensvraagpiek en daarmee kan het elektriciteitsnet toch nog overbelast raken.

De groei van de elektriciteitsvraag wordt niet alleen gedreven door elektrificatie van bestaande processen. Ook bevolkingsgroei, toename van het aantal woningen, meer vervoersbewegingen en industriële ontwikkelingen zoals de groei van datacenters spelen een rol. Daarnaast moet rekening worden gehouden met mogelijke grootschalige elektriciteitsexport naar buurlanden die minder gunstig liggen voor duurzame energieopwekking. De groei van de elektriciteitsvraag om redenen die hiervoor genoemd staan is verwerkt in het Klimaatzaak 2040 scenario en er is ook rekening mee gehouden in de sector analyses in hoofdstuk 4.

5.3.4. Uitwerking in beleid

Wat de Rijksoverheid in samenwerking met de netbeheerders op zeer korte termijn dient te doen is vastleggen aan welke sturingsprotocollen nieuwe zware elektrische apparaten moeten voldoen. Al ruim voor 2030 zouden nieuwe apparaten die worden verkocht in Nederland dan aanstuurbaar kunnen zijn. Verder zouden de Netbeheerders het mandaat moeten krijgen om sturing op basis van metingen in lokale transformator stations te mogen doen indien een bepaalde belastingsgraad wordt bereikt in een gebied. Tenslotte zou er een afwegingskader moeten komen waarin de noodzaak tot netverzwaring wordt afgezet tegen het aantal interventies en de duur van die interventies die worden gepleegd. Omdat Gridshield de zekerheid geeft dat overbelasting niet kan ontstaan kunnen er meer aangeslotenen op het net worden toegestaan en kunnen netverzwaringen indien gewenst worden geprioriteerd. Indien gewenst kan Gridshield worden aangevuld met financiële prikkels die gebruikers al stimulans geven om stroomvraag pieken te vermijden, zonder dat Gridshield ingrijpt.

Verder dienen de Netbeheerders ondersteunt te worden door de Rijksoverheid bij de financiering van de enorme uitbreiding van het elektriciteitsinfra en dienen procedures die de uitbreiding mogelijk maken zo kort mogelijk te worden gehouden. Financiering en procedure verkorting zijn onderwerpen die echter al op de radar staan van de Rijksoverheid en waar al volop aan wordt gewerkt, zodat we dit hier niet als aanvullend beleid opnemen.

Tabel 34. Voorgestelde aanvullende beleidsmaatregelen

Categorie	Maatregel
Normerend	Realtime metingen van belasting van alle transformatorstations verplicht
Normerend	Aansturing van zware elektrische apparaten in het betroffen gebied verplichten
Stimulerend	Financiële prikkels introduceren om gebruikers van zware elektrische apparaten te sturen in de richting van netbewust gebruik
Normerend	Datum vaststellen en protocol voor aansturing van zware elektrische apparaten, binnen de komende jaren.

5.3.5. Oordeel over de haalbaarheid

De transitie naar een klimaatneutraal elektriciteitssysteem in 2040 vormt een buitengewoon complexe en urgente opgave. Zelfs met optimale kaderstelling door de Rijksoverheid voor sturing van zware elektrische apparaten en een aangepaste prioritering van netverzwaring, evenals de diverse ander voorstellen om de benodigde netverzwaring te minimaliseren, zal het een zeer grote uitdaging blijven om alle gewenste ontwikkelingen tijdig te realiseren. Om de doelstellingen te halen is het cruciaal dat er op zeer korte termijn concrete actie wordt ondernomen en dat alle betrokken partijen zich maximaal inzetten. We beoordelen deze analyse als **oranje**: met zeer grote inspanningen kan klimaatneutraliteit in 2040 wat betreft het elektriciteitssysteem bereikt worden.

5.4. Beschikbaarheid arbeid

Een cruciale vraag bij de energietransitie is of er voldoende gekwalificeerde arbeidskrachten beschikbaar zijn voor de uitvoering. De impact op de arbeidsmarkt is complex en kent verschillende, soms tegengestelde, effecten binnen sectoren.

Neem de transitie naar elektrische mobiliteit. Deze creëert nieuwe banen in de installatie en productie van laadinfrastructuur, maar leidt tegelijkertijd tot banenverlies in de traditionele auto-onderhoudssector. Elektrische voertuigen zijn immers mechanisch eenvoudiger en vergen minder onderhoud. In de raffinagesector zien we een vergelijkbaar patroon. De afnemende binnenlandse vraag naar benzine en diesel zou kunnen leiden tot baanverlies. Echter, zolang er internationale vraag blijft, kunnen raffinaderijen hun exportactiviteiten voortzetten. Bovendien ontwikkelen deze bedrijven nieuwe activiteiten, zoals de productie van biobrandstoffen en synthetische brandstoffen uit waterstof en CO₂, wat nieuwe werkgelegenheid creëert. De elektrificatie heeft ook cascade-effecten op de energiesector. Meer elektrische auto's betekent meer vraag naar duurzame elektriciteit, wat leidt tot extra werkgelegenheid in de wind- en zonne-energiesector. Daarnaast zijn er arbeidskrachten nodig voor de ontwikkeling en het beheer van elektriciteitsopslag en backup-centrales. Tegelijkertijd verdwijnen er banen bij conventionele kolen- en gascentrales die worden uitgefaseerd.

Door deze complexe wisselwerking van baancreatie en baanverlies, waarbij directe en indirecte effecten door de hele economie doorwerken, is het lastig om de netto impact op de werkgelegenheid nauwkeurig te bepalen. Voor Nederland ontbreken momenteel gedetailleerde studies die deze arbeidsmarkteffecten van de energietransitie in kaart brengen.

5.4.1. Macro inschatting van extra arbeidsplaatsen

Om toch een benadering van de gecreëerde arbeidsplaatsen te krijgen, kan via een macro benadering de relatie worden geschat tussen extra investeringen in de economie en de extra arbeidsplaatsen die dit oplevert. Er zijn drie typen van gecreëerde arbeidsplaatsen:⁹²

- **Directe:** Arbeidsplaatsen die ontstaan door een investering, zoals de bouw van wind- en zonne-energie-installaties en de renovatie van gebouwen voor energie-efficiëntie.
- **Indirecte:** Arbeidsplaatsen in de toeleveringsketen (zoals productie van zonnepanelen of windturbines die nodig zijn voor de energietransitie)
- **Geïnduceerde:** Arbeidsplaatsen die ontstaan doordat werknemers in de directe en indirecte sectoren hun verdiende inkomen besteden aan goederen en diensten in andere delen van de economie.

Internationale onderzoeken naar de werkgelegenheidseffecten van de energietransitie zijn redelijk eensgezind over de relatie tussen een investering en de gecreëerde

⁹² R. Pollin et al. (2009) The Economic Benefits of Investing in Clean Energy: How the economic stimulus program and new legislation can boost US economic growth and employment

arbeidsplaatsen. Een investering in een westerse economie t.b.v. de energietransitie van 1 miljoen euro levert tussen de 5 en 20 extra arbeidsplaatsen op.⁹³

Deze arbeidsplaatsen zijn voornamelijk van korte duur (~87%) omdat de overgang naar netto-nul veel productie, bouw en installatie vereist voor de aanleg van hernieuwbare energiebronnen, transportinfrastructuur en gebouwisolatie.⁹⁴ We hebben de verhouding van korte termijn- en permanente banen berekend op basis van de "*Energy Industries – Sectors and Weights*" van Pollin et al. (2009). We hebben de subsectoren zelf ingedeeld naar korte termijn en permanent, op basis van de volgende definities⁹⁵:

- **Korte termijn:** Eenmalige arbeidsplaatsen voor specifieke projecten zoals de bouw, installatie of renovatie van infrastructuur, die meestal enkele maanden tot enkele jaren duren.
- **Permanent:** Arbeidsplaatsen die naar verwachting op lange termijn blijven bestaan en de duurzame energie-infrastructuur ondersteunen. Dit omvat functies zoals onderhoud, onderzoek en ontwikkeling.

Tabel 35. Verdeling van korte termijn en permanente banen per sector

Sector	Korte termijn	Permanent	Aandeel van banen in energietransitie ⁹⁴
Gebouwisolatie	Niet-residentiele reparatiebouw (50%) Residentiele reparatiebouw (50%)		40%
Vervoer en spoor	Overige bouw (45%)	Spoorvervoer (10%) Grondvervoer van passagiers (45%)	20%
Intelligente energienetwerk	Bouw (25%) Machines (25%) Elektronische apparatuur (25%) Elektronische krachtgoederen (12,5%) Opslagbatterijen (12,5%)		10%
Wind	Bouw (26%) Kunststofproducten (12%) Bewerkte metalen (12%) Machines (37%) Mechanische krachttransmissieapparatuur (3%) Elektronische componenten (3%)	Wetenschappelijke en technische diensten (7%)	10%

⁹³ M. Moszoro (2021) The Direct Employment Impact of Public Investment, IMF Working Paper; R. Hanna et al. (2024) Job creation in a low carbon transition to renewables and energy efficiency: a review of international evidence, Sustainability Science; H. Garrett-Peltier (2017) Green versus brown: Comparing the employment impacts of energy efficiency, renewable energy, and fossil fuels using an input-output model, Economic Modelling; Pollin et al. (2009)

⁹⁴ Pollin et al. (2009); H. Garrett-Peltier (2017)

⁹⁵ H. Garrett-Peltier (2017)

Sector	Korte termijn	Permanent	Aandeel van banen in energietransitie ⁹⁴
Zonne-energie	Bouw (30%) Hardware fabricage (17,5%) Elektronische apparatuur (17,5%) Elektronische componenten (17,5%)	Wetenschappelijke en technische diensten (17,5%)	10%
Biomassa	Overige nieuwbouw (25%)	Graanteelt (25%) Houthakken (25%) Raffinage (12,5%) Wetenschappelijk onderzoek en ontwikkeling (12,5%)	10%

Gemiddeld zijn er dus 8,7 korte termijn en 2,3 permanente banen per 1 miljoen euro investering.

We weten uit bij benadering welke extra investeringen nodig zijn voor de energietransitie tussen nu en klimaatneutraliteit, zie ook hoofdstuk 5.2⁹⁶. De energietransitie wordt gekenmerkt door een verschuiving van variabele kosten (OPEX) voor met name brandstoffen, naar investeringen (CAPEX) voor apparatuur. Deze verschuiving is aanzienlijk en waarschijnlijk in de orde grootte van 75% OPEX en 25% CAPEX in 2020 naar 25% OPEX en 75% CAPEX in 2040.⁹⁷ In totaal gaat het om een meerinvestering van ongeveer 514 miljard euro tussen 2019 en 2040, zie sectie 5.2.2. Indien we deze 514 miljard uitgeven tussen 2019 en 2040, komt dat neer op 24 miljard extra investeringen per jaar. Een deel van die investeringen is publiek en een deel privaat.

Dit zou betekenen dat door de transitie naar netto-nul elk jaar ongeveer 210.000 korte termijnbanen worden gecreëerd. Daarnaast wordt over de 15 jaren tussen 2025 en 2040 een totaal van 850.000 permanente banen gecreëerd. Naast de toename van banen in de hernieuwbare energiesector, gaan er ook banen verloren in de fossiele energiesector en bij sectoren waarin apparaten die fossiele energie verbranden. Onderzoekers zijn het er redelijk over eens dat er tijdens de transitie, oftewel de ‘grote energieverbouwings’ van onze samenleving, er twee keer zoveel banen bijkomen als dat er verloren gaan.⁹⁸ Fossiele banen die verloren gaan zijn voornamelijk permanente operationele banen.⁹⁹

Een ruwe inschatting laat zien dat er in 2040 ongeveer 320.000 extra permanente banen nodig zijn, aangenomen dat het grootschalige productie-, bouw- en installatiewerk dan is afgerond en vanaf dan het voornamelijk zal gaan om vervanging van installaties aan het einde van hun economische en/of technische levensduur. Het aantal benodigde extra banen tussen nu en 2040 is hoger, omdat er ook korte termijn banen nodig zijn. Figuur 44 laat zien dat er op het hoogtepunt 560.000 extra banen nodig zijn.¹⁰⁰

⁹⁶ Een essay over de financiering van de Energietransitie tussen 2020 en 2050, Kalavasta en Berenschot, 2021

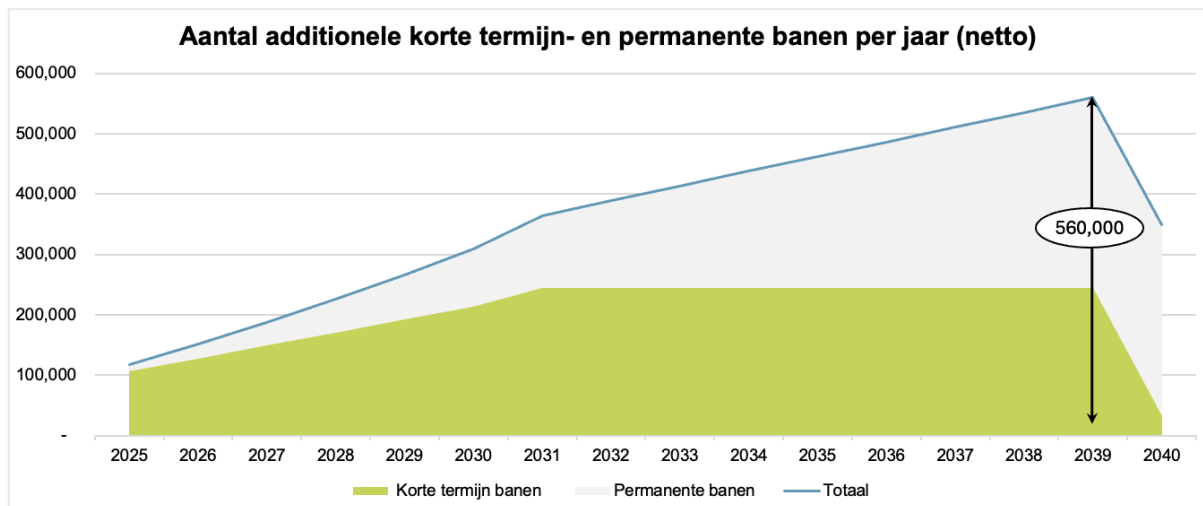
⁹⁷ Quintel, 2024, Pilot Financieel Inzicht in de Energietransitie (FIT)

⁹⁸ 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight (WWS) All-Sector Energy Roadmaps, Mark Z. Jacobson e.o., Science Direct, 2017

⁹⁹ Pollin et al. (2009);

¹⁰⁰ Inschatting van Kalavasta.

We rekenen nu met de aanname dat de meerinvesteringen tussen 2019 en 2040 deels al genomen zijn. In de hypothetische situatie dat er tussen 2019 en nu geen enkele meerinvestering in de energietransitie was gedaan, zou de volledige 514 miljard moeten worden geïnvesteerd tussen 2025 en 2040. Dit betekent 34 miljard per jaar en een piek in de werkgelegenheid van 780.000, in plaats van 560.000 extra banen.



Figuur 44. Aantal additionele korte termijn- en permanente banen per jaar (netto)

We hebben onderzocht wat het verschil in de arbeidsvraag zou zijn tussen het klimaatzaakscenario (100% reductie) en het EU-scenario (90% emissiereductie) in 2040. Het EU-scenario is tot stand gekomen op basis van een advies van de EU Klimaatadviesraad, die aangeeft dat een emissiereductie van 90-95% haalbaar is voor de EU in 2040. Door het schrappen van alle negatieve emissie maatregelen komt het klimaatzaakscenario uit op 92% reductie. Dit resulteert in:

- 3-4% lagere meerinvesteringen (15-20 miljard euro)
- Een evenredige daling in arbeidsvraag van 3-4%

Voor het bereiken van de EU-doelstelling (90% i.p.v. 92%) verwachten we een totale verlaging van 4-5% in zowel meerinvesteringen als arbeidsvraag.

We concluderen hieruit dat bij 90% emissiereductie in 2040, het grootste deel (95-96%) van de investerings- en arbeidsopgave van 100% emissiereductie blijft staan. Dit komt doordat de geschrapte negatieve emissie maatregelen minder kapitaal- en arbeidsintensief zijn vergeleken met bijvoorbeeld woningisolatie of netverzwaring in het laagspanningsnet.

5.4.2. Het effect op de beroepsbevolking

De Nederlandse werkzame beroepsbevolking bestaat uit ongeveer 9,8 miljoen werkenden, die gemiddeld ongeveer 73% van full-time werken.¹⁰¹ Dat geeft dus een huidige beroepsbevolking in FTE van ongeveer 7,15 miljoen.

Een totaal van 560.000 extra banen zou, aangenomen dat de werkgelegenheid momenteel nagenoeg volledig is, uitkomen op een benodigde groei van het aantal full-time werkenden van 7,8%¹⁰². Dit kan op twee manieren worden bereikt. Enerzijds door de groei van de arbeidsparticipatie van momenteel 73% naar 79% te brengen of door de toename van het aantal werkenden van 9,8 miljoen naar 10,6 miljoen. Of een combinatie van beiden of door een aantal mensen binnen het arbeidspotentieel van 7,15 miljoen FTE om te scholen en vacatures te laten ontstaan in niet energietransitie gerelateerde beroepen. Bij deze berekening is geen rekening gehouden met de verwachte bevolkingsgroei, omdat deze groei onzeker is. Volgens de KEV 2024 zal de Nederlandse bevolking tussen 2023 en 2035 van 17,8 tot 18,8 miljoen mensen groeien.¹⁰³ Als we aannemen dat de arbeidsparticipatie gelijk blijft, geeft dit een additionele 400.000 FTE. Maar het overgrote deel van deze mensen zal banen moeten vullen in de tegelijkertijd meegroeiende sectoren, zoals de zorg, onderwijs, etc. Desalniettemin zou een deel van de groeiende werkbevolking wel in de energietransitie kunnen belanden, wat de opgave iets zou kunnen reduceren.

Er zijn verschillende mogelijkheden om het personeelstekort aan te pakken, zoals gerichte (tijdelijke) arbeidsmigratie vanuit andere Europese lidstaten of het Franse model voor arbeidsmigratie door tijdelijke werkvisa voor mensen van buiten de EU, zoals nu wordt toegepast in de (glas)tuinbouw. Hiermee kan buitenlands personeel worden aangetrokken dat vervolgens in eigen land de opgedane kennis kan toepassen voor de energietransitie die ook buiten Nederland dient plaats te vinden. Voor beide opties geldt wel dat er geïnvesteerd moet worden in opleidingscapaciteit. Daarnaast vraagt dit om oplossingen voor de extra druk die ontstaat op de toch al zeer krappe woningmarkt. Ook zijn er verregaande maatregelen denkbaar zoals de introductie van een Klimaatplicht jaar, waarin jongeren na hun studie gevraagd wordt om een jaar lang bij te dragen aan de samenleving, zoals in het verleden de dienstplicht. Zeker de komende jaren zal het knellen in het aantal gekwalificeerde werkenden dat beschikbaar is voor de energietransitie. Maar bij gericht beleid zou richting 2030 en daarna vraag en aanbod van arbeid dichterbij elkaar gebracht moeten kunnen worden.

Afhankelijk van genomen interventies is het mogelijk om de extra aantal arbeid te kunnen leveren. We zullen wel moeten kiezen hoe we het beschikbare arbeidspotentieel in onze samenleving inzetten, dan wel verdelen over de verschillende beroepen.

¹⁰¹ CBS (2024) Beroeps- en niet-beroepsbevolking, 2^e kwartaal 2024, seizoen gecorrigeerd.

¹⁰² Bij deze berekening is geen rekening gehouden met het feit dat de groep gepensioneerden gaat toenemen de komende tijd.

¹⁰³ PBL, Klimaat- en Energieverkenning 2024, [Klimaat- en Energieverkenning 2024 | Planbureau voor de Leefomgeving](#)

5.4.3. Uitwerking in beleid

In het kort zou de Rijksoverheid de arbeidsparticipatie moeten stimuleren, het part-time werken moeten afremmen en oplossingen moet bedenken om tijdelijk personeel vanuit het buitenland aan te trekken. Daarnaast kan overwogen worden om jongeren via een klimaatplichtjaar een rol te geven in de energietransitie. In totaal gaat het om ruim een half miljoen extra arbeidsplaatsen op de piek van de energietransitie.

Mogelijke Faciliterende Maatregelen

Een nationaal versneld opleidingsprogramma voor technisch personeel in de energietransitie zou als belangrijke eerste stap kunnen dienen voor het om- en bijscholing van personeel. Voor het aantrekken en benutten van internationale arbeidskracht kan worden gewerkt aan een efficiënt systeem voor de erkenning van buitenlandse diploma's en werkervaring, samen met een gecoördineerd programma voor tijdelijke arbeidsmigratie. Dit wordt ondersteund door praktische maatregelen zoals versnelde huisvestingsprogramma's voor arbeidsmigranten, wat essentieel is voor het succesvol aantrekken en behouden van buitenlands talent. Daarnaast kunnen regionale arbeidspools specifiek voor energietransitie projecten zorgen voor betere matching van vraag en aanbod.

Mogelijke Stimulerende en Beprijzende Maatregelen

Op het gebied van arbeidsparticipatie zouden financiële prikkels kunnen worden ingezet via fiscale voordelen voor voltijds werk en verlaging van de marginale belastingdruk, waardoor meer werken financieel aantrekkelijker wordt. Dit zou kunnen worden aangevuld met gerichte subsidies voor om- en bijscholing specifiek gericht op technische en energietransitie-gerelateerde functies. Daarnaast zouden bedrijven die investeren in relevante opleidingsprogramma's extra subsidies kunnen ontvangen (of belastingsvoordelen krijgen), wat hen stimuleert om actief bij te dragen aan de ontwikkeling van het benodigde arbeidspotentieel.

Mogelijke Normerende Maatregelen

Een voorbeeld van een mogelijke normerende maatregel is de introductie van een verplicht klimaatdienstjaar voor jongeren. Doorgroeimogelijkheden naar vaste functies in de sector zouden het programma aantrekkelijk kunnen maken voor deelnemers.

Tabel 36. Voorgestelde aanvullende beleidsmaatregelen

Type beleid	Maatregel
Stimulerend	Verhogen fiscale voordelen voor voltijd werk en het verminderen van de marginale belastingdruk
Stimulerend	Introduceren van gerichte subsidies voor om- en bijscholing naar technische en energietransitie-gerelateerde beroepen
Faciliterend	Opzetten van een nationaal programma voor versnelde technische opleidingstrajecten specifiek gericht op de energietransitie
Faciliterend	Creëren van een efficiënt systeem voor erkenning van buitenlandse diploma's en werkervaring in technische beroepen
Faciliterend	Ontwikkelen van een gecoördineerd programma voor tijdelijke arbeidsmigratie met focus op energietransitie-gerelateerde beroepen

Type beleid	Maatregel
Normerend	Invoeren van een klimaatdienstjaar voor jongeren met aantrekkelijke vergoeding en doorgroeimogelijkheden
Stimulerend	Verstrekken van extra subsidies voor bedrijven die investeren in opleidingsprogramma's voor energietransitie-gerelateerde functies
Faciliterend	Opzetten van regionale arbeidspools specifiek voor energietransitie projecten
Beprijzend	Introduceren van fiscale prikkels voor werkgevers die mensen omscholen naar energietransitie-gerelateerde functies
Faciliterend	Ontwikkelen van versnelde huisvestingsprogramma's voor arbeidsmigranten in de energietransitie sector

5.4.4. Oordeel over de haalbaarheid

De arbeidsmarktuiddaging voor de energietransitie vormt een complexe en zeer omvangrijke opgave die urgente actie vereist. Met een piekbehoefte van ongeveer een half miljoen extra arbeidsplaatsen (waarvan 320.000 permanent) op een totale beroepsbevolking van 9,8 miljoen mensen, staat ons een enorme transformatie van de arbeidsmarkt te wachten. Deze transitie vraagt om een snelle en gecoördineerde aanpak via meerdere sporen: verhoging van de arbeidsparticipatie, grootschalige om- en bijscholing, gerichte arbeidsmigratie en innovatieve concepten zoals een klimaatdienstjaar. Hoewel de uitdagingen rond herstructurering van de arbeidsmarkt, het creëren van voldoende opleidingscapaciteit en het oplossen van praktische zaken zoals huisvesting immens zijn, laat de analyse zien dat er voldoende concrete aangrijpingspunten zijn voor effectief beleid. Met een voortvarende implementatie van de voorgestelde maatregelen beoordelen we deze opgave als haalbaar, mits alle betrokken partijen effectief samenwerken en er direct actie wordt ondernomen. We beoordelen deze analyse als **oranje**: met zeer grote inspanningen kan klimaatneutraliteit in 2040 wat betreft arbeidsmarkt bereikt worden.

5.5. Schaarse grondstoffen en materialen

De transitie naar netto-nul vraagt om een hoge inzet van schaarse ruwe materialen voor de productie van hernieuwbare technologieën zoals windturbines, zonnepanelen en opslagbatterijen. Voor de aanvoer van deze materialen is Nederland sterk afhankelijk van import uit andere landen, zoals China.

Hoewel we de vraag naar schaarse ruwe materialen die in dit scenario nodig zijn vrij effectief kunnen inschatten, is de totale beschikbaarheid van schaarse ruwe materialen voor Nederland moeilijk te kwantificeren. Er zijn over het algemeen voldoende minerale reserves (de beperkende factor is de lange doorlooptijd voor de ontwikkeling van mijnen), en de schattingen voor de wereldwijde vraag fluctueren aanzienlijk. We kunnen concluderen dat er waarschijnlijk tekorten aan mineralen zullen ontstaan, waarbij zeldzame aardmetalen een bijzonder hoog risico vormen. Deze tekorten kunnen echter worden opgevangen door een combinatie van substitutie en recycling (in veel gevallen kunnen technologieën worden gebouwd zonder zeldzame aardmetalen, met een iets lagere efficiëntie). Om ervoor te zorgen dat schaarse grondstoffen de energietransitie niet verhinderen of aanzienlijk vertragen, moet Nederland doorgaan met het monitoren van de beschikbaarheid van schaarse grondstoffen, investeren in verschillende technologieën (bijv. diversificatie van turbine- en batterijtypen) om overmatige afhankelijkheid van een specifiek metaal/mineraal te voorkomen, en recycling verbeteren.

Hier volgen we de definitie van de Europese Commissie van kritieke ruwe materialen als de set van 34 mineralen en metalen die als van groot economisch belang voor de Europese economie worden beschouwd. Voor de productie van hernieuwbare technologieën zijn de volgende materialen van bijzonder belang: Zeldzame aardmetalen (waaronder neodymium, praseodymium, dysprosium en terbium), Kobalt, Lithium, Nikkel, Mangaan, Boor, Koper en Silicium.

5.5.1. Vraag naar schaarse ruwe materialen in het Klimaatzaak 2040 scenario

Om de vraag naar schaarse ruwe materialen te kwantificeren, hebben we de vraag van de grootste verbruikers in het Klimaatzaak 2040 scenario geanalyseerd. Dit bevat offshore en onshore windturbines, solar PV, elektrische voertuigen en batterijen.

Offshore windturbines

Offshore windturbines hebben een hoge gemiddelde capaciteit van 10-20 MW omdat ze groter zijn en meer betrouwbare windsnelheden hebben ten opzichte van onshore windturbines¹⁰⁴. Offshore modellen gebruiken vaak permanente magneetgeneratoren (PMG's) vanwege de hogere efficiëntie en lagere onderhoudsbehoeften. PMG's maken meer gebruik van zeldzame aardmetalen.

¹⁰⁴ International Energy Agency (2022) The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report

Bij 52 GW offshore wind is de totale vraag aan kritieke ruwe materialen¹⁰⁵:

- **Zeldzame aardmetalen:** afhankelijk van het type windturbine wordt tussen 62-239 t/GW aan zeldzame aardmetalen gebruikt voor de permanente elektromagneten die ervoor zorgen dat een turbine kan draaien zonder versnellingsbak.¹⁰⁶ De totale vraag in 2040 is 11.050 ton. Dit bestaat voornamelijk uit neodymium (76%), daarnaast ook praseodymium (14%), dysprosium (7%) en terbium (3%).
- **Boor:** Boor wordt ook gebruikt in permanente magneetgeneratoren. Afhankelijk van het type turbine wordt 1-6 ton/GW gebruikt. In 2040 is de totale vraag 270 ton.
- **Koper:** Koperen wikkelingen worden voornamelijk gebruikt voor de generator, waar ze helpen de mechanische energie (van de draaiende turbinebladen) om te zetten in elektrische energie. Tussen de 950 en 3.000 ton/GW wordt gebruikt, afhankelijk van het type turbine.¹⁰⁶ In 2040 wordt 140.000 ton koper gevraagd.
- **Nikkel en Mangaan:** Nikkel en mangaan worden veel gebruikt om de sterkte, hardheid en corrosiebestendigheid van staal te verbeteren in structurele onderdelen zoals de toren en rotorbladen. Afhankelijk van het type turbine worden tussen de 790 en 800 ton/GW mangaan en 240-440 ton/GW nikkel gebruikt.¹⁰⁶ In 2040 is de totale vraag 41.000 ton mangaan en 14.000 ton nikkel.

Onshore windturbines

Onshore windturbines hebben een gemiddelde capaciteit van 2-5 GW. Onshore windturbines zijn voornamelijk systemen met een doubly-fed induction generator (DFIG), omdat deze systemen de gridstabiliteit kunnen reguleren door te controleren hoeveel elektriciteit naar het net wordt gestuurd. Het systeem kan zich ook aanpassen aan veranderende windsnelheden, wat ze efficiënter maakt.¹⁰⁷ DFIG systemen gebruiken minder zeldzame aardmetalen dan PMG systemen.

Bij 20 GW onshore wind is de totale vraag aan kritieke ruwe materialen¹⁰⁸:

- **Zeldzame aardmetalen:** afhankelijk van het type windturbine wordt tussen 14-239 t/GW aan zeldzame aardmetalen gebruikt.¹⁰⁶ De totale vraag in 2040 is 1.060 ton. Dit bestaat voornamelijk uit neodymium (77%), daarnaast ook praseodymium (12%), dysprosium (9%) en terbium (2%)
- **Boor:** Afhankelijk van het type turbine wordt 0-6 ton/GW gebruikt.¹⁰⁶ In 2040 is de totale vraag 270 ton.
- **Koper:** Tussen de 950 en 5.000 ton/GW wordt gebruikt, afhankelijk van het type turbine.¹⁰⁶ In 2040 wordt 39.000 ton koper gevraagd.
- **Nikkel en Mangaan:** Afhankelijk van het type turbine worden tussen de 780 en 800 ton/GW mangaan en 240-440 ton/GW nikkel gebruikt.¹⁰⁶ In 2040 is de totale vraag 15.600 ton mangaan en 7.900 ton nikkel.

¹⁰⁵ Op basis van ingeschatte turbine shares voor offshore wind in 2040 van de IEA base case.

¹⁰⁶ Carrara et al. (2020) Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. European Commission, Joint Research Centre

¹⁰⁷ Pertl (2021) Pitch-controlled variable-speed doubly-fed induction generator (DFIG) wind turbine middel in DlgSILENT PowerFactory.

¹⁰⁸ Op basis van ingeschatte turbine shares voor onshore wind in 2040 van de IEA base case.

Solar PV

Er zijn twee typen zonnepanelen: kristallijne silicium (c-Si) en thin-film technologieën. C-Si panelen domineren de wereldwijde markt omdat ze efficiënter zijn dan thin-film modellen (15-21% in vergelijking tot 12-15%).¹⁰⁶ Thin-film technologieën maken meer gebruik van kritische ruwe materialen.

Bij 126 GW aan zon-PV (58 GW zon op land en water en 114,6 GW op gebouwen en woningen), is de totale vraag aan kritieke ruwe materialen:

- **Koper:** Koper is een algemeen materiaal dat wordt gebruikt in de structurele en elektrische componenten van PV-energiecentrales en komt voor in alle technologieën (bijvoorbeeld bedrading, aarding, omvormers, transformatoren). Hiervoor zal in 2040 4,3 t/MW nodig zijn.¹⁰⁶ Daarnaast wordt koper ook in kleine hoeveelheden gebruikt in een type van thin-film technologieën, zoals CGIS (14 t/GW). De totale vraag voor 2040 is dus 750.000 ton.
- **Silicium:** Silicium is het primaire materiaal dat wordt gebruikt in PV-cellen die zonlicht naar elektriciteit converteren in c-Si panelen. De vraag naar silicium voor c-Si panelen is 2,6 t/MW.¹⁰⁶ Er is ook een kleine vraag van a-Si panelen van 98 t/GW. De totale vraag voor silicium in 2040 is 420.000 ton.
- **Gallium en Germanium:** Gallium en Germanium worden als alternatief voor silicium gebruikt in thin-film panelen. In CGIS-panelen wordt 2,3 t/GW Gallium gevraagd en in a-Si panelen wordt 25 t/GW germanium gevraagd.¹⁰⁶ De totale vraag voor gallium in 2040 is 15 ton, en de totale vraag voor germanium is 34 ton.

Elektrische voertuigen en batterijen

Schaarse ruwe materialen bevinden zich in twee belangrijke componenten van elektrische auto's: de motor en de batterij.

Motoren

De meest gebruikte motoren in EV's zijn permanent-magneet-synchroonmotoren. Deze motoren gebruiken de volgende schaarse ruwe materialen¹⁰⁹:

- **Zeldzame aardmetalen:** Neodymium (0,25-0,5 kg per voertuig), andere REE's (0,06-0,35 kg per voertuig)
- **Boor:** 0,01-0,03 kg per voertuig
- **Koper:** 3-6 kg per voertuig

Batterijen

Er zijn een aantal typen batterijen, met verschillende chemische samenstellingen. De twee primaire typen voor gebruik in elektrische voertuigen en energieopslag zijn lithium-nikkel-mangaan-kobalt-oxide (NMC) en lithium-ijzerfosfaat (LFP).¹¹⁰ NMC-batterijen hebben een hoge energiedichtheid (meer energie kan worden opgeslagen in een kleinere,

¹⁰⁹ International Energy Agency (2022)

¹¹⁰ International Energy Agency (2022)

lichtere verpakking) en een lange levensduur. LFP-batterijen hebben lage kosten en een hoge slijtvastheid, maar relatief lage energiedichtheid. Onderstaande tabel laat de verschillende verhoudingen van schaarse ruwe materialen voor de twee typen batterijen zien.

Voor flowbatterijen veronderstelt het ETM de toepassing van waterstof-broom batterijen, waardoor deze vorm van energieopslag niet bijdraagt aan de vraag naar schaarse materialen.¹¹¹

Tabel 37. Schaarse ruwe materialen verbruik in verschillende typen batterijen (kg/kWh)

Schaarse ruwe materialen	NMC 622-batterij	LFP-batterij
Koper	0,71 kg/kWh	
Nikkel	0,53 kg/kWh	
Mangaan	24,5 kg/ kWh	
Kobalt	0,18 kg/ kWh	
Lithium	0,12 kg/ kWh	0,12 kg/ kWh

NMC-batterijen worden veel ingezet voor lichte voertuigen. Er zijn verschillende typen van NCM-batterijen met verschillende verhoudingen van nikkel, mangaan en kobalt. Vanwege prijsstijgingen en zorgen over de ethische mijnbouw van kobalt, proberen fabrikanten over te schakelen op nikkelrijke varianten.¹¹²

Zware voertuigen, zoals trekkers en vrachtauto's, gebruiken vooral LFP-batterijen waarbij het volume en gewicht van de batterijen minder uitmaken.¹¹³ LFP-batterijen worden ook verwacht de algehele batterijopslagmarkt te domineren, met NMC-batterijen deels ingezet voor thuisenergieopslag.¹¹⁴

Volgens het Klimaatzaak 2040 -scenario zouden er in 2040:

- 11,6 miljoen lichte elektrische voertuigen nodig zijn (10.5 miljoen personenauto's, 1,1 miljoen bestelauto's).
- 150.000 zware elektrische voertuigen nodig zijn (87.000 trekkers en 63.000 vrachtauto's).
- Batterijen in elektrische vervoer met totale opslagcapaciteit van 170 GWh.
- Grootschalige batterijen met totale opslagcapaciteit van 40 GWh.
- Huishoudelijke batterijen met totale opslagcapaciteit van ongeveer 32 GWh.

De totale vraag naar materialen van elektrische vervoer en energieopslag is¹¹⁵:

- **Koper:** 200.000 ton
- **Nikkel:** 130.000 ton
- **Mangaan:** 80.000 ton

¹¹¹ [The Elestor Solution - Elestor](#)

¹¹² International Energy Agency (2022)

¹¹³ International Energy Agency (2022)

¹¹⁴ International Energy Agency (2022)

¹¹⁵ Berkend op basis van 75 kWh batterij voor lichte voertuigen en 540 kWh voor zware voertuigen.

- **Cobalt:** 43.000 ton
- **Lithium:** 29.000 ton
- **Zeldzame aardmetalen:** 3.000 ton neodymium, 750 ton andere REE's
- **Boor:** 120 ton

Elektrolyzers

Alkaline elektrolyzers gebruiken 1 ton/MW nikkel als katalysator in elektrolyse¹¹⁶. In het Klimaatzaak 2040 scenario zijn er 10 GW aan elektrolyzers die stroom van de offshore windmolens kunnen omzetten in groene waterstof. Voor het opstellen van 10 GW elektrolyzers is 10.000 ton nikkel nodig.

5.5.2. Aanbod van schaarse ruwe materialen

De beschikbaarheid van schaarse grondstoffen voor de Nederlandse energietransitie is een complex vraagstuk. Het probleem ligt niet zozeer bij een gebrek aan fysieke reserves, maar bij de lange tijd die nodig is om nieuwe mijnbouwprojecten te realiseren. Gemiddeld duurt het wereldwijd 16,5 jaar vanaf de ontdekking van een vindplaats tot aan daadwerkelijke productie. Deze situatie wordt verder gecompliceerd door toenemende maatschappelijke weerstand tegen nieuwe mijnbouwactiviteiten en groeiende aandacht voor milieu-, sociale en bestuurlijke (ESG) aspecten. De traditionele aanname dat voldoende marktvaart automatisch leidt tot nieuwe investeringen in mijnbouw, blijkt niet meer houdbaar. Dit kan resulteren in langdurige periodes van materiaal tekorten en sterke prijsschommelingen. De mondiale vraag naar deze materialen is bovendien moeilijk te voorspellen omdat landen wereldwijd gelijktijdig hun energiesystemen verduurzamen. Hoe sneller deze wereldwijde energietransitie verloopt, des te groter wordt de druk op de beschikbaarheid van schaarse grondstoffen.

Het Nederlandse aandeel in het wereldwijde verbruik van schaarse metalen is relatief bescheiden. Volgens onderzoek van Metabolic (2018) zou Nederland naar verwachting slechts 0,6 tot 1 procent van de mondiale productie van deze metalen nodig hebben¹¹⁷. Deze schatting is gebaseerd op twee indicatoren respectievelijk: het Nederlandse aandeel in het wereldwijde finale energieverbruik en het percentage dat Nederland bijdraagt aan het mondiale BBP. Op basis van een grove berekening zien we de grootste tekorten waarschijnlijk bij neodymium, zie Tabel 37. Dit metaal is een essentieel onderdeel van de permanente magneten die worden gebruikt in windturbines en vormt daarmee een kritische grondstof voor de Nederlandse energietransitie.

¹¹⁶ International Energy Agency (2022)

¹¹⁷ Metabolic, 2018, Metal Demands of the Dutch Energy Transition

Tabel 38. Een vergelijking van de vraag naar schaarse materialen en het wereldwijde aanbod. *Huidige aanbod gebruikt omdat er geen schattingen voor 2040 zijn. Geen nieuwe mijnen verwacht.

Schaarse ruwe mineraal	Wereldwijde aanbod in 2040 ¹¹⁸	Vraag in de Klimaatzaak 2040 scenario	Percentage van mondiaal aanbod
Koper	20.000.000 ton/j	1.125.000 ton (75.000 ton/j)	0,4%
Nikkel	4.400.000 ton/j	160.000 ton (11.000/j)	0,2%
Mangaan	13.500.000 ton/j*	140.000 ton (9.000 ton/j)	0,1%
Kobalt	260.000 ton/j	43.000 ton (2.900 ton/j)	1,1%
Lithium	450.000 ton/j	29.000 ton (1.900 ton/j)	0,4%
Neodymium	26.800 ton/j*	12.000 ton (810 ton/j)	3,0%
Overige zeldzame aardmetalen	7.800 ton/j*	3.700 ton (250 ton/j)	3,2%
Boor	1.100.000 ton/j*	420 ton (28 ton/j)	0,0%

De productie en verwerking van zeldzame aardmetalen wordt gedomineerd door China, dat 90% van het marktaandeel heeft in de waardeketen. Deze afhankelijkheid van grondstoffen is een extra risico voor Nederland, omdat het onze energietransitie kwetsbaar maakt voor protectionistische beleidsbeslissingen of exportbeperkingen, zoals China in het verleden heeft genomen. Het is dus belangrijk dat Nederland hun vraag voor zeldzame aardmetalen kan verminderen.

5.5.3. Oplossingspaden

Substitutie

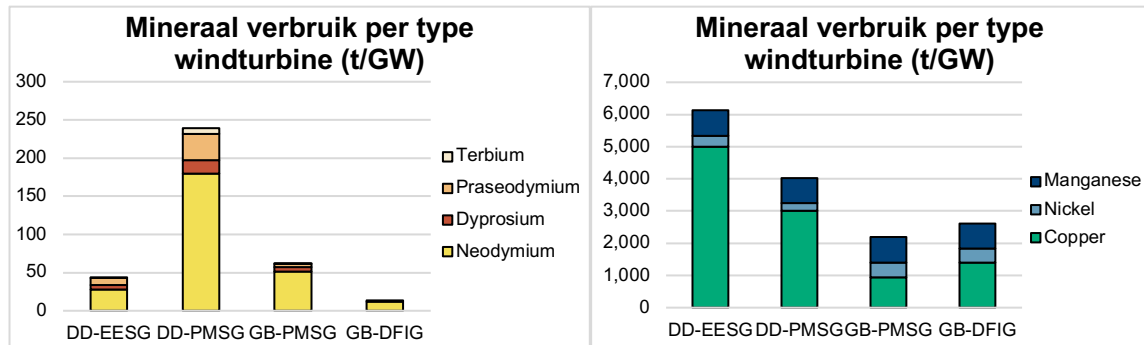
In veel van de hierboven genoemde technologieën kunnen alternatieven met minder kritieke grondstoffen (zeldzame aardmetalen) worden gebruikt, of in sommige gevallen helemaal zonder deze grondstoffen worden gemaakt. Een goed voorbeeld hiervan is de vermindering van het gebruik van permanente magneten in windturbines, zoals besproken in de onderstaande case study.

Case Study: Verminderen van het Gebruik van Permanente Magnetten in Windturbines

Permanente magneet synchroon generators (PMSG's) zijn momenteel de voorkeurskeuze voor windturbines, omdat ze een kleinere algehele omvang, lager gewicht en hogere efficiëntie hebben. Naarmate de turbines groter en hoger worden, worden deze voordelen nog duidelijker. In 2040 wordt voorspeld dat PMSG's ongeveer 95% van de offshore markt en 40% van de onshore markt zullen vertegenwoordigen.

¹¹⁸ International Energy Agency (2024) Global Critical Minerals Outlook 2024; Solutions for Critical Raw Materials – A European Expert Network (SCRREEN), 2020, Factsheets - Boron; SCRREEN, 2020, Fact sheets – Rare Earth Elements; SCRREEN, 2020, Fact sheets – Manganese.

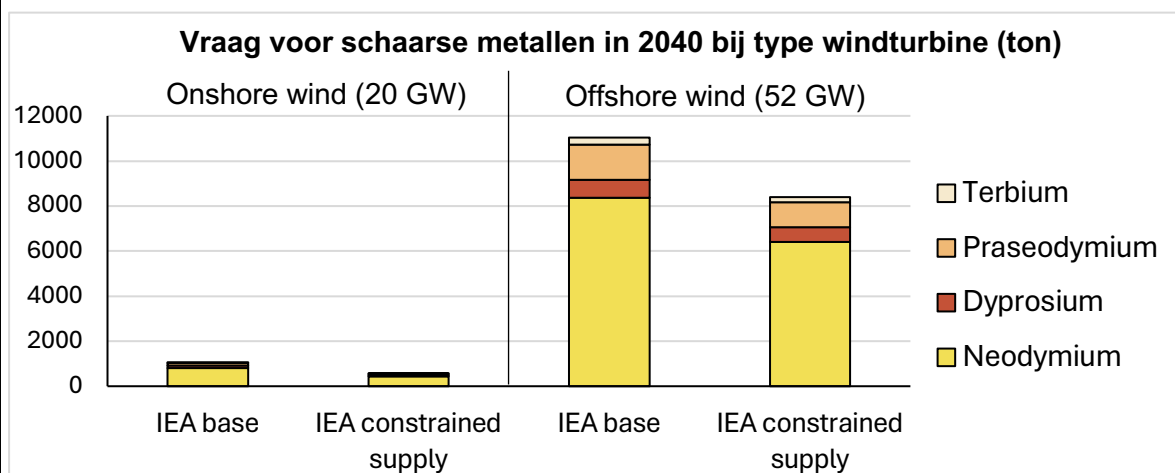
PMSG's bevatten echter ook een aanzienlijk aantal zeldzame aardmetalen en kritieke zeldzame mineralen. Figuur 45 toont het verschil in mineraalverbruik per type windturbine in t/GW.



Figuur 45. Zeldzame aardmetalen en schaarse ruwe materialen vraag per type turbine (t/GW)

Als de aanvoer van zeldzame aardmetalen beperkt is (bijvoorbeeld door stijgende prijzen of geopolitieke gebeurtenissen), kunnen fabrikanten overschakelen naar niet-magneettechnologieën of hybride configuraties met een versnellingsbak en kleinere magneten (GB-PMSG). Onshore-projecten kunnen overstappen op elektrisch opgewekte synchroon generators (DD-EESG), die externe stroom (bijvoorbeeld een batterij) gebruiken om de stroom te leveren die nodig is om een magnetisch veld te creëren.

De IEA heeft de marktaandeelen van turbines in een scenario met beperkte zeldzame aardmetalen gemodelleerd. Door dit toe te passen op de totale vraag naar onshore en offshore wind in het Klimaatzaak 2040 -scenario, kunnen we zien dat dit de vraag naar zeldzame aardmetalen van offshore windturbines kan verminderen met 2.650 ton (van 11.050 ton naar 8.400 ton), en de vraag van onshore windturbines met ongeveer 50% kan verminderen van 1.060 ton naar 550 ton (zie Figuur 46). Dit heeft echter als nadelig effect dat de vraag naar koper voor onshore windturbines toeneemt, aangezien GB-DFIG-systemen meer koper vereisen.



Figuur 46. Totale vraag voor zeldzame aardmetalen in 2040 bij IEA scenario (ton)

Zoals blijkt uit deze case study, kan substitutie leiden tot suboptimale prestaties en/of de vraag verschuiven naar andere kritieke grondstoffen. Het zal ook een uitdaging zijn om de

concurrerende vraag naar schaarse ruwe materialen in balans te brengen, maar het is uiteindelijk mogelijk.

Andere technologieën waarin substitutie een optie is:

- **Elektrische voertuigmotoren:** Asynchrone inductiemotoren zijn een alternatief voor permanente-magnetenmotoren. Deze motoren zijn iets minder efficiënt, maar hebben het voordeel van lagere kosten omdat ze geen zeldzame aardmetalen vereisen. Ze hebben echter wel een hogere vraag naar koper (11-24 kg/voertuig in vergelijking met 3-6 kg/voertuig).
- **Batterijen:** De chemische samenstelling van NCM-batterijen is variabel, met verschillende verhoudingen van nikkel, kobalt en mangaan. Afhankelijk van de tekorten die je wilt voorkomen, kun je verschillende verhoudingen van deze elementen hebben. Bijvoorbeeld, NCM 111 gebruikt gelijke hoeveelheden van nikkel, kobalt en mangaan; maar er kunnen ook andere verhoudingen zijn, zoals 6:2:2 of 8:1:1.¹¹⁹ Daarnaast kijken fabrikanten in China ook naar de optie om LFP-batterijen te gebruiken in lichte voertuigen. Dit kan de vraag naar koper, nikkel, mangaan en kobalt sterk reduceren.
- **Electrolysers:** Solid oxide elektrolysecellen (SOEC's) zijn een nieuw type electrolyser dat momenteel wordt getest en minder of andere behoeften aan mineralen heeft. SOEC's gebruiken per MW slechts 150-200 kg nikkel, 40 kg lanthaan en 20 kg yttrium.

Recycling

Recycling en modulair ontwerp zijn een tweede goede optie om de afhankelijkheid van primaire grondstoffen te reduceren.

Als technologieën ontworpen zijn met een lange levensduur, kan dit de lange-termijn jaarlijkse materiaalvraag verminderen. Modulair ontwerp (gemakkelijke scheiding van componenten) vergemakkelijkt eenvoudige reparaties en upgrades, en maakt ook hergebruik van hoge kwaliteit mogelijk.

Daarnaast zijn er ook kansen om meer te gaan recycelen in Nederland en Europa. Batterijrecycling is een goed voorbeeld hiervan. Als elektrische voertuigen een hoger aandeel van de auto's in het totaalbestand uitmaken, zal er een grote influx van batterijen op de markt komen. Volgens de WEO 2020 EV- en energieopslag-deploymenttrajecten zal het volume van batterijen die het einde van hun levensduur bereiken in 2030 100 GWh zijn, en tussen de 600 en 1.300 GWh jaarlijks in 2040.¹²⁰ Hier kan 500.000 ton nikkel, 350.000 ton koper, 100.000 ton kobalt en 60.000 ton lithium worden uitgehaald.¹²¹

¹¹⁹ Accardo et al. (2021) Life cycle assessment of an NMC battery for application to electric light-duty commercial vehicles and comparison with a sodium-nickel-chloride battery.

¹²⁰ International Energy Agency (2022)

¹²¹ International Energy Agency (2022)

5.5.4. Uitwerking in beleid

Om de beschikbaarheid van kritieke materialen voor de energietransitie te waarborgen, zou een samenhangend beleidspakket kunnen worden ontwikkeld met vier verschillende typen maatregelen: faciliterend, stimulerend, beprijzend en normerend beleid.

Mogelijke Faciliterende Maatregelen:

Een belangrijke basis zou kunnen worden gevormd door een nationaal monitoringssysteem dat de beschikbaarheid en prijsontwikkeling van kritieke grondstoffen volgt. Dit zou kunnen worden aangevuld met een platform waar industrie en kennisinstellingen kennis kunnen delen over alternatieve technologieën en materialen. Voor de leveringszekerheid zou het oprichten van een strategische grondstoffenreserve kunnen helpen, met bijzondere aandacht voor zeldzame aardmetalen. Een materialenpaspoort systeem zou kunnen zorgen voor betere tracking van deze grondstoffen door de hele keten.

Mogelijke Stimulerende Maatregelen:

De innovatie zou kunnen worden aangejaagd door gerichte R&D-subsidies voor technologieën die minder afhankelijk zijn van zeldzame aardmetalen. Ook zouden innovatiesubsidies kunnen worden verstrekt voor de ontwikkeling van recyclingtechnologieën en zouden pilotprojecten voor batterijrecycling kunnen worden ondersteund. Op internationaal niveau zouden samenwerkingsverbanden kunnen worden opgezet voor gezamenlijke inkoop van kritieke materialen.

Mogelijke Beprijzende Maatregelen:

Om circulair gebruik te stimuleren zou een heffing kunnen worden ingevoerd op producten die gebruik maken van nieuwe (virgin) kritieke materialen. Daartegenover zou een belastingvoordeel kunnen staan voor bedrijven die aantoonbaar gerecyclede materialen gebruiken.

Mogelijke Normerende Maatregelen:

Het beleidspakket zou kunnen worden gecompleteerd door regelgeving die minimale recyclingpercentages voorschrijft voor kritieke materialen in nieuwe producten. Producten die kritieke materialen bevatten zouden modulair kunnen worden ontworpen voor betere recycling. Bindende richtlijnen zouden kunnen zorgen voor optimale terugwinning van materialen aan het einde van de levensduur. Grootverbruikers zouden kunnen worden verplicht te rapporteren over hun gebruik van kritieke materialen.

Tabel 39. Voorgestelde beleidsmaatregelen in het kader van kritieke materialen

Type beleid	Beleidsmaatregel
Faciliterend	Opzetten van een nationaal monitoringssysteem voor de beschikbaarheid en prijsontwikkeling van kritieke grondstoffen
Faciliterend	Ontwikkelen van een platform voor kennisdeling tussen industrie en kennisinstellingen over alternatieve technologieën en materialen
Faciliterend	Oprichten van een strategische grondstoffenreserve voor kritieke materialen, met name zeldzame aardmetalen

Type beleid	Beleidsmaatregel
Stimulerend	Subsidiëren van R&D-projecten gericht op technologieën die minder afhankelijk zijn van zeldzame aardmetalen
Stimulerend	Verstrekken van innovatiesubsidies voor de ontwikkeling van recyclingtechnologieën
Stimulerend	Ondersteunen van pilotprojecten voor batterijrecycling faciliteiten
Beprijzend	Invoeren van een heffing op producten die gebruik maken van virgin (niet-gerecyclede) kritieke materialen
Beprijzend	Introduceren van een belastingvoordeel voor bedrijven die aantoonbaar gebruik maken van gerecyclede materialen
Normerend	Invoeren van minimale recyclingpercentages voor kritieke materialen in nieuwe producten
Normerend	Verplichten van modulair ontwerp voor producten die kritieke materialen bevatten
Normerend	Opstellen van bindende richtlijnen voor de terugwinning van materialen aan het einde van de levensduur
Stimulerend	Opzetten van internationale samenwerkingsverbanden voor de gezamenlijke inkoop van kritieke materialen
Faciliterend	Creëren van een materialenpaspoort systeem voor betere tracking van kritieke materialen
Normerend	Invoeren van verplichte rapportage over gebruik van kritieke materialen voor grote bedrijven

Deze beleidsmaatregelen zijn erop gericht om:

- De afhankelijkheid van kritieke materialen te verminderen
- Innovatie in alternatieve technologieën te stimuleren
- Recycling en circulair gebruik te bevorderen
- De leveringszekerheid te vergroten
- Transparantie in de toeleveringsketen te verbeteren

5.5.5. Oordeel over de haalbaarheid

De energietransitie richting netto-nul in 2040 vraagt om een aanzienlijke inzet van schaarse grondstoffen en materialen, met name voor de productie van windturbines, zonnepanelen, elektrische voertuigen en batterijen. Uit de analyse blijkt dat Nederland vooral afhankelijk is van de import van deze materialen, waarbij China een dominante positie heeft met 90% marktaandeel in de productie en verwerking van zeldzame aardmetalen.

De grootste uitdaging ligt bij zeldzame aardmetalen, waar Nederland volgens de berekeningen ongeveer 3% van het wereldwijde aanbod nodig heeft - een significant percentage gezien de Nederlandse economische omvang. Voor andere materialen zoals koper (0,4%), nikkel (0,2%), mangaan (0,1%), kobalt (1,1%) en lithium (0,4%) is het aandeel van de Nederlandse vraag in het mondiale aanbod beter beheersbaar. Het knelpunt zit niet zozeer in een absoluut tekort aan reserves, maar vooral in de lange doorlooptijd (gemiddeld 16,5 jaar) voor het ontwikkelen van nieuwe mijnen. Dit kan

leiden tot periodes van schaarste en prijsvolatiliteit, vooral omdat landen wereldwijd gelijktijdig de energietransitie doormaken.

Er zijn echter twee belangrijke oplossingspaden geïdentificeerd:

- **Substitutie:** Voor veel technologieën bestaan alternatieven die minder kritieke grondstoffen gebruiken. Bij windturbines kan bijvoorbeeld worden overgestapt van permanente magneet synchroon generators (PMSG's) naar alternatieven zonder zeldzame aardmetalen, al gaat dit wel ten koste van enige efficiëntie. Bij batterijen kunnen verschillende chemische samenstellingen worden gebruikt om de afhankelijkheid van specifieke materialen te verminderen.
- **Recycling:** Door in te zetten op modulair ontwerp, langere levensduur van producten en betere recyclingmogelijkheden kan de afhankelijkheid van primaire grondstoffen worden verminderd. Vooral bij batterijen biedt dit perspectief, met een verwachte significante toename van recyclebare batterijen tegen 2040.

Om de energietransitie succesvol te laten verlopen en geen vertraging te laten ontstaan door een tekort aan schaarse materialen, is het essentieel dat Nederland blijft monitoren op de beschikbaarheid van schaarse grondstoffen, investeert in diverse technologieën om overmatige afhankelijkheid van specifieke materialen te voorkomen, en actief inzet op het verbeteren van recyclingmogelijkheden. Daarnaast is het van belang om de internationale samenwerking te versterken om de leveringszekerheid van deze kritieke materialen te waarborgen. We beoordelen deze analyse als **oranje**: er komt op korte termijn actie worden ondernomen om te voorkomen dat er geen vertraging ontstaat vanwege Nederlandse tekorten aan schaarse materialen.

6. Conclusie en discussie

6.1. Inleiding

We zijn begonnen met het creëren van een Klimaatzaak 2040 scenario dat gebaseerd is op het Nationale Leiderschap scenario van de Integrale Infrastructuur- en Energiesysteemverkenning 2030 – 2050 (II3050 editie 2) van de gezamenlijke Netbeheerders, zie hoofdstuk 3. Een scenario dat voor een belangrijk deel input heeft gegeven aan het Nationaal Programma Energiesystemen (NPE) van de Rijksoverheid. Dit scenario gaat uit van maximale elektrificatie en Nederlandse productie van groene waterstof. Een scenario waarin de industrie niet vertrekt, maar in Nederland blijft en vergroent: *“liever groen hier, dan grijs elders”*. Waar mogelijk en nodig hebben we de cijfers in dit scenario vergeleken met cijfers van het Plan Bureau voor de Leefomgeving (PBL) voor 2030 (KEV2024) tot en met 2050 (TVKN).

Vervolgens hebben we alle sectoren besproken die binnen scope van deze studie vallen, zie hoofdstuk 4. Dat zijn de elektriciteit- en warmtesector, de mobiliteit, de (overige, niet ETS1) industrie, de gebouwde omgeving, de landbouw en landgebruik. Per sector hebben we vanuit verschillende lenzen gekeken naar de haalbaarheid om de transitie naar een klimaatneutraal Nederland in 2040 te voltooien, oftewel een versnelling van 10 jaar. We hebben telkens de vraag gesteld of het haalbaar is vanuit het gezichtspunt van beleid, economie, sociaal-maatschappelijk en cultureel, milieu, technologie, infrastructuur en ruimte? En zo nee, wat volgens ons de verwachte (tijdelijke) restemissies zijn?

In de analyse per sector kwamen een aantal thema's terug die sectoroverstijgend zijn en de vraag oproepen “kan het (overkoepelend) wel?”. Het gaat dan om de stijging van nationale kosten en investeringen, de beschikbaarheid van de noodzakelijke infrastructuur, de beschikbaarheid van arbeid en de beschikbaarheid van schaarse grondstoffen en materialen. Zie voor de analyse naar deze vier thema's hoofdstuk 5.

6.2. Netto klimaatneutraal in 2040

Voordat we de belangrijkste conclusies herhalen, is het belangrijk om nog een keer in te gaan op het verschil tussen positieve broeikasgasemissies c.q. restemissies, negatieve broeikasgasemissies en netto klimaatneutraliteit, binnen de scope van dit onderzoek.

Het blijkt dat er in 2040, ondanks dat het haalbaar is om broeikasgasemissies zeer ver terug te dringen richting 0, toch nog restemissies zijn. In sommige sectoren zijn deze onvermijdelijk als gevolg van de natuurlijke emissies van landgebruik en zijn deze onderdeel van een Nederland nadat de transitie naar klimaatneutraliteit is voltooid. In andere sectoren zijn deze restemissies in 2040 het gevolg van de verwachting dat zelfs met stringent beleid het niet zal lukken om de transitie naar het eindbeeld al te voltooien, bijvoorbeeld vanwege een tekort aan arbeid. In dit geval gaat het om tijdelijke restemissies, die gecompenseerd moeten worden door negatieve emissies.

Dat er nog restemissies zijn in enkele sectoren waardoor we in Nederland in 2040 niet op 0 zullen uitkomen is geen verrassing. In andere studies naar klimaatneutraliteit, zoals de Trajectverkenning van PBL en het NPE, zijn er ook in het eindbeeld nog restemissies die

met negatieve emissies worden gecompenseerd. Daarom zijn we in hoofdstuk 4.8 ingegaan op de opties en op het potentieel om negatieve broeikasgasemissies te realiseren in Nederland.

De optelsom van positieve of restemissies en negatieve broeikasgasemissies dient op 0 in 2040 uit te komen om te kunnen spreken van een klimaatneutraal Nederland in 2040.

6.3. Resultaten analyse

In hoofdstuk 4 hebben we per sector geanalyseerd in welke mate het naar voren halen van klimaatneutraliteit haalbaar is en welke tijdelijke of permanente restemissies er in 2040 onvermijdelijk zijn.

Per sector hebben we een inschatting gemaakt welke restemissies tijdelijk of permanent zullen resterende in 2040, gegeven een maximale inspanning om de transitie naar klimaatneutraliteit te versnellen. Daarnaast hebben we een beoordeling gemaakt van de haalbaarheid van het bereiken van klimaatneutraliteit met de volgende weging:

- **Groen:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt haalbaar en geïdentificeerde uitdagingen zijn te overkomen.
- **Oranje:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt moeilijk haalbaar en er bestaan significante onzekerheden, doordat er zeer grote veranderingen dienen plaats te vinden op het gebied van technologie, innovatie, financiering en/of aantal arbeidskrachten om de versnelling te realiseren.
- **Rood:** Bereiken van het eindbeeld in 2040 lijkt niet haalbaar. Bereiken van het eindbeeld in 2045 is mogelijk haalbaar. Dit betekent overigens wel dat er met zeer stringente maatregelen en grote veranderingen een aanzienlijke versnelling van emissiereductie kan worden gerealiseerd. Tot het halen van het eindbeeld blijven tijdelijk extra restemissies ten opzichte van dat eindbeeld, die gecompenseerd moeten worden.

De restemissies per sector zijn weergegeven in Tabel 40 en Tabel 41 toont onze inschatting van de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040 per lens.

De sector **Elektriciteit en Warmte** (hoofdstuk 4.2) is vanwege het ETS1 ook zonder aanvullend beleid zeer sterk verduurzaamd in 2040. Er zijn waarschijnlijk tijdelijke restemissies, waarbij de exacte uitstoot sterk afhankelijk is van weersomstandigheden (gascentrales draaien om tijdens een dunkelfalute een brown- of black-out te voorkomen), de ontwikkeling van de elektriciteitsvraag en de beschikbaarheid van waterstof(opslag). Voor een volledige verduurzaming zijn er drie belangrijke knelpunten: de infrastructurele uitdagingen rond het elektriciteits-, warmte- en waterstofnetwerk, de milieukundige impact vanwege de benodigde kritieke materialen voor onder meer batterijen en windmolens, en de technologische beperkingen vooral rond waterstofopslag en de opschaling van het aantal GW wind op zee, elektrolyse en regelbaar vermogen. We schatten de restemissies op 0,4 Mton (0 – 0,8 Mton) en de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040 op oranje.

De sector **Mobiliteit** (hoofdstuk 4.3) kent in 2040 nog tijdelijke restemissies tussen de 0 en 4,2 Mton CO₂, waarbij de exacte uitstoot sterk afhankelijk is van de beschikbaarheid van elektrische voertuigen voor zwaar transport, de ontwikkeling van laadinfrastructuur en de transitie in de binnenvaart. Voor een volledige verduurzaming zijn er twee belangrijke knelpunten, die in de analyse als 'oranje' zijn beoordeeld: de infrastructurele uitdagingen rond de beschikbaarheid van netcapaciteit voor laadinfrastructuur en de technologische beperkingen vooral rond binnenvaart en zware mobiele werktuigen. We schatten de restemissies op 2,9 Mton (0 - 4,2 Mton) en de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040 op groen.

De sector **Industrie** (hoofdstuk 4.4) valt uiteen in twee delen: de ETS1-industrie, waar vanwege Europese regelgeving zekerheid is over netto nul emissies in 2040, en de ETS2-industrie. Volledige emissiereductie is bereikbaar binnen de bandbreedte, maar het is waarschijnlijker dat een kleine groep bedrijven nog niet volledig verduurzaamd is in 2040. Voor een volledige verduurzaming van de ETS2-industrie zijn er twee belangrijke knelpunten: de infrastructurele uitdagingen rond het elektriciteitsnetwerk en de economische haalbaarheid vanwege vervroegde afschrijvingen en beperkte beschikbaarheid van kapitaal bij bedrijven. We schatten de restemissies van de ETS2-industrie op 0,3 Mton (0 - 0,7 Mton) en de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040 op groen.

De sector **Gebouwde Omgeving** (hoofdstuk 4.5) kent in 2040 nog restemissies, waarbij de exacte uitstoot sterk afhankelijk is van de beschikbaarheid van groen gas, de snelheid waarmee woningen en gebouwen kunnen worden verduurzaamd (arbeid), en de ontwikkeling van warmtenetten en infrastructuur. Voor een volledige verduurzaming zijn er vier belangrijke knelpunten: de beleidsmatige uitdagingen rond normering en stimulering (denk hierbij aan wettelijke ruimte om verduurzaming achter de voordeur te verplichten), de economische haalbaarheid voor met name kwetsbare groepen, de sociaal-maatschappelijke acceptatie en bereidheid tot verduurzaming, en de infrastructurele beperkingen rond elektriciteits- en warmtenetten. Overkoepelend speelt mee dat er veel arbeid nodig is, opschaling verder dan een vijfvoud van huidige aantal woningen dat jaarlijks van het gas af gaat (50.000 in 2023) lijkt niet reëel. Terwijl voor utiliteitsgebouwen klimaatneutraliteit in 2045 haalbaar lijkt, zal dit voor woningen ook in 2045 nog een grote uitdaging zijn, waarbij de restemissies door negatieve emissies gecompenseerd zullen moeten worden – ook vanwege het vervallen van ETS2 rechten. We schatten de restemissies van de gebouwde omgeving op 6,2 Mton (5,6 - 8,5 Mton) en de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040 op rood voor woningen en oranje voor gebouwen. Dit betekent dat we, zelfs met maximale inspanningen, geen mogelijkheid zien om de transitie voor woningen in 2040 afgerond te hebben. Er is vrij zeker een versnelling van emissiereductie mogelijk t.o.v. de inschatting van het PBL voor 2040.

De sector **Landbouw** (hoofdstuk 4.6) kent in 2040 nog (blijvende) restemissies, waarbij de exacte uitstoot sterk afhankelijk is van de mate waarin de veestapel krimpt, de verduurzaming van de glastuinbouw, en de ontwikkeling van alternatieve bemestingsmethoden. Voor een volledige verduurzaming zijn er drie belangrijke knelpunten: de politieke bereidheid voor een kleinere veestapel, de economische

haalbaarheid van nieuwe verdienmodellen in de veehouderij en akkerbouw, en de infrastructurele uitdagingen voor de glastuinbouw rond warmte- en CO₂-netwerken. We schatten de restemissies op 7,6 Mton CO₂-equivalent (7,6 - 11,0 Mton) en de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040 op groen.

De sector **Landgebruik** (hoofdstuk 4.7) kent in 2040 nog (blijvende) restemissies, waarbij de exacte uitstoot sterk afhankelijk is van de vernatting van veenweidegebieden, de aanplant van extra bomen, en de mate van koolstofvastlegging in landbouwbodems. Voor een volledige verduurzaming is het belangrijkste knelpunt: de economische uitdagingen rond de afwaardering van veengronden en het vinden van nieuwe verdienmodellen voor boeren in het veenweidegebied. We schatten de restemissies op 1,1 Mton CO₂-equivalent (0,75 - 1,25 Mton) en beoordelen de haalbaarheid van het bereiken van het eindbeeld in 2040 op groen.

Voor Nederland als geheel geeft dit een verwachte hoeveelheid **restemissies in 2040** van 18,5 Mton (14 – 26 Mton). Hiervan is 8,7 Mton blijvend aanwezig in het eindbeeld en 9,8 Mton is tijdelijk, in de periode tussen 2040-2050 worden deze tot 0 teruggebracht. Ondanks dat het eindbeeld nog niet volledig bereikt is in 2040, kan klimaatneutraliteit wel bereikt worden, indien er voldoende negatieve emissies worden gerealiseerd.

In 2040 moet 18,5 Mton (14 – 26 Mton) aan emissies gecompenseerd worden door inzet van negatieve emissies om klimaatneutraliteit te bereiken. De exacte hoeveelheid is afhankelijk van de omvang aan restemissies uit de zes behandelde sectoren¹²². Er zijn verschillende technieken met de potentie om in Nederland CO₂ uit de atmosfeer te verwijderen, zoals mineralisatie met olivijn (3 Mton), afvang bij afvalverbranding (2 Mton), houtbouw (2 Mton) en BECCS bij biobrandstoffenproductie (4,8 Mton). Tenslotte kan geïnvesteerd worden in Direct Air Capture (DACCS) voor de resterende 6,7 Mton, eventueel op- of afgeschaald indien de emissiereductie aan de boven- of onderkant van de bandbreedte uitvalt. Maar we schetsen ook andere mogelijke routes om deze laatste restemissies te reduceren of compenseren (onder andere het opschalen van biobrandstofproductie voor extra negatieve emissies of juist het doorvoeren van kostbare emissiereducties, zoals CO₂ -afvang van gascentrales met weinig draaiuren, etc.). Voor een effectieve implementatie van deze bronnen van negatieve emissies zijn er drie belangrijke knelpunten: de economische haalbaarheid van met name DACCS vanwege de hoge kosten (tot 500 euro per ton CO₂), de technologische ontwikkeling van DAC-technologie en veilige CO₂-opslag, en de milieukundige aspecten rond de beschikbaarheid van duurzame biomassa voor BECCS en houtbouw (in totaal is er volgens onze analyse ruim 216 PJ biomassa nodig als grondstof en materiaal in de sectoren die geanalyseerd zijn, zie ook hoofdstuk 4.8). De benodigde infrastructuur voor CO₂-transport en -opslag lijkt beschikbaar te kunnen komen via projecten als Porthos en Aramis, en er is voldoende opslagcapaciteit in lege gasvelden onder de Noordzee. We beoordelen de haalbaarheid van het bereiken het benodigde volume negatieve emissies op groen.

¹²² Uitstoot als gevolg van uitstoot door internationale lucht- en scheepvaart vallen buiten de Klimaatwet en/of internationale afspraken volgend uit Parijs c.q. Europese afspraken.

Tabel 40. Een overzicht van historische emissies per sector, de verwachte emissies in 2030 volgens de KEV, de verwachte emissies in een klimaatneutraal 2050 volgens twee andere studies (II3050v2 scenario Nationaal Leiderschap en de Trajectverkenning van PBL) en in een klimaatneutraal 2040 volgens dit rapport.

Sector	Sub-sector	1990	2023	2030	2050 (klimaatneutraal in eerdere studies)		2040 (klimaatneutraal in deze studie)	
					PBL KEV 2024	II3050-NAT ¹²³	PBL TVKN	Resultaat analyse
Elektriciteit en warmte	Opwek, infrastructuur en flex	39,6	23,5	12,9	0	0,8	0,4 (0 – 0,8)	<i>Tijdelijk</i>
Mobiliteit	Personen	17,9	15,3	10,5	0	1,3	2,9 (0 – 4,2)	<i>Tijdelijk</i>
	Goederen	10,5	11,9	8,1				
	Mobiele werktuigen + binnenvaart en spoor	5,1	3,4	2,5				
Industrie	ETS2	86,8	10,5	2,0	0	0,0	0,3 (0 – 0,7)	<i>Tijdelijk</i>
	ETS1		36,1	36,5				
Gebouwde omgeving	Woningen	21,0	12,6	11,8	0	4,6	6,2 (5,6 – 8,5)	<i>Tijdelijk Mogelijk nog na 2045, 2050 neutraal</i>
	Utiliteitsbouw	9,1	5,2	3,8				
Landbouw	Energetische emissies en methaanslip (GTB)	7,5	6,6	5,4	1,5	14,2	7,6 (7,6 – 11,0)	<i>Blijvend</i>
	Niet energetische emissies	25,3	17,8	16,5	7,5			
Landgebruik	LULUCF	5,4	3,8	4,8	⁻¹²⁴		1,1 (0,75-1,25)	<i>Blijvend</i>
Sub-totaal		n.v.t.					18,5 (14 - 26)	
Negatieve emissies		-	-	-	-	22	18,5 (14 – 26)	<i>Waarvan 7 Mton DACCS</i>
Totaal Mton CO₂-eq. (reductie ten opzichte van 1990)		228,0 0%	146,7 -31%	117 49%	9,0 -96%	-1¹²⁵ -100%	0 -100%	

¹²³ De getallen uit deze kolom zijn gebaseerd op de data onderliggend aan het ii3050 rapport en die in het team aanwezig waren vanwege betrokkenheid bij dat project. Ze sluiten niet altijd volledig aan bij de ETM scenario's.

¹²⁴ Niet bekend

¹²⁵ Exclusief bunkers

Tabel 41. Een overzicht van de inschatting van het bereiken van het eindbeeld in 2040 per sector, bekeken door 7 lenzen

Sector	Sub-sector	Lens							Som van Sector
		Beleid	Economisch	Sociaal, maatschappelijk, cultureel	Milieukundig	Technologisch	Infrastructureel	Ruimtelijk	
Elektriciteit en warmte	Opwek, infrastructuur en flex	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Yellow
Mobiliteit	Personen	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green
	Goederen	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green
	Mobiele werktuigen + binnenvaart en spoor	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Green	Green
Industrie	ETS2	Green	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green
Gebouwde omgeving	Woningen	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Red
	Utiliteitsbouw	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	Yellow
Landbouw	Energetische emissies en methaanslip (GTB)	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green	Green
	Niet energetische emissies	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Landgebruik	LULUCF	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Negatieve emissies		Green	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green
Som van lens		Green	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Green	

6.4. Conclusie haalbaarheid

Uit onze analyse blijkt dat er in 2040, na maximale inspanning om emissiereductie te versnellen, nog zo'n 18,5 Mton (bandbreedte 14 – 26 Mton, deels tijdelijk) restemissies gecompenseerd moeten worden. Tegelijkertijd blijkt dat Nederland voldoende potentie heeft om negatieve emissies te realiseren. Ongeveer 12 Mton kan worden gecompenseerd met behulp van bewezen methoden zoals mineralisatie, houtbouw, afvang van CO₂ bij AVI's en bij de productie van biobrandstoffen. Voor de resterende emissies gaat het Klimaatzaak 2040-scenario uit van ongeveer 7 Mton compensatie via Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS).

DACCS is weliswaar een bewezen technologie, maar is nog nooit op deze schaal toegepast en is bovendien kostbaar en op zichzelf energieintensief. Dit illustreert de uitdaging van het reduceren of compenseren van de allerlaatste emissies in Nederland, in dit scenario gaat het om de laatste 3% emissiereductie. Er zijn alternatieve opties, zoals het opschalen van biobrandstofproductie voor extra negatieve emissies, meer groengas produceren wat zowel leidt tot minder emissies als meer potentiële afvang voor emissies via BECCS of het doorvoeren van andere kostbare emissiereducties, zoals CO₂-afvang van gascentrales met weinig draaiuren of CAPEX en OPEX subsidie voor kernenergie. Alle alternatieven hebben nadelen, zoals hoge kosten en/of een zware afhankelijkheid van import. De keuze voor DACCS in dit scenario is dan ook exemplarisch voor het feit dat de laatste stappen richting klimaatneutraliteit in 2040 complex en kostbaar zullen zijn. Desalniettemin toont onze analyse aan dat het technisch mogelijk is om in 2040 netto-nul emissies te bereiken en dat de tijdelijke kosten van DACCS, uitgaande van verdere afname van restemissies na 2040, gedragen kunnen worden, gegeven de uitkomsten van het Klimaatzaak 2040 scenario. Bovendien volgt uit de analyse dat er zowel potentie is voor meer emissiereductie, wat de noodzaak tot negatieve emissies zou reduceren. Aan de andere kant is er ook de potentie voor het realiseren van meer negatieve emissies, indien de emissiereductie tegenvalt.

Hoewel onze analyse aantoont dat Nederland in 2040 voldoende negatieve emissies kan creëren om de restemissies te compenseren en dus netto klimaatneutraliteit technisch haalbaar is, wil dat niet zeggen dat het gemakkelijk gaat worden. Meerdere lenzen in sectoren staan op oranje en dat betekent dat er significante obstakels moeten worden overwonnen. Dat kan op drie manieren: (i) de Rijksoverheid moet additioneel stringent beleid invoeren, (ii) bedrijven en burgers moeten hun gedrag veranderen en (iii) er moeten substantiële investeringen gedaan worden. Dit vraagt om een aanzienlijke, gezamenlijke inspanning, zowel financieel, intellectueel als fysiek, van alle betrokken partijen om de emissies binnen 15 jaar naar netto 0 te brengen.

De analyse van vier sector overstijgende thema's die mogelijk als showstoppers zouden kunnen werken - (i) jaarlijkse kosten en investeringen, (ii) infrastructurele beschikbaarheid, (iii) beschikbaarheid van arbeidskrachten, en (iv) toegang tot schaarse grondstoffen en materialen - toont aan dat er significante uitdagingen zijn in enkele sectoren. Om deze belemmeringen te overkomen is het cruciaal dat de Rijksoverheid gerichte beleidskeuzes maakt en aanvullend stringent beleid ontwikkelt om deze

uitdagingen het hoofd te bieden. Zonder snel ontwikkelen van additionele maatregelen raakt het doel voor 2040 uit zicht.

De transitie vraagt om **meerinvesteringen** (CAPEX) van 24 miljard per jaar in de periode 2019-2040, mogelijk maximaal 34 miljard euro per jaar vanaf 2025, zie hoofdstuk 5.2. De meerinvesteringen bestaan uit additionele investeringen in duurzame opwek, flexibiliteit en uitbreiding van netinfrastructuur. De nationale jaarlijkse kosten (CAPEX + OPEX) stijgen echter minder hard, namelijk van 39 miljard in 2019 tot 60 miljard in 2040. Dit komt doordat tegenover de extra investeringen en afschrijving van duurzame opwek staat dat de jaarlijkse uitgaven aan fossiele brandstoffen lager liggen in 2040 dan in 2019. Bij stijgende fossiele brandstofprijzen (zoals in extremen voor 2022), zijn nationale jaarlijkse kosten van het duurzame energiesysteem zelfs vergelijkbaar met de kosten wanneer we het huidige systeem in stand zouden houden. Bovendien heeft het duurzame energiesysteem een positief effect op onze energiezekerheid, omdat het aandeel energieimport daalt van ongeveer 60 naar 35 procent en de import diversifieert naar meer landen. Dit maakt Nederland minder kwetsbaar voor energieprijsschommelingen als gevolg van geopolitieke spanningen. Wel is de verwachting dat prijsschommelingen op de korte termijn (dag en week) hoger zijn in 2040 vanwege de interconnectiviteit met andere Europese landen en grote volumes aan weersafhankelijke opwek in Europa. De toekomstige prijs is verder afhankelijk van de beschikbaarheid van flexibel regelbaar vermogen (waterstofcentrales), tijdelijke afschakeling van vraag bij afnemers en de beschikbaarheid van flex-middelen zoals batterijen en e-boilers.

Die meerinvesteringen veroorzaken ook een **meervraag naar arbeidskrachten**. Wij berekenen dat op de piek er jaarlijks 560.000 extra arbeidsplaatsen nodig zullen zijn op een beroepsbevolking van 7,1 miljoen FTE, om de transitiewerkzaamheden uit te voeren. Dat is ongeveer 8% van het huidige arbeidspotentieel in Nederland. Vanaf 2040 gaat het om 320.000 aan permanente extra arbeidsplaatsen. Er zijn tal van manieren om deze arbeidsplaatsen in te vullen en in hoofdstuk 5.4 geven we daarvan een aantal voorbeelden.

Die meerinvesteringen en arbeidskrachten zijn o.a. nodig voor het **aanleggen van nieuwe infrastructuur**. Dit betreft niet alleen de aanleg van nieuwe netwerken voor warmte, CO₂-transport en waterstof, maar vooral ook de verzwaring van de **elektriciteitsinfrastructuur en isolatie**, zoals beschreven in hoofdstuk 5.3 en 4.2. Er breekt een periode van netcongestie aan, waardoor niet alle benodigde elektriciteit tijdig kan worden vervoerd. Dit wil overigens niet zeggen dat het elektriciteitsnet altijd vol zit - de problemen doen zich vooral voor tijdens piekmomenten. Mogelijkheden om gelijktijdigheid en vermogens van zware elektrische apparaten te beperken in de gebouwde omgeving en mobiliteit zijn er, en vragen beprijzend en normerend overheidsbeleid. Hoewel flexibiliseringsmaatregelen vaak extra kosten met zich meebrengen, kunnen ze grotendeels worden gerealiseerd als de overheid de onrendabele top van flexibiliteitsmiddelen afdekt. Dit betekent dat er, ondanks het feit dat de netverzwaring het tempo van de energietransitie beperkt en dit scenario de energievraag 10 jaar naar voren haalt, toch belangrijke stappen gezet kunnen worden.

En verder zal de Rijksoverheid duidelijk moeten zijn in wat we voor basisindustrie in Nederland willen hebben. De stroomvraag van de industrie, en daarbinnen voornamelijk de basisindustrie, is ongeveer de helft van de totale elektriciteitsvraag in 2040. Een cruciale strategische keuze betreft de toekomst van de olieraffinaderijen: kiezen we voor een vervanging van de huidige aardolieverwerking en door de productie van synthetische, biogene en circulaire producten, of laten we deze productie over aan landen met gunstiger condities voor duurzame energieopwekking en laten we deze sector sterk krimpen? Het Klimaatzaak 2040 scenario gaat nu uit van een de syn-fuel productie in Nederland conform het II3050-NAT basisscenario. In dit scenario wordt een beperkt deel van de totale huidige energievraag van de lucht- en scheepsvaart die met syn-fuel te verduurzamen is in Nederland geproduceerd. Als de volledige behoefte aan brandstoffen worden geïmporteerd of de productie wordt uitgesteld tot na 2040, wordt de totale energievraag met zo'n 60 TWh kleiner (met name minder waterstofimport).

De energietransitie vraagt om een **zorgvuldige omgang met schaarse grondstoffen en materialen** die kritiek zijn voor het realiseren van deze overgang, zoals beschreven in hoofdstuk 5.5. Hoewel er over het algemeen voldoende materialen in de bodem beschikbaar zijn, zorgen drie factoren voor uitdagingen: de lange doorlooptijd om nieuwe mijnen te ontwikkelen, de snelgroeiende wereldwijde vraag naar deze materialen en de dominante positie die met name China in deze materialen heeft opgebouwd. Deze uitdagingen vragen om een stringent beleid waarbij drie zaken hand in hand gaan: het continue monitoren van beschikbaarheid en prijsvorming, werken aan substitutie van schaarse materialen en maximale inzet op recycling van deze materialen, door zowel verbeterde inzameling als modulair ontwerp van apparaten voor betere herwinning.

Indien Nederland voorop loopt in de transitie naar netto 0 broeikasgasemissies ontstaat een strategisch voordeel. Door eerder dan andere landen de recycling route in te zetten en de substitutie route te verkennen, kunnen we op de lange termijn onze afhankelijkheid van andere landen verkleinen. Dit is vooral relevant omdat schaarse materialen kunnen worden hergebruikt, in tegenstelling tot fossiele brandstoffen die na verbranding verloren gaan (m.u.v. CCU of DAC). Hierdoor kunnen we voorkomen dat we onze huidige geopolitieke afhankelijkheid van fossiele brandstoffen simpelweg vervangen door een nieuwe afhankelijkheid van schaarse materialen.

Kortom de analyses laten zien dat het een formidabele opgave wordt om netto klimaatneutraal te worden in Nederland in 2040. Echter, wanneer we het volledige potentieel voor negatieve emissies meenemen, zijn er geen onoverkomelijke belemmeringen gevonden - niet vanuit individuele sectoren, niet vanuit specifieke beoordelingslenzen, en niet vanuit sectoroverstijgende thema's. De conclusie is daarom dat een aanzienlijke reductie van ten minste 95% t.ov. 1990 zeker haalbaar is, en dat bij maximale inspanning van alle partijen in combinatie met maximale realisatie van negatieve emissies, netto klimaatneutraliteit zeer uitdagend, maar mogelijk is.

Het begint bij duidelijk, tijdig aangekondigd stringent beprijzend en normerend overheidsbeleid. Duidelijk in de zin dat burgers en bedrijven de noodzaak begrijpen en weten wat ze moeten doen. Beprijzend in de zin dat fossiel naarmate de tijd verstrijkt duurder wordt dan een duurzaam alternatief o.a. als gevolg van ETS1 en ETS2, maar waar

nodig om het doel te halen aangevuld met nationale heffingen. Normerend om zeker te stellen dat bepaalde ontwikkelingen tijdig in gang worden gezet. Verder is er stimulerend overheidsbeleid nodig, voor burgers die de verandering niet kunnen betalen en voor bedrijven die anders de concurrentie met andere bedrijven buiten Nederland niet kunnen volhouden op het moment dat we sneller omschakelen.

6.5. Discussie

In de bovenstaande analyse zijn we uitgegaan van een scenario waarin de Nederlandse economie en onze huidige levensstijl grotendeels intact blijven. Er is echter ook een alternatief pad denkbaar waarbij we als samenleving kiezen voor een meer sobere levensstijl met minder consumptie, minder (vlieg)reizen en een meer plantaardig dieet. Een dergelijke maatschappelijke transitie zou de weg naar klimaatneutraliteit aanzienlijk vergemakkelijken. De benodigde investeringen zouden lager uitvallen, de druk op de arbeidsmarkt zou afnemen en de vraag naar grondstoffen en energie zou substantieel dalen. Dit zou betekenen dat de technische en financiële uitdagingen die we hierboven hebben beschreven minder groot zouden zijn. Hoewel een dergelijke maatschappelijke omslag zijn eigen uitdagingen kent, zou het de haalbaarheid van klimaatneutraliteit in 2040 vergroten.

Echter, uitgaande van het in dit rapport geschetste scenario met behoud van onze huidige economie en levensstijl, is het evident dat een dergelijke grote verandering in 15 jaar tijd maar op één manier kan worden bereikt en dat is via zeer stringent beprijzend en normerend overheidsbeleid, dat bovendien zo snel mogelijk van de grond moet komen. Het invoeren van normerend beleid geeft ook garanties dat de doelstellingen worden gehaald. Om burgers en bedrijven in de transitie te ondersteunen, is daarnaast ook stimulerend beleid nodig. Anders blijft aanbod ook achter bij de vraag.

Tegelijk zal een dergelijke inspanning om de broeikasgassen tot netto nul te brengen ook leiden tot meer economische activiteit in onze maatschappij en een kans om nieuwe bedrijvigheid aan te trekken en goederen en diensten, die nodig zullen zijn om netto klimaatneutraal te worden in andere landen, te gaan exporteren. Voordeel van deze versnelling is ook dat we eerder dan andere landen zullen beschikken over een hoge mate van “eigen” energie waardoor prijsschommeling en geopolitieke dreigingen door afhankelijkheid van niet-EU energie minder zullen worden. En dat we eerder de vruchten zullen plukken een verbeterde leefomgeving en luchtkwaliteit, met positieve gevolgen voor de volksgezondheid. Tot slot zorgt onze inspanning ervoor dat ook andere landen hun ambities en inzet om uitstoot te reduceren ophogen, aangezien hun bijdrage ook belangrijk is voor beperken van klimaatverandering.

Van burgers en bedrijven zal een grote inzet worden gevraagd. Deze inspanning kan leiden tot verschillende maatschappelijke en politieke reacties, waarbij sommigen mogelijk kiezen voor oplossingen die minder ingrijpend zijn voor het dagelijks leven of die een langzamer tempo van verandering voorstaan. De wetenschap is helder: hoe sneller we de uitstoot terugbrengen, hoe beter we onszelf en volgende generaties beschermen tegen de gevolgen van klimaatverandering. Klimaatverandering heeft een steeds grotere impact op ons persoonlijke leven. Elke ton emissiereductie die gerealiseerd kan worden, draagt bij aan het voorkomen van een sterke ontwrichting van het leven van mensen wereldwijd, inclusief onszelf. Uit onze analyse blijkt dat het behalen van netto klimaatneutraliteit in 2040 zeer moeilijk, maar met grote inspanning haalbaar is, dit vraagt wel om actie op korte termijn van alle betrokken partijen en met name het Rijk.



Bijlage I: achtergrond bij de ontwikkeling van de scenariostudies ii3050v2

Inleiding op het II3050 traject

De scenario studies van de gezamenlijke Netbeheerders (zowel editie 1 als 2) zijn door de minister van Economische Zaken aangeboden aan de Tweede Kamer. Daarmee zijn deze studies openbaar en worden gebruikt als basis of referentie voor vele tientallen andere studies van de Rijksoverheid, waaronder het Nationaal Plan Energiesysteem¹²⁶. De Netbeheerders zelf gebruiken deze studies als basis voor hun tweejaarlijkse investeringsprogramma's. Voor II3050 editie 2 ging dit om het investeringsprogramma 2024 (IP2024) en voor editie 3 wordt nu gewerkt aan het investeringsprogramma 2026 (IP2026). Bij de investeringsprogramma's wordt 10 jaar vooruitgekeken. Daarnaast gebruiken de Netbeheerders de II3050 studies om te kijken hoe hun investeringsprogramma's eruit kunnen zien tot aan 2050.

Netbeheerders zijn publieke organisaties die veel waarde hechten aan het transparant en goed onderbouwd aangeven van waarom zij denken dat investeringen van vele tientallen miljarden nodig zijn in de infrastructuur als gevolg van veranderingen in vraag en aanbod van energie. De II3050 scenario's beschrijven die veranderingen in vraag en aanbod van energie en de verschillende energiedragers (o.a. elektriciteit, aardgas, steenkool, aardolie, biomassa, waterstof, warmte) op jaarbasis en vaak ook op uurbasis. De scenario's worden zodanig gemaakt dat vraag en aanbod altijd in balans zijn – middels een uitgebreide flexibiliteit analyse – en daarmee een betrouwbare energievoorziening leveren.

Naast de toepassing door Rijksoverheid en Netbeheerders worden de II3050 scenario's ook regelmatig gebruikt als basis voor studies van diverse lagere overheden, kennisinstellingen, NGO's en commerciële partijen. Kortom het zijn gezaghebbende, veelgebruikte en waardevolle scenario's aangaande de energietransitie en ze worden in tweejaarlijkse cycli steeds verder bijgewerkt en verbeterd.

Alvorens we de aanvullende analyses beschrijven, geven we context over de scenario studies van de gezamenlijke Netbeheerders en de analyses van PBL m.b.t. emissiereductie in 2040 en 2050. Ook geven we enige achtergrond over twee andere EU-landen die 2040 als streefjaar voor klimaatneutraliteit hebben en het advies van de EU COM om in 2040 al tot 90% emissiereductie te komen¹²⁷.

Totstandkoming van II3050 editie 2 in werkpakketten

Na de publicatie van de eerste editie van II3050 in april 2021 hebben de gezamenlijke netbedrijven een programma uitgewerkt voor een vervolgcyclus op de verkenning. Voor het uitwerken van de update van de verkenning – II3050 tweede editie – is een aantal inhoudelijke verbeterpunten voorzien, waaronder het uitwerken van de ontwikkelpaden van het energiesysteem, flexibiliteit en infrastructuur via de steekjaren 2030-2035-2040-

¹²⁶ NPE, [Nationaal plan energiesysteem \(NPE\) \(rvo.nl\)](https://rvo.nl/npe)

¹²⁷ EU COM, [2040 climate target - European Commission \(europa.eu\)](https://europa.eu/2040-climate-target)

2050, de ruimtelijke alternatieven en het nauw samenwerken met Rijksprogramma's. Tevens wordt voor elk van de opties de impact op kosten, ruimte en uitvoerbaarheid inzichtelijk gemaakt.

Om dit te bereiken, zijn de volgende werkpakketten opgesteld:

WP1: Scenariodefinitie en energiesysteemmodellering. Update van de Klimaatneutrale Energiescenario's 2050 (Berenschot & Kalavasta, 2020; Netbeheer Nederland, 2021). Deze update is primair door de scenariowerkgroep van Netbeheer Nederland uitgevoerd, een werkgroep waarin de scenarioverantwoordelijken (strategen en analisten) van de verschillende netbedrijven deelnamen, gebruikmakend van de input uit de andere werkpakketten.

WP2: Stakeholderinput. In dit werkpakket is de externe inbreng voor de scenario's georganiseerd en gefaciliteerd door onafhankelijke deskundige adviesbureaus (met name Berenschot). Doel is dat de verschillende stakeholders (markt- en overheidspartijen) input leveren op de actualisatie, dus hierover meedenken, zodat de geüpdatete scenarioverhaallijnen en -uitwerkingen voldoende worden gedragen. De II3050-scenario's zijn relevant voor een groot aantal partijen. De insteek is dus input ophalen, challengen en verwerken, en vervolgens ook tussentijdse resultaten bij stakeholders toetsen en valideren.

WP3: Verdieping transitie van de industrie. De intensieve industrie is geraadpleegd (met name Kalavasta) over de verwachte en mogelijke koers van verduurzaming van deze sector. Hiermee is de modellering van de transitie van de industrie nader onderbouwd.

WP4: Afstemming met aanpalende trajecten zoals het Nationaal Plan Energiesysteem, het Expertteam Energiesysteem 2050, de Trajectverkenning Klimaatneutraal van het PBL en de klimaatneutrale scenario's van TNO. Hiermee is geleerd van elkaars inzichten en zijn de scenario's verrijkt.

Onderbouwing van de scenario's

In het rapport van Netbeheer Nederland over de II3050-scenario's van juli 2023 worden de scenario's onderbouwd met verschillende methodes en benaderingen om hun haalbaarheid en realisme te waarborgen. Hier is een overzicht van hoe deze aspecten worden behandeld in het rapport:

1. Onderbouwing van de scenario's:

Realisme en Relevantie: De scenario's zijn ontwikkeld met een sterke nadruk op realisme en relevantie. Dit betekent dat de scenario's gebaseerd zijn op huidige technologische, economische, sociale en ecologische ontwikkelingen en trends die een zekere mate van waarschijnlijkheid hebben. Onzekerheden zijn erkend en er is ruimte gelaten voor ontwikkelingen die nog niet volledig voorspelbaar zijn.

Gebruik van het DESTEP-Model: Het DESTEP-model (Demografie, Economie, Sociaal, Technologie, Ecologie en Politiek) wordt gebruikt om de scenario's te bouwen, waarbij zowel zekere als onzekere factoren worden meegenomen. Hierdoor worden de scenario's realistisch en breed gedragen, rekening houdend met mogelijke externe invloeden op het energiesysteem.

Stakeholderconsultatie: Het proces voor het opstellen van de scenario's omvatte een uitgebreide consultatie met verschillende stakeholders, zoals marktpartijen, overheden,

toezichthouders en kennisinstellingen. Dit heeft geholpen om de scenario's te toetsen aan de realiteit en om te zorgen dat ze breed gedragen worden door de betrokken partijen.

2. Waarom de scenario's haalbaar en realistisch zijn:

Verankering in Beleidsdoelstellingen: De scenario's zijn afgestemd op de nationale klimaatdoelstellingen en het beleidskader, zoals vastgelegd in het Klimaatakkoord en de Europese Klimaatwet. Dit geeft de scenario's een sterke beleidsmatige basis en maakt ze haalbaar binnen de gestelde doelen voor 2030 en 2050. Voor 2035 en 2040 zijn nog geen wettelijke doelen vastgelegd.

Kwantificering en Modellerings: Elk scenario is gedetailleerd gekwantificeerd, waarbij vraag en aanbod van energie per sector zijn gemodelleerd met behulp van het Energietransitiemodel¹²⁸ (ETM). Dit zorgt voor een consistente en technisch onderbouwde weergave van hoe het energiesysteem zich kan ontwikkelen.

Impactanalyse: De impact van de verschillende scenario's op de energie-infrastructureur is onderzocht, wat bijdraagt aan het inzicht in de technische en ruimtelijke haalbaarheid van de scenario's.

3. Consultatie van de scenario's:

Inbreng van Stakeholders: In het werkpakket Stakeholderinput (WP2) is input verzameld van diverse stakeholders door middel van klankbordgroepbijeenkomsten, sectortafels en interviews met deskundigen. De ontvangen input is gedocumenteerd en teruggekoppeld aan de scenariowerkgroep, waardoor de scenario's beter aansluiten bij de inzichten van de betrokken partijen.

Betrokkenheid van Externe Experts: Externe experts zijn betrokken om tunnelvisie te voorkomen en om de scenarioverhaallijnen uit te dagen. Dit heeft bijgedragen aan een bredere acceptatie en geloofwaardigheid van de scenario's.

4. Maakbaarheid van de scenario's:

Technologische en Economische Haalbaarheid: De scenario's zijn opgebouwd met bestaande en opkomende technologieën die een hoge mate van zekerheid hebben om opgeschaald te worden. Innovatieve technologieën die nog in een vroeg ontwikkelingsstadium verkeren (lage TRL), zoals kernfusie en Ultra-Diepe Geothermie, zijn bewust buiten beschouwing gelaten.

Ruimtelijke en Sociale Inpassing: De scenario's houden rekening met de ruimtelijke inpassing van energie-infrastructuren en de sociale acceptatie daarvan. De transformatie van het energiesysteem is gekoppeld aan maatschappelijke veranderingen, zoals veranderingen in woon- en reispatronen.

Wetgeving en Beleid: Er wordt erkend dat wetgeving en beleidsmatige keuzes cruciaal zijn voor het behalen van de gestelde doelen. De scenario's zijn niet gebaseerd op de maakbaarheid van de wereld, maar eerder op het feit dat wetgeving de uitkomsten in veel gevallen noodzakelijk maakt.

¹²⁸ Het Energietransitiemodel is een open source en gratis toegankelijk model dat wordt ontwikkeld door Quintel. Het model kan worden ingezien en gebruikt via <https://energytransitionmodel.com> en via de home page zijn de II3050 scenario's van zowel editie 1 als editie 2 op te roepen en eventueel aan te passen. In dit rapport zullen we voornamelijk gebruik maken van het scenario II3050 V2 National Leadership voor het jaar 2050. Hoe en waarom we dit scenario gaan gebruiken wordt verderop in dit rapport uitgelegd.

5. Visie op Maakbaarheid vs. Noodzakelijkheid door Wetgeving:

Beleidsafhankelijkheid: Hoewel de scenario's rekening houden met technologische en economische realiteit, wordt erkend dat de uiteindelijke uitkomsten sterk afhankelijk zijn van beleidskeuzes en regelgeving. Wetgeving is een essentiële drijfveer in de transitie naar een klimaatneutraal energiesysteem.

Draagvlak maatschappij: Voor elke ambitie geldt dat halen van deze ambitie ook afhangt van het draagvlak in de maatschappij voor het realiseren van deze ambitie. Veel van de maatregelen vragen om een investering (publiek en privaat) en/of om een verandering van gedrag. Denkbare draconische maatregelen die het draagvlak naar onze verwachting extreem negatief beïnvloeden zijn niet wenselijk voor het halen van de ambitie en daarom buiten beschouwing gelaten.

Kortom, de scenario's in het II3050-rapport zijn realistisch en haalbaar gemaakt door een zorgvuldige combinatie van technologische modellering, beleidsmatige afstemming, stakeholderconsultatie en een breed begrip van maatschappelijke en ruimtelijke contexten. De consultatie van stakeholders speelde een cruciale rol bij het vormgeven en valideren van de scenario's, wat heeft geleid tot een breed gedragen en robuust rapport.

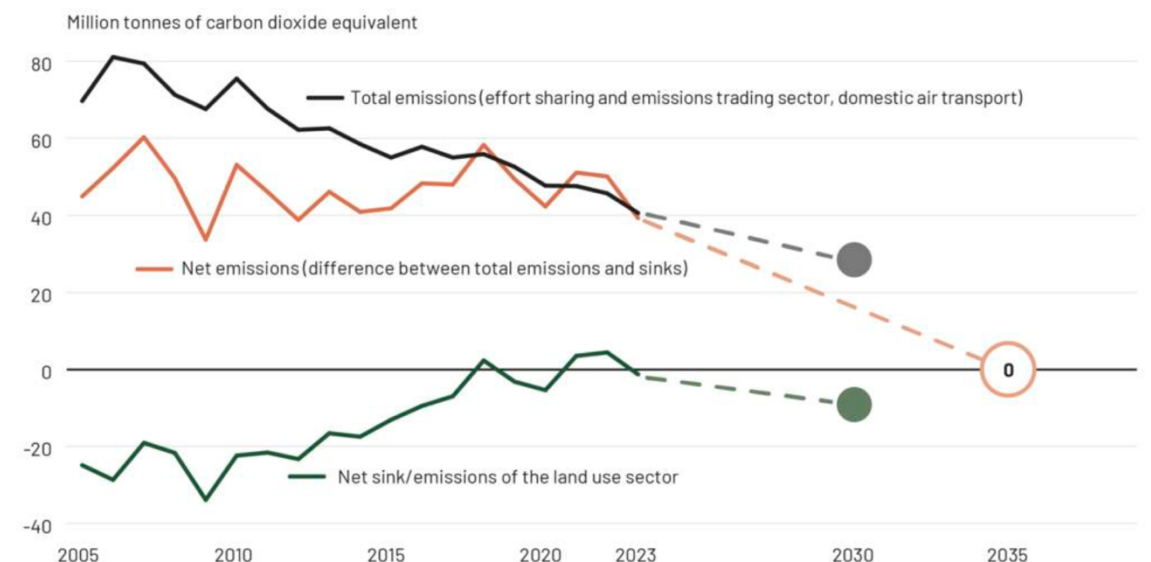
Bijlage II: Finland en Oostenrijk in 2035 en 2040 klimaatneutraal

Inleiding

Per augustus 2024 zijn er vier landen die in of voor 2040 klimaatneutraal willen zijn. Dat zijn de Malediven, IJsland, Finland en Oostenrijk. We bespreken hier Finland en Oostenrijk. Malediven en IJsland worden niet besproken vanwege de bijzondere omstandigheden van beide landen. De Malediven hebben namelijk wel een doel, maar nog geen plan en IJsland heeft veel mogelijkheden tot geothermie en waterkracht die Nederland niet heeft. Tenslotte is belangrijk om ook Costa Rica en Bhutan te vermelden. Costa Rica en Bhutan strijden om de eer om als eerste land klimaatneutraal te worden. Costa Rica had als ambitie klimaatneutraliteit in 2021, mede mogelijk gemaakt door veel waterkrachtcentrales en Bhutan heeft in de grondwet een bosdekking van minimaal 60% vastgelegd, het zit sinds 2016 op 70% en absorbeert op deze wijze meer CO₂ dan dat het broeikasgas uitstoot.

Finland klimaatneutraal in 2035

De kernpijler van Finlands klimaatbeleid is de nationale Klimaatwet, die emissiereductiedoelstellingen vastlegt voor 2030, 2040 en 2050. De emissiereductiedoelstellingen zijn -60% tegen 2030, -80% tegen 2040 en -90% met een streven naar -95% tegen 2050, vergeleken met de niveaus in 1990. Volgens de wet moet Finland uiterlijk in 2035 netto koolstofneutraal zijn. Deze doelen lijken op het eerste gezicht tegenstrijdig maar zijn dat niet. Finland wil dus niet alleen 95% van de emissies hebben gereduceerd tegen 2050 maar ook al in 2035 netto koolstofneutraal zijn. Dat betekent dat in 2035 de uitstoot van CO_{2eq} in evenwicht moet zijn met de opname van CO_{2eq} en dat daarna Finland netto negatieve emissies heeft. Onderstaande figuur illustreert deze positie.



According to the national Climate Act, Finland's net emissions should be zero or negative by 2035. By 2030, the total emissions must be reduced by 60% compared to the 1990 level. This would mean a level of 28.5 million tonnes of carbon dioxide equivalent. Finland's obligation for the carbon sink of the land use sector is set at the EU level. With the current figures in the greenhouse gas inventory, the obligation for the Finnish land use sector for 2030 is -7.6 million tonnes of carbon dioxide equivalent.

Figuur 47. De historische (negatieve) emissies en de doelen van Finland wat betreft positieve en negatieve emissies in 2030 en 2035.

De impact van de Finse klimaatwet op het sturen van beleid en acties is gebaseerd op het klimaatbeleidsplanningssysteem. Jaarlijkse Klimaatrapporten worden gepubliceerd om de voortgang van het behalen van de doelstellingen en de toereikendheid van de maatregelen te monitoren. De rapporten kunnen gevonden worden op de website van de Finse overheid via <https://ym.fi/en/finland-s-national-climate-change-policy>.

Oostenrijk klimaatneutraal in 2040

De federale regering van Oostenrijk heeft zich tot doel gesteld om Oostenrijk tegen 2040 klimaatneutraal te maken. Dit nationale doel wordt ondersteund door politieke verklaringen en beleidsprogramma's, zoals het **Regeringsprogramma 2020–2024**¹²⁹, waarin de ambitie voor een klimaatneutraal Oostenrijk duidelijk wordt vermeld. Tegelijkertijd richt een specifieke resolutie van de Nationale Raad zich op de klimaatneutraliteit van de federale administratie.

Met de resolutie van 26 maart 2021 heeft de Nationale Raad de federale regering opgeroepen om de ambities op weg naar klimaatneutraliteit verder te bevorderen en concrete maatregelen te implementeren, waaronder:

- Het ontwikkelen van een strategie met een concreet tijdschema voor een klimaatneutrale federale administratie tegen 2040. Dit omvat bindende klimaatbeschermingsrichtlijnen voor alle federale instellingen, inclusief ondergeschikte diensten en bedrijven die volledig eigendom zijn van de federale overheid.
- Het bevorderen van duurzame en innovatievriendelijke inkoop, waarbij rekening wordt gehouden met de Total Cost of Ownership, zodat dit de standaard wordt.

Hoewel deze resolutie specifiek gericht is op de federale administratie, is het belangrijk om te benadrukken dat de bredere ambitie om heel Oostenrijk tegen 2040 klimaatneutraal te maken nog geen juridisch bindende basis heeft. De bredere nationale doelstelling wordt ondersteund door politieke documenten en initiatieven, maar een overkoepelende klimaatwet die deze ambitie juridisch afdwingbaar maakt, ontbreekt nog.

In lijn met de opdracht van de resolutie heeft Oostenrijk zich tijdens de 27e VN-Klimaatconferentie aangesloten bij het internationale initiatief "Net-Zero Government". Hiermee heeft het land zich verplicht om een routekaart te ontwikkelen en te publiceren die beschrijft hoe de federale administratie tegen 2040 klimaatneutraal kan worden.

Om dit te realiseren, heeft de federale regering zich ertoe verbonden een strategie en actieplan te ontwikkelen voor de klimaatneutraliteit van de federale administratie. Het ministerie van Klimaatbescherming, Milieu, Energie, Mobiliteit, Innovatie en Technologie en het ministerie van Financiën dragen gezamenlijk de inhoudelijke verantwoordelijkheid voor het opstellen van deze strategie. Een interministeriële werkgroep zal centrale federale instellingen en relevante belanghebbenden betrekken bij de ontwikkeling van het actieplan.

¹²⁹ Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020 – 2024