TNO innovation for life

Planbureau voor de Leefomgeving

KLIMAATNEUTRALE MOBILITEIT IN 2050

EEN VERKENNING VAN BEELDEN EN PADEN DAAR NAARTOE

G.P. Geilenkirchen, J. Harmsen & A.W.H. Nusteling

26-03-2024

PBL

Colofon

Klimaatneutrale mobiliteit in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving
Den Haag, 2024
PBL-publicatienummer: 5235
TNO publicatienummer: TNO 2024 R10491

Contact

Gerben.Geilenkirchen@pbl.nl

Auteurs

G.P. Geilenkirchen (PBL), J. Harmsen (TNO) & A.W.H. Nusteling (PBL).
Met medewerking van M. Verbeek (TNO), H. Hilbers en I. Stammes (beiden PBL).

Supervisie

Femke Verwest (PBL) en Rob Cuelenaere (TNO).

Met dank aan

Het PBL en TNO zijn dank verschuldigd aan Bert van Wee (TU Delft), Stefan Bakker en Saeda Moorman (KiM), Richard Smokers, Norbert Ligterink en Xander Seykens (TNO) en Igor Davydenko, Michel Traa, Maarten 't Hoen, Alexandros Dimitropoulos en Jetske Bouma (PBL) voor het reviewen van (delen van) deze rapportage. Daarnaast hebben we dankbaar gebruik gemaakt van de inbreng van de stuurgroep voor dit project bestaande uit Femke Verwest, Jaco Stremler, Bert Tieben en André van Lammeren (PBL) en Rob Cuelenaere (TNO).

Redactie figuren

Beeldredactie PBL

Eindredactie en productie

Uitgeverij PBL

Toegankelijkheid

Het PBL hecht veel waarde aan de toegankelijkheid van zijn producten. Mocht u problemen ervaren bij het lezen ervan, dan kunt u contact opnemen via info@pbl.nl. Vermeld daarbij s.v.p. de naam van de publicatie en het probleem waar u tegenaan loopt.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Geilenkirchen, G.P. et al. (2024), *Klimaatneutrale mobiliteit in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe*, Den Haag; Planbureau voor de Leefomgeving & TNO.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is vóór alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

TNO is een onafhankelijke onderzoeksorganisatie. Wij verbinden mensen en kennis om innovaties te creëren die de concurrentiekracht van bedrijven en het welzijn van de samenleving duurzaam versterken. Hiertoe zijn wij bij wet opgericht als publiekrechtelijke rechtspersoon. Deze TNO-wet geeft ons een aantal bijzondere taken en kaders en verbindt daaraan specifieke voorwaarden waaronder wij ons werk moeten uitvoeren. Het doel daarvan is dat wij onafhankelijk en betrouwbaar oplossingen kunnen blijven creëren voor de uitdagingen die de samenleving ons stelt.

Inhoud

Samenvatting 4

Bevindingen: Klimaatneutrale mobiliteit in 2050 7

1 Inleiding 17

2 Aanpak en afbakening van de studie 19
2.1 Aanpak om tot de paden te komen 19
2.2 Afbakening van de studie 22
2.3 Verschillende perspectieven op transities 24

3 Trajcten per vervoerswijze 28
3.1 Huidige uitstoot van broeikasgassen 28
3.2 Paden naar klimaatneutraal wegverkeer 30
3.3 Paden naar klimaatneutrale luchtvaart 33
3.4 Paden naar klimaatneutrale zeevaart 36
3.5 Paden naar klimaatneutrale binnenvaart 38

4 Gecombineerde trajecten naar klimaatneutrale mobiliteit in 2050 42
4.1 Ontwikkeling energievraag mobiliteit 42
4.2 Emissiereductie in de paden 46
4.3 Mobiliteit binnen het energiesysteem 50

5 Kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven 53
5.1 Beleid en regelgeving 53
5.2 Inzet van klimaatneutrale energie 56
5.3 Verbetering van de energie-efficiëntie 61
5.4 Minder en anders 66
5.5 Draagvlak en rechtvaardigheid 71

6 Discussie en vervolgonderzoek 78

Referenties 81

Samenvatting

Nederland heeft wettelijk vastgelegd om uiterlijk in 2050 klimaatneutraal te zijn. Ook de Europese Unie (EU) heeft deze ambitie voor 2050 wettelijk vastgelegd. Dit vereist dat de uitstoot van broeikasgassen in alle delen van de economie drastisch omlaag gaat. De mobiliteitssector speelt daarbij een belangrijke rol. Zo was de binnenlandse mobiliteit in 2022 goed voor circa 19 procent van de totale broeikasgasuitstoot in Nederland. De uitstoot van de internationale lucht- en scheepvaart vanuit Nederland lag in 2022 anderhalf keer zo hoog als die van de binnenlandse mobiliteit. Om de broeikasgasuitstoot voor de mobiliteitssector tijdig terug te kunnen dringen, moet het tempo van de verduurzaming in Nederland omhoog. Duurzame technologie speelt daarbij een cruciale rol. Daarom is het zaak deze versneld uit te rollen. Daarnaast speelt energiebesparing een belangrijke rol in het terugdringen van de klimaatimpact van mobiliteit en in het pad naar klimaatneutraal.

In deze studie verkennen het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en TNO enkele potentiële paden naar een klimaatneutrale mobiliteit in Nederland in 2050. Daarbij redeneren we terug vanuit het doel van klimaatneutraliteit in 2050. Zo geven we een beeld van hoe dit doel voor de mobiliteit in en vanuit Nederland kan worden gehaald en van de kansen en uitdagingen die daarmee gepaard gaan. De paden zijn opgesteld voor de vier vervoerswijzen: het wegverkeer, de luchtvaart, de zeescheepvaart en de binnenvaart. Bij het uitwerken van de paden gaan we in op trends op het gebied van het vervoersvolume, de ontwikkeling op het gebied van hernieuwbare energiedragers en bijbehorende aandrijftechnologie en de rol van andere maatregelen zoals verbeterde energie-efficiëntie en het beïnvloeden van de vraag naar mobiliteit. Met deze informatie formuleren we vervolgens de belangrijkste kansen en uitdagingen voor een klimaatneutrale mobiliteit.

De transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit vormt een grote maatschappelijke uitdaging. In deze studie laten we zien dat er technisch veel kan, maar dat een versnelling nodig is ten opzichte van het huidige pad. Voor het personenautoverkeer zit de transitie al in een opschalingsfase. Grote uitdagingen daarbij zijn de opschaling van de laadinfrastructuur en het faciliteren van de afbouw van het bestaande wagenpark. In de lucht- en scheepvaart en het zware wegtransport staat de transitie nog in de kinderschoenen. Er is nog onduidelijkheid over de internationale regelgeving en het ontbreekt op sommige gebieden aan concreet uitgewerkt beleid. In de scheepvaart wordt nog een breed scala aan duurzame technologieën ontwikkeld en is er behoefte aan meer praktijkervaringen, als opmaat naar een grootschaliger inzet daarvan.

Leunde de mobiliteit van oudsher op olieproducten, in de toekomst gaat duurzaam geproduceerde elektriciteit een cruciale rol spelen als energiedrager voor elektrische aandrijving en als grondstof voor de productie van e-brandstoffen. Ook biobrandstoffen spelen in de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit een belangrijke rol. Door de transitie neemt de vraag naar hernieuwbare brandstoffen enorm toe, vooral voor de lucht- en scheepvaart. Er is nog veel onzeker over het aanbod aan en de prijsontwikkeling van deze brandstoffen. Opschaling van het aanbod is één van de grote uitdagingen in de transitie. De mobiliteitssector concurreert daarbij met andere sectoren, zoals de industrie. Dit vraagt om een eenduidige visie over de rol die de mobiliteit speelt in het toekomstige klimaatneutrale energiesysteem. Deze visie kan dienen als basis voor een nationale strategie voor de opschaling van het aanbod aan duurzame brandstoffen. In deze strategie moet er aandacht zijn voor zowel de omvang van de eigen productie van deze brandstoffen als de rol die import daarbij speelt. Dit geldt in het bijzonder voor de brandstoffen voor de lucht- en zeevaart: waar in de wereld gaan de duurzame brandstoffen bijvoorbeeld geproduceerd worden en kan Rotterdam zijn positie

als belangrijke bunkerlocatie behouden? Hierbij is het van belang om goed te kijken naar de strategische en geopolitieke aspecten van deze vragen, om de leveringszekerheid van energiedragers in de toekomst te kunnen garanderen.

Ook energiebesparing is een belangrijke pijler van het klimaatbeleid voor mobiliteit. Energiebesparing verlaagt de vraag naar schaarse hernieuwbare energie en kritieke materialen en grondstoffen en vergroot daarmee de kans dat de transitie slaagt. Ook verlaagt energiebesparing de klimaatimpact van de mobiliteitssector in de periode dat deze nog niet klimaatneutraal is. Dit is voor het halen van de Parijsafspraken minstens zo belangrijk als het uiteindelijke doel van klimaatneutraliteit. Bij alle vervoerswijzen zien we ruimte om de energie-efficiëntie van het vervoer te verbeteren. Het blijkt echter weerbarstig om dit potentieel te ontsluiten. Hiervoor is het nodig het beleid op dit gebied te herijken. Ook gedragsverandering kan een belangrijke rol spelen bij het besparen van energie. Zeker voor het personenverkeer kan de vraag naar mobiliteit afnemen en verschuiven naar duurzamere modaliteiten, bijvoorbeeld door maatregelen die zijn gericht op een beter aanbod van die duurzamere modaliteiten en op het gebied van de ruimtelijke ordening.

Ten slotte is ook draagvlak cruciaal om de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit te kunnen laten slagen. In de transitie kan mobiliteit duurder worden en zijn investeringen nodig in duurzame technologie, wat op verschillende groepen burgers en bedrijven een andere impact kan hebben. Vooral de lagere inkomensgroepen zijn kwetsbaar voor de effecten van sommige maatregelen om een duurzame mobiliteit te bevorderen, met name als zij in gebieden wonen waar de bereikbaarheid per OV en fiets beperkt is. Ook kleine transportbedrijven lopen een risico tijdens de transitie, omdat zij minder makkelijk in verduurzaming kunnen investeren dan grote bedrijven. Het maken van duidelijke keuzes in de verdeling van lusten en lasten en het betrekken van burgers en andere belanghebbenden bij deze keuzes helpt het draagvlak voor beleid te vergroten.

BEVINDINGEN

BEVINDINGEN

Bevindingen: Klimaatneutrale mobiliteit in 2050

Mobiliteit is een cruciaal onderdeel van de samenleving. Personenvervoer biedt mensen de mogelijkheid om aan de samenleving deel te nemen, en goederenvervoer verzorgt het transport van grondstoffen, intermediaire goederen en eindproducten die mensen nodig hebben. Op dit moment is de mobiliteit in Nederland nog grotendeels afhankelijk van fossiele brandstof. Daardoor was de sector in 2022 goed voor circa 19 procent van de uitstoot van broeikasgassen in Nederland: bijna 30 megaton CO_2-equivalenten. De uitstoot van de internationale lucht- en scheepvaart vanuit Nederland lag met 46 megaton nog hoger. De mobiliteitssector ligt nog niet op koers naar het wettelijk vastgelegde doel van een klimaatneutrale samenleving in 2050. Om dat doel te halen, zal de uitstoot van broeikasgassen de komende decennia drastisch moeten afnemen (figuur S.1).

In deze studie presenteren we een aantal potentiële paden die kunnen leiden naar een klimaatneutrale mobiliteit in en vanuit Nederland in 2050. We redeneren daarbij terug vanuit het doel van klimaatneutraliteit in 2050 en doen dat niet alleen voor de binnenlandse mobiliteit maar ook voor het internationale transport. We doen dat voor vier vervoerswijzen: wegverkeer, luchtvaart, zeescheepvaart en binnenvaart. Voor iedere vervoerswijze zijn twee paden uitgewerkt: een *innovatief* pad met een grote(re) rol voor nieuwe aandrijftechnologie en e-brandstoffen, en een *behoudend* pad waarin een grote(re) rol is weggelegd voor biobrandstoffen en bestaande aandrijftechnologie. Hoe deze paden uitpakken in de brandstof- en energiemix, verschilt per vervoerswijze. De resultaten per vervoerswijze zijn vervolgens gebundeld tot twee paden voor de sector mobiliteit als geheel. Daarbij gaan we in op de huidige trends en ontwikkelingen in de vervoersvolumes en de uitstoot van broeikasgassen, het huidige beleidskader voor verduurzaming, de energiedragers en technologieën die in beeld zijn om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren en de rol die beleid dat is gericht op energie-efficiëntie en vervoersvolumes, kan spelen bij het pad naar klimaatneutraliteit. Op basis van deze informatie hebben we de belangrijkste kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven voor het beleid in kaart gebracht.

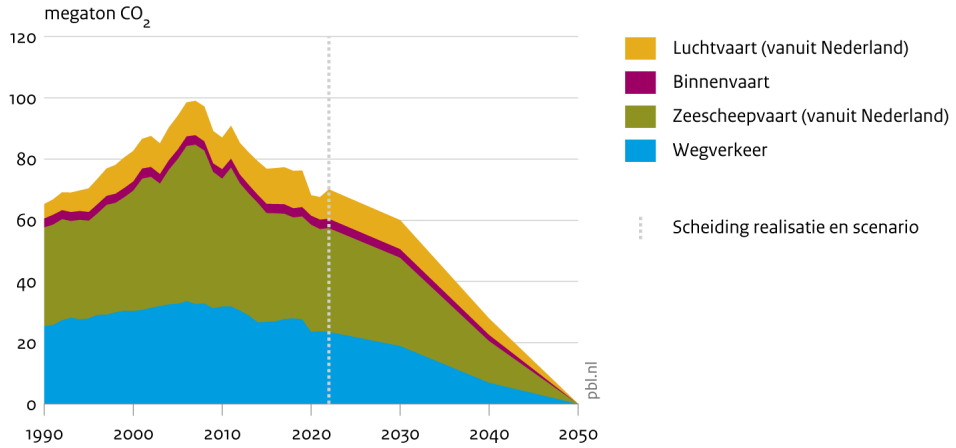
Deze studie maakt onderdeel uit van een bredere verkenning die het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) uitvoert naar een klimaatneutrale samenleving in 2050 in Nederland die in april 2024 uitkomt, genaamd Trajectverkenning Klimaatneutraal (TVKN).

Ingroei duurzame technologieën én energiebesparing nodig

De klimaatimpact van mobiliteit kan worden teruggebracht door duurzame energiedragers te gebruiken, de energie-efficiëntie van het vervoer te verhogen, klimaatvriendelijke vervoerswijzen te gebruiken en de vraag naar vervoer te verminderen. In deze studie laten we zien dat er technisch veel kan. Nieuwe technologieën voor duurzame mobiliteit zijn in ontwikkeling of worden al uitgerold in de samenleving. Tegelijkertijd is de tijd tot 2050 kort en staat de energietransitie in de mobiliteitssector deels nog in de kinderschoenen. Het pad naar een klimaatneutrale mobiliteit is ingeslagen, maar de uitdagingen om duurzame technologie tijdig in de vloten en wagenparken op te nemen zijn groot. Om het doel van klimaatneutraliteit in 2050 te halen is het nodig het huidige emissiereductietempo te versnellen. Naast de inzet van hernieuwbare energie ligt hier een belangrijke rol voor energiebesparing, en daarmee voor gedragsverandering.

Figuur S.1

CO_2-uitstoot van vervoerswijzen in traject Behoudend



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024 (realisatie); PBL & TNO (scenario)

Snelle uitrol van duurzame energiedragers staat centraal in de transitie, uitdagingen zijn groot

Om ervoor te zorgen dat de mobiliteitssector in 2050 klimaatneutraal is, is het nodig om snel veel meer duurzame energiedragers in te zetten, zoals hernieuwbare elektriciteit, biobrandstoffen en e-brandstoffen. Hiervoor zijn ook nieuwe aandrijftechnologieën noodzakelijk, zoals batterij-elektrische auto's en schepen die varen op ammoniak of methanol. De opschaling van deze technologieën en het tempo waarin ze moeten worden uitgerold, vormen een grote uitdaging.

Uitdagingen en oplossingsrichtingen verschillen tussen vervoerswijzen

De vier vervoerswijzen – wegverkeer, luchtvaart, zeescheepvaart en binnenvaart – bevinden zich in verschillende fases van de transitie, die uiteenlopen van het nog verkennen van duurzame technologieën tot het opschalen van een dominante technologie. Daardoor verschillen ook de uitdagingen waar de vervoerswijzen voor staan, en de oplossingen die daarvoor moeten worden gezocht. Bovendien geldt voor de hele sector dat er nog veel onzekerheden zijn. Dat geldt bijvoorbeeld voor het aanbod aan en de prijs van verschillende aandrijftechnologieën en energiedragers, en daarmee voor de bijdrage die de verschillende technologische opties aan de verduurzaming kunnen gaan leveren. Het is daardoor voor geen van de vervoerswijzen mogelijk te zeggen welk pad het meest waarschijnlijk is op weg naar een klimaatneutrale mobiliteit. Wel verschilt de mate van onzekerheid tussen de vervoerswijzen:

- In het wegverkeer is batterij-elektrische aandrijving de dominante optie, met daarnaast mogelijk een rol voor waterstof in het zware vrachtverkeer. Hernieuwbare brandstoffen kunnen een belangrijke rol spelen bij het terugdringen van de klimaatimpact van de bestaande vloot. Bij personenauto's is de transitie reeds in volle gang. Daar liggen grote uitdagingen op het vlak van de opschaling van laadinfrastructuur, het aanbod van voertuigen op zowel de nieuwmarkt (inclusief de daarvoor benodigde grondstoffen en materialen) als de tweedehandsmarkt, en het afbouwen van het bestaande, fossiele, wagenpark.
- In de luchtvaart blijft (een duurzame vorm van) kerosine dominant, met op termijn wellicht een bescheiden rol voor waterstof. Om de productie en het gebruik van duurzame luchtvaartbrandstoffen snel op te schalen, is wet- en regelgeving cruciaal. Op Europees niveau is dit beleid reeds voor een belangrijk deel geïmplementeerd maar mondiale afspraken ontbreken nog. Een andere uitdaging bij de verduurzaming van de luchtvaart is het klimaateffect van waterdamp en stikstofoxiden en de vorming van condenssporen. Dit effect blijft

bestaan bij het gebruik van hernieuwbare brandstoffen. Om deze niet-CO_2-gerelateerde effecten te verminderen, bestaan er oplossingen, zoals aangepaste vliegroutes, maar die vergen internationale coördinatie en nieuw beleid.

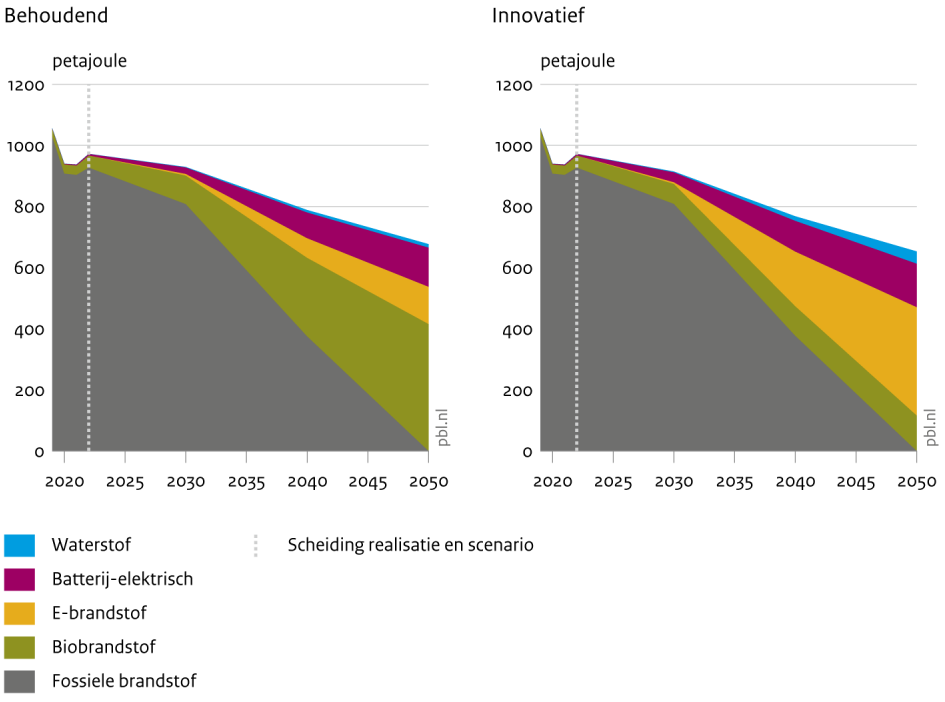
- Ook in de scheepvaart moet de wet- en regelgeving verder worden ontwikkeld. Er zijn mondiaal wel doelen gesteld voor verduurzaming van de zeevaart in 2050 maar de uitwerking van die doelen in concrete beleidsinstrumenten ontbreekt nog. Ook voor de binnenvaart ontbreekt het aan concrete instrumenten voor verduurzaming. Er wordt nog een breed scala aan nieuwe technologieën en brandstoffen verkend. Waarschijnlijk zullen er in verschillende marktsegmenten andere oplossingen worden ingezet. De komende jaren is het cruciaal dat er in verschillende toepassingen meer ervaring wordt opgedaan met de nieuwe technologieën en brandstoffen, als opmaat naar een grootschalige inzet. Tegelijkertijd moet er bij de scheepvaart (en zeker bij de binnenvaart) meer aandacht komen voor de af- of ombouw van de bestaande vloot.

De omslag naar nieuwe technologieën brengt kosten met zich mee, zeker in de lucht- en scheepvaart. Tegelijkertijd biedt die omslag ook economische kansen voor Nederland. Zowel het maritieme cluster als de automotive en luchtvaartindustrie in Nederland kunnen profiteren van (investeringen in en beleid voor) klimaatneutrale technologie en hiermee hun concurrentiepositie versterken. Gebrek aan gekwalificeerd personeel is hier mogelijk wel een knelpunt.

Figuur S.2

Trajecten richting klimaatneutrale mobiliteit

Energievraag van mobiliteit in en vanuit Nederland



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024 (realisatie); PBL & TNO (scenario)

Belangrijke rol voor elektriciteit, opschaling aanbod hernieuwbare brandstoffen cruciaal

Leunde de mobiliteitssector van oudsher op olieproducten, in de toekomst gaat duurzaam opgewekte elektriciteit een cruciale rol spelen: als energiedrager voor elektrische aandrijving en als basis

voor de productie van e-brandstoffen. Ook biobrandstoffen kunnen een belangrijke rol gaan spelen bij de verduurzaming van de mobiliteit (figuur S.2).

De beschikbaarheid en betaalbaarheid van hernieuwbare brandstoffen zijn voor de transitie een cruciale en uitdagende randvoorwaarde. De vraag naar hernieuwbare brandstoffen neemt door de transitie fors toe (figuur S.2), vooral vanuit de lucht- en scheepvaart. Het opschalen van het aanbod van deze brandstoffen is één van de grote opgaven in de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. Op dit moment is nog niet te zeggen hoe groot de rol wordt van biobrandstoffen en e-brandstoffen. Schepen en vliegtuigen kunnen met beide typen brandstoffen uit de voeten. Veel hangt af van hoe het aanbod aan en de prijzen van deze brandstoffen zich gaan ontwikkelen, onder invloed van onder andere de wet- en regelgeving en de eisen die deze stelt aan de brandstoffen, en daarnaast van de vraag die uit andere sectoren komt, zoals de industrie. De grote vraag naar hernieuwbare brandstoffen vanuit de lucht- en scheepvaart kan een groot beslag leggen op de in Nederland beschikbare hernieuwbare energie. Om te kunnen voorzien in die vraag zal Nederland waarschijnlijk ook hernieuwbare brandstoffen moeten gaan importeren.

Door de transitie raakt mobiliteit meer verknoopt met andere onderdelen van het energiesysteem. Het toekomstige energiesysteem wordt veel meer afhankelijk van variabele energiebronnen zoals zonne- en windenergie. Het aanbod daarvan varieert in de tijd. De mogelijkheden die er momenteel zijn om vraag naar en aanbod van elektriciteit op elkaar af te stemmen, bijvoorbeeld door gascentrales af te schakelen, zijn in de toekomst minder beschikbaar. Het is daarom nodig om andere manieren van flexibiliteit in het systeem in te bouwen. Het wegverkeer kan hier een bijdrage aan leveren door grootschalige uitrol van slim laden en *Vehicle-to-Grid* technologie, waarbij de auto's elektriciteit terug kunnen leveren aan het net. Het grootschalig in gebruik nemen van deze technologie blijft tot nu toe achter bij de ambities op dat vlak.

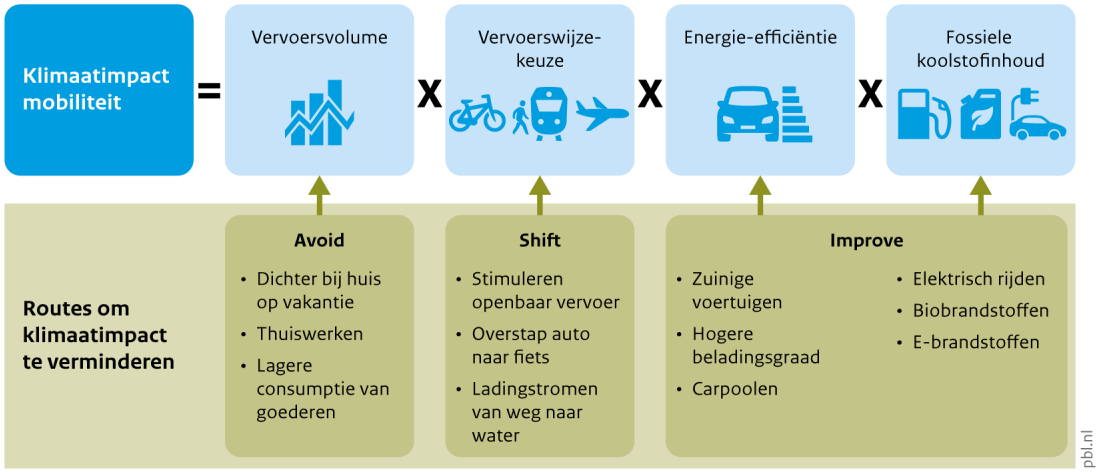
Accent verschuift van stimuleren naar faciliteren en aanjagen van de transitie
De opgave waar Nederland voor staat bij de energietransitie in de mobiliteitssector, verschuift dit decennium steeds meer van het stimuleren van de eerste uitrol en opschaling van nieuwe technologieën en brandstoffen naar het faciliteren en aanjagen van de verdere opschaling. Hierbij stuurt het internationale beleid vooral op aanbod en op normerende randvoorwaarden. Het Europese beleidskader voor de verduurzaming van het aanbod aan hernieuwbare energie en voor het gebruik ervan is grotendeels vastgesteld. De automarkt wordt hierdoor in steeds grotere mate elektrisch en de vraag naar hernieuwbare brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart neemt snel toe. Deze ontwikkelingen brengen grote uitdagingen met zich mee. Nationaal beleid kan een belangrijke rol spelen om de vraag naar duurzame technologie te stimuleren, het aanbod van hernieuwbare brandstoffen op te schalen en (infrastructurele) randvoorwaarden voor dit alles te creëren.

Energiebesparing kan belangrijke rol spelen bij realiseren van klimaatneutraliteit in 2050
In een robuuste beleidsstrategie voor de verduurzaming van de mobiliteit heeft de overheid niet alleen aandacht voor de introductie en verspreiding van duurzame energiedragers maar ook voor de andere factoren die de klimaatimpact van mobiliteit beïnvloeden, namelijk: de ontwikkeling van de vervoersvolumes, de vervoerswijzekeuze en de energie-efficiëntie van het vervoer (zowel technisch als operationeel), zie figuur S.3. Via deze factoren is het mogelijk de vraag naar (hernieuwbare) energie en de bijbehorende aandrijftechnologie, inclusief de benodigde kritieke materialen en grondstoffen, te verlagen of de toename van die vraag te beperken. Dit vergroot de kans dat een tijdige transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit slaagt. Energiebesparing draagt bovendien bij aan het beperken van de klimaatimpact van mobiliteit in de periode dat deze nog niet

klimaatneutraal is. Dit is voor het halen van de Parijsafspraken minstens zo belangrijk als het uiteindelijke doel van klimaatneutraliteit.

Figuur S.3

Drie routes om de klimaatimpact van mobiliteit terug te dringen



Bron: PBL

Potentieel voor verdere verbetering van energie-efficiëntie

Energiebesparing door een verbeterde energie-efficiëntie van voer-, vaar- en vliegtuigen en door operationele en logistieke efficiëntieverbetering kan een betekenisvolle bijdrage leveren aan het terugdringen van de klimaatimpact van mobiliteit. We schatten dit potentieel op zo'n 15 tot 30 procent tot 2050. In de paden in figuur S.2 hebben we verwerkt dat dit potentieel deels al wordt ontsloten via bestaande wet- en regelgeving. Bij alle vervoerswijzen zien we echter nog potentieel voor verdere verbetering maar of ook dat kan worden ontsloten, is niet evident. Daarvoor is het nodig de standaarden voor nieuwe vervoersmiddelen aan te scherpen en dat vergt internationale afstemming en besluitvorming, die gepaard gaan met lange doorlooptijden en onzekere uitkomsten. Nationaal kan worden gestuurd op de aanschaf van zuinige vervoersmiddelen en een efficiënt(er) gebruik van vervoersmiddelen. Tot nu toe is dit beleid vooral gebaseerd geweest op gedragscampagnes en vrijwillige afspraken. Het is niet altijd goed bekend wat deze campagnes hebben opgeleverd maar het effect lijkt veelal beperkt. Met stringentere regelgeving is het mogelijk een groter effect te behalen. Hoe groot dit potentieel daadwerkelijk is, is onzeker. Daarbij speelt onder andere het volgende:

- Energiebesparing leidt tot lagere brandstofkosten, maar dit weegt lang niet altijd op tegen de kosten van de maatregel zelf. Ook zijn maatregelen niet zomaar toe te passen in de bestaande operatie. Beleid is noodzakelijk om de reductiepotentie te kunnen realiseren.
- Energiebesparingsmaatregelen zijn (ten dele) al op korte termijn te realiseren en kunnen de omschakeling naar duurzame energiedragers makkelijker en goedkoper maken.
- Lagere brandstofkosten kunnen tot reboundeffecten leiden, ofwel tegengestelde effecten, waardoor de effectiviteit van het beleid afneemt.

Groei vervoersvolumes bemoeilijkt transitie naar klimaatneutraliteit

Bij alle modaliteiten verwachten we een autonome groei van de vervoersvolumes. Omdat die groei een groter beslag legt op schaarse grondstoffen en materialen en schaarse hernieuwbare energie, wordt ook de opgave van klimaatneutraliteit groter. Bovendien vergroot de volumetoename de klimaatimpact van de mobiliteitssector in de periode waarin die nog niet klimaatneutraal is. De

ontwikkeling van de vervoersvolumes wordt beïnvloed door beleidskeuzes op het vlak van onder andere de beprijzing van mobiliteit, infrastructuurbeleid, ruimtelijke keuzes en de structuur van onze economie. De vraag naar mobiliteit kan zeker voor het personenverkeer verschuiven naar duurzamere modaliteiten en daardoor afnemen, bijvoorbeeld door maatregelen die zijn gericht op gedragsverandering, op een beter aanbod van duurzamere modaliteiten en op het gebied van de ruimtelijke ordening. In dit kader is bijvoorbeeld relevant hoe de woningbouwopgave ingevuld gaat worden. De plekken waar gebouwd gaat worden en de bijbehorende infrastructuur bepalen mede hoe de mobiliteit van de toekomstige bewoners eruit ziet. Woningbouw in de stedelijke centra en nabij openbaarvervoersknooppunten kan de bereikbaarheid van een locatie per openbaar vervoer (OV) en fiets verbeteren en mensen zo minder afhankelijk maken van de auto. Beleid gericht op vervoersvolumes en vervoerswijzekeuze kan een belangrijke bijdrage leveren aan de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. Vanwege de verschillende kosten en baten van dit type beleidsmaatregelen, verdient het aanbeveling om nut en noodzaak voor deze maatregelen te beschouwen in een bredere context waarin de verschillende doelen van het mobiliteitsbeleid in ogenschouw worden genomen.

Verduurzaming mobiliteit blijft achter bij rest economie

Uit figuur S.2 blijkt dat de afname van het gebruik van fossiele brandstoffen, en daarmee van de uitstoot van broeikasgassen, in de beide paden naar een klimaatneutrale mobiliteit pas na 2030 versnelt. Dit is mede te verklaren uit de hiervoor geschetste uitdagingen rond bijvoorbeeld de opschaling van het aanbod aan hernieuwbare brandstoffen of de uitrol van de laadinfrastructuur. Het pad naar klimaatneutraliteit bij de mobiliteitssector verloopt hierdoor langzamer dan bij andere sectoren van de economie. Waar de hele Nederlandse economie volgens de Klimaatwet al in 2030 op een broeikasgasreductie van 55 procent moet zitten ten opzichte van 1990, zit de mobiliteitssector in de geschetste paden pas ver in de jaren '30 op dat niveau. Dit betekent dat de verduurzaming in andere sectoren, zoals de energiesector en de industrie, sneller moet verlopen om aan de doelen te voldoen. Deels is dit verklaarbaar omdat in andere sectoren de mogelijkheden om te verduurzamen groter zijn of de kosten daarvan lager. Het koolstofbudget dat binnen de Parijsafspraken tot 2050 beschikbaar is, is echter beperkt. Hierdoor is er voor sectoren die een aanzienlijke bijdrage leveren aan de totale uitstoot van broeikasgassen, zoals de mobiliteit, maar beperkt ruimte om in een langzamer tempo te verduurzamen. Daarbij komt dat een snellere emissiereductie in andere sectoren ook niet voor de hand ligt. Ook daar liggen grote uitdagingen. Dit alles maakt dat het belangrijk is om in de beleidsstrategie voor verduurzaming van de mobiliteit extra aandacht te besteden aan energiebesparing.

Duidelijke keuzes nodig bij verdelingsvraagstukken in de transitie

Draagvlak speelt een belangrijke rol bij de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. In haar beleid kan de overheid het draagvlak voor de noodzakelijke veranderingen en de bijbehorende beleidsinstrumenten vergroten door duidelijk te zijn over de keuzes die zij maakt bij verdelingsvraagstukken in de transitie en door burgers daar actief bij te betrekken. Zo kan zij beter zicht krijgen op welke gevolgen de transitie heeft voor verschillende groepen. De transitie gaat namelijk gepaard met herverdelingseffecten. Zo wordt elektrisch rijden op termijn waarschijnlijk goedkoper dan het rijden met benzine- of dieselauto's. Door prijsdalingen van de technologie en door nieuw beleid om de CO_2-uitstoot van het wegverkeer te beprijzen kunnen die prijsverschillen groter worden. Tegelijkertijd is elektrisch rijden nog niet voor iedereen te betalen. Vooral de lagere inkomensgroepen zijn kwetsbaar voor de effecten van sommige maatregelen om een duurzame mobiliteit te bevorderen, met name als zij gebieden wonen waar de bereikbaarheid per OV en fiets beperkt is en de autoafhankelijkheid dus vaak groot. Om elektrische auto's voor grotere groepen

bereikbaar te maken is een goed functionerende tweedehandsmarkt cruciaal, maar deze is momenteel nog bescheiden in omvang. Bovendien sluit het aanbod van de voertuigmodellen niet altijd goed aan bij de vraag.
Binnen het goederenvervoer lopen kleine bedrijven risico tijdens de transitie, omdat zij minder makkelijk in verduurzaming kunnen investeren en minder flexibel zijn in de inzet van hun vervoersmiddelen. Met haar beleid kan de overheid kwetsbare groepen en bedrijven ondersteunen met gerichte maatregelen.

Beleidsaanbevelingen

Op basis van de voorgaande bevindingen zijn er verschillende uitdagingen te identificeren rond de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit in 2050 die vragen om adaptief beleid. Enerzijds is er behoefte om ver vooruit te kijken om duidelijke doelen te stellen en richting te geven, anderzijds is er nog zo veel onzekerheid over de ontwikkelingen dat ook tijdig bijgestuurd moet kunnen worden in termen van oplossingsrichtingen. Hieronder presenteren we een aantal beleidsaanbevelingen die onderdeel kunnen zijn van een dergelijk adaptieve beleidsstrategie. Deze beleidsaanbevelingen hebben enerzijds betrekking op de opbouw van een nieuwe vloot die gebruik maakt van nieuwe energiedragers en nieuwe (aandrijf)technologieën, en anderzijds op het gebruik en de afbouw van de bestaande vloot. Beide elementen zijn belangrijk voor een succesvolle transitie.

Inzet van duurzame technologie

Klimaatneutrale technologie speelt een centrale rol bij de verduurzaming van de mobiliteit. De uitrol daarvan verdient meer urgentie. Daarbij zijn keuzes nodig over onder andere:

- De ruimte die wordt geboden voor de uitrol van laadinfrastructuur voor het wegverkeer, in het licht van de toenemende netcongestie. Hierbij speelt het volgende een rol:
    - Het maken van slimme koppelingen om de bestaande capaciteit optimaal te benutten;
    - Proactieve investeringen in netverzwaring en slimme netten.;
    - Duidelijkheid voor de sector over wat er op welke termijn mogelijk is. Hiervoor is het nodig om prioriteiten te stellen.
- Een adaptieve strategie die in kan spelen op een mogelijke vertraging van de uitrol van elektrisch vervoer. Dit maakt het mogelijk om alternatieven, wanneer nodig, snel op te kunnen schalen.
- Pilotstudies voor nieuwe technologieën in de scheepvaart (zeevaart en binnenvaart). Deze pilots zorgen ervoor dat Nederlandse reders kunnen voldoen aan de internationale afspraken over verduurzaming en dat de concurrentiepositie van werven en maritieme toeleveranciers wordt versterkt. Lessen uit de pilots kunnen als basis dienen voor de beleidsvorming rond verdere uitrol van duurzame technologie in de scheepvaart.
- Een beleidsstrategie voor de inzet van waterstof voor de mobiliteit op de weg en het water die rekening houdt met de onzekerheid over de rol die deze technologie op termijn kan gaan spelen.

De vraag naar bunkerbrandstoffen voor de lucht- en scheepvaart in Nederland is groot. Het verduurzamen van die vraag brengt grote uitdagingen met zich mee. Tegelijkertijd is het niet evident dat die vraag in Nederland in zijn huidige omvang behouden blijft. Het verdient aanbeveling een visie te ontwikkelen op de rol van deze bunkerbrandstoffen voor de lucht- en scheepvaart in het toekomstige klimaatneutrale energiesysteem en deze visie uit te werken in een beleidsstrategie voor de opschaling van de productie en import van hernieuwbare brandstoffen. Daarbij spelen vraagstukken omtrent:

- De mate waarin Nederland zelfvoorzienend wil zijn in de energievoorziening voor de internationale lucht- en scheepvaart en de mate waarin het afhankelijk wil zijn van import;
- De koppeling met de plannen voor verduurzaming van de industrie en de daarvoor benodigde energiedragers en grondstoffen;
- Het monitoren van de markt voor de productie van duurzamere transportbrandstoffen en het zorgen voor ondersteuning waar dit nodig is om de tijdige beschikbaarheid van deze brandstoffen zeker te stellen.

Verhoging van de energie-efficiëntie van het vervoer kan een relevante bijdrage leveren aan een duurzamer mobiliteitssector. Hoe groot het resterende potentieel is en hoe dat effectief kan worden ontsloten, is echter onzeker. Het verdient aanbeveling het beleid hieromtrent te herijken en te onderzoeken waar daadwerkelijk onontgonnen potentieel zit voor verbetering van de energie-efficiëntie en met welk type beleid dit nationaal te ontsluiten valt.

Internationaal beleid

Een belangrijk deel van het verduurzamingsbeleid voor de mobiliteitssector wordt op internationaal niveau vastgesteld. Nederland kan invloed uitoefenen in de beleidsvormende fase en kan binnen de International Civil Aviation Organization (ICAO) en de Internationale Maritieme Organizatie (IMO) van de Verenigde Naties en binnen de Europese Unie (EU) inzetten op een ambitieus internationaal klimaatbeleid voor mobiliteit. Het ontbreekt op een aantal punten nog aan cruciale wet- en regelgeving waardoor de verduurzaming niet of maar beperkt van de grond komt. Het verdient in dat kader aanbeveling om:

- In samenwerking met gelijkgezinde landen besluitvorming in de IMO en ICAO voor te bereiden rond de verdere uitwerking en implementatie van beleidsinstrumenten voor de lucht- en zeevaart om de recent aangescherpte langetermijndoelen voor het klimaat te vertalen naar concrete maatregelen;
- In internationaal verband een pakket aan beleidsinstrumenten gericht op de lange termijn vast te leggen voor de verduurzaming van de binnenvaart. Daarbij moet er aandacht zijn voor de bijzondere omstandigheden in deze sector, die relatief veel kleine ondernemingen kent met soms beperkte investeringsmogelijkheden;
- In internationaal verband beleid te ontwikkelen voor de klimaateffecten in de luchtvaart die worden veroorzaakt door de uitstoot van waterdamp en stikstofoxiden en de vorming van condenssporen (de niet-CO_2-effecten).

Gedragsverandering

Het mobiliteitsgedrag van burgers en bedrijven wordt mede gestuurd door nationaal beleid. Door de klimaatopgave integraal onderdeel te maken van de beleidsvorming op het gebied van onder andere ruimtelijke ordening, infrastructuur en bereikbaarheid, kan het potentieel van dit type beleidsmaatregelen meer worden benut. In dat kader verdient het aanbeveling om:

- Het doel van klimaatneutraliteit in de mobiliteitsvisie nadrukkelijker te verbinden met andere maatschappelijke opgaven en de opgave daarbij niet enkel als technische exercitie te beschouwen. Daarbij kan worden verkend hoe klimaatneutraliteit past in het licht van andere doelen van het mobiliteitsbeleid rond bijvoorbeeld bereikbaarheid en verkeersveiligheid en kan worden gezocht naar kansen om meerdere doelen tegelijk te dienen;
- Te verkennen hoe de energietransitie interfereert met de huidige beleidsambities op het gebied van een modal shift van het goederenvervoer en de beleidsstrategie daarop te herijken. De transitie kan tot gevolg hebben dat er ladingstromen van het water naar de weg verschuiven, terwijl het huidige beleid juist de omgekeerde verschuiving ambieert;

- De klimaatopgave integraal mee te nemen in de besluitvorming rond de woningbouwopgave door meer systematisch te verkennen hoe keuzes rond deze opgave doorwerken in de verduurzaming van de mobiliteit.

Verdelingseffecten

Door duidelijke keuzes te maken bij de verdeling van de lusten en lasten van de transitie, kan het draagvlak voor de transitie toenemen, evenals de kans dat het pad inderdaad leidt tot klimaatneutraliteit van de mobiliteitssector. Naast beleid dat zich richt op de introductie en verspreiding van nieuwe technologie en duurzame brandstoffen, is ook beleid nodig dat zich richt op de afbouw en ombouw van de bestaande vloot. In dat kader verdient het aanbeveling om:

- In kaart te brengen waar mogelijke ongewenste verdelingseffecten plaats kunnen gaan vinden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan verschillende inkomensgroepen of typen bedrijven, soorten arbeid of regionale verschillen. Het betreft hier verschillen tussen burgers en bedrijven, maar ook tussen verschillende gebruikers binnen een vervoerswijze;
- Een visie te ontwikkelen op de toekomstige beprijzing en betaalbaarheid van mobiliteit, inclusief de verdelingseffecten. Daarbij gaat het erom:
    - De onzekerheid weg te nemen over de manier waarop elektrisch rijden belast wordt;
    - De effecten mee te nemen van nieuw beleid zoals het nieuwe emissiehandelssysteem (ETS-2) en een oplopende verplichting voor de inzet van hernieuwbare energie, maar ook de rol van de huidige fiscale instrumenten (motorrijtuigenbelasting, de belasting van personenauto's en motorrijwielen) en de positie van verschillende typen gebruikers;
    - In te zetten op een goed functionerende tweedehandsmarkt voor elektrische auto’s.

VERDIEPING

VERDIEPING

1 Inleiding

In het Klimaatakkoord van Parijs is afgesproken om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder de twee graden, en daarbij te streven naar maximaal anderhalve graad. Om die reden heeft Nederland in de Klimaatwet vastgelegd uiterlijk in 2050 klimaatneutraal te willen zijn. Ook de Europese Unie (EU) heeft dit doel voor 2050 wettelijk vastgelegd. Dit vereist dat de uitstoot van broeikasgassen in alle delen van de economie veelal tot (nagenoeg) nul moet worden teruggebracht. Dit geldt ook voor de sector mobiliteit. De vraag is echter hoe trajecten naar een klimaatneutrale mobiliteitssector eruit kunnen zien, en welke kansen en uitdagingen die met zich meebrengen.

Mobiliteit is een cruciaal onderdeel van de samenleving: personenvervoer biedt mensen de mogelijkheid om deel te nemen aan de samenleving en door goederenvervoer kunnen grondstoffen, intermediaire goederen en eindproducten terechtkomen op de plekken waar zij nodig zijn. Tegelijkertijd is de sector nu nog grotendeels afhankelijk van fossiele brandstof. Hierdoor was de mobiliteit in Nederland – met een uitstoot van bijna 30 megaton CO_2-equivalenten – in 2022 goed voor circa 19 procent van de totale broeikasgasuitstoot in Nederland (RIVM/Emissieregistratie 2024). Daar komt de uitstoot van de internationale lucht- en scheepvaart vanuit Nederland nog bij: tezamen bijna 46 megaton CO_2 in 2022. Weliswaar wordt tot 2040 een afname verwacht van de emissies, maar duidelijk is dat de mobiliteitssector niet op een pad zit richting klimaatneutraliteit in 2050 (PBL et al. 2022 & 2023a). Het tempo waarin de emissies door deze sector afnemen, blijft bovendien achter bij de andere economische sectoren (PBL et al. 2022). Er is dus een inhaalslag nodig.

Paden richting klimaatneutrale mobiliteit in 2050

In deze studie verkennen het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en TNO verschillende trajecten naar een klimaatneutrale mobiliteit in Nederland in 2050. Klimaatneutrale mobiliteit wil zeggen dat de mobiliteit in en vanuit Nederland in 2050 niet meer bijdraagt aan klimaatverandering. Het doel van dit onderzoek is om te verkennen hoe paden naar klimaatneutraal er voor de mobiliteit in Nederland uit kunnen zien en welke kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven de transitie naar klimaatneutrale mobiliteit met zich meebrengt voor Nederland. De paden naar een klimaatneutrale mobiliteit zijn uitgewerkt voor vier vervoerswijzen: het wegverkeer, de binnenvaart, de zeescheepvaart en de luchtvaart. Voor het spoorvervoer hebben we geen paden uitgewerkt omdat dit al grotendeels elektrisch wordt aangedreven en daardoor nauwelijks bijdraagt aan de uitstoot van broeikasgassen. Wel komt het spoorvervoer aan bod als deeloplossing voor het verduurzamen van het personen- en goederenvervoer.

De paden beschrijven de verwachte ontwikkeling van de energievraag door de mobiliteit in en vanuit Nederland en kijken laten zien hoe aan die vraag kan worden voldaan met (steeds meer) hernieuwbare energie. De paden zijn gebaseerd op eerdere verkenningen waarin PBL, TNO en andere instituten in beeld brengen hoe de mobiliteit in en vanuit Nederland, en de bijbehorende energievraag, zich tot 2050 kan ontwikkelen. Daarnaast hebben we bij het opstellen van de paden gebruik gemaakt van eigen inzichten en recente literatuur over de verschillende technologieën die een rol kunnen spelen bij de verduurzaming van de mobiliteit. Hoe de energievraag door de mobiliteitssector zich gaat ontwikkelen, is onzeker; dat wordt onder andere beïnvloed door maatschappelijke ontwikkelingen en beleidskeuzes. In deze studie verkennen we niet alleen welke technologieën een rol kunnen spelen bij de verduurzaming van de mobiliteit maar ook welke rol het mobiliteitsgedrag en de mede daaruit voortvloeiende ontwikkeling van het vervoersvolume en de *modal split* kunnen

spelen bij de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteitssector. Hoe de paden tot stand zijn gekomen, lichten we toe in hoofdstuk 2.

Samenhang met 'Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050'

De voorliggende studie maakt deel uit van een breder onderzoeksproject van het PBL naar een klimaatneutrale samenleving in Nederland. In de 'Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050' (TVKN) onderzoekt het PBL welke ontwikkelingen in de Nederlandse samenleving nodig zijn om in 2050 klimaatneutraal te zijn en hoe trajecten daarnaartoe eruit kunnen zien (PBL 2024). Daartoe zijn verschillende trajecten uitgewerkt richting een klimaatneutrale samenleving in 2050. In de TVKN vergelijkt het PBL de toekomstige vraag naar hernieuwbare energie in Nederland met het verwachte aanbod van verschillende hernieuwbare energiebronnen. Bij het bepalen van de toekomstige energievraag zijn geen ingrijpende veranderingen in de economische structuur en in de productie en consumptie verondersteld. De nadruk ligt in de TVKN op de technologieën die ingezet kunnen worden om de energievraag te verduurzamen. De toekomstige energievraag is voor vier sectoren in kaart gebracht: de industrie, de gebouwde omgeving, de landbouw, en mobiliteit. In dit rapport (en de bijbehorende rapportages) gaan we in op de toekomstige energievraag van de mobiliteitssector. De andere sectoren komen in andere rapporten aan de orde.

In de TVKN wordt het toekomstige aanbod van hernieuwbare energiebronnen in kaart gebracht in aparte deelrapportages over biogrondstoffen, waterstof en elektriciteit. Met behulp van modelanalyses worden de vraag naar en het aanbod van hernieuwbare energie met elkaar vergeleken. Het resultaat daarvan is een set aan trajecten naar klimaatneutraliteit in 2050. Hieruit ontstaat een beeld van waar vraag en aanbod passen en waar het aanbod van bepaalde energiedragers of andere oplossingen om te verduurzamen zoals CO_2-opslag kan gaan knellen. De TVKN verschijnt in april 2024.

Leeswijzer

Voor ieder van de vier vervoerswijzen hebben we de paden naar klimaatneutraliteit in 2050 uitgewerkt in afzonderlijke rapportages. Daarin gaan we uitgebreid in op de huidige trends en ontwikkelingen van de vervoersvolumes en de uitstoot van broeikasgassen, het beleidskader voor verduurzaming, de hernieuwbare energiedragers en de bijbehorende aandrijftechnologieën die in beeld zijn om de broeikasgasuitstoot te reduceren en de rol die een verbeterde energie-efficiëntie en beleid gericht op de vervoersvolumes (kunnen) spelen voor het pad naar klimaatneutraliteit. Op basis daarvan schetsen we voor iedere vervoerswijze twee paden naar klimaatneutraliteit in 2050 en brengen we bijbehorende uitdagingen en kansen in kaart. Ook verkennen we welke handelingsperspectieven dat oplevert voor verschillende actoren in Nederland. Voor een uitgebreide beschrijving van de aanpak en resultaten per vervoerswijze verwijzen we naar de vier onderliggende rapportages (Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Van Meerkerk et al. 2024; Traa et al. 2024). In deze studie vatten we per vervoerswijze de bevindingen samen, combineren we deze, en trekken we overkoepelende lessen voor de sector mobiliteit als geheel.

In hoofdstuk 2 van deze studie beschrijven we de aanpak en de afbakening van de studie in detail. Hoofdstuk 3 geeft voor ieder van de vier vervoerswijzen een samenvatting van de belangrijkste bevindingen uit de onderliggende rapportages. Vervolgens schetsen we in hoofdstuk 4 de gecombineerde paden naar een klimaatneutrale mobiliteit in 2050. Hoofdstuk 5 gaat over de kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven die daaruit voortvloeien. Ten slotte geven we in hoofdstuk 6 een korte reflectie op de aanpak en de resultaten, en geven we enkele aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

2 Aanpak en afbakening van de studie

In dit hoofdstuk beschrijven we hoe we de paden naar klimaatneutrale mobiliteit in 2050 hebben ontwikkeld (paragraaf 2.1) en hoe we het onderzoek hebben afgebakend (paragraaf 2.2). In paragraaf 2.3 bespreken we verschillende perspectieven op transities, om aan te geven welke aspecten we in deze studie aan bod laten komen.

2.1 Aanpak om tot de paden te komen

De paden naar een klimaatneutrale mobiliteit zijn tot stand gekomen op basis van *backcasting*. We hebben eerst beelden geschetst van hoe een klimaatneutrale mobiliteit er in 2050 kan uitzien, en vervolgens verschillende paden uitgewerkt die daarnaartoe leiden. Dat hebben we gedaan aan de hand van een combinatie van aannames over de ontwikkeling van de vier factoren die de klimaatimpact van mobiliteit bepalen (figuur 2.1), namelijk:[1]

1. Het *vervoersvolume*: het totale volume aan goederen en personen dat wordt vervoerd en de afstand waarover het vervoer plaatsvindt;
2. De *vervoerswijzekeuze*: de vervoerswijzen die worden ingezet voor het vervoer;
3. De *energie-efficiëntie* van het vervoer met de betreffende vervoerswijze (technisch en operationeel); en
4. De *fossiele koolstofinhoud* van de energiedrager.

Figuur 2.1

Drie routes om de klimaatimpact van mobiliteit terug te dringen

Bron: PBL

[1] Deze indeling is ontleend aan Schipper en Marie-Lilliu (1998) en wordt daar aangeduid als de ASIF-methodiek: *Activity, modal Structure, energy Intensity* en *Fuel-to-carbon ratio*.

In lijn hiermee kan het terugdringen van de klimaatimpact van mobiliteit langs vier routes verlopen, namelijk door de vervoersvolumes te beperken, door gebruik van klimaatvriendelijker vervoerswijzen, door de technische en operationele energie-efficiëntie van het vervoer te verbeteren en door energiedragers te gebruiken die een lage of geen fossiele koolstofinhoud hebben. Deze opties worden in de literatuur samengevat in het adagium *Avoid, Shift, Improve* (zie figuur 2.1). *Improve* heeft betrekking op zowel de verbetering van de energie-efficiëntie als het terugbrengen van de fossiele koolstofinhoud van de energiedragers. Alle factoren komen in deze studie aan bod. Mede vanwege de opzet van de 'Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050' (TVKN) doen we dat stapsgewijs:

1. We ramen per vervoerswijze de *business-as-usual*-ontwikkeling van de vervoersvolumes.
2. We ramen per vervoerswijze de ontwikkeling van de energie-efficiëntie van het vervoer als combinatie van technische en operationele factoren.
3. We schetsen twee technologiepaden per vervoerswijze om in de energievraag (resultante van stap 1 en 2) te voorzien met hernieuwbare energiedragers. Deze paden dienen als uitgangspunt voor de analyses van een klimaatneutraal energiesysteem in de TVKN.
4. We verkennen in hoeverre de omvang van de energievraag kan worden beïnvloed door beleid (of andere maatschappelijke ontwikkelingen) dat is gericht op vervoersvolumes, de vervoerswijzekeuze (*modal shift*) en verbetering van de technische of operationele energie-efficiëntie van het vervoer.

De ontwikkeling van de vervoersvolumes (stap 1) hebben we geraamd op basis van de langetermijnscenariostudie Welvaart en Leefomgeving, WLO (CPB & PBL 2015; PBL 2020), aangevuld met inzichten uit de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) van 2022 en 2023 (PBL et al. 2022; 2023a). Deze ramingen geven een beeld van de verwachte trendmatige groei van de mobiliteit, gegeven (trendmatige voorzetting van) het huidige beleid, de huidige gedragsvoorkeuren rond mobiliteit, en de onzekerheid over de ontwikkeling van de economie en de bevolkingsomvang en -samenstelling. Deze onzekerheden leiden tot een bandbreedte voor de groei van het vervoersvolume. De inschattingen voor de verbetering van de energie-efficiëntie van het vervoer in stap 2 zijn gebaseerd op de bij TNO en PBL aanwezige kennis, aangevuld met inzichten uit de literatuur[2]. In combinatie met stap 1 resulteert zo een bandbreedte voor de ontwikkeling van de energievraag per vervoerswijze.

Om tot technologiepaden te komen, hebben we in stap 3 verkend welke hernieuwbare energiedragers en bijbehorende voertuigtechnologieën in beeld zijn als het gaat om de verduurzaming van de betreffende vervoerswijze. We hebben daarvoor in kaart gebracht hoe ver de ontwikkeling van de verschillende technologieën gevorderd is (de marktrijpheid in de vorm van TRL- en CRL-niveaus[3]) en welke uitdagingen gepaard gaan met de verdere ontwikkeling en toepassing daarvan. Dit gaat bijvoorbeeld over aspecten als de veiligheid, kosten en bredere milieu-impacts van de technologie. Op basis hiervan hebben we per vervoerswijze twee technologiepaden uitgewerkt die leiden tot een klimaatneutrale mobiliteit in 2050. De paden zijn schetsmatig van aard, ze zijn niet gebaseerd op nieuwe modelanalyses. Wel hebben we bij het opstellen van de paden rekening gehouden met inzichten uit eerdere verkenningen en scenariostudies zoals de WLO en de KEV over bijvoorbeeld

[2] De hierbij gebruikte bronnen worden beschreven in de onderliggende rapporten per vervoerswijze.

[3] De *technological* en de *commercial readiness levels* (TRL en CRL) beschrijven de technologische en commerciële rijpheid en beschikbaarheid van de technologie. Dit wordt toegelicht in de onderliggende rapportages over de vier vervoerswijzen: Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Van Meerkerk et al. 2024; Traa et al. 2024.

de dynamiek van wagenparken en vloten. De paden zijn gebaseerd op de huidige kennis van en verwachtingen over de ontwikkeling van duurzame alternatieven, de vervangingssnelheden van vloten en wagenparken en kennis over de mechanismen die de ontwikkeling van de mobiliteit bepalen. We houden daarbij rekening met de huidige beleidskaders, die al een zeker emissiereductietempo voorschrijven. De uit stap 3 resulterende technologiepaden dienen als uitgangspunt voor de analyses in de TVKN, waarin geen ingrijpende veranderingen van productie of consumptie worden verondersteld.

Hoe de vervoersvolumes in het personen- en goederenvervoer zich ontwikkelen, hangt samen met beleidskeuzes en maatschappelijke ontwikkelingen. De groei van de vervoersvolumes kan variëren onder invloed van externe factoren zoals bevolkingsgroei of economische groei. Ook beleidskeuzes spelen een belangrijke rol bij de ontwikkeling van het vervoersvolume. Zo kunnen de kosten voor vervoer veranderen door een verplichte inzet van hernieuwbare brandstoffen of door CO_2-beprijzing, en die verandering is van invloed op de vervoersvolumes. Maar ook ruimtelijk beleid en prijsbeleid in de vorm van bijvoorbeeld een kilometerheffing voor mobiliteit spelen een belangrijke rol. Bij een verkenning van paden die naar een klimaatneutrale mobiliteit leiden, is de ontwikkeling van de vervoersvolumes daarom geen gegeven. In aanvulling op de technologiepaden die voortkomen uit stap 3, verkennen we daarom in stap 4 ook de rol die het beleid gericht op vervoersvolumes, energie-efficiëntie en de *modal split* kan spelen bij het terugdringen van de klimaatimpact van mobiliteit. Dit resulteert in een indicatieve inschatting van hoeveel lager de energievraag van mobiliteit hierdoor zou kunnen uitvallen. Deze analyse is gebaseerd op eerder onderzoek van PBL en TNO aangevuld met inzichten uit de literatuur (dit wordt toegelicht in hoofdstuk 5). Omdat stap 4 vooral verkennend van karakter is, hebben we deze inschattingen niet vertaald in nieuwe paden. Ook zijn in deze studie geen integrale scenario's uitgewerkt van radicaal andere vervoerssystemen (en andere wereldbeelden die daaraan ten grondslag kunnen liggen). Het materiaal in deze studie kan wel worden benut om dergelijke beelden verder uit te werken, als basis voor bijvoorbeeld de verdere visievorming voor een toekomstig duurzaam mobiliteitssysteem. In de discussie in hoofdstuk 6 gaan we hier kort op in.

Twee paden naar klimaatneutraliteit per vervoerswijze

We hebben per vervoerswijze twee technologiepaden geschetst: een (technisch) innovatief pad en een (technisch) behoudend pad. In het innovatieve pad ligt de nadruk op het gebruik van nieuwe aandrijftechnologie, waarbij een grote rol is weggelegd voor elektriciteit, waterstof en/of e-brandstoffen.[4] In het behoudende pad ligt de nadruk meer op de bestaande aandrijftechnologie in combinatie met een grotere inzet van biobrandstoffen. Hoe dit uitpakt, varieert per vervoerswijze. Bij wegverkeer speelt nieuwe aandrijftechnologie bijvoorbeeld in beide paden de hoofdrol. Dit lichten we verder toe bij de beschrijving van de paden in hoofdstuk 3.

Bij het uitwerken van de transitiepaden hebben we voor iedere vervoerswijze onderzocht of, en hoe, deze klimaatneutraal kan zijn in 2050, zonder restemissies van broeikasgassen die elders in het energiesysteem gecompenseerd moeten worden. Het is niet gezegd dat iedere vervoerswijze ook daadwerkelijk klimaatneutraal moet zijn in 2050 om tot een klimaatneutrale samenleving te

[4] E-brandstoffen of *e-fuels*, worden geproduceerd uit elektriciteit en koolstof of stikstof. De elektriciteit wordt omgezet in waterstof, die vervolgens wordt gecombineerd met CO_2 of stikstof om synthetische brandstoffen te maken.

komen. Door bijvoorbeeld CO_2 die vrijkomt bij de productie van biobrandstoffen ondergronds op te slaan of door herbebossing kan koolstof uit de atmosfeer worden onttrokken. Deze zogeheten negatieve emissies kunnen worden gebruikt om een zekere restemissie te compenseren en als samenleving netto klimaatneutraal te zijn. De paden voor de vier vervoerswijzen sorteren hier niet op voor. In de TVKN wordt op het niveau van het Nederlandse energiesysteem verkend hoe klimaatneutraliteit in 2050 ingevuld zou kunnen worden, inclusief de mogelijkheden voor CO_2-opslag en het creëren van negatieve emissies om eventuele restemissies elders in het systeem, onder andere bij de sector mobiliteit, te compenseren. Overigens geldt voor de internationale lucht- en zeevaart, die mondiaal opereren, dat ook deze analyse op het niveau van alleen het Nederlandse energiesysteem niet het volledige mondiale perspectief meeneemt. Afwegingen hieromtrent spelen op internationale schaal en vallen daarmee deels buiten de afbakening van de huidige analyse.

2.2 Afbakening van de studie

Deze verkenning richt zich op de mobiliteit in en vanuit Nederland, inclusief de internationale lucht- en scheepvaart. Voor de cijfermatige uitwerking hebben we specifiek gekeken naar de energievraag door de mobiliteitssector in Nederland. Dezelfde afbakening wordt gebruikt in de KEV en in de nationale broeikasgasinventarisatie die Nederland jaarlijks uitbrengt aan de Verenigde Naties (VN) (RIVM 2023). Daarbinnen vallen niet alleen de brandstofleveringen aan de binnenlandse mobiliteit, maar ook de levering van bunkerbrandstoffen aan de internationale lucht- en scheepvaart. In Nederland worden relatief veel bunkerbrandstoffen geleverd aan de lucht- en scheepvaart (zie ook paragraaf 3.1). Voor de analyse van de verduurzaming van het Nederlandse energiesysteem in de TVKN zijn deze bunkerleveringen dus zeer relevant. Daarom gebruiken we ze als cijfermatige basis voor de analyse. Met name voor de zeescheepvaart geldt echter dat er geen directe relatie bestaat tussen de brandstofleveringen in Nederland en de uitstoot van broeikasgassen op vaarten van en naar Nederland. Zeeschepen kunnen grote afstanden afleggen op één tankbeurt. In Nederland wordt veel brandstof gebunkerd door de zeescheepvaart en lang niet al die brandstof wordt gebruikt op vaarten van en naar Nederland (Geilenkirchen et al., 2024). De Nederlandse overheid heeft nog niet besloten welk deel van de uitstoot door de zeevaart tot de nationale beleidsopgave wordt gerekend. Voor de luchtvaart is dat wel helder. In de Luchtvaartnota is vastgelegd dat Nederland verantwoordelijkheid neemt voor alle emissies van vertrekkende vluchten vanuit Nederland. In de praktijk wordt dit emissietotaal benaderd op basis van de afzet van bunkerbrandstoffen aan de luchtvaart in Nederland. Dit is dezelfde afbakening als in deze studie wordt gehanteerd.

Het energiegebruik van vervoersmiddelen en de direct daaruit voortvloeiende uitstoot van broeikasgassen staan centraal in deze studie.[5] Dit zijn de zogeheten *Tank-To-Wheel*-emissies (TTW). Bij mobiliteit gaat het hierbij hoofdzakelijk om de uitstoot van CO_2 bij de verbranding van fossiele brandstoffen. Met name bij de luchtvaart spelen ook andere emissies een wezenlijke rol bij de klimaatimpact van vliegtuigen. Deze emissies zijn ook in de analyse betrokken. Klimaatneutraliteit veronderstelt immers dat de totale klimaatimpact van de mobiliteitssector naar nul gaat. We

[5] Daarbij wordt de CO_2-uitstoot uit verbranding van biobrandstoffen niet meegerekend, conform de huidige afspraken binnen het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Biobrandstoffen worden in deze studie als klimaatneutraal beschouwd. Voor een beschouwing van de duurzaamheidsaspecten rond gebruik van biogrondstoffen verwijzen we naar eerdere onderzoeken en adviezen (zie bijvoorbeeld Strengers & Elzenga 2020; SER 2020).

verkennen daarom ook hoe de zogeheten niet-CO_2-klimaatimpact van de luchtvaart kan worden gereduceerd. Ook bij de productie van de energiedragers en de vervoersmiddelen komen broeikasgassen vrij. Om klimaatneutraliteit te realiseren moeten deze zogeheten *Well-to-Tank*-emissies (WTT) eveneens worden teruggedrongen of gecompenseerd. Deze ketenemissies vallen buiten de reikwijdte van deze verkenning. In de TVKN besteedt het PBL hier wel aandacht aan, althans voor zover deze emissies in Nederland plaatsvinden. Voor een overzicht van de totale energieketens voor klimaatneutrale mobiliteit verwijzen we naar onderzoek van het KiM (2022a).

Ruimtelijke implicaties van paden niet in beeld gebracht

De transitie naar een klimaatneutrale samenleving kan grote gevolgen hebben voor de ruimtelijke inrichting van Nederland. Hierbij gaat het niet alleen om andere locaties voor de opwekking van energie of veranderingen van voertuigtechnologieën die ruimtelijke implicaties met zich meebrengen, zoals de benodigde laadpalen voor elektrisch vervoer, maar ook om veranderingen in het gehele mobiliteitssysteem, de algehele energievoorziening en de stedelijke inrichting. De ruimtelijke implicaties van de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit vallen buiten deze studie. Deze implicaties moeten in samenhang worden beschouwd met de bredere (ruimtelijke) implicaties van de transitie naar een klimaatneutrale samenleving en ook in relatie tot andere ruimtelijke opgaven. De Ruimtelijke Verkenning 2023 (PBL 2023a) biedt daarvoor een basis. Voor een analyse van het ruimtegebruik dat nodig is om hernieuwbare energie voor mobiliteit op te wekken, verwijzen we naar onderzoek van het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM 2022a). Wel verkennen we hier de potentiële rol die de ruimtelijke inrichting speelt bij het verduurzamen van ons mobiliteitsgedrag (paragraaf 5.4).

Klimaatneutraliteit in 2050 is een belangrijke stap om te voldoen aan Parijsdoelen

In deze verkenning redeneren we vanuit het nationale en Europese doel van een klimaatneutrale samenleving dat uiterlijk in 2050 moet zijn bereikt. In het licht van de klimaatafspraken van Parijs is 2050 een tussenstap bij het beperken van de opwarming van de aarde. Het pad naar een klimaatneutrale situatie en de ontwikkeling daarna bepalen of de doelen van Parijs worden gehaald, niet het emissieniveau in 2050. Het tempo van de emissiereductie tot 2050 (en daarna), en daarmee de cumulatieve uitstoot van broeikasgassen, is daarbij cruciaal. De vraag welke uitstootreductie nodig is in de EU en in Nederland om aan de Parijsafspraken te voldoen, valt buiten de reikwijdte van deze studie.[6] Wel verkennen we hoe snel de sector mobiliteit klimaatneutraal kan worden en welke factoren daarop van invloed zijn. Vanuit praktisch oogpunt werken we niet met koolstofbudgetten (waarmee wordt gekeken wat tot 2050 de totale uitstoot van de mobiliteit nog mag zijn om binnen de Parijsafspraken te blijven). Deze kunnen wel onderwerp zijn van vervolgonderzoek. De vraag hoe de broeikasgasuitstoot door de mobiliteitssector zich na 2050 moet ontwikkelen om binnen de Parijsafspraken te blijven, valt eveneens buiten de reikwijdte van deze studie. Het is mogelijk dat niet alle vervoerswijzen in 2050 al klimaatneutraal zijn, dat de uitrol van bepaalde klimaatneutrale technologieën nog gaande is of dat de toepassing van bepaalde technologieën pas in de decennia na 2050 kansrijk wordt (bijvoorbeeld batterij-elektrisch vliegen). Waar relevant lichten we dit toe. De paden gaan echter niet verder dan 2050 en gaan uit van klimaatneutraliteit in dat jaar.

[6] In PBL (2021) wordt hier wel op gereflecteerd. Ook recente adviezen van de Europese wetenschappelijke adviesraad voor klimaatverandering (ESABCC 2023) en van de Nederlandse klimaatraad (WKR 2023) gaan hier op in.

Ten slotte hebben we bij het opstellen van de paden voor mobiliteit impliciet verondersteld dat ook de rest van de wereld op een pad zit dat in lijn is met de Parijsafspraken. Dit pad is niet expliciet bepaald, maar impliciet gaan we ervan uit dat de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit in Nederland niet tot grote uitwijkeffecten leidt naar de omringende landen. Iedereen doet mee.

2.3 Verschillende perspectieven op transities

De overstap naar een klimaatneutrale mobiliteit en breder naar een klimaatneutrale samenleving vereist een transitie van het energie- en mobiliteitssysteem. Klimaatneutrale technologie speelt daarbij een centrale rol. Maar de energietransitie is meer dan een verandering van de in de samenleving gebruikte technologieën. Loorbach et al. (2017: 601) beschrijven de transitie als een machtsstrijd en een socio-culturele verandering die vergaande impact heeft op bestaande instituties, routines en overtuigingen. De klimaatopgave vraagt om een verandering van de dominante manier van denken en doen, in het beleid en in de samenleving. De overheid en het (klimaat)beleid dat zij ontwikkelt, spelen een cruciale rol bij de maatschappelijke transformatie die hiervoor nodig is (Nabielek et al. 2023). In deze studie verkennen we handelingsperspectieven voor het beleid en voor andere actoren om te komen tot de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. Om voor deze transitie effectief beleid te kunnen formuleren, is het van belang te begrijpen hoe transities tot stand komen en hoe deze kunnen worden beïnvloed. Er zijn in de loop van de tijd verschillende perspectieven rond transities ontwikkeld (Loorbach et al. 2017). In dit hoofdstuk introduceren we de theorie van transitiemanagement en innovatiesystemen, als kader voor deze studie. Het perspectief van transitiemanagement (Rotmans et al. 2001) geeft een kader voor het maken van beleid en voor de dynamieken van opbouw en afbraak die centraal staat tijdens een transitie. Om te laten zien hoe de overheid de bijbehorende technologische en systeemontwikkelingen kan stimuleren en faciliteren, introduceren we vervolgens de rol en werking van innovatiesystemen.

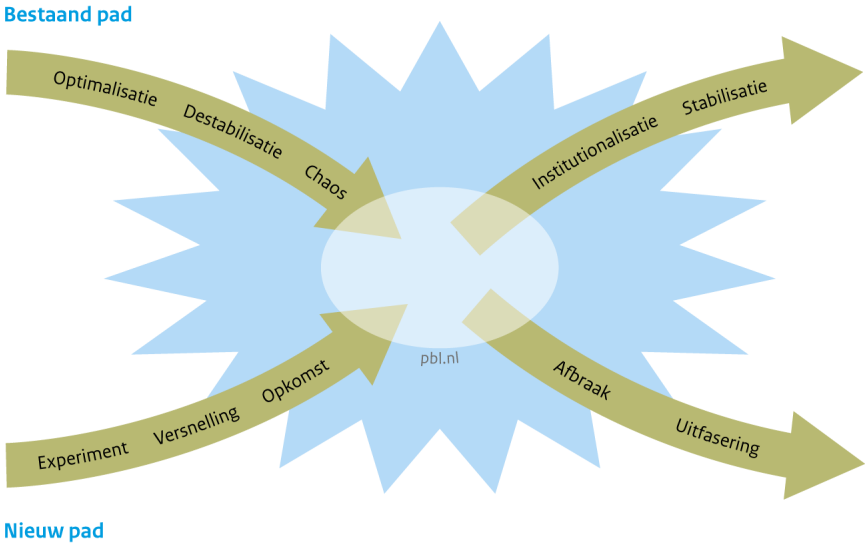
Sturen van transities met aandacht voor opbouw en afbraak

Het huidige systeem van vervoersmiddelen die voor het overgrote deel door fossiele brandstoffen worden aangedreven, staat steeds meer onder druk door de noodzaak om klimaatverandering tegen te gaan. Het tegengaan van klimaatverandering vereist een overstap naar duurzame alternatieven. Niet alleen technologische innovaties spelen een rol bij die transitie, ook veranderingen van economische patronen, ruimtelijke indeling, mobiliteitsgedrag en sociale verhoudingen (Kunseler & Dammers 2023). We beschrijven daarom in deze studie niet alleen de technologieën die een rol spelen bij de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit, maar verkennen ook de rol van prijseffecten, ruimtelijke inrichting, sociale normen en gedragsverandering daarbij.

Transities laten zich niet direct sturen en de snelheid van een transitie laat zich niet goed voorspellen, maar transities zijn wel degelijk te beïnvloeden door beleid en andere actoren in termen van richting en snelheid (transitiemanagement). Zo hebben visie, maatschappelijke urgentie, ondernemerschap en strategische beleidsinterventies een potentieel grote invloed op het verloop van een transitie (Bode et al. 2019). Een visie op de toekomst zorgt ervoor dat actoren effectiever kunnen werken aan de transitie, innovatie kunnen aanjagen en nieuwe doelen kunnen stellen. De *backcasting*-aanpak die we in deze studie hebben gekozen, kan bijdragen aan het vormen van zo'n visie. Het is voor de transitie van belang om (ver) vooruit te kijken, maar ook om tijdens het proces te reflecteren en zo bij te kunnen sturen en kansen te benutten die zich tijdens de transitie voordoen (Loorbach et al. 2017).

Figuur 2.2

Omgekeerde x-curve als uitdrukking van de dynamiek van transities



Bron: Loorbach et al. 2017; bewerking PBL

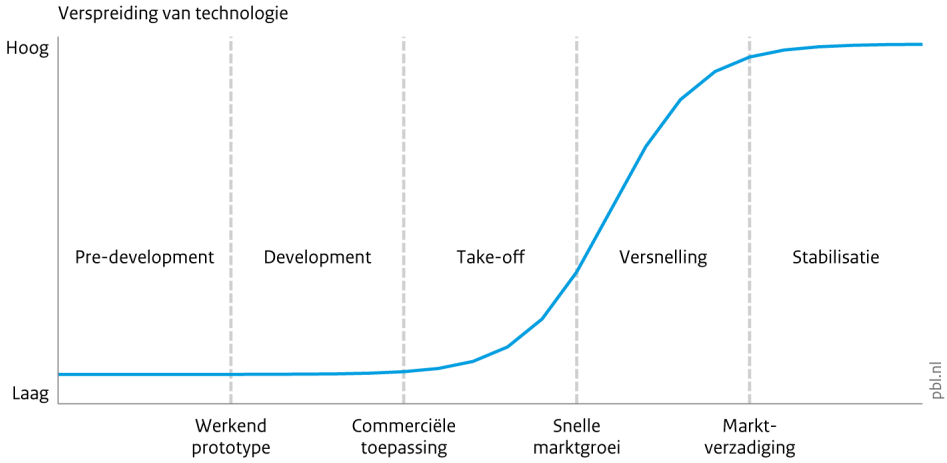
Transitiesturing betekent in de praktijk onder andere het stimuleren van innovaties, het versnellen van opkomende niches, het opvoeren van veranderdruk op dominante regimes en het anticiperen op processen van uitfaseren (Bode et al. 2019). In de transitie staat namelijk niet alleen de opbouw van het 'nieuwe' centraal, maar ook de afbouw of ombouw van het bestaande (Hebinck et al. 2021). Dit is weer te geven in een X-curve, waarin de verschillende fases van opbouw en afbouw te zien zijn (zie figuur 2.2). In het proces van opbouw (het 'nieuwe' pad in figuur 2.2) vinden innovaties plaats die zich ontwikkelen van experimenten tot een brede toepassing daarvan. Uiteindelijk leidt dit tot een verandering van de gevestigde orde en stabilisatie van een nieuw regime. Tegelijkertijd vindt een proces van afbraak plaats (het 'bestaande' pad in figuur 2.2). Voordat de transitie plaatsvindt, wordt er vooral geïnvesteerd in optimalisatie van het bestaande. Wanneer de druk op het regime toeneemt, kan dit leiden tot destabilisatie van het systeem. De transitie bereikt een keerpunt wanneer bestaande instituties en organisaties worden afgebroken, wat uiteindelijk leidt tot het uitfaseren van (delen van) het bestaande regime.

De transitie naar klimaatneutraal is gebaat bij goed functionerende innovatiesystemen

Klimaatneutrale technologie speelt een cruciale rol bij de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. De onderliggende rapportages over de vier vervoerswijzen (Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Van Meerkerk et al. 2024; Traa et al. 2024) bevatten daarom een uitgebreide analyse van de verschillende technologieën die in beeld zijn bij verduurzaming, inclusief inzichten over de kosten en rijpheid van de technologie en de toepasbaarheid en milieu-impacts ervan. Hiermee ontstaat een beeld van welke technologieën kansrijk zijn in de transitie naar klimaatneutraliteit en welke uitdagingen gepaard gaan met de ontwikkeling en toepassing van die technologieën. Om hier vervolgens beleid aan te koppelen, kan de transitie bekeken worden vanuit het perspectief van technologische innovatiesystemen (Hekkert et al. 2007). Volgens deze benadering is een aantal sleutelprocessen van belang voor de ontwikkeling van een technologie. Zo is er voldoende kennisontwikkeling en -uitwisseling nodig, moeten ondernemers met de nieuwe technologie gaan experimenteren en moeten er nieuwe markten worden gecreëerd. Verder zijn er voldoende middelen nodig om dit te realiseren en moet er aandacht zijn voor de legitimiteit van de oplossingen.

Figuur 2.3

Fases in ontwikkeling van een innovatie



Bron: Chappin et al. 2018; bewerking PBL

Beleid kan de sleutelprocessen voor de ontwikkeling van nieuwe technologie faciliteren. Waar het zwaartepunt van het beleid moet liggen, hangt af van de fase waarin de technologieontwikkeling zich bevindt. De ontwikkeling van een technologie, voor zover deze succesvol blijkt, volgt een S-curve en doorloopt achtereenvolgens de fases *pre-development*, *development*, *take-off*, *versnelling* en *stabilisatie* (zie figuur 2.3). Chappin et al. (2018) laat zien welke sleutelprocessen in elke fase een rol spelen en welk beleid deze processen kan faciliteren. Voordat er een werkend prototype van de technologie is (*pre-development*), ligt de nadruk op kennisontwikkeling en de ondersteuning daarvan. De overheid kan er in deze fase voor zorgen dat voldoende middelen voor onderzoek beschikbaar zijn vanuit geldverstrekkende instanties zoals NWO en zij kan richting geven door doelen te stellen. De technologieën die we in deze studie verkennen, zijn deze *pre-development*-fase veelal al voorbij.

Als er een prototype is, komt de technologie in de *development*-fase en zijn vooral ondernemers aan zet om de technologie klaar te maken voor de markt. Zij doen dat door te experimenteren met de technologie, bijvoorbeeld door pilottoepassingen te realiseren. Hiervoor is doorlopend onderzoek nodig en interactie tussen onderzoekers en ondernemingen. Daarnaast moet er richting gegeven worden, zodat meer ondernemers inzetten op de technologie. De overheid heeft in deze fase een rol om richting te geven door de technologie te stimuleren, om de experimenten van ondernemers met subsidie te ondersteunen, om de interactie tussen de stakeholders te faciliteren en om een beschermde (niche)markt te creëren door bijvoorbeeld belastingvoordelen of standaarden. Als de technologie op zichzelf in de markt kan staan (*take-off*), is het aan ondernemers om de markt te veroveren. Op dit punt wordt het van belang om de weerstand van de gevestigde belangen te doorbreken. De overheid kan de gevestigde technologieën minder aantrekkelijk maken door deze bijvoorbeeld te beprijzen of door subsidies ervoor af te schaffen en tegelijkertijd naar manieren te zoeken om maatschappelijk draagvlak (legitimiteit) te creëren voor de nieuwe technologie (zie ook paragraaf 5.5). Wanneer er voldoende draagvlak is voor een technologie, kunnen de nodige veranderingen in wet- en regelgeving worden doorgevoerd. De nieuwe technologie kan hierdoor de markt verder veroveren in de *versnellingsfase*, waardoor stimuleringsregelingen kunnen worden afgebouwd.

De laatste jaren is het concept van een innovatiesysteem verder ontwikkeld in de richting van een missiegedreven innovatiesysteem (Elzinga et al. 2023; Hekkert et al. 2020). Dit perspectief kijkt niet

alleen naar hoe technologie kan bijdragen aan de transitie, maar ook breder naar andere maatschappelijke oplossingen. Naast nieuwe technologieën is het voor de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit ook van belang te kijken naar maatschappelijke oplossingen die de vervoersvolumes kunnen verkleinen of kunnen verschuiven naar duurzamere vervoerswijzen (zie paragraaf 5.4). Ook moet er aandacht zijn voor de afbouw van het oude systeem. In deze studie kijken we met name naar technologie en verkennen we andere oplossingen. Een onderwerp voor vervolgonderzoek kan zijn om de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit expliciet te bekijken vanuit het perspectief van een missiegedreven innovatiesysteem. En vandaaruit te analyseren welke technologische en niet-technologische oplossingen er aandacht krijgen, in welke fase van de transitie deze zitten, welke actoren een rol spelen en wat de verschillende oplossingen belemmert of juist in staat stelt om bij te dragen aan de missie (Elzinga et al. 2023)

3 Trajcten per vervoerswijze

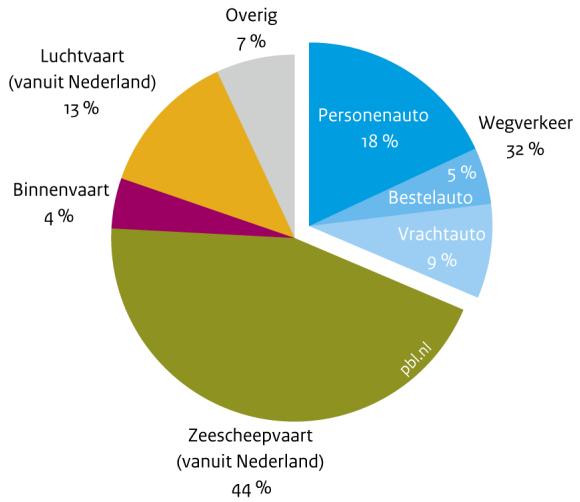
In dit hoofdstuk presenteren we de paden naar een klimaatneutrale mobiliteit in 2050 die in de vier onderliggende rapportages zijn uitgewerkt. In paragraaf 3.1 schetsen we eerst een beeld van de huidige uitstoot van broeikasgassen door de mobiliteitssector. Vervolgens beschrijven we voor ieder van de vier vervoerswijzen kort hoe de paden naar klimaatneutraliteit in 2050 eruit zien en welke uitdagingen deze met zich meebrengen (paragrafen 3.2 tot en met 3.5). In hoofdstuk 5 gaan we uitgebreider in op de kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven die voortvloeien uit de paden naar een klimaatneutrale mobiliteit. Voor een uitgebreide beschrijving per vervoerswijze verwijzen we naar de onderliggende rapportages (Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Van Meerkerk et al. 2024; Traa et al. 2024). Deze bevatten ook een overzicht van de uitgangspunten die zijn gehanteerd bij het opstellen van de paden en de gehanteerde bronnen.

3.1 Huidige uitstoot van broeikasgassen

In 2022 was de binnenlandse mobiliteit goed voor bijna 30 megaton aan broeikasgassen, circa 19 procent van de totale broeikasgasuitstoot in Nederland (RIVM/Emissieregistratie 2024). De internationale lucht- en zeescheepvaart vanuit Nederland nam in 2022 bijna 46 megaton CO_2-equivalenten voor zijn rekening. Binnen de totale uitstoot van de mobiliteit in en vanuit Nederland was de zeescheepvaart, met een aandeel van 44 procent, de grootste emissiebron (figuur 3.1). Zoals is toegelicht in paragraaf 2.2, is de uitstoot van de zeescheepvaart niet alleen gerelateerd aan vaarten van en naar Nederland. Het hoge aandeel van deze vervoerswijze hangt samen met de belangrijke rol die met name de Rotterdamse haven speelt in de mondiale bunkermarkt.

Figuur 3.1

Aandeel van vervoerswijzen in uitstoot van broeikasgassen door mobiliteit in Nederland, 2022



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024

De categorie 'overig' bevat mobiele werktuigen, de visserij, recreatievaartuigen, het diesel-aangedreven railvervoer, de militaire lucht- en scheepvaart en de voertuigtypen binnen het wegverkeer waarvoor geen trajecten zijn opgesteld naar klimaatneutraal vanwege hun geringe bijdrage aan de uitstoot, namelijk bussen, motorfietsen en brom- en snorfietsen.

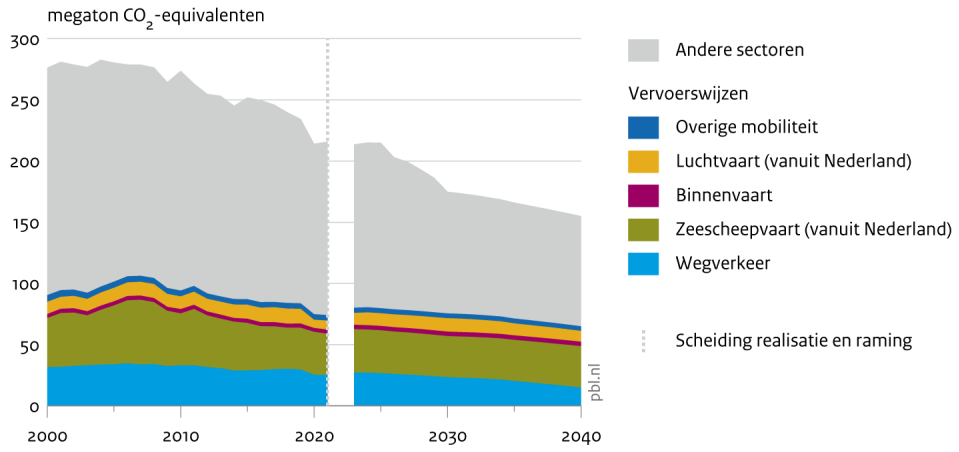
Het wegverkeer was in 2022 goed voor ongeveer een derde van de uitstoot, waaraan personenauto's en vrachtvoertuigen de grootste bijdrage leverden (figuur 3.1). De luchtvaart had een aandeel van 13 procent in de uitstoot (exclusief de niet-CO_2-klimaateffecten; zie hiervoor paragraaf 3.3), en de binnenvaart was goed voor 4 procent. De categorie 'overig' bevat naast de voertuigcategorieën binnen het wegverkeer die niet in de onderliggende rapportage worden behandeld ook een aantal specifieke emissiebronnen die in het klimaatbeleid tot de sector mobiliteit worden gerekend, zoals mobiele werktuigen en de visserij. Deze bronnen vallen buiten de reikwijdte van deze studie.

Het energiegebruik van de binnenlandse mobiliteit en de internationale lucht- en scheepvaart bestaat momenteel voor het overgrote deel uit fossiele brandstoffen. In 2022 hadden fossiele brandstoffen een aandeel van 92 procent in het energiegebruik van de binnenlandse mobiliteit. Van het resterende energiegebruik kwam 7 procent uit biobrandstoffen en 1 procent uit elektriciteit. Bij de internationale lucht- en scheepvaart vanuit Nederland werd in 2022 3 procent van de energievraag door biobrandstoffen geleverd. De rest van de bunkervraag bestond uit fossiele brandstoffen.

De uitstoot van broeikasgassen in Nederland is de afgelopen jaren gestaag afgenomen (figuur 3.2). In 2021[7] lag de uitstoot 22 procent lager dan in 2000. De industrie en de elektriciteitssector leverden de grootste bijdrage aan deze dalende trend. In diezelfde periode daalde de uitstoot door de binnenlandse mobiliteit met 20 procent en die door de internationale lucht- en scheepvaart vanuit Nederland met 17 procent. De afname bij de binnenlandse mobiliteit is het gevolg van een groeiende inzet van biobrandstoffen, een efficiënter wordend wagenpark, een toenemend aantal elektrische auto's en grenseffecten in het tankgedrag van transporteurs. De afname bij de bunkerbrandstoffen komt hoofdzakelijk door wijzigingen in de bunkermarkt (PBL et al. 2022). Figuur 3.2 laat zien dat de mobiliteit in en vanuit Nederland volgens de ramingen uit de KEV2022 nog niet op een pad zit naar klimaatneutraal in 2050.

Figuur 3.2

Uitstoot van broeikasgassen in Nederland



Bron: PBL et al. 2022

[7] In figuur 3.2 staan de historische en geraamde broeikasgasemissies volgens de KEV 2022. De realisatiecijfers lopen daarin tot en met 2021.

3.2 Paden naar klimaatneutraal wegverkeer

Het tegengaan van klimaatverandering is momenteel een belangrijke drijfveer voor veranderingen in het wegverkeer.[8] Het nieuwe Europese beleidskader voor de verduurzaming van het wegverkeer, waaronder de aangescherpte voertuignormen die de verkoop van nulemissievoertuigen afdwingen, zet grote stappen richting een duurzamer wagenpark. Ten opzichte van de andere vervoerswijzen onderscheidt het wegverkeer zich in de grootte van de vloot en het grote aantal gebruikers – die veelal zelf eigenaar zijn van de vervoersmiddelen –, de variatie in de toepassingsgebieden en daardoor in het gebruik en het grote aantal belanghebbenden.

Batterij-elektrische aandrijving wordt dominante oplossing

In beide paden naar een klimaatneutraal wegverkeer in 2050 speelt batterij-elektrische aandrijving de hoofdrol (figuur 3.3). Batterij-elektrische aandrijving wordt zeer waarschijnlijk de belangrijkste aandrijftechnologie in de transitie naar klimaatneutraliteit in het wegverkeer. Dit geldt zowel voor het lichte (personen- en bestelauto's) als voor het zware wegverkeer (vrachtauto's en bussen).

Bij personenauto's is het toekomstbeeld ten aanzien van aandrijftechnologieën al ver uitgekristalliseerd en maken elektrische auto's al een wezenlijk deel uit van de nieuwverkopen. Bij zware vrachtvoertuigen is nog minder goed duidelijk welke rol verschillende aandrijftechnologieën kunnen gaan spelen. Ook voor vrachtverkeer lijkt batterij-elektrische aandrijving een kansrijke oplossing voor verduurzaming. Een beperkt deel van het zware vrachtverkeer is echter zo energie-intensief dat gebruik van batterij-elektrische aandrijving ook op langere termijn waarschijnlijk geen optie is zonder de dagelijkse inzet van de voertuigen aan te passen. Voor deze groep is een andere oplossing nodig om te verduurzamen, zoals:

- Alternatieve laadtechnologieën, zoals batterijwisselstations of *electric road systems*, waarbij batterij-elektrische vrachtauto's tijdens het rijden van energie worden voorzien via een bovenleiding of via inductief laden;
- Gebruik van andere energiedragers zoals waterstof, biobrandstoffen of e-brandstoffen;
- Logistieke aanpassingen, door bijvoorbeeld ritten aan te passen waardoor ze wel kunnen worden gereden met elektrische voertuigen, of door modal shift.

Het aantal voertuigen en de periode waarvoor een andere oplossing nodig is, hangt niet alleen samen met de ontwikkeling van de batterijtechnologie, maar ook met het uitroltempo van de laadinfrastructuur voor zwaar verkeer (momenteel een knelpunt) en de beschikbaarheid van de voor de voertuigen benodigde materialen en grondstoffen. Wanneer deze uitdagingen rond batterij-elektrische aandrijving voor het vrachtverkeer tijdelijk van aard zijn, lijkt de inzet van hernieuwbare brandstoffen (biobrandstoffen en/of e-brandstoffen) een logisch alternatief om in de tussentijd de klimaatimpact te beperken. Hiervoor zijn geen investeringen nodig in nieuwe tankinfrastructuur en voertuigtechnologie.

Wanneer de uitdagingen structureel van aard blijken, is het gebruik van waterstof een optie. De hiervoor benodigde waterstof-tankinfrastructuur kan alleen worden opgebouwd als er zicht is op

[8] De analyse beperkt zich tot het personenauto-, bestel- en vrachtverkeer. Bussen, motorfietsen en brom- en snorfietsen zijn niet meegenomen vanwege hun kleine bijdrage aan de uitstoot van broeikasgassen door het wegverkeer (PBL et al. 2022).

een langdurige gebruiksperiode. Op korte termijn zou waterstof al kunnen worden gebruikt in verbrandingsmotoren aangezien dit een volwassen technologie is. Op langere termijn kan waterstof ook worden gebruikt in een brandstofcel zonder uitlaatemissies. Het is onzeker of de kostprijs van waterstof (inclusief infrastructuurkosten) en brandstofcelvoertuigen ver genoeg kan dalen om deze aantrekkelijk te maken voor gebruikers en dus of waterstofaandrijving een wezenlijke rol gaat spelen in de verduurzaming van het wegverkeer.
Om de opschaling van alternatieve technologieën voor batterij-elektrische aandrijving snel te kunnen realiseren indien die wel nodig blijken, is het zaak om de technologieontwikkeling en bijbehorende randvoorwaarden rond bijvoorbeeld de tankinfrastructuur verder te verkennen en te ontwikkelen. In het geval van structurele uitdagingen voor de grootschalige inzet van batterij-elektrische aandrijving kunnen naast inzet van waterstof ook logistieke aanpassingen en alternatieve laadtechnologieën zoals '*electric road systems*' een deel van de oplossing vormen. De haalbaarheid van dergelijke laadtechnologieën wordt op verschillende plaatsen in pilots onderzocht maar is vooralsnog zeer onzeker.

Paden verschillen in tempo van elektrificatie

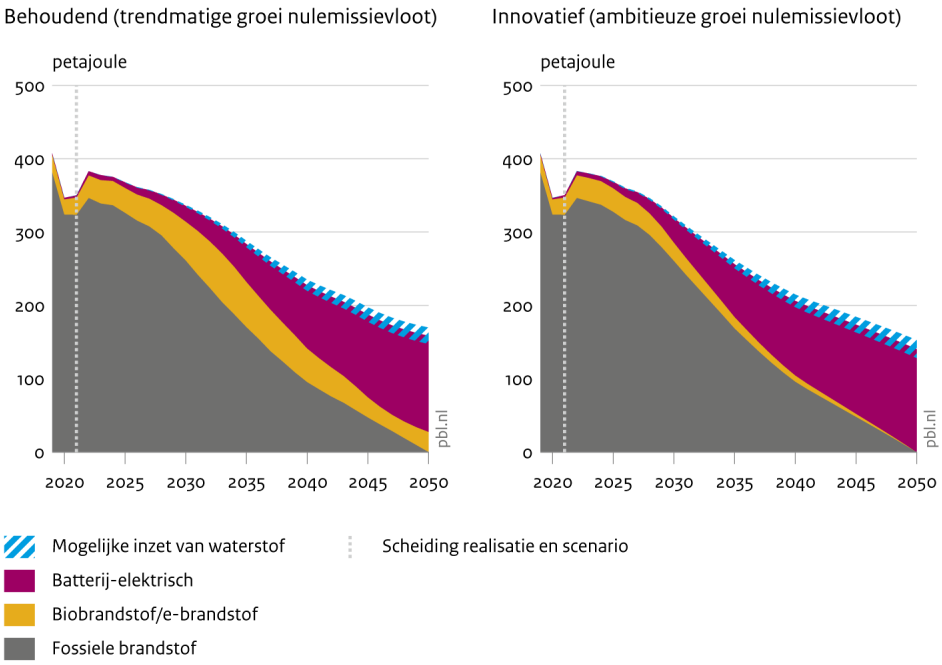
De paden naar klimaatneutraal wegverkeer in 2050 (figuur 3.3) verschillen in het moment waarop alle nieuwe voertuigen nulemissie zijn aan de uitlaat en het tempo waarin deze nulemissievoertuigen tot het wagenpark gaan behoren. In het innovatieve pad wordt een ambitieuze groei van de nulemissievloot verondersteld en wordt toegewerkt naar een beeld waarin het hele autopark in 2050 nulemissie is. Hiervoor is verondersteld dat alle nieuwe personenauto's vanaf 2030 batterij-elektrisch zijn, in lijn met de ambitie van de kabinetten-Rutte III en IV rondom nulemissie voertuigen. Voor het zware wegverkeer is verondersteld dat alle nieuwe voertuigen rond 2037 nulemissie zijn. Vanwege de hiervoor beschreven onzekerheid over de rol die batterij-elektrische aandrijving kan spelen in de verduurzaming van het zware vrachtverkeer, is voor beide paden een variant uitgewerkt waarin alle nulemissievoertuigen batterij-elektrisch zijn en een variant waarbij 20% van de nulemissie trekker-opleggers rijdt op waterstof. Om een volledige vloot nulemissievoertuigen te realiseren in 2050 is verondersteld dat ruim 1 miljoen personen- en bestelauto's en 15.000 vrachtwagens met verbrandingsmotoren in de jaren voor 2050 versneld worden vervangen door gerichte stimuleringsmaatregelen. Deze maatregelen zijn niet nader uitgewerkt.

In het behoudende pad gaat de instroom van nulemissievoertuigen minder snel. Dit pad is voor het lichte wegverkeer gebaseerd op het huidige EU-beleid en de huidige vervangingssnelheden van de vloot. Dit houdt in dat het marktaandeel van batterij-elektrische personen- en bestelvoertuigen vanaf 2035 op 100 procent ligt. Voor zwaar wegverkeer is verondersteld dat vanaf 2040 alle nieuwe voertuigen nulemissie zijn aan de uitlaat. Dit is ambitieuzer dan het huidige EU-beleid waarin een aandeel van 90 procent wordt vereist. Dit hogere aandeel komt overeen met de ambities van de rijksoverheid (IenW 2023b). Net als in het innovatieve pad is er een variant verkend waarin alle nulemissievrachtwagens batterij-elektrische zijn en een variant waarin 20% van de nulemissievrachtwagens rijden op waterstof.
Uitgaande van het huidige tempo van vlootverjonging resulteert bij deze aannames in 2050 een grotendeels maar niet volledig emissievrij wagenpark. Met name bij het vrachtverkeer is nog een wezenlijk deel van de vloot (circa 10 procent) niet emissievrij. In dit behoudende pad veronderstellen we dat het resterende deel van de vloot gebruikmaakt van biobrandstoffen of e-brandstoffen om klimaatneutraliteit te bereiken.

Figuur 3.3

Trajecten richting klimaatneutraal wegverkeer

Energievraag van wegverkeer in Nederland



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2022 (realisatie); PBL & TNO (scenario)

Voor beiden paden is een variant uitgewerkt waarin 100% van de zware nulemissie-vrachtwagens batterij-elektrisch wordt aangedreven en een variant waarin dit 80% is en daarnaast 20% rijdt op waterstof. De waterstofbehoefte is daarom gearceerd weergegeven.

Autonome groei verkeersvolumes, energievraag daalt door andere energiemix

Zonder grote wijzigingen in het beleid of het gedrag nemen de vervoersvolumes in het wegverkeer tot 2050 naar verwachting toe. De mate waarin is echter onzeker; deze hangt mede samen met de ontwikkeling van de bevolking en de economie. Het groeitempo hangt ook samen met de snelheid van de energietransitie en beleidskeuzes. Onder het huidige belastingsysteem is het aannemelijk dat elektrische voertuigen op termijn goedkoper worden in gebruik dan voertuigen die op fossiele brandstoffen rijden. Dit komt mede doordat de belasting op elektriciteit lager is dan die op fossiele brandstoffen. Lagere kosten voor autogebruik resulteren echter in een hoger aantal autokilometers. De omvang van dit zogeheten *reboundeffect* is onzeker. Uit onderzoek onder diesel- en benzinerijders blijkt dat dit effect kan oplopen tot bijna 30 procent. Wel lijkt het effect af te nemen over de tijd.

De transitie naar elektrisch rijden kan de autonome groei van het autogebruik dus versterken. In hoeverre er *reboundeffecten* optreden, hangt samen met de beleidskeuzes rond de belasting van de verschillende energiedragers (in relatie tot het nieuwe emissiehandelssysteem (ETS) voor het wegverkeer), voertuigen en de mogelijke invoering van de heffing Betalen naar Gebruik. Met prijsbeleid en andersoortige maatregelen kan de overheid de toename van de verkeersvolumes beïnvloeden. Dit lichten we verder toe in paragraaf 5.4. De energievraag van het wegverkeer halveert naar verwachting tot 2050 (figuur 3.3) door het veel hogere energierendement van elektrische voertuigen.

Uitdagingen voor klimaatneutraal wegverkeer

De transitie naar een klimaatneutraal wegverkeer kent een aantal belangrijke uitdagingen. Deze worden uitgebreid toegelicht in de onderliggende rapportage (Van Meerkerk et al. 2024) en hier op hoofdlijnen samengevat:

- De tijdige uitrol van laad- en tankinfrastructuur, inclusief de daarvoor benodigde capaciteit op het elektriciteitsnetwerk, is een cruciale en uitdagende randvoorwaarde voor de verduurzaming van het wegverkeer. Door knelpunten op het elektriciteitsnet dreigt vertraging van de transitie. Het is cruciaal om in de transitie naar elektrisch rijden deze knelpunten aan te pakken. Ook de tijdige uitrol van tankinfrastructuur voor waterstof kan een uitdaging zijn, omdat de uitrolsnelheid dient te worden afgestemd op een onzekere ingroeisnelheid van waterstofvrachtwagens.
- De energietransitie leidt tot een sterk toenemende vraag naar kritieke grondstoffen, onder andere voor de productie van accu's. Deze grondstoffen zijn in de EU veelal niet voldoende beschikbaar. Bovendien is de beschikbaarheid buiten de EU soms geografisch geconcentreerd, en zijn er zorgen over de werkomstandigheden tijdens de winning ervan en de lokale impact van de winning op milieu en natuur. Schaarste van deze grondstoffen en materialen kan tot tekorten leiden in het aanbod van nieuwe voertuigen en daarmee de transitie vertragen. Ook kan de schaarste tot prijsstijgingen leiden.
- Het is van belang een volwassen tweedehandsmarkt voor elektrische auto's te realiseren zodat elektrisch rijden voor een grotere groep autokopers bereikbaar wordt. Kopers van occasions hebben een voorkeur voor compacte middensegmentauto's (KiM 2023c). Dergelijke auto's zijn nog weinig voorhanden op de elektrische tweedehandsmarkt. De kenmerken van nieuwe elektrische personenauto's die tot op heden zijn verkocht, sluiten onvoldoende aan bij de vraag op die tweedehandsmarkt. De doorstroming van kleine (betaalbare) autosegmenten naar de tweedehandsmarkt verdient daarom aandacht.
- Mede daaraan gekoppeld is aandacht nodig voor de herverdelingseffecten die kunnen optreden als elektrisch rijden goedkoper blijkt dan rijden op (fossiele of hernieuwbare) brandstoffen maar nog niet voor iedereen toegankelijk is.

Deze uitdagingen kunnen het tempo van en het draagvlak voor de transitie onder druk zetten. In hoofdstuk 5 gaan we nader in op deze uitdagingen.

3.3 Paden naar klimaatneutrale luchtvaart

De luchtvaart is grotendeels internationaal van aard en de concurrentie in deze sector is groot. Stringent nationaal beleid kan leiden tot uitwijkgedrag, waardoor de CO_2-uitstoot verschuift. Dat versterkt het belang van een ambitieus Europees en mondiaal klimaatbeleid. De burgerluchtvaartorganisatie van de Verenigde Naties (de ICAO) heeft de ambitie dat de mondiale luchtvaart klimaatneutraal is in 2050. Dit doel is nog niet vertaald naar concrete beleidsinstrumenten. Het EU-beleid voor verduurzaming van de luchtvaart tot 2050 ligt wel vast en vereist een snelle toename van de inzet van hernieuwbare brandstoffen. Naast de uitstoot van broeikasgassen draagt ook de uitstoot van waterdamp en stikstofoxiden en de vorming van condenssporen (*contrails*) door de luchtvaart bij aan de opwarming van de aarde. Om daadwerkelijk klimaatneutraal te vliegen zullen ook deze niet-CO_2-klimaateffecten vermeden moeten worden.

Hernieuwbare brandstoffen cruciaal bij terugdringen klimaatimpact luchtvaart

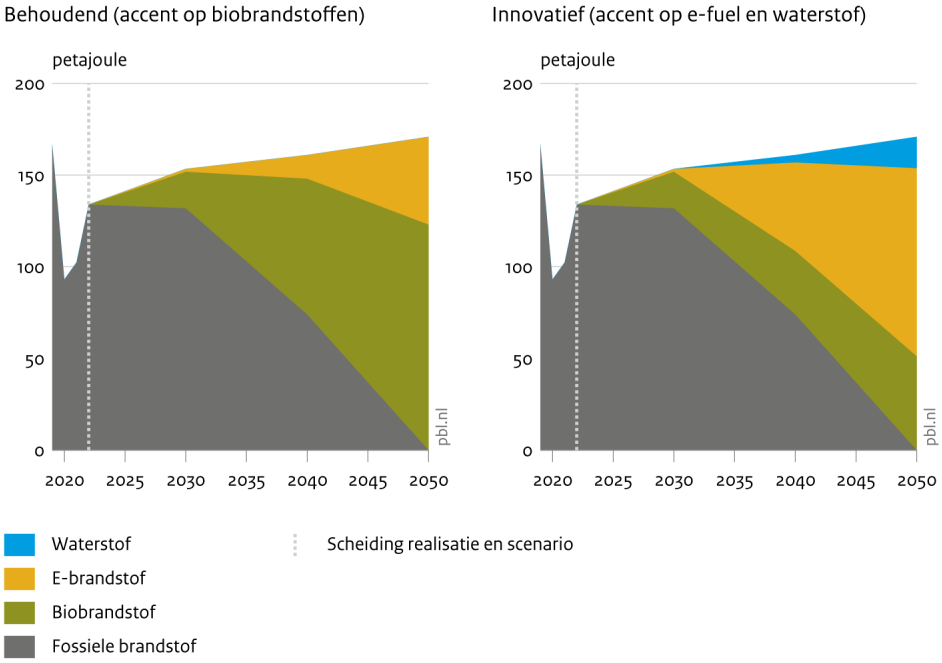
Sustainable Aviation Fuel (SAF) speelt een cruciale rol bij de verduurzaming van de luchtvaart (figuur 3.4). SAF omvat zowel biokerosine gemaakt uit biomassa, als e-kerosine gemaakt uit hernieuwbare elektriciteit en CO_2. Een deel van de huidige biodiesel die voor het wegverkeer wordt ingezet, is van zodanige kwaliteit dat deze relatief eenvoudig opgewerkt kan worden tot biokerosine. Er zijn ook nieuwe routes voor de productie van biokerosine mogelijk, in het bijzonder FTJ (*Fischer-Tropsch Jet*) en ATJ (*Alcohol-To-Jet*). Deze technologieën zijn nog niet op commerciële schaal beschikbaar, er moeten nog technische barrières worden overwonnen. Ook e-kerosine wordt nog niet op commerciële schaal geproduceerd. Het proces vraagt veel hernieuwbare elektriciteit en een koolstofbron. Voor het gebruik van SAF hoeft in principe geen aanpassing plaats te vinden in de vliegtuigen zelf.

Alternatieven voor SAF zijn vliegen op waterstof of batterij-elektrische aandrijving. De technologie voor vliegen op waterstof met een brandstofcel bevindt zich nog in de onderzoeksfase. De toekomstige rol van deze technologie is onzeker. Als vliegen op waterstof in de periode tot 2050 commercieel haalbaar blijkt, dan zal dat waarschijnlijk alleen voor de kortere vluchten zijn (minder dan 2.000 kilometer). Deze vluchten beslaan nu grofweg 20 procent van de kerosinevraag. Vliegen op waterstof vereist een complexe nieuwe bunkerinfrastructuur op de vertrek- én aankomstluchthavens. Batterij-elektrische aandrijving in de luchtvaart zal in 2050 nog verwaarloosbaar zijn (minder dan 1 procent) en zal ook na 2050 waarschijnlijk bescheiden blijven, tenzij de opslagcapaciteit van batterijen een ordegrootte beter wordt.

Figuur 3.4

Trajecten richting klimaatneutrale luchtvaart

Energievraag van vertrekkende vluchten vanuit Nederland



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024 (realisatie); PBL & TNO (scenario)

Twee paden naar klimaatneutrale luchtvaart vanuit Nederland

Beide paden naar een klimaatneutrale luchtvaart in 2050 zijn gebaseerd op een snelle groei van de productie en het gebruik van SAF (figuur 3.4). In de periode tot 2030 zal de nadruk liggen op het gebruik van biokerosine. Daarna kan ook het gebruik van e-kerosine snel toenemen. De mate waarin

is onzeker. Daarom schetsen we een behoudend pad waarin het gebruik van biokerosine dominant blijft en een innovatief pad waarin e-kerosine na 2030 de dominante energiedrager wordt. Op langere termijn is het ook mogelijk dat er (beperkt) meer waterstofvliegtuigen op de markt komen. Vanwege traagheden in het systeem verwachten we dat waterstof in 2050 tot maximaal 10 procent van de kerosinevraag kan invullen. Omdat nog onzeker is of deze technologie op de termijn tot 2050 kansrijk wordt, is waterstof alleen opgenomen in het innovatieve pad (figuur 3.4).

Hoewel de luchtvaart met deze paden in 2050 CO_2-vrij kan zijn, zullen de niet-CO_2-klimaateffecten ten minste deels blijven bestaan. Met name de vorming van condenssporen lijkt een significant klimaateffect te hebben, met name op de kortere termijn (tijdsspanne tien tot twintig jaar). Wel zijn er kostenefficiënte mogelijkheden om de vorming van langdurige condenssporen te verminderen, bijvoorbeeld door niet te vliegen in de luchtlagen waarin deze worden gevormd. De andere van de bovengenoemde niet-CO_2-klimaateffecten worden maar beperkt minder zolang vliegtuigen nog door verbrandingsmotoren worden aangedreven. Alleen door waterstof in brandstofcellen te gebruiken is het mogelijk om de niet-CO_2-klimaateffecten (vrijwel) volledig te reduceren.

Ontwikkeling energievraag sterk afhankelijk van beleidskeuzes

De ontwikkeling van de vervoersvolumes in de luchtvaart is lastig in te schatten doordat er onzekerheden zijn ten aanzien van de markt en de politiek. Door hernieuwbare brandstof in te zetten stijgen de kosten van de luchtvaart, wat leidt tot hogere ticketprijzen. Dit dempt de groei van de vraag. Door dit effect en mede op basis van de groeiverwachtingen uit de WLO en de KEV 2022 verwachten we dat de vervoersvolumes in de luchtvaart toenemen tussen 2019 en 2050, namelijk met circa 20 tot 70 procent. In hoeverre deze vraag geaccommodeerd kan worden, hangt samen met de gemaakte beleidskeuzes. In de Nederlandse context zijn ook de problematiek rond geluidsoverlast, stikstof- en fijnstofuitstoot en de benodigde natuurvergunningen van invloed op de groei van de luchtvaart.

De combinatie van zuiniger vliegtuigen en een efficiëntere routeplanning leidt de komende decennia waarschijnlijk tot een verbetering van de energie-efficiëntie van naar schatting 1 à 1,5 procent per reizigerskilometer per jaar. Het wordt op termijn steeds lastiger de energie-efficiëntie van nieuwe vliegtuigen verder te verbeteren, tenzij radicale ontwerpveranderingen worden doorgevoerd. Gecombineerd leiden deze aannames ertoe dat de energiebehoefte voor de luchtvaart in Nederland tussen nu en 2050 binnen een bandbreedte van 150 tot 200 petajoule blijft; een orde van grootte die vergelijkbaar is met de 166 petajoule die in 2019 in Nederland werd gebunkerd. Bij stringente capaciteitsplafonds of andersoortig beleid dat de groei van de luchtvaart inperkt, kan de energievraag lager uitvallen. Dit is in de paden hier niet verondersteld.

Uitdagingen voor verduurzaming van de luchtvaart

De transitie naar een CO_2-neutrale luchtvaart brengt grote uitdagingen met zich mee op het gebied van regelgeving, de beschikbaarheid van energiedragers en de aanpak van niet-CO_2-effecten. Deze worden uitgebreid toegelicht in de onderliggende rapportage (Davydenko et al. 2024) en hier kort samengevat:

- De (tijdige) beschikbaarheid van hernieuwbare brandstoffen (SAF) is een cruciale randvoorwaarde voor de verduurzaming van de luchtvaart. Een voordeel is dat gebruik van SAF geen investeringen vergt in een nieuwe bunkerinfrastructuur. Wel zal de productiecapaciteit voor SAF snel moeten worden opgeschaald. Het nieuwe EU-beleidskader voor de inzet van SAF biedt zekerheid over de toekomstige afzetmarkt. Het verdient aanbeveling om de markt voor de

productie van SAF te monitoren en waar nodig te ondersteunen om de tijdige beschikbaarheid van SAF zeker te stellen.

- De aanpak van de niet-CO_2-effecten van de luchtvaart wordt bemoeilijkt door onzekerheden over de omvang van het effect ervan en de relatie met de lokale omstandigheden. De vorming van condenssporen kan worden beperkt wanneer vliegtuigen de luchtlagen vermijden waarin deze sporen ontstaan. Dit betekent veelal dat zij in die gebieden wat lager en langzamer moeten vliegen, wat extra brandstof en reistijd kost. Om condenssporen op grote schaal te voorkomen, moeten luchtvaartmaatschappijen informatie krijgen over de locatie van luchtlagen waar dergelijke sporen zich vormen en is wetgeving nodig om deze gebieden verplicht te vermijden.
- Voor de verduurzaming van de mondiale luchtvaart is mondiale regelgeving nodig. Dit betekent dat de mondiale doelen die de luchtvaartsector heeft geformuleerd met het oog op het klimaat, moeten worden vertaald naar concrete beleidsinstrumenten en bijbehorende regelgeving. De directe invloed van de Nederlandse overheid en andere Nederlandse stakeholders op de besluitvorming hierover is beperkt, maar Nederland kan met gelijkgezinde landen een voortrekkersrol spelen bij de uitwerking en voorbereiding van deze wetgeving.

3.4 Paden naar klimaatneutrale zeevaart

De zeescheepvaart is verantwoordelijk voor ongeveer 3 procent van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen. De impact voor Nederland is groter (zie ook figuur 3.1), door de grote rol die Nederland speelt op de maritieme bunkermarkt. Verduurzaming van de sector is, net als bij de luchtvaart, complex omdat het om een mondiale markt gaat. Dit vereist een internationale aanpak. De Internationale Maritieme Organisatie (IMO) van de VN, die verantwoordelijk is voor de mondiale regulering van de sector, heeft haar klimaatambitie in 2023 vastgesteld, namelijk een klimaatneutrale mondiale zeevaart om en nabij 2050. Dit doel wordt momenteel uitgewerkt in concreet beleid. Zeeschepen blijven lang in de vaart. Schepen met leeftijden van (ruim) boven de dertig jaar zijn geen uitzondering. Nederland heeft met de haven van Rotterdam één van de grootste zeehavens ter wereld en ook één van de grootste bunkerhavens ter wereld. De in Nederland gebunkerde brandstof wordt echter niet alleen gebruikt op vaarten van en naar Nederland.

Toekomstige energiemix voor verduurzaming zeevaart nog niet te voorspellen

Het is te vroeg om duidelijke winnaars aan te wijzen in het palet van hernieuwbare brandstoffen voor de zeevaart. Biobrandstoffen gaan waarschijnlijk een belangrijke rol spelen, waaronder biodiesel, bio-LNG en biomethanol. Biodiesel kan zonder grote aanpassingen in de bestaande vloot worden toegepast. Dit geldt ook voor bio-LNG, zij het voor een veel kleiner gedeelte van de vloot. Hoe waarschijnlijk deze route van biobrandstoffen is, hangt sterk samen met de beschikbaarheid en de kosten van de biobrandstoffen voor de zeevaart. Ook e-brandstoffen kunnen een belangrijke rol gaan spelen. Cruciaal daarvoor is dat hernieuwbare elektriciteit en elektrolysers beschikbaar zijn voor de productie van waterstof. Afhankelijk van de wereldwijde ontwikkeling van de productie van e-brandstoffen, kan vanaf 2030/2035 het gebruik hiervan snel toenemen. Daarnaast is de beschikbaarheid van duurzame koolstofbronnen een cruciale factor die het potentieel gaat bepalen van koolstofhoudende e-brandstoffen zoals e-diesel en e-methanol. Voor e-ammoniak of waterstof is geen koolstof nodig. Ammoniakmotoren zijn momenteel nog niet marktrijp en de regelgeving voor de toepassing van ammoniak, waaronder veiligheidsvoorschriften voor het gebruik, moet nog worden uitgewerkt. Batterij-elektrische aandrijving kan een rol spelen bij de verduurzaming van de kustvaart, zoals veerboten en havenschepen. Batterijen kunnen ook worden gebruikt om de energiebehoefte aan boord te verduurzamen. Walstroom zal een belangrijke rol gaan spelen om in de

energiebehoefte aan de kade te voorzien, maar dit heeft meer impact op de lokale luchtkwaliteit dan op het broeikaseffect.

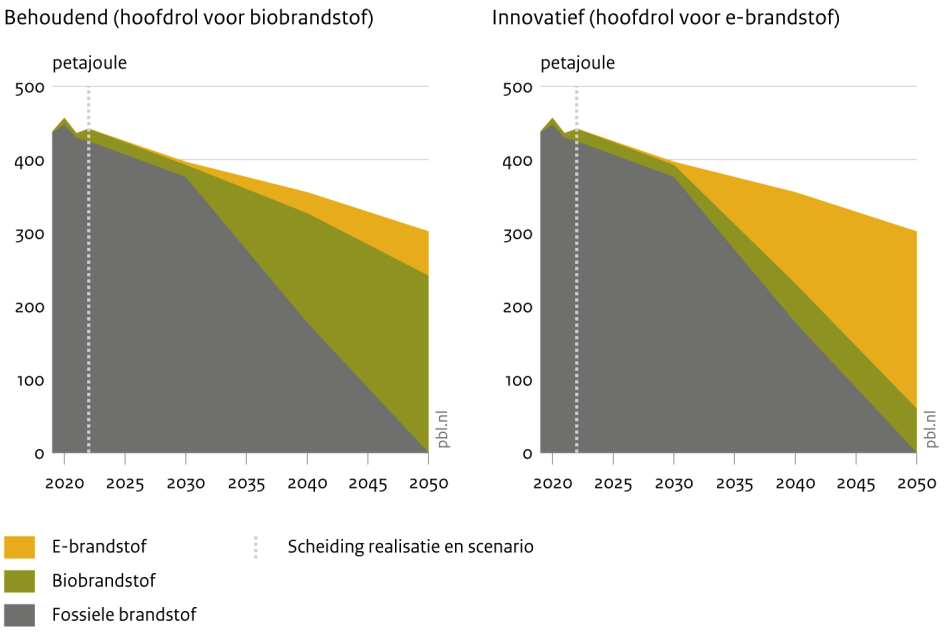
Twee paden naar klimaatneutrale zeescheepvaart

Vanwege de onzekerheden over de toekomstige energiemix schetsen we twee uiteenlopende paden naar een klimaatneutrale zeevaart in 2050. Daarin specificeren we alleen de mate waarin de verschillende categorieën energiedragers worden ingezet (figuur 3.5). Een prognose van de aandelen van de specifieke typen hernieuwbare brandstoffen is momenteel nog te onzeker. In beide paden is in het komende decennium een belangrijke rol weggelegd voor efficiëntieverbetering. Daarnaast lijkt in dit decennium vooral een rol weggelegd voor biobrandstoffen als het gaat om de verduurzaming van de zeescheepvaart. Na 2030 voorzien we in beide paden een versneld gebruik van hernieuwbare brandstoffen. In het behoudende pad is een belangrijke rol weggelegd voor biobrandstoffen, terwijl e-brandstoffen in het innovatieve pad een grote rol spelen. Het kan hierbij gaan om verschillende energiedragers zoals e-diesel, e-methanol of e-ammoniak.

Figuur 3.5

Trajecten richting klimaatneutrale zeescheepvaart

Energievraag van zeescheepvaart in Nederland



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024 (realisatie); PBL & TNO (scenario)

Ontwikkeling van de energievraag door de zeevaart in Nederland is onzeker

Hoe de energievraag van de zeevaart in Nederland zich gaat ontwikkelen, is onzeker. De groei van de op- en overslag in Nederland is geraamd op 0 tot 45 procent tot 2050. De energie-efficiëntie van het vervoer zal in deze periode verder verbeteren door aangescherpt beleid van de IMO. We verwachten tot 2050 een verbetering van 25 tot 40 procent. Gecombineerd resulteert dit in een bandbreedte voor de toename van het energiegebruik van de zeevaart van en naar Nederland van -18 tot +6 procent. Wat dit betekent voor de bunkervolumes in Nederland, is onzeker. De Nederlandse havens hebben de afgelopen tien jaar marktaandeel verloren in de mondiale bunkermarkt. Het is denkbaar dat deze trend zich doorzet, zeker als de Europese plannen voor verduurzaming ambitieuzer zijn dan het reductietempo dat de IMO wereldwijd voorschrijft. Ook is het mogelijk dat schepen in de toekomst vaker moeten bunkeren omdat hernieuwbare brandstoffen een lagere energie-

inhoud hebben of dat er meer gebunkerd wordt op plekken waar hernieuwbare energie goedkoper beschikbaar is. Dit kan de rol van de Nederlandse zeehavens in de mondiale bunkermarkt verkleinen. Het is ook denkbaar dat de haven van Rotterdam door investeringen die deels al zijn gepland tot de koplopers gaat behoren als het gaat om de verduurzaming van energiedragers, mede door de import van hernieuwbare brandstoffen, en een leidende rol blijft houden in de bunkermarkt. We schetsen daarom een ruime bandbreedte voor de bunkervraag in Nederland (zie ook paragraaf 4.1).

Uitdagingen voor verduurzaming van de zeevaart

De transitie naar een klimaatneutrale zeescheepvaart brengt belangrijke uitdagingen met zich mee op het gebied van regelgeving, technologieontwikkeling, beschikbaarheid van duurzame energiedragers en financiering. Deze worden uitgebreid toegelicht in de onderliggende rapportage (Geilenkirchen et al. 2024) en hier kort samengevat:

- De uitwerking van het IMO-doel voor 2050 in concrete beleidsinstrumenten en bijbehorende regelgeving en kaders (bijvoorbeeld rond veiligheid en duurzaamheidseisen voor verschillende oplossingen) is een cruciale vervolgstap om investeringen los te krijgen en de transitie op gang te brengen.
- Nog niet alle technologieën voor de verduurzaming van de zeevaart zijn al uitontwikkeld (zie ook hiervoor). Hier ligt een belangrijke uitdaging. Op korte termijn is het cruciaal dat pilottoepassingen worden gerealiseerd, om duidelijkheid te verschaffen over zowel de mogelijke kostenbesparingen in het ontwerp als de veiligheidsmaatregelen. Hier ligt een kans voor Nederland vanwege het grote maritieme cluster dat hier is.
- De (tijdige) beschikbaarheid en betaalbaarheid van hernieuwbare energiedragers is een cruciale randvoorwaarde voor de verduurzaming van de zeescheepvaart. Import zal hierbij waarschijnlijk een rol gaan spelen, maar een deel zal ook nationaal worden geproduceerd. Voor nieuwe energiedragers (behalve *drop-in*-biobrandstoffen zoals bio- of e-diesel) is een nieuwe bunkerinfrastructuur nodig. Hierbij is het van belang dat er over de hele wereld een uniforme standaard komt, en dat er in eerste instantie voldoende bunkerlocaties beschikbaar zijn langs relevante routes (zogenoemde groene corridors). Binnen groene corridors kunnen havens de beschikbaarheid van verschillende energiedragers coördineren zodat schepen de juiste energiedragers kunnen bunkeren. Dit is een kans om de toepassing en bunkering te testen en de weg te bereiden voor een bredere inzet van deze energiedragers. Overheden kunnen hierbij een coördinerende functie vervullen, maar ook marktpartijen zullen hierbij een belangrijke rol spelen.
- Voor de verduurzaming van de zeescheepvaart is financiering nodig om te kunnen investeren in nieuwe aandrijflijnen. Om die financiering los te krijgen, is een dwingend beleidskader voor verduurzaming cruciaal. Maar ook financiële instellingen en verzekeringsmaatschappijen kunnen hierbij een belangrijke rol spelen. Naarmate grote investeerders meer nadruk leggen op groene investeringen, kunnen rederijen of brandstofproducenten de hoge kapitaalkosten gemakkelijker gedekt krijgen.

3.5 Paden naar klimaatneutrale binnenvaart

De binnenvaart is een relatief kleine markt met uiteenlopende scheepstypen en relatief veel kleine ondernemingen. De markt kent min of meer gescheiden deelsegmenten, zoals vervoer van containers, natte bulk en droge lading. Op Europese schaal is de binnenvaart een kleine sector, in Nederland levert de binnenvaart een grote bijdrage aan het vervoer van goederen, zeker op de achterlandverbindingen. De Centrale Commissie van de Rijnvaart (CCR) heeft voor Europa strategische doelstellingen vastgesteld waarbij de binnenvaart in 2050 vrijwel klimaatneutraal moet zijn.

Ook in Nederland zijn er vergelijkbare doelen. Concreet klimaatbeleid voor de binnenvaart ontbreekt echter tot op heden.

Verschillende technologieën in ontwikkeling voor verduurzaming binnenvaart

De verduurzaming van de binnenvaartsector staat nog in de kinderschoenen. Er zijn meerdere technologieën in ontwikkeling. Toepassing van batterij-elektrische aandrijving met verwisselbare batterijcontainers lijkt kansrijk. Deze technologie wordt momenteel getest in proeftoepassingen en in een Groeifondsproject wordt gewerkt aan een eerste opschaling van de technologie. Door gebruik te maken van een *pay-per-use*-concept voor de batterijcontainers worden hoge investeringskosten voor schippers vermeden. Een andere mogelijkheid om de binnenvaartvloot te verduurzamen is het gebruik van methanol en waterstof in combinatie met verbrandingsmotoren of in brandstofcellen. Hiervoor zijn er nog geen standaardproducten op de markt, wel zijn er met deze technologie eerste proeven gedaan of gepland. Voor de toepassing van ammoniak als klimaatneutrale energiedrager is in de binnenvaartsector nauwelijks belangstelling, vooral vanwege zorgen over de externe veiligheid. Een andere route naar verduurzaming is het gebruik van *drop-in*-biobrandstoffen in bestaande motoren. Deze optie heeft als voordeel dat de investeringskosten aan boord van het schip beperkt zijn. Daarnaast is deze route niet afhankelijk van de instroom van nieuwe schepen in de vloot, die bij de binnenvaart langzaam verloopt.

Twee paden naar klimaatneutrale binnenvaart

Hoe een klimaatneutrale binnenvaart er in 2050 uit gaat zien, valt op dit moment niet te zeggen. Verschillende technologieën zijn nog in ontwikkeling en de kosten en praktische toepasbaarheid daarvan zijn nog onzeker. We schetsen daarom twee uiteenlopende paden op weg naar klimaatneutraliteit in 2050 (zie figuur 3.6). Het uitgangspunt voor deze paden is de verwachting dat het aantal energiedragers en aandrijftechnologieën dat zal worden ingezet voor de verduurzaming van de binnenvaart, beperkt blijft. Gezien de kleine omvang van de markt voor nieuwe schepen en motoren achten we het niet waarschijnlijk dat een brede waaier aan aandrijftechnologieën en energiedragers met bijbehorende energie-infrastructuur zal worden ingezet. Dit zou hoge kosten met zich meebrengen.

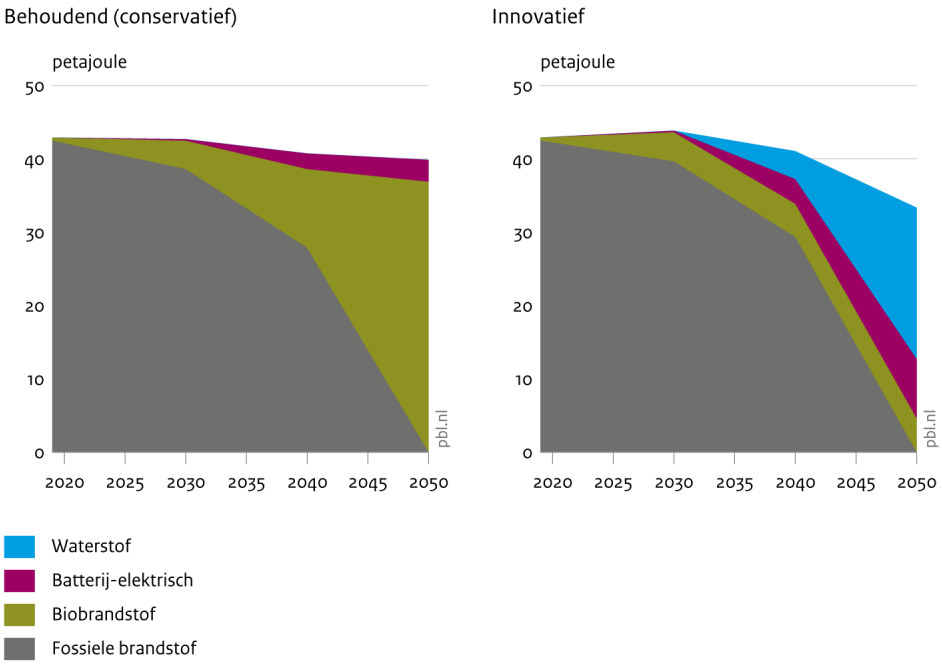
In het innovatieve pad is een grote rol weggelegd voor nieuwe aandrijftechnologie, waaronder batterij-elektrische aandrijving. Dit vereist forse investeringen in de schepen. De *business case* voor batterij-elektrisch varen is al ver ontwikkeld en het concept van verwisselbare accucontainers maakt de financiering eenvoudiger. Ook kan de binnenvaart profiteren van ontwikkelingen voor accuelektrische aandrijving en opslag in andere toepassingen. Batterij-elektrisch varen is waarschijnlijk niet voor alle marktsegmenten een reëel alternatief. We verwachten in dit pad daarom ook een grote rol voor waterstof of e-brandstoffen in combinatie met verbrandingsmotoren of brandstofcellen. Welke vorm dominant wordt, is nog niet te zeggen. We hebben er in dit pad voor gekozen om de potentiële rol van waterstof te illustreren. Die rol zou echter even goed ingevuld kunnen worden door (duurzame) methanol, methaan, e-diesel of zelfs ammoniak. We houden in een klein aandeel biodiesel aan voor oude schepen en schepen met een hoog energiegebruik.

In het behoudende pad is het aandeel batterij-elektrische aandrijving kleiner en is biodiesel dominant. Dit vereist beperkte investeringen in de vloot: de schepen kunnen grotendeels doorvaren met de huidige aandrijftechnologie. De meerkosten ten opzichte de huidige dieselaandrijving zullen in dit pad de komende tien tot vijftien jaar waarschijnlijk lager blijven dan in het innovatieve pad.

Figuur 3.6

Trajecten richting klimaatneutrale binnenvaart

Energievraag van binnenvaart in Nederland



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2021 (basisjaar); PBL & TNO (scenario)

In het innovatieve pad kan waterstof ook ingevuld worden door een op elektriciteit gebaseerde energiedrager (e-brandstof) zoals e-methanol of, e-diesel.

Ontwikkeling van de energievraag hangt mede samen met tempo energietransitie

Hoe de omvang van de binnenvaart zich tot 2050 gaat ontwikkelen, is onzeker. Dit hangt mede samen met de ontwikkeling van de energietransitie. Momenteel is circa 30 procent van het vervoersvolume van de binnenvaart energiegerelateerd; het overgrote deel daarvan betreft fossiele energie. Dit vervoer zal op termijn grotendeels wegvallen. Deels komen daar nieuwe energiedragers zoals biomassa voor terug. In de paden gaan we op basis van eerdere scenariostudies uit van een groei van het transportvolume in de binnenvaart van 0,5 tot 1,0 procent per jaar. Er zijn echter ook studies waarin nauwelijks of geen groei wordt verwacht in de binnenvaart of waarin wordt gesproken van krimp. In dergelijke situaties kunnen de investeringsmogelijkheden in verduurzaming van de sector onder druk komen te staan.

De hogere kosten van de duurzame energiedragers en de bijbehorende aandrijflijnen geven een stimulans om de efficiëntie van de schepen en het vaargedrag te verhogen. Efficiëntieverbetering in de binnenvaart is mogelijk door de motorefficiëntie te verhogen en tegelijkertijd *right-sizing* toe te passen, ofwel motoren te gebruiken met het juiste motorvermogen voor het betreffende schip, hydrodynamische maatregelen te nemen en energie-efficiënt te varen in combinatie met logistieke efficiëntie. Er is geen goed beeld van het effect van deze mogelijkheden op de energie-efficiëntie. Op basis van de literatuur en *expert judgement* komen we tot een ruwe schatting van in totaal 15 tot 20 procent reductie van het totale brandstofverbruik als gevolg van efficiëntieverbetering in 2050 ten opzichte van het niveau in 2020, onder invloed van hogere brandstofkosten en een betere brandstofmonitoring. Dit kan hoger uitpakken door gericht beleid, zoals verplichte eisen voor de

energie-efficiëntie. Het potentieel voor verbetering wordt grofweg op 30 tot 35 procent verbetering geraamd tot 2050.

Uitdagingen en handelingsperspectieven voor verduurzaming van de binnenvaart

De transitie naar een klimaatneutrale binnenvaart gaat gepaard met een aantal grote uitdagingen. Deze worden uitgebreid toegelicht in de onderliggende rapportage (Traa et al. 2024) en hier kort samengevat:

- Gezien de verschillen in de vloot in termen van operationele inzet (vaargebied en jaarlijkse inzet), technische kenmerken (bijvoorbeeld motorvermogen) en gerelateerde bedrijfsmodellen is een gedifferentieerde aanpak van belang om de binnenvaart te verduurzamen. Het gaat daarbij om de keuze van in de deelsegmenten toe te passen technieken. Om snel duidelijkheid te krijgen over de potentie van verschillende innovatieve oplossingen in (deel)markten zijn proeftoepassingen van die oplossingen in de praktijk noodzakelijk.
- Er is meer kennis nodig over de huidige leeftijdsopbouw en inzet van de vloot en de dynamiek hierin. Dit is een belangrijk punt voor verder onderzoek. Met een betere kennis hierover is het mogelijk om in te schatten welke duurzame oplossingen in welke omvang mogelijk of nodig zijn.
- Voor innovaties in de binnenvaart zijn middelen beschikbaar uit bijvoorbeeld het Nationaal Groeifonds en het Maritiem Masterplan of uit Europese fondsen zoals *Horizon Europe* en het *Innovation Fund*. Deze fondsen zijn echter versnipperd, waardoor het onduidelijk is of de benodigde breedte zowel op het gebied van oplossingsrichtingen als deelmarkten kan worden bereikt. Het verdient aanbeveling dat beleidsmakers overzicht houden op de verschillende initiatieven en hier waar nodig bijsturen.
- Schepen in de binnenvaart gaan lang mee, waarbij de motoren vaak tussentijds gereviseerd (opgeknapt) of vervangen worden. De tijdsduur tot aan een complete revisie van de motor ligt bij veel scheepstypen rond de twintig jaar. Na een revisie kunnen de motoren nogmaals hetzelfde aantal jaren meegaan. Gezien de lange levensduur van binnenvaartschepen dient juist ook naar oplossingen voor de bestaande vloot (retrofit) te worden gekeken.
- Om de energietransitie in de binnenvaart op gang te brengen, is het cruciaal dat er handhaafbare doelstellingen voor de binnenvaart komen, inclusief de bijbehorende beleidsinstrumenten. Dit beleidskader ontbreekt momenteel grotendeels (zie ook paragraaf 5.1). Zonder deze stap zullen partijen onvoldoende prikkels krijgen om grootschalig duurzame oplossingen te implementeren. Gezien het internationale karakter van de markt verdient het de voorkeur dit beleid op (Noordwest-)Europees niveau te implementeren. Gezien de belangrijke rol die Nederland in deze sector speelt, kan het hier het voortouw nemen.
- Handhaafbare doelstellingen helpen om investeringen en hogere operationele kosten financierbaar te maken. Op korte termijn, wanneer er nog geen duidelijke doelstellingen zijn, is het speelveld ongelijk en is het voor koplopers lastig om financiering voor verduurzaming te krijgen of deze te kunnen terugverdienen. Om nieuwe energiedragers meer te kunnen toepassen, zijn hierdoor nieuwe financieringsopties nodig. Het is hierbij voor koplopers op de korte termijn van belang dat de overheid pilots ondersteunt en fondsen opricht. Mogelijk is het ook noodzakelijk om op de lange termijn gerichte ondersteuning te bieden aan kleine zelfstandig opererende schippers.

4 Gecombineerde trajecten naar klimaatneutrale mobiliteit in 2050

In het vorige hoofdstuk hebben we beknopt geschetst hoe de trajecten naar een in 2050 klimaatneutrale mobiliteit er voor de vier vervoerswijzen uit kunnen zien. De vraag is nu hoe die paden optellen? Waar kunnen de vervoerswijzen elkaar versterken? Waar concurreren ze om dezelfde schaarse energiedragers? Waar doet zich uitruil voor? Deze vragen staan centraal in paragraaf 4.1. Vervolgens reflecteren we in paragraaf 4.2 op het effect dat deze ontwikkelingen hebben op de uitstoot van broeikasgassen en milieuverontreinigende stoffen. Ten slotte staan we in paragraaf 4.3 stil bij de rol die mobiliteit kan spelen in het toekomstige energiesysteem.

4.1 Ontwikkeling energievraag mobiliteit

Energievraag daalt door elektrificatie en onzekere bunkervraag scheepvaart

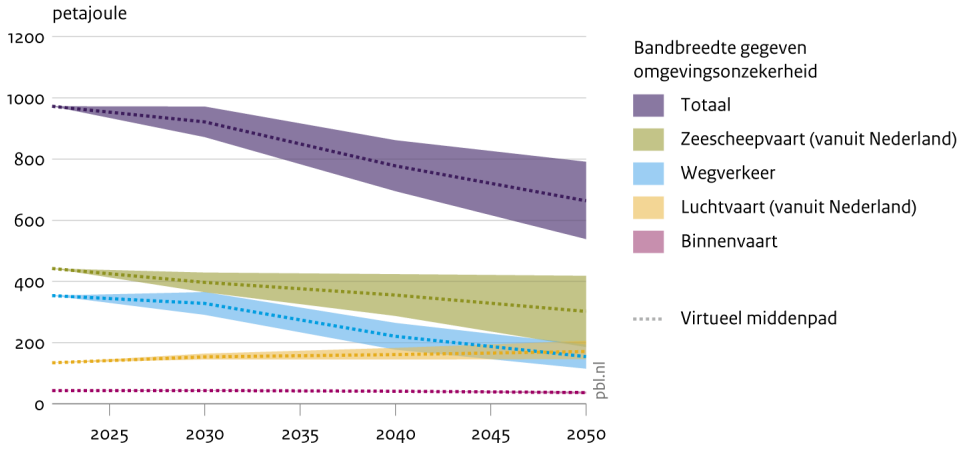
Uit figuur 4.1 blijkt dat, volgens de paden die in deze verkenning per vervoerswijze zijn geschetst, de totale energievraag van de mobiliteitssector tussen 2019 en 2050 afneemt.[9] Deze afname vloeit voort uit de dalende energievraag door de zeevaart en het wegverkeer. Die afname is het grootst bij het wegverkeer: door het hogere energierendement van de batterij-elektrische aandrijving neemt de energievraag sterk af terwijl de vervoersvolumes naar verwachting toenemen (zie ook paragraaf 3.2). Ook bij de zeescheepvaart is tot 2050 een (bescheiden) toename verondersteld van de vervoersvolumes. Deze toename wordt grofweg gecompenseerd door een hogere energie-efficiëntie van het vervoer. De mogelijke veranderingen in de Nederlandse bunkermarkt die in paragraaf 3.4 zijn beschreven, monden uit in een (mogelijke) daling van de energievraag in Nederland. De afname impliceert vooral een verschuiving van de bunkervraag naar het buitenland (en dus ook een verschuiving van de emissies). Zoals is beschreven in paragraaf 3.4 en in de onderliggende rapportage over zeevaart (Geilenkirchen et al. 2024), is de onzekerheid over die toekomstige bunkermarkt in Nederland groot. Dit verklaart de relatief grote bandbreedte rond de energievraag van de zeescheepvaart.

Bij de luchtvaart verwachten we dat de snel groeiende vervoersvraag autonoom leidt tot een toename van de energievraag. Door een volledige overgang naar duurzame energiedragers wordt vliegen echter duurder, waardoor deze groei deels wegvalt. De groei van de luchtvaart hangt niet alleen samen met de ontwikkeling van de vraag, maar ook met die van het aanbod. In de paden is geen rekening gehouden met capaciteitsbeperkende maatregelen (zie paragraaf 3.3). Het kabinet-Rutte IV was voornemens de groei van de luchtvaart op korte termijn te beperken. Volgens de Luchtvaartnota 2020-2050 kan de luchtvaart nog wel groeien richting 2050, mits de negatieve effecten op klimaat en leefomgeving worden beperkt.

[9] We laten in figuur 4.1 het middenpad en de bandbreedtes zien voor de toekomstige energievraag. De middenpaden geven niet noodzakelijkerwijs de meest waarschijnlijke uitkomst. De verdeling van de energiedragers is berekend voor deze middenpaden. De bandbreedtes zijn onder meer het gevolg van omgevingsonzekerheid rond de economische ontwikkeling, de bevolkingsgroei, het tempo van innovatie en de ontwikkeling van de energieprijzen. Zie paragraaf 2.1.

Figuur 4.1

Energievraag van mobiliteit in Nederland



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024 (basisjaar); PBL & TNO (scenario)

Bij de binnenvaart verwachten we een lichte afname van de energievraag. De vervoersvolumes stijgen weliswaar licht maar tegelijkertijd neemt de energie-efficiëntie toe, onder meer als gevolg van de verwachte elektrificatie van een deel van de vloot. De binnenvaart levert een bescheiden bijdrage aan de totale energievraag van de mobiliteitssector (figuur 4.1).

Paden uitgesplitst naar energiedrager

Zoals beschreven in hoofdstuk 2, hebben we voor iedere vervoerswijze twee paden uitgewerkt naar klimaatneutraliteit in 2050: een (technisch) innovatief pad waarin de nadruk ligt op elektrificatie, waterstof en e-brandstoffen en een (technisch) behoudend pad waarin de nadruk ligt op de inzet van biobrandstoffen. De verhouding van energiedragers tussen die twee hoofdsporen verschilt per vervoerswijze, zo blijkt uit hoofdstuk 3. Figuur 4.2 geeft de resulterende energievraag van mobiliteit per energiedrager. Hierbij is het middenpad voor de energievraag uit figuur 4.1 gebruikt. Uit figuur 4.2 blijkt dat het fossiele energiegebruik door de sector mobiliteit tussen 2019 en 2030 licht afneemt en vervolgens richting 2050 sneller. In 2040 is het aandeel fossiele brandstoffen gedaald tot net onder de 50 procent (tabel 4.1). Batterij-elektrische aandrijving krijgt een steeds belangrijker rol in het energiegebruik, en ligt in 2050 grofweg een factor 25 hoger dan in 2022. Desalniettemin blijft het aandeel van batterij-elektrische aandrijving in het totale energiegebruik door de sector mobiliteit relatief bescheiden, namelijk circa 20 procent in 2050. Dit is mede het gevolg van het hoge energierendement in vergelijking met een verbrandingstechnologie. Batterij-elektrische aandrijving heeft daardoor een wezenlijk groter aandeel in het vervoersvolume dan in het energiegebruik.

Tabel 4.1

Aandeel energiedragers in totaal energiegebruik door mobiliteit (de bandbreedte beschrijft de variatie tussen het innovatieve en behoudende pad).

	2022	2030	2040	2050
Fossiele brandstoffen	95%	87-89%	48-49%	0%
Hernieuwbare brandstoffen	4%	8-11%	37-41%	77-80%
Elektriciteit	1%	2-4%	11-14%	20-23%

Het grote verschil tussen de paden ligt in de hoofdrol die biobrandstoffen spelen in het behoudende pad en e-brandstoffen en waterstof in het innovatieve pad. In beide paden domineren e-

brandstoffen de energievraag in 2050. De vraag naar hernieuwbare brandstoffen neemt door de transitie fors toe en ligt in de paden in 2050 grofweg dertien keer zo hoog als in 2022 (tabel 4.1).

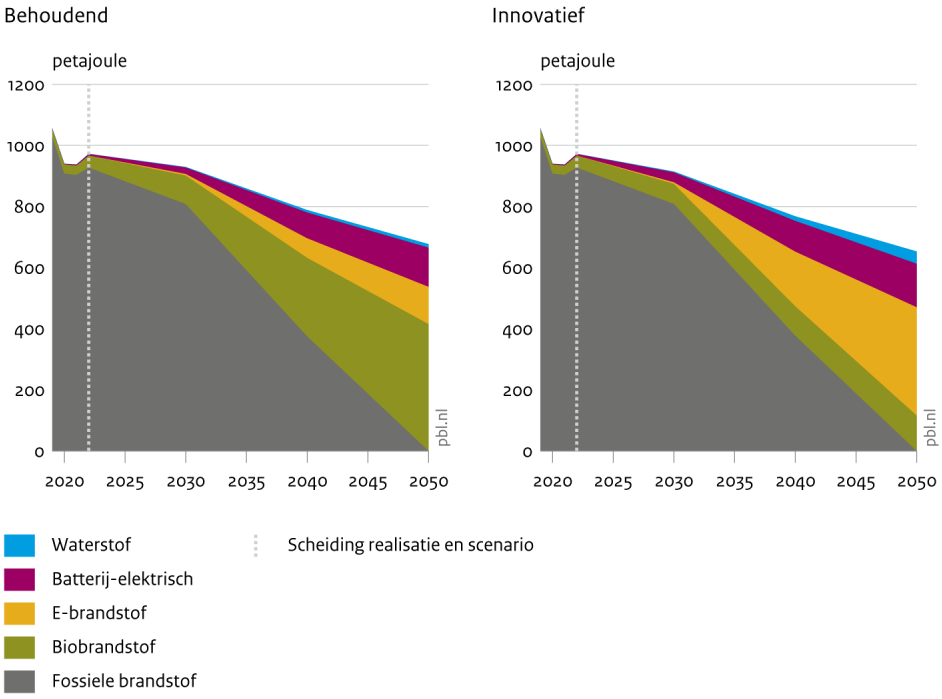
In figuur 4.2 zijn de paden weergegeven voor de situatie waarin de verdeling tussen energiedragers zich voor alle vervoerswijzen ontwikkelt volgens ofwel het behoudende ofwel het innovatieve pad. De figuren schetsen in dat opzicht de hoeken van het speelveld. In werkelijkheid zullen er combinaties optreden, waarbij de energievraag voor de ene vervoerswijze meer in de richting van het behoudende pad beweegt terwijl die voor andere vervoerswijzen meer in de richting van het innovatieve pad gaat. Dit hangt samen met de ontwikkeling van de aandrijftechnologie en vooral met de vraag en het aanbod van de verschillende typen energiedragers en de daaruit resulterende marktprijzen. Daarbij speelt niet alleen de (deels concurrerende) energievraag vanuit de verschillende vervoerswijzen een rol, maar ook de vraag vanuit andere sectoren van de economie, zoals de industrie en de gebouwde omgeving. Deze vraag brengt het PBL in de Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050 (TVKN) in kaart, in combinatie met een analyse van het potentiële aanbod van deze energiedragers.

Bij het uitwerken van de paden per vervoerswijze hebben we ervoor gekozen om eerst een bandbreedte te schetsen voor de toekomstige energievraag en daarna voor de potentiële invulling van die energievraag het middenpad daaruit te gebruiken (zie ook paragraaf 2.1). Deze aanpak sluit aan bij de werkwijze van de TVKN. Bovendien ligt het in lijn der verwachting dat de globale invulling van de paden niet wijzigt wanneer de totale energievraag hoger of lager uitvalt. Het is echter niet evident dat de onderlinge verhoudingen tussen de energiedragers identiek blijven bij een hogere of lagere energievraag. Dit hangt samen met de ontwikkeling van het aanbod van de verschillende energiedragers.

Figuur 4.2

Trajecten richting klimaatneutrale mobiliteit

Energievraag van mobiliteit in en vanuit Nederland



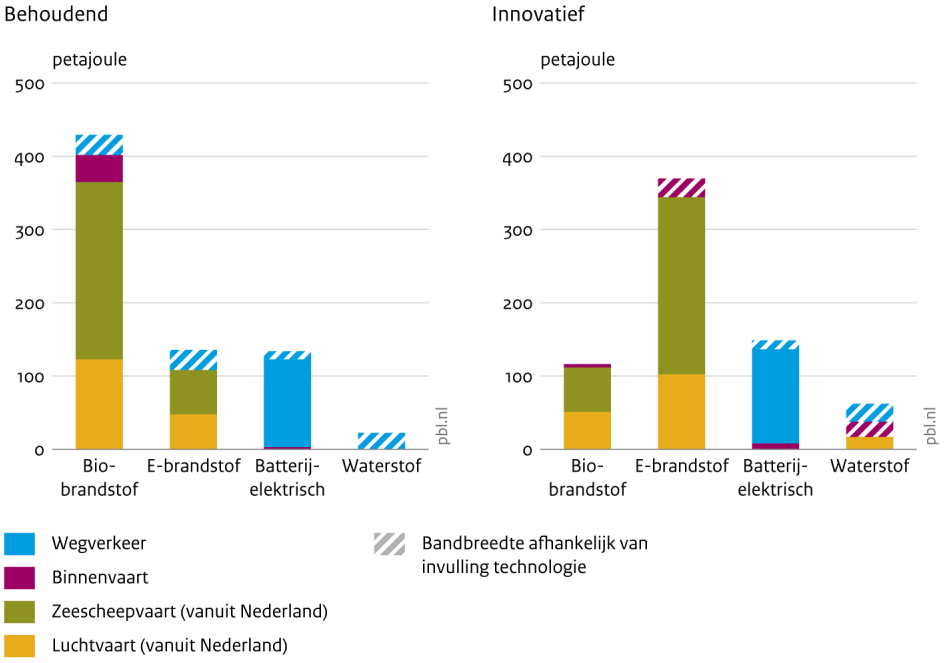
Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024 (realisatie); PBL & TNO (scenario)

Potentiële vraag naar de verschillende energiedragers

Figuur 4.3 schetst de mogelijke vraag in 2050 naar de verschillende typen energiedragers per vervoerswijze. De figuur geeft een beeld van de vraag naar de individuele energiedragers en waar deze met name worden ingezet. Dit beeld is wederom gebaseerd op de middenpaden uit figuur 4.1. Voor sommige vervoerswijzen is de invulling van de energiedragers in (één van) de paden in figuur 4.2 niet expliciet gemaakt. In het behoudende pad voor wegverkeer (zie paragraaf 3.2) hebben we de vraag naar hernieuwbare brandstoffen ingevuld met biobrandstoffen en vanaf 2040 voor de helft met e-brandstoffen. In theorie kan die vraag ook geheel met biobrandstoffen of geheel met e-brandstoffen worden ingevuld. Daarnaast hebben we in de twee hoofdpaden voor het wegverkeer in paragraaf 3.2 waterstof niet meegenomen als optie. In het onderliggende rapport voor wegverkeer (Van Meerkerk et al. 2024) is een variant op beide hoofdpaden uitgewerkt waarin waterstof een rol speelt bij de verduurzaming van het zware wegverkeer. Voor de binnenvaart geldt dat de energiebehoefte die voor de paden in paragraaf 3.5 met waterstof is ingevuld, ook met e-brandstoffen zou kunnen worden ingevuld. In figuur 4.3 zijn deze variaties op de verdeling van energiedragers in hoofdstuk 3 gearceerd weergegeven. Hierdoor zijn de totalen per vervoerswijze over de brandstoffen heen niet optelbaar.

Figuur 4.3

Energievraag van mobiliteit in Nederland, 2050



Bron: PBL & TNO

Figuur 4.3 laat wederom duidelijk zien dat biobrandstoffen en e-brandstoffen een grote rol gaan spelen bij de verduurzaming van de mobiliteitssector, maar dat de omvang van de toekomstige inzet ervan nog hoogst onzeker is. Hierbij doet zich een duidelijke uitruil voor tussen de twee paden, waarbij de vraag kan oplopen tot boven de 350 (e-brandstoffen) à 400 petajoule (biobrandstoffen). Voor beide brandstoffen geldt dat de zeescheepvaart de grootste afnemer is, gevolgd door de luchtvaart. De vraag naar deze brandstoffen vanuit het wegverkeer en de binnenvaart is (relatief) bescheiden.

De onzekerheid over de (directe) inzet van elektriciteit voor batterij-elektrische aandrijving is relatief klein in vergelijking met de andere energiedragers. In beide paden voor het wegverkeer is

batterij-elektrische aandrijving dominant. De exacte omvang van de elektriciteitsvraag hangt samen met het tempo waarin het wagenpark elektrisch wordt – dat verschilt binnen de paden – en met de ontwikkeling van de vervoersvolumes en de energie-efficiëntie en de daaruit resulterende energievraag (zie ook figuur 4.1). Deze bandbreedte is niet opgenomen in figuur 4.3. De binnenvaart vraagt waarschijnlijk ook een kleine hoeveelheid elektriciteit voor batterij-elektrische aandrijving, maar de omvang daarvan is gering in vergelijking met de vraag voor het wegverkeer.

De directe inzet van waterstof als energiedrager is het meest onzeker. In het innovatieve pad wordt toepassing van waterstof in de luchtvaart voorzien. Voor de binnenvaart is het in dat pad nog onzeker of directe inzet van waterstof een substantiële rol gaat spelen. Daarnaast is de omvang van de inzet van waterstof in het zware wegverkeer onzeker. Deze inzet zou in beide paden een rol kunnen spelen, maar het is ook mogelijk dat het vrachtautopark vrijwel volledig batterij-elektrisch wordt. Waterstof zal overigens een belangrijke rol spelen bij de productie van de e-brandstoffen, maar dat valt buiten de afbakening van de figuur.

4.2 Emissiereductie in de paden

De Parijsafspraken over het terugdringen van klimaatverandering vereisen een snelle afname van de uitstoot van broeikasgassen. Daarbij is het uitstootniveau in 2050 (veel) minder relevant dan de cumulatieve uitstoot van broeikasgassen tot het einde van deze eeuw (zie ook hoofdstuk 2). Het pad naar klimaatneutraliteit en de ontwikkeling daarna is bepalend voor het halen van de Parijsafspraken. In figuur 4.4 schetsen we hoe de CO_2-uitstoot door de vier vervoerswijzen[10] zich tussen 1990 en 2050 ontwikkelt. Uit de figuur blijkt dat de uitstoot door mobiliteit tussen 1990 en 2006 snel is gestegen, en sindsdien is gedaald tot grofweg het niveau van 1990 in 2022. Met de in deze studie geschetste paden verwachten we tot 2030 een bescheiden extra afname als gevolg van de toegenomen inzet van hernieuwbare brandstoffen en batterij-elektrische aandrijving (tabel 4.1). Daarmee ligt de CO_2-uitstoot in 2030 ongeveer 10 procent lager dan in 1990 (waar de totale uitstoot binnen Nederland in dat jaar ten minste 55 procent lager moet liggen dan in 1990). Na 2030 gaat het reductietempo snel omhoog. In 2040 ligt de uitstoot van mobiliteit ongeveer 60 procent lager dan in 1990.

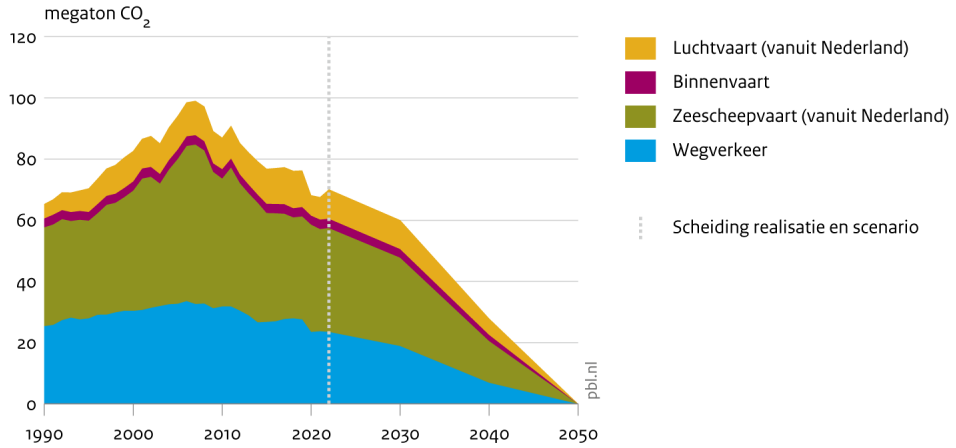
Vanwege de grote bijdrage aan de totale CO_2-uitstoot door de mobiliteitssector speelt de zeescheepvaart een belangrijke rol bij het tempo waarin de uitstoot van broeikasgassen door mobiliteit afneemt (figuur 4.4). Het reductietempo in de paden voor de zeevaart is gebaseerd op de doelen uit de nieuwe klimaatstrategie van de Internationale Maritieme Organisatie (zie ook paragraaf 3.4 en de onderliggende rapportage over zeevaart: Geilenkirchen et al. 2024). Het reductietempo in de paden voor de luchtvaart hangt samen met de Nederlandse ambitie om in 2030 hernieuwbare brandstoffen in te zetten en versnelt na 2030 ten opzichte van het pad dat uit de nieuwe Europese regelgeving volgt. Het emissiereductietempo voor het wegverkeer hangt samen met de huidige ambities over de instroom van emissievrije voertuigen in het wagenpark.

---

[10] Zoals blijkt uit paragraaf 3.1, waren deze vier vervoerswijzen in 2022 goed voor 93 procent van de totale uitstoot van broeikasgassen door de mobiliteit in en vanuit Nederland. CO_2 is daarin verreweg het dominante broeikasgas met een aandeel van meer dan 97 procent in de totale uitstoot in CO_2-equivalenten. Daarmee geeft de figuur een goed beeld van het tempo waarmee de directe (Tank-To-Wheel-emissies; TTW) klimaatimpact van mobiliteit wordt gereduceerd.

Figuur 4.4

CO_2-uitstoot van vervoerswijzen in traject Behoudend



Bron: RIVM/Emissieregistratie 2024 (realisatie); PBL & TNO (scenario)

Mogelijkheden om het reductietempo te versnellen

Met de in deze studie geschetste paden draagt de mobiliteitssector er minder dan evenredig aan bij dat de Nederlandse klimaatdoelen (als doorvertaling van de Parijsafspraken) gehaald worden. Waar de hele Nederlandse economie in 2030 volgens de Klimaatwet al op een reductie van 55 procent moet zitten ten opzichte van 1990, zit de mobiliteitssector in de geschetste paden pas ver in de jaren '30 op dat niveau. Dit betekent dat de verduurzaming in andere sectoren, zoals de energiesector en de industrie, sneller moet verlopen om de doelen te kunnen halen. Doordat de handelingsperspectieven en de kosteneffectiviteit voor het reduceren van broeikasgasemissies in een aantal andere sectoren beter zijn dan in de mobiliteitssector, is het verklaarbaar dat het CO_2-reductietempo voor de sector mobiliteit achterblijft. Het koolstofbudget tot 2050 dat binnen de Parijsafspraken beschikbaar is, is echter beperkt, waardoor er voor sectoren met een aanzienlijke bijdrage aan de totale uitstoot van broeikasgassen, zoals de mobiliteit, maar beperkt ruimte is om een trager reductietempo te volgen dan gemiddeld. Daarbij komt dat een snelle emissiereductie in andere sectoren niet evident is. Ook daar liggen grote uitdagingen. Netbeheer Nederland (2023) concludeert bijvoorbeeld dat de extreem snelle verduurzaming van het energiesysteem tegen de grenzen aanloopt van wat uitvoerbaar is. Versnelling is niet mogelijk. Ook de gebouwde omgeving heeft te maken met lange doorlooptijden.

Dit roept de vraag op of de emissiereductie door de sector mobiliteit sneller kan dan in de paden in deze studie is geschetst. Gezien de recente adviezen van de Europese wetenschappelijke adviesraad voor klimaatverandering en de Nederlandse Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR) en de recente mededeling van de Europese Commissie over de Europese klimaatdoelen in 2040 is deze vraag extra actueel. De Europese adviesraad heeft de Europese Commissie in 2023 geadviseerd om de transitie naar klimaatneutraliteit te versnellen. In 2040 zou de uitstoot van broeikasgassen in de EU dan al met 90 tot 95 procent gereduceerd moeten zijn ten opzichte van 1990 (ESABCC 2023).[11] Dit advies is gebaseerd op wetenschappelijke inzichten over wat nodig is om de opwarming van de aarde tot maximaal 1,5 graden te beperken, wat rechtvaardig is gezien de historische uitstoot, de beschikbare

[11] De adviesraad neemt in dit doel alleen de uitstoot van de lucht- en zeevaart binnen Europa mee.

middelen in de EU en wat haalbaar is.[12] De WKR onderschrijft dit advies en adviseert de Nederlandse regering om haar inspanningen gericht op klimaatneutraliteit te versnellen (WKR 2023). De Europese Commissie heeft in februari 2024 aangekondigd zich te richten op een reductie van 90 procent in 2040 (EC 2024).

Extra inzet hernieuwbare brandstoffen kan in theorie tot versnelling leiden

Omdat de transitie in de lucht- en scheepvaart (groten)deels is gebaseerd op *drop-in*-brandstoffen in de bestaande vloten, is het CO_2-reductietempo in die sectoren beperkt afhankelijk van de instroom van nieuwe vaar- en vliegtuigen. Versnelling is hier in theorie mogelijk door meer hernieuwbare brandstoffen in te zetten. Bij het wegverkeer is elektrificatie van de wagenparken de dominante oplossingsrichting. Het tempo van de emissiereductie is daarom bij het wegverkeer in grotere mate afhankelijk van de vervangingssnelheden van verschillende voertuigcategorieën in de vloot. Met gericht beleid kan dit proces worden versneld, maar de mate waarin is beperkt. Het innovatieve pad veronderstelt al een versnelling van het vervangingstempo ten opzichte van de historische trends. Maar ook bij het wegverkeer kan het reductietempo worden versneld door (meer) hernieuwbare *drop-in* brandstoffen in de bestaande vloot te gaan gebruiken. De beschikbaarheid van (duurzame) hernieuwbare brandstoffen voor de verschillende vervoerswijzen vormt hierbij echter een grote uitdaging. In de paden in deze studie is al een enorme toename verondersteld van de beschikbaarheid van hernieuwbare brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart. Versnelling op dat aanbod kan tegen de grenzen aanlopen van wat praktisch haalbaar is. In paragraaf 5.2 gaan we nader op deze uitdagingen in.

Beleid gericht op energiebesparing kan ook significante bijdrage leveren

Een andere manier om het emissiereductietempo voor de mobiliteit te versnellen is door (extra) beleid in te zetten op de afname van de energievraag door deze sector, ofwel op de andere drie factoren uit paragraaf 2.1 (naast de inzet van klimaatneutrale energiedragers). Hierbij gaat dan om (beleid gericht op) het verbeteren van de energie-efficiëntie van het vervoer, een modal shift naar klimaatvriendelijke(re) vervoerswijzen en een afname van (de groei van) de vervoersvolumes. Beleid gericht op deze factoren kan in potentie ook een significante bijdrage leveren aan het terugdringen van de klimaatimpact van de mobiliteitssector. In paragraaf 5.3 en 5.4 gaan we hier verder op in.

Transitie leidt tot bescheiden afname van uitstoot milieuverontreinigende stoffen

De paden richting een klimaatneutrale mobiliteit leiden niet alleen tot minder uitstoot van broeikasgassen, maar ook tot minder uitstoot van luchtverontreinigende stoffen zoals fijnstof ($PM_{2.5}$) en stikstofoxiden (NO_x). De transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit leidt hiermee ook tot een verbeterde luchtkwaliteit en een lagere depositie van stikstof op natuurgebieden. Hoewel we de omvang van deze effecten in deze studie niet hebben berekend, kunnen we op basis van de geschetste paden wel concluderen dat de transitie naar klimaatneutraliteit een aanzienlijk kleiner effect zal hebben op de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen, en daarmee op de luchtkwaliteit en stikstofdepositie, dan op de uitstoot van broeikasgassen. De neveneffecten van de energietransitie zijn op dit punt beperkt (tabel 4.2).

[12] De adviesraad concludeert op basis van alleen de eerste twee criteria dat de uitstoot in de EU in 2040 al onder de nul zou moeten liggen, ofwel dat er in de EU per saldo CO_2 uit de atmosfeer onttrokken zou moeten worden. Dit acht de raad echter niet haalbaar.

Bij het wegverkeer is de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen de afgelopen decennia al hard gedaald (PBL et al. 2023b), grotendeels als gevolg van Europees bronbeleid voor nieuwe voertuigen. Dit bronbeleid heeft ertoe geleid dat vrijwel alle nieuwe voertuigen zijn uitgerust met een roetfilter en/of katalysator. Nieuwe voertuigen zijn daarom al relatief schoon. De milieuwinst van elektrische voertuigen is daardoor beperkt in vergelijking met nieuwe benzine- of dieselvoertuigen. De elektrische auto is vooral effectief als het erom gaat de klimaatimpact van het wegverkeer te verlagen. Een belangrijk voordeel van elektrisch rijden is wel dat de emissieniveaus gedurende de levensduur van de auto niet oplopen. Bij benzine- en dieselauto's speelt dat risico wel, onder andere door defecten of door verwijdering van katalysatoren en roetfilters. Hoe groot de omvang en de richting zijn van het effect van elektrische auto's op de slijtage van banden, remmen en wegdek en de resulterende slijtage-emissies van $PM_{2.5}$, is nog onzeker. Door regeneratief remmen kunnen remmen minder hard slijten, terwijl het hogere voertuiggewicht van elektrische auto's resulteert in een hogere slijtage van banden en wegdek. Hoe dit per saldo uitpakt, is nog onderwerp van onderzoek. De uitstoot van zwaveldioxide (SO_2) door het wegverkeer is momenteel al minimaal. Alle brandstoffen voor het wegverkeer zijn sinds 2010 zwavelvrij. Hier heeft de transitie dus geen impact.

Voor de lucht- en scheepvaart geldt dat de energietransitie waarschijnlijk voor het grootste deel wordt ingevuld met hernieuwbare brandstoffen voor verbrandingsmotoren. Bij de verbranding daarvan komen luchtverontreinigende stoffen vrij. Het gebruik van biobrandstoffen of e-kerosine in de luchtvaart heeft waarschijnlijk geen effect op de uitstoot van NO_x. De uitstoot van $PM_{2.5}$ kan bij gebruik van e-kerosine wel afnemen omdat het aromatengehalte in die brandstof lager is. Bij de zeescheepvaart wordt een kleine afname verwacht van de NO_x-uitstoot als gevolg van het gebruik van batterij-elektrische aandrijving en waterstof in brandstofcellen. Deze verduurzamingsopties hebben in de paden slechts een kleine rol. Het overgrote deel van de energietransitie wordt ingevuld met brandstoffen. Bij gebruik van hernieuwbare brandstoffen wordt geen afname van de NO_x-uitstoot verwacht omdat die uitstoot al wordt begrensd door de huidige emissienormering van de IMO. De hoogte van de uitstoot wordt vooral bepaald door de hoogte van de emissienormen. Voor $PM_{2.5}$ zijn er geen emissienormen. Hier verwachten we wel lagere emissieniveaus bij de zeescheepvaart door het gebruik van hernieuwbare brandstoffen. Deze leiden namelijk tot een schoner verbrandingsproces. Hernieuwbare brandstoffen bevatten in tegenstelling tot fossiele diesel en stookolie geen zwavel, waardoor ook de uitstoot van zwavel iets afneemt. Door recente wetgeving over het maximale zwavelgehalte in scheepsbrandstoffen (of het verplichte gebruik van nabehandeling) is de uitstoot van zwavel sterk afgenomen.
Hoewel de paden weinig impact hebben op de totale uitstoot van NO_x en fijnstof op het Nederlandse deel van de Noordzee, kan grootschalige implementatie van walstroom een positief effect hebben op de lokale luchtkwaliteit in de havengebieden. Deze maatregel levert hiermee een bijdrage aan zowel het klimaat als de luchtkwaliteit.

Tabel 4.2
Indicatief effect van paden op uitstoot van luchtverontreinigende stoffen

	Wegverkeer	**Binnenvaart**	**Zeevaart**	**Luchtvaart**
Stikstofoxiden (NO_x)	Kleine afname	Afname	Kleine afname	Geen effect
Fijnstof ($PM_{2.5}$)	Kleine afname	Afname	Afname	Kleine afname
Zwavel (SO_2)	Geen effect	Geen effect	Afname	Afname

Voor de binnenvaart verwachten we een afname van de NO_x- en $PM_{2.5}$-uitstoot doordat in een deel van de vloot batterij-elektrische aandrijving wordt gebruikt. Ook het gebruik van waterstof in brandstofcellen resulteert in een nulemissie aan de uitlaat. De maximale uitstoot van NO_x en $PM_{2.5}$ wordt gereguleerd door Europees bronbeleid. Om hieraan te voldoen wordt uitlaatgasnabehandeling toegepast voor nieuwe motoren. Het gebruik van andere brandstoffen leidt naar verwachting niet tot noemenswaardig andere emissieniveaus. Ook de zwaveluitstoot verandert niet noemenswaardig omdat de brandstoffen voor de binnenvaart al zwavelvrij zijn. Voor het terugdringen van NO_x en fijnstof is het belangrijk om niet alleen alternatieve brandstoffen toe te passen maar ook nieuwe verbrandingsmotoren.

Transitie brengt risico op hogere uitstoot van niet-gereguleerde stoffen
Het gebruik van nieuwe brandstoffen in met name de zeescheepvaart brengt het risico met zich mee op verhoogde emissieniveaus van stoffen die momenteel niet worden gereguleerd. Zo kan bij gebruik van methanol in verbrandingsmotoren aldehyde vrijkomen, wat tot gezondheidsklachten kan leiden. Bij gebruik van ammoniak in verbrandingsmotoren kunnen specifieke stikstofverbindingen vrijkomen die nu niet worden gereguleerd. Ook deze brengen risico's met zich mee voor de gezondheid en de natuur. De omvang van deze effecten is niet goed bekend. Het verdient dan ook aanbeveling om de risico's op hoge emissies van deze componenten nader te onderzoeken en waar nodig ook daarvoor emissienormen te introduceren.

4.3 Mobiliteit binnen het energiesysteem

Voor de verduurzaming van de energievraag door mobiliteit is een grote hoeveelheid hernieuwbare energie nodig (figuur 4.1). Dit roept de vraag op in hoeverre deze behoefte geaccommodeerd kan worden binnen het toekomstige energiesysteem en wat dit betekent voor het energiesysteem. In de TVKN-studie schetst het PBL in meer detail hoe de verduurzamingsopgave van mobiliteit zich verhoudt tot die van andere delen van de economie en samenleving. In deze paragraaf verkennen we kort de rol die de sector kan gaan spelen in het toekomstige energiesysteem. Figuur 4.5 geeft schematisch weer hoe de energievoorziening voor een klimaatneutrale mobiliteit in en vanuit Nederland eruit kan zien in 2050.

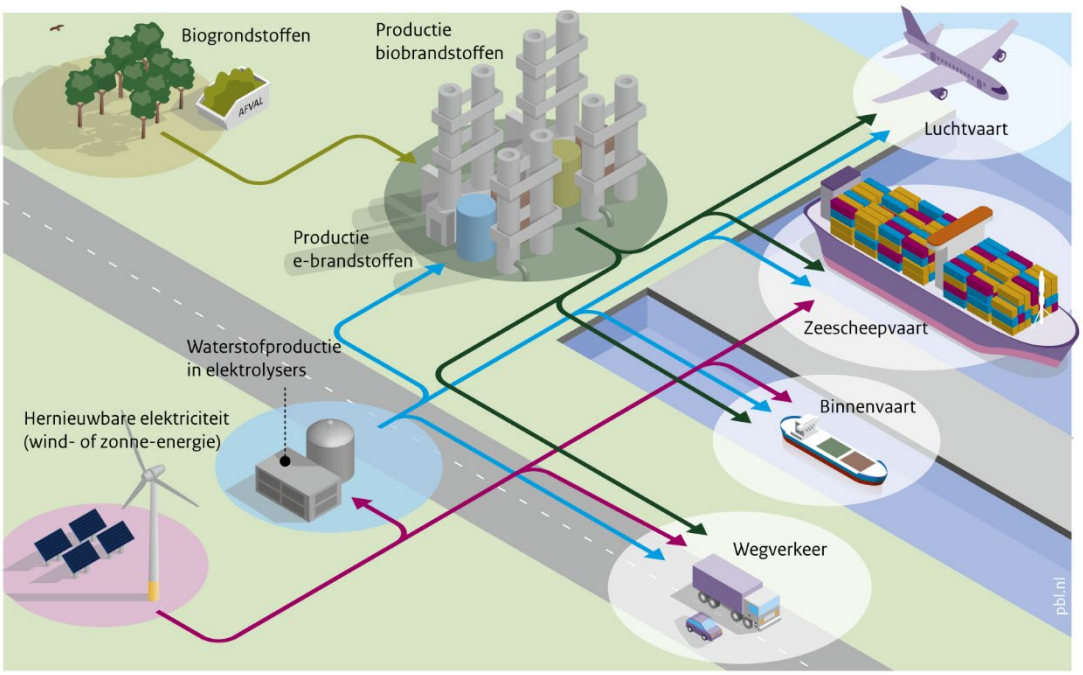
Grote vraag naar hernieuwbare elektriciteit vanuit mobiliteit
In figuur 4.3 is de directe energievraag voor mobiliteit geschetst zoals die uit de paden volgt, ofwel de energie die het vervoermiddel ingaat. Ook voor de productie van die energie(dragers) is energie nodig. Het rendement van de energieketens verschilt aanzienlijk tussen de verschillende energiedragers (zie bijvoorbeeld KiM (2022a) voor een uitgebreid overzicht van het energierendement per energieketen voor mobiliteit). Voor de productie van waterstof en e-brandstoffen is relatief veel elektriciteit nodig. De totale behoefte aan hernieuwbare elektriciteit voor mobiliteit in 2050 komt in het behoudende pad op ongeveer 125 TWh en in het innovatieve pad op bijna 300 TWh. Ter illustratie: met de beoogde realisatie van 72 GW aan wind op zee in Nederland in 2050 kan in totaal circa 325 TWh aan hernieuwbare elektriciteit worden opgewekt. In het innovatieve pad zou dan het grootste deel van de capaciteit nodig zijn voor mobiliteit, terwijl ook andere sectoren steeds meer elektriciteit vragen. De opgave is hier dus groot. Ook is voor de productie van de e-brandstoffen een grote hoeveelheid duurzame koolstof nodig en een grote productiecapaciteit voor waterstof. Het is onwaarschijnlijk dat deze productie volledig in Nederland plaats zal vinden. Niet alleen omdat dit een groot beslag zou leggen op de schaarse capaciteit, maar ook omdat de kosten die gepaard gaan met de import van e-brandstoffen waarschijnlijk lager zijn dan de kosten voor de

productie daarvan in Nederland (TNO 2021b).[13] In paragraaf 5.2 gaan we verder in op de uitdagingen die spelen bij de opschaling van de productiecapaciteit voor hernieuwbare brandstoffen.

In het behoudende pad is een grote rol weggelegd voor biobrandstoffen. Deze vraag kan oplopen tot circa 430 petajoule. Voor de productie daarvan is, afhankelijk van de gebruikte *feedstocks* en de conversietechnologieën om biomassa in biobrandstoffen om te zetten, 700 tot 800 petajoule aan biomassa nodig. Dit is aanzienlijk meer dan de grofweg 125 tot 230 petajoule die in 2050 in Nederland beschikbaar zou kunnen zijn voor energie, feedstocks en materialen (Van Minnen et al. 2024). Ook bij biobrandstoffen zal import dus een belangrijke rol kunnen gaan spelen. In algemene zin past de inzet van biobrandstoffen in de lucht- en scheepvaart binnen het duurzaamheidskader dat de Sociaal-Economische Raad (SER) heeft opgesteld voor biogrondstoffen (SER 2020). De SER adviseert om biogrondstoffen in te zetten in sectoren waar alternatieven niet of slechts beperkt voorhanden zijn.

Figuur 4.5

Mobiliteit in het energiesysteem



Bron: PBL

Mobiliteit krijgt andere rol in het energiesysteem

Mobiliteit is momenteel voor het overgrote deel afhankelijk van het gebruik van aardolieproducten en interfereert daarmee beperkt met de rest van het energiesysteem. Dit beeld verandert in een klimaatneutrale samenleving. Het wegverkeer zal in de toekomst sterk leunen op hernieuwbare elektriciteit, net als veel andere sectoren van de economie. Die elektriciteit voor wegverkeer kan

[13] Een kanttekening daarbij is dat als er mondiaal een schaarste ontstaat aan e-brandstoffen, de marktprijzen (ruim) boven de productiekosten zullen liggen. Dan is het goed denkbaar dat ook in Nederland relatief veel geproduceerd wordt ondanks de in vergelijking met andere regio's hogere productiekosten.

grotendeels in Nederland worden opgewekt. Daarmee verdwijnt de grote afhankelijkheid van geïmporteerde energie. Bovendien raakt het wegverkeer hiermee veel sterker verknoopt met het energiesysteem. Ook voor de hernieuwbare brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart is potentieel veel hernieuwbare elektriciteit nodig.

Het toekomstige energiesysteem in Nederland wordt veel meer afhankelijk van variabele energiebronnen zoals zonne- en windenergie. Het aanbod daaraan varieert over de tijd. Ook het verbruik van elektriciteit gaat meer fluctueren als gevolg van elektrificatie, lokaal onder andere door het laden van elektrische voertuigen. Elektrische auto's die voor woon-werkverkeer worden gebruikt, vragen namelijk vooral in de ochtend en avond veel vermogen (CE Delft 2020b). De huidige manieren om vraag en aanbod van elektriciteit op elkaar af te stemmen, zoals het afschakelen van gascentrales, zijn in de toekomst steeds minder beschikbaar. Het is dus van belang om andere manieren van flexibiliteit in te bouwen in het energiesysteem. Netbeheer Nederland (2023) concludeert zelfs dat flexibiliteit potentieel een disruptieve rol kan gaan spelen in de transitie naar een duurzaam energiesysteem. De juiste beschikbaarheid en inzet van flexibiliteit kan de transitie tot een succes of juist tot een mislukking maken. Flexibele stroomopwekking, handel in elektriciteit met andere landen, opslag of aanpassing van de vraag kunnen allemaal bijdragen aan een grotere flexibiliteit en een betere afstemming van vraag en aanbod.

Het personenautoverkeer kan bijdragen aan die flexibiliteit door de grootschalige uitrol van slim laden. Door meer te laden op momenten dat er veel aanbod van elektriciteit is, wordt de vraag beter afgestemd op het variabele aanbod. Zeker nu op veel plekken het elektriciteitsnetwerk vol zit, kan slim laden de beschikbare capaciteit efficiënter helpen benutten. Slim laden zou volgens het Klimaatakkoord vanaf 2030 de standaard moeten worden. De uitrol blijft tot nu toe echter achter. Met het programma 'Slim laden voor iedereen' wil de overheid de opschaling van slim laden versnellen. Ook met *vehicle-to-grid* (V2G) toepassingen kan het wegverkeer de flexibiliteit van het elektriciteitssysteem helpen vergroten door buffercapaciteit te leveren. De uitrol van deze technologie staat momenteel echter nog in de kinderschoenen. Een nadeel van deze technologieën is dat er meer laadinfrastructuur voor nodig is: voertuigen staan immers langer aan de lader. Dit speelt vooral bij publieke laadpalen, waarbij dit resulteert in een groter ruimtebeslag en extra straatmeubilair. En voertuigeigenaren leveren zelf een stukje flexibiliteit in: het kan zijn dat het voertuig bij onverwacht gebruik nog onvoldoende is opgeladen. Voertuigeigenaren kunnen onder andere via prijsprikkels verleid worden tot slim laden of V2G. In het rapport over het wegverkeer wordt dit verder toegelicht (Van Meerkerk et al. 2024).

De luchtvaart en de scheepvaart zullen in de transitie naar klimaatneutraliteit naar verwachting sterk afhankelijk zijn van biobrandstoffen en e-brandstoffen. Op dit moment speelt Nederland een belangrijke rol bij de raffinage en verkoop van bunkerbrandstoffen voor de lucht- en scheepvaart. De vraag is of die rol behouden blijft. Nederland behoort binnen de EU inmiddels ook tot de grotere producenten van biobrandstoffen (Hurtig et al. 2022). Of ditzelfde voor e-brandstoffen gaat gelden, is onzeker. De productiekosten in Nederland verschillen met die in andere wereldregio's doordat hernieuwbare energie daar goedkoper voorhanden is, ruimte minder schaars is en doordat het aanbod van hernieuwbare elektriciteit en/of waterstofproductiecapaciteit in Nederland beperkt is. Hierdoor is het waarschijnlijk dat de productie van e-brandstoffen vooral in andere delen van de wereld plaatsvindt. Desalniettemin kan de haven van Rotterdam een belangrijke rol blijven spelen bij de transitie naar het gebruik van hernieuwbare brandstoffen in de mobiliteitssector en in de industrie. De haven zou dan voor e-brandstoffen vooral een doorvoerfunctie krijgen (TNO 2021b).

5 Kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven

De paden naar een mobiliteitssector die klimaatneutraal is in 2050, brengen grote uitdagingen met zich mee maar bieden ook kansen. In dit hoofdstuk beschrijven we de belangrijkste kansen en uitdagingen. We onderscheiden vier typen uitdagingen. In paragraaf 5.1 worden eerst de belangrijkste ontwikkelingen op het gebied van beleid en regelgeving samengevat. Hier gaan we in op de vastgestelde doelstellingen en beleidsmaatregelen. Deze bepalen de aantrekkelijkheid van de maatregelen die kunnen worden genomen; die komen daarna aan de orde. Als uitgangspunt daarbij nemen we de vier factoren die de klimaatprestatie van mobiliteit bepalen: vervoersvolume, vervoerswijzekeuze, energie-efficiëntie van het vervoer en fossiele koolstofinhoud van de energiedrager (zie paragraaf 2.1). We beginnen in paragraaf 5.2 met de inzet van klimaatneutrale energiedragers en schetsen de belangrijkste uitdagingen die we op basis van de paden uit hoofdstuk 3 hebben geïdentificeerd. Vervolgens beschrijven we in paragraaf 5.3 de mogelijkheden om de energie-efficiëntie van het vervoer verder te verbeteren en de uitdagingen die daarbij spelen. In paragraaf 5.4 verkennen we de rol die (beleid gericht op) de vervoersvolumes en modal split kunnen spelen bij de verduurzaming van de mobiliteit.[14]
Een belangrijke voorwaarde om de transitie te laten slagen is dat er draagvlak is voor de benodigde veranderingen en de bijbehorende beleidsinstrumenten. In paragraaf 5.5 verkennen we op hoofdlijnen de kansen en uitdagingen op dit gebied we die in de literatuur zijn tegengekomen.

5.1 Beleid en regelgeving

Voor de transitie naar klimaatneutrale energiedragers en een efficiënter gebruik van de verschillende vervoerswijzen is regelgeving van cruciaal belang. Door heldere en ambitieuze doelen te stellen, kunnen beleidsmakers sturen op de richting en toepassing van innovaties (Hekkert et al. 2020). Normering en beprijzing van de klimaatimpact van mobiliteit verlopen primair via internationale gremia, zoals de Europese Unie (EU) en de International Maritieme Organizatie (IMO) en de Internationale Burgerluchtvaart Organisatie (ICAO) van de Verenigde Naties. Ook nationaal beleid speelt een rol. Subsidies en gedragscampagnes worden immers in belangrijke mate nationaal vormgegeven. Uit de vier achtergrondrapporten bij deze studie (Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Van Meerkerk et al. 2024; Traa et al. 2024) blijkt dat hierbij op dit moment verschillende niveaus van implementatie gelden.

Een eerste stap is het realiseren van heldere klimaatdoelstellingen tot en met 2050. Hierbij is er (bij voorkeur) geen conflict tussen de doelstellingen voor de verschillende overheidslagen. Vervolgens moet er concrete wet- en regelgeving worden geformuleerd waarmee de doelstellingen kunnen

[14] De analyse in dit hoofdstuk is deels gebaseerd op (het samenbrengen van) de onderliggende rapportages per vervoerswijze (Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Van Meerkerk et al. 2024; Traa et al. 2024) en deels op literatuurbronnen. Vanuit praktisch oogpunt verwijzen we maar beperkt naar de onderliggende rapportages. Daar waar uitspraken afkomstig zijn uit andere bronnen vermelden we dat wel consequent.

worden behaald. Deze regelgeving kan op verschillende manieren geïmplementeerd worden, bijvoorbeeld in de vorm van een norm (maximum CO_2-niveau, verplichting voor het gebruik van een technologie) of in de vorm van prijsbeleid (ETS, accijns, subsidie). Wanneer een technologie wordt verplicht, is het van belang dat deze ver genoeg ontwikkeld is en er voldoende draagvlak is voor de toepassing. Daarnaast speelt faciliterend beleid een rol dat zich richt op verschillende aspecten van de implementatie op Europese en vooral op nationale of lokale schaal.

Tabel 5.1
Stand van zaken klimaatbeleid per vervoerswijze op hoofdlijnen

	Wegverkeer	Binnenvaart	Zeevaart	Luchtvaart
Doelstelling klimaatneutraal	EU: klimaatneutraal in 2050	EU: Geen expliciet doel NL: doelstelling gemiddeld label B in 2030	IMO: klimaatneutraal rond 2050	ICAO: netto nul in 2050 (ambitie)
Beleidspakket vastgesteld	EU: Vastgesteld in richtlijnen en verordeningen van Fit-for-55	Nee	EU: vastgesteld in Fit for 55 IMO: Nee, gebeurt in 2025	EU: vastgesteld in Fit for 55 ICAO: Nee
Normerend beleid	EU: CO_2-normen nieuwe voertuigen REDIII	Nee	EU: Reductiepad koolstofintensiteit brandstof (FUelEU Maritime) IMO: Technische en operationele standaarden	EU: Ingroeipad verplichting hernieuwbare brandstoffen (ReFuel aviation)
Prijsbeleid	EU: ETS-2[a)] NL: Brandstofaccijns en CO_2-differentiatie autobelastingen, Vrachtwagenheffing	Geen	EU: ETS1[b)]	EU: ETS1 ICAO: CORSIA

a) ETS-2 moet in 2027 in werking treden.
b) De zeescheepvaart binnen de EU en de helft van de uitstoot van vaarten van en naar de EU wordt vanaf 2024 stapsgewijs onder het bestaande EU-ETS (ETS1) gebracht.

Voor het wegverkeer is het regelgevende kader al ver uitgewerkt (tabel 5.1). Doelstellingen en het bijbehorende instrumentarium zijn uitgewerkt in het Europese beleidspakket Fit-for-55. De CO_2-normen voor nieuwe personen- en bestelauto's liggen vast en garanderen vanaf 2035 alleen nog de verkoop van nulemissietechnologie. Ook voor vrachtauto's is er overeenstemming in de EU over aangescherpte voertuignormen voor 2030 en 2040. Het Europese ingroeipad van nulemissietechnologie ligt daarmee vast. Voor de toepassing van andere oplossingsrichtingen bestaat er nog onzekerheid voor de langere termijn. De verplichtingen en criteria voor de inzet van duurzame brandstoffen in de mobiliteit uit de Richtlijn Hernieuwbare Energie lopen momenteel tot 2030. Vanaf 2027 komt er een nieuwe vorm van beprijzing via de invoering van het Europese

emissiehandelssysteem voor de gebouwde omgeving (ETS) en het wegverkeer (ETS-2). Op het gebied van prijsbeleid is er de afgelopen jaren door de nationale overheid een sterke fiscale stimulering voor elektrisch rijden geweest in de belasting van personenauto's en motorrijwielen (bpm), de motorrijtuigenbelasting (mrb) en de bijtelling. Ook zijn er subsidieregelingen geïntroduceerd voor de aanschaf van nieuwe en gebruikte elektrische voertuigen. Daarnaast heeft de overheid de aanschaf van schone en zuinige technologie door bedrijven bevorderd via de Milieu-Investeringsaftrek (MIA) en de Willekeurige afschrijving milieu-investeringen (VAMIL).

Voor de zeescheepvaart zijn de klimaatdoelstellingen op mondiaal (IMO) en Europees niveau tot en met 2050 (verregaand) vastgesteld. De doelstellingen liggen redelijk goed in het verlengde van elkaar. Op Europees niveau is ook een set beleidsmaatregelen vastgesteld in het Fit-for-55-pakket als uitwerking daarvan. Het pakket beleidsinstrumenten op mondiaal niveau (IMO) wordt uiterlijk in 2025 vastgesteld. Het Europese maatregelenpakket wordt hier mogelijk nog op aangepast. Het Europese pakket bevat zowel een normerend als een beprijzend element. Vanuit het Europese beleidspakket FuelEU Maritime is een geleidelijk oplopende norm ingevoerd voor het terugdringen van de koolstofintensiteit van de energiedragers die worden gebruikt op vaarten binnen de EU en 50 procent van de uitstoot van vaarten van en naar de EU. Daarnaast komt de uitstoot op deze vaarten vanaf 2024 onder het EU-ETS te vallen.

Voor de luchtvaart heeft de ICAO een mondiale ambitie vastgesteld van netto nul koolstofemissies in 2050. Dit doel is niet uitgewerkt in een concreet beleidsinstrumentarium. Wel heeft de ICAO met het mondiale beprijzingssysteem CORSIA een instrument geïntroduceerd om een toename van de uitstoot van broeikasgassen tot boven het niveau van 2019 te voorkomen of compenseren. De EU heeft een ingroeipad vastgesteld voor een oplopende verplichting om hernieuwbare brandstoffen in te zetten (ReFuelEU_Aviation). Daarnaast valt de intra-Europese luchtvaart onder het Europese emissiehandelssysteem (EU-ETS). Passagiers die vanaf Nederlandse luchthavens vertrekken, betalen een vliegticketheffing.

Voor de binnenvaart is nog geen eenduidige doelstelling op Europees niveau geformuleerd. Alleen de Centrale Commissie voor de Rijnvaart heeft een strategisch doel vastgesteld. Ook is er nog geen duidelijkheid over de te nemen beleidsmaatregelen. De binnenvaart is momenteel niet opgenomen in het EU-ETS. Het ETS bevat wel een *opt-in*-mogelijkheid voor landen om sectoren toe te voegen. Dit kan een manier zijn om ook voor de binnenvaart een prijsprikkel voor verduurzaming te introduceren. Gezien het internationale karakter van de binnenvaart verdient het de voorkeur hier op (Noordwest-)Europese schaal afspraken over te maken. Nederland heeft recent aangekondigd in 2030 in te willen zetten op een gemiddelde uitstoot van de binnenvaartvloot (gemiddeld label B); dat zou een reductie betekenen van ongeveer 55 procent ten opzichte van de huidige gemiddelde uitstoot. De doelstelling moet nog vertaald worden naar beleidsmaatregelen.

Handelingsperspectief Nederlandse overheid rond normering is beperkt

De Nederlandse overheid heeft beperkte mogelijkheden om de mobiliteit te verduurzamen als het gaat om het vaststellen van doelstellingen en normerend beleid voor voertuigtechnologie. Besluitvorming hierover vindt plaats op Europees (wegverkeer en binnenvaart) of mondiaal niveau (zee- en luchtvaart). In de uitwerking en voorbereiding van deze wetgeving kan Nederland wel een voortrekkersrol spelen.

Op het gebied van beprijzingsbeleid heeft Nederland veel invloed op het wegverkeer, maar, door concurrentieoverwegingen en internationale afspraken, minder op de andere vervoerswijzen. De

lucht- en scheepvaart worden momenteel nog niet of slechts beperkt beprijsd. Deze vervoerswijzen zijn uitgezonderd van brandstofaccijnzen. De omvang van dit zogeheten 'beprijzingstekort' bedraagt bijna 6 miljard euro per jaar (CPB & PBL 2023). Voor personenvervoer in de luchtvaart hoeft bovendien ook geen BTW te worden afgedragen, waarmee een bedrag van ruim 2 miljard euro per jaar gemoeid is. Een deel van dit tekort wordt ondervangen door (een deel van) de zeescheepvaart op te nemen in het EU-ETS en in datzelfde ETS de gratis emissierechten voor de luchtvaart af te schaffen. Wanneer de prijs van zowel de lucht- als de scheepvaart in lijn wordt gebracht met hun klimaatschade, kan dit de verduurzaming van deze sectoren stimuleren. Door de uitstoot van broeikasgassen te beprijzen ontstaat een prikkel voor bedrijven en burgers om die uitstoot te verminderen. Ook zorgt de beprijzing ervoor dat investeringen in verduurzaming zich eerder terugverdienen.

Naast normeren en beprijzen is er veel ruimte voor de Nederlandse overheid om flankerende maatregelen te nemen. Denk bijvoorbeeld aan de uitrol van infrastructuur of maatregelen die invloed hebben op het gedrag van personen en bedrijven. Dit beleid komt hierna aan de orde.

5.2 Inzet van klimaatneutrale energie

Om de klimaatdoelen voor mobiliteit te halen is de inzet van klimaatneutrale energiedragers cruciaal. Zoals we beschreven in hoofdstuk 2, zijn er verschillende stadia van de transitie die elk hun eigen uitdagingen hebben. Uit de beschrijving van de verschillende vervoerswijzen in hoofdstuk 3 blijkt dat deze in verschillende fases van de transitie zitten. In deze paragraaf brengen we de kansen, uitdagingen en de handelingsperspectieven op het gebied van klimaatneutrale energie in kaart voor de verschillende vervoerswijzen. Hierbij onderscheiden we een aantal thema's die naar voren komen bij de uitdagingen die we in hoofdstuk 3 per vervoerswijze beschreven: technologieontwikkeling, beschikbaarheid van energiedragers, benodigde infrastructuur en financiering.

Ontwikkeling technologie

In hoofdstuk 2 presenteerden we een raamwerk voor de verschillende stadia van technologieontwikkeling. Bij elke vervoerswijze spelen verschillende technologieën een rol (zie hoofdstuk 3), die elk in een ander stadium van ontwikkeling kunnen zitten (*pre-development, development, take-off, versnelling* en *stabilisatie*). In het wegtransport wordt batterij-elektrische aandrijving naar verwachting de dominante techniek. Deze techniek is voor personenauto's en bestelverkeer redelijk uitontwikkeld en komt nu in de *versnellingsfase*. De nadruk ligt hier op opschaling. Voor (zware) vrachtauto's is de techniek nog in ontwikkeling. Voor dit segment is ook waterstof een technologische optie die verder verkend wordt. In de luchtvaart blijft (een duurzame vorm van) kerosine dominant. Hier ligt de nadruk vooral op de beschikbaarheid van duurzame brandstoffen (zie verder in deze paragraaf).

Momenteel is nog niet duidelijk welke energiedragers dominant zullen worden bij de verduurzaming van de binnenvaart en zeevaart. Hiervoor is de technologie nog niet ver genoeg uitontwikkeld. Waarschijnlijk zullen er verschillende energiedragers voor verschillende marktsegmenten worden ingezet. Bovendien kost het zeer veel tijd om de vloot te vervangen, waardoor ook de ontwikkeling van retrofit- en *drop-in*-oplossingen de komende decennia belangrijk is. De technologie in de scheepvaart bevindt zich deels nog in een fase van ontwikkeling (*development*). Belangrijk in deze fase is dat er meer ervaring wordt opgedaan met de verschillende technieken in verschillende segmenten, om meer duidelijkheid te krijgen over de toepasbaarheid ervan en om te bezien waar kostenbesparingen te halen zijn in het ontwerp. Op korte termijn is het belangrijk om voor de binnen- en zeescheepvaart pilottoepassingen te realiseren. Vanuit deze pilots zou een stap naar de

opschalingsfase moeten worden gezet. Deze stap biedt kansen voor zowel scheepseigenaren om onzekerheden te mitigeren als voor de Nederlandse industrie om meer ervaring op te doen met het ontwerp en de bouw van schepen die varen met alternatieve aandrijflijnen. In de 'Sector Agenda Maritieme Maakindustrie' wordt een aantal punten genoemd die de opschaling kunnen faciliteren, waaronder maritieme inkooptrajecten, gerichte financiering en continuïteit van de innovatieprogramma's.

De energietransitie van de verschillende vervoerswijzen is complex en de tijd waarin de transitie dient te worden gerealiseerd is beperkt. Dit betekent dat er weinig ruimte is voor tegenvallers, zoals vertraging in de technologieontwikkeling of -implementatie. Daarom is het niet altijd mogelijk te wachten tot duidelijk is over wat de 'winnende' technologie is. Wij voorzien dat het hiermee ook noodzakelijk is om te investeren in technologieën waarvan de rol in de energietransitie op langere termijn onzeker is. In veel gevallen gaat het hierbij in ieder geval om de ontwikkeling van kennis en de doorontwikkeling van technologieën tot *technological readiness levels* (TRL) vanwaar de stap naar de praktijk gezet kan worden. Verder kunnen pilots en *living labs* een grootschalige implementatie soepeler laten verlopen. Ook kan worden bekeken hoe de wet- en regelgeving kan worden aangepast om snelle opschaling mogelijk te maken indien dit nodig blijkt. Investeringen in onderzoek en ontwikkeling (R&D) in Nederland sluiten daarbij zoveel mogelijk aan bij de internationale initiatieven.

Een mogelijk overkoepelend probleem voor de transitie is krapte op de arbeidsmarkt. Weterings et al. (2022) laten zien dat voor de energietransitie in den brede veelal werknemers uit dezelfde beroepsgroepen nodig zijn. Denk hierbij vooral aan ambachtsberoepen als metaalbewerkers, machinemonteurs en elektriciens en elektromonteurs. Voor deze beroepen bestaan nu al tekorten. Dit risico wordt onderkend in verschillende sectorrapporten (zie bijvoorbeeld de Sector Agenda Maritieme Maakindustrie).

Beschikbaarheid van energiedragers en grondstoffen

Om voldoende hernieuwbare energiedragers beschikbaar te hebben voor de mobiliteit, is het cruciaal dat er een opschaling plaatsvindt van de productiecapaciteit van hernieuwbare elektriciteit, duurzame koolstof (bijvoorbeeld door *Direct Air Capture*), waterstof (elektrolysers) en biobrandstoffen. De ontwikkeling van het aanbod van deze bronnen en de daarbij behorende prijs zijn mede bepalend voor het tempo waarin de verduurzaming plaats kan vinden en met name ook voor het marktaandeel van de specifieke energiedragers dat resulteert. De hernieuwbare elektriciteitsopwekking zal wereldwijd sterk moeten toenemen voor de energietransitie, onder andere voor de productie van e-brandstoffen, voor gebruik in batterij-elektrische voertuigen en voor gebruik in andere sectoren dan de mobiliteit.

Omdat er een tekort is aan fysieke ruimte in Nederland, zal het niet mogelijk zijn om alle *feedstocks* die nodig zijn voor de benodigde bio- en e-brandstoffen hier te produceren (zie ook paragraaf 4.3). Bovendien zijn er mogelijk regio's waar duurzame bio- en e-brandstoffen tegen (aanzienlijk) lagere kosten kunnen worden geproduceerd dan in Nederland, omdat de grondprijzen en de prijzen voor energieproductie daar lager zijn (TNO 2021b). Aangezien de markten voor bio- en e-brandstoffen mondiaal zijn, is het waarschijnlijk dat veel landen deze brandstoffen voor een groot deel zullen moeten importeren. Dit kan een belangrijke logistieke activiteit worden voor Nederland. Belangrijk hierbij is dat vroegtijdig wordt gekeken naar strategische en geopolitieke aspecten om de leveringszekerheid van energiedragers in de toekomst te kunnen garanderen.

Momenteel worden e-brandstoffen niet op commercieel significante schaal geproduceerd. De kosten zijn hoog en de technologie bevindt zich in een relatief vroeg ontwikkelingsstadium. De productiekosten van hernieuwbare brandstoffen (zeker e-brandstoffen) liggen significant hoger dan die van reguliere fossiele brandstoffen, en de verwachting is dat dit in de toekomst ook zo zal zijn (zie ook de onderliggende rapportages over de lucht- en scheepvaart: Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Traa et al. 2024). Transportbedrijven zijn hierdoor terughoudend om e-brandstoffen te gebruiken. Doordat daardoor geen gegarandeerde afzetmarkt voor deze brandstoffen bestaat, worden investeringen in de productiecapaciteit ervan risicovol. Daardoor zien bedrijven van deze investeringen af, waardoor niet de benodigde schaalgrootte wordt bereikt die nodig is om de kosten terug te dringen. Overheidsbeleid is nodig om deze onzekerheid te verminderen, bijvoorbeeld door normering of CO_2-beprijzing. Daarnaast is mogelijk financiële of andersoortige ondersteuning nodig voor de opschaling van productiecapaciteit voor e-brandstoffen (zie bijvoorbeeld ITF (2023) voor een overzicht van financiële instrumenten die investeringen in klimaatneutrale technologie kunnen bevorderen). Het nieuwe Europese beleidskader voor hernieuwbare brandstoffen van niet-biogene oorsprong (RFNBOs) biedt hiervoor een basis.

Sterk toenemende vraag naar grondstoffen en materialen kan transitie vertragen

Voor de energietransitie zijn verschillende kritieke materialen (en componenten) nodig. De sterk toenemende vraag naar batterijen voor elektrische auto's en zwaar wegverkeer is een van de drijvende krachten achter de sterke toename van de vraag naar schaarse grondstoffen en metalen die wordt verwacht als gevolg van een aangescherpt klimaatbeleid (IEA 2021). Maar ook het toenemend gebruik van waterstof voor onder andere mobiliteit leidt tot een sterke stijging van de vraag naar metalen voor de productie van elektrolysers. De tijdige beschikbaarheid van specifieke grondstoffen die cruciaal zijn voor de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit, zoals lithium en kobalt, is een punt van zorg (Hanemaaijer et al. 2023). Ondanks veronderstelde grote geologische reserves, bestaat er een reële kans op leveringsrisico's, enerzijds doordat de doorlooptijden voor het openen van nieuwe mijnen en het opschalen van productiefaciliteiten lang zijn en anderzijds doordat er zorgen zijn over de impact op het landschap en de sociaaleconomische effecten van de mijnbouw (Jowitt et al. 2020). Van sommige van deze materialen zijn maar beperkte hoeveelheden voorraden bekend in een beperkt aantal regio's in de wereld, waardoor er ook een geopolitiek element aan de energietransitie zit. Materialen zijn daarom van strategisch belang. Zo geldt voor zowel lithium als kobalt dat driekwart van de huidige mondiale winning is geconcentreerd in drie landen (IEA 2021). Met name China heeft inmiddels een sterke positie opgebouwd in de winning en raffinage van verschillende kritieke metalen.

Uit het oogpunt van energiezekerheid is het raadzaam om in Nederland de benodigde kennis op te bouwen voor de productie van duurzame energiedragers en om ook een deel van de benodigde energiedragers hier te produceren. Dit gebeurt momenteel reeds in verschillende onderzoeksprogramma's uit bijvoorbeeld het Nationale Groeifonds of het programma Horizon Europe. Voor het te importeren deel is een strategie nodig ten aanzien van het type product dat wordt geïmporteerd en het land waar dit vandaan komt. Verder is samenwerking in Europese context noodzakelijk om de waardeketens voor kritische goederen op te bouwen. Het is hierbij belangrijk om strategische allianties te bouwen. Bovendien zijn verschillende manieren denkbaar om efficiënter om te gaan met materialen en zo de vraag ernaar te verlagen: minder gebruik van producten, substitutie van kwetsbare grondstoffen, hergebruik van (gedeelten van) producten en recyclen van producten en materialen (Hanemaaijer et al. 2023). Voor de sector mobiliteit zou het hierbij kunnen gaan om minder voertuigbezit of -gebruik (zie ook paragraaf 5.4) en productinnovatie, meer hergebruik of recycling bij accupakketten.

Distributie van energiedragers

Voor het wegverkeer, en voor de binnenvaart, is de beschikbaarheid van laadpunten en vooral van capaciteit op het elektriciteitsnetwerk een cruciale randvoorwaarde voor de opkomst van elektrische vervoermiddelen en tegelijkertijd een potentiële barrière. De snelheid waarmee laadpunten dienen te worden gerealiseerd om aan de verwachte toename van de vraag te voldoen, is hoog (tot ruim 1.000 laadpunten per werkdag tijden de uitrolpiek). Bovendien bestaat het risico op een technologische *lock-in* wanneer er alternatieve laadtechnologieën beschikbaar komen die beter toepasbaar blijken dan de huidige laadpaal. Voorbeelden van zulke technologieën zijn *electric road systems* of laden op zeer hoog vermogen, waardoor er minder 'normale' laadpalen nodig zouden zijn.

Het toekomstbestendig maken van het elektriciteitsnetwerk is arbeidsintensief en tijdrovend. Daarom is een duidelijk plan nodig voor de verzwaring van het elektriciteitsnetwerk, bijvoorbeeld voor de ruimte die in verschillende gebieden wordt geboden voor de uitrol van laadinfrastructuur. Daarnaast moet er op specifieke locaties, zoals bedrijventerreinen, worden geïnventariseerd welke mogelijkheden er zijn om binnen de bestaande netcapaciteit vraag en aanbod af te stemmen. Deze opgave vereist een aanzienlijke regierol voor de verschillende betrokken overheden. Een belangrijk onderdeel van die opgave is het gebruik van ruimte. Ook dient de wet- en regelgeving te worden aangepast om flexibiliteit te creëren, om vooruit te kunnen investeren (actief in plaats van reactief) en om het mandaat te bepalen van de betrokken partijen (netbeheerders, rijk, provincies).

Ook de distributie van waterstof naar tank- en bunkerlocaties is een complexe opgave. Er zijn verschillende opties mogelijk: vervoer onder druk in tankwagens, distributie via pijpleiding of lokale productie. Elke optie heeft haar voor- en nadelen. Gegeven de onzekerheid van de vraagontwikkeling is het belangrijk een *no-* of *low-regret*-strategie te ontwikkelen, bijvoorbeeld door te bepalen wat de beste toevoermogelijkheid is voor individuele waterstoftankstations.

Voor de lucht- en zeevaart is distributie van energiedragers in Nederland minder een aandachtspunt. Het aantal bunkerlocaties is beperkt en door de rol van het energiecluster in de Nederlandse havens is er al een basisinfrastructuur voor verschillende energiedragers beschikbaar. Hier speelt eerder de vraag waar in de wereld de duurzame brandstoffen geproduceerd worden en of Rotterdam zijn positie als producent en bunkerhaven voor de zeescheepvaart in de huidige omvang behoudt.

Betaalbaarheid en financiering

Hernieuwbare brandstoffen hebben (in ieder geval op dit moment) een hogere kostprijs dan reguliere brandstoffen. Daarnaast vergt de inzet van hernieuwbare energiedragers in sommige gevallen ook investeringen in nieuwe aandrijflijnen, zoals nieuwe verbrandingsmotoren, gebruik van brandstofcellen of batterij-elektrische aandrijving, die vaak duurder zijn dan reguliere aandrijflijnen. Consumenten en bedrijven moeten deze investering (kunnen) financieren.

In het wegtransport verloopt de omschakeling naar een andere energiedrager primair via de aankoop van een nieuw transportmiddel. Naar verwachting is de totale kostprijs voor het bezit en gebruik (ofwel de *Total Cost of Ownership*, TCO) van elektrische voertuigen ergens in de komende jaren gelijk aan of lager dan die van benzine- en dieselvoertuigen De aanschaf van nulemissietechnologie kan hierdoor waarschijnlijk via de reguliere kanalen gefinancierd worden. Mogelijk is hiervoor in de komende vijf jaar wel enige ondersteuning nodig voor het zware materieel.

De afgelopen jaren heeft vooral de aankoop van elektrische voertuigen veel aandacht gehad in het beleid. In de huidige versnellingsfase, waarin zich vooral de transitie van het lichte verkeer bevindt, verdienen de doorstroming van deze elektrische voertuigen naar de tweedehandsmarkt en de afbouw van de bestaande markt van benzine- en dieselvoertuigen aandacht. Belangrijke vragen zijn hoe een volwassen tweedehandsmarkt voor elektrische voertuigen gecreëerd kan worden met een aanbod dat past bij de vraag op die markt, en hoe mobiliteit betaalbaar blijft voor de groep mensen die nog niet bereid of in staat is om de overstap naar elektrisch rijden te maken. Deze groep kan met prijsstijgingen worden geconfronteerd als gevolg van nieuw beleid zoals het ETS-2 en de oplopende eisen aan de inzet van hernieuwbare energie. Dit aspect lichten we toe in paragraaf 5.5.

In de transitie naar CO_2-neutraliteit maakt de luchtvaart vooral gebruik van *drop-in*-brandstoffen. De energietransitie is daar niet zo zeer een financieringsvraagstuk, maar meer een vraagstuk van hogere operationele kosten. Duurzame brandstoffen zijn duurder dan fossiele brandstoffen. Partijen die deze gebruiken, hebben zo een concurrentienadeel ten opzichte van partijen die fossiele kerosine gebruiken. Gezien de internationale concurrentie zullen luchtvaartmaatschappijen zich daarom veelal aansluiten bij het minimumniveau voor het bijmengen van duurzame brandstoffen dat volgens de Europese regelgeving vereist is. De kosten kunnen ze doorberekenen aan hun klanten. Uit een recente verkenning van het ministerie van Financiën komt naar voren dat er momenteel schaarstewinst bij luchtvaartmaatschappijen is (ofwel hoge winst doordat de vraag veel groter is dan het aanbod. Hierdoor is het ook mogelijk dat extra kosten juist wordt afgeroomd uit de huidige winsten (Ministerie van Financiën 2024). Haalbare beleidsdoelstellingen zijn daarom cruciaal.

De energietransitie voor de zeescheepvaart bevindt zich in de komende jaren mondiaal nog vooral in een verkennende fase, waarin de kosten voor de implementatie van duurzame technologieën in de verschillende scheepstypen vrij hoog zijn. Op termijn lijken de additionele kosten van de aandrijflijn (ten opzichte van de additionele operationele kosten van hernieuwbare brandstoffen) relatief beperkt, zeker als deze worden afgezet tegen de totale nieuwbouwkosten van een schip. Voor rederijen kan het een goede risicobeperkende strategie zijn om te investeren in een *dual fuel*-systeem, die kan worden aangedreven met verschillende brandstoffen zoals diesel en methanol. Zo'n systeem is echter niet in gelijke mate toepasbaar voor alle scheepstypen en/of grootteklassen.

Gaat het om de introductie en verdere verspreiding van hernieuwbare brandstoffen, dan gelden voor de zeevaart verregaand dezelfde overwegingen als voor de luchtvaart. Van belang hierbij is dat de IMO nog geen beleidsinstrumenten heeft vastgesteld om het gebruik van duurzame brandstoffen verder te stimuleren. Hierover bestaat nog onzekerheid tot 2025. Verladers spelen hierbij ook een belangrijke rol. Zij kunnen duurzame scheepvaart inzetten om te voldoen aan Europese richtlijnen zoals de *Corporate Social Reporting Directive* (CSRD). Varende partijen kijken naar manieren om hen hierin te faciliteren. Op dit gebied moet nog productontwikkeling plaatsvinden.

Voor de binnenvaart zijn de additionele investeringskosten van alternatieve aandrijflijnen relatief hoog, ook afgezet tegen de totale nieuwbouwkosten van een schip. Daarnaast is er op de korte termijn, waarvoor nog geen duidelijke beleidsdoelstellingen geformuleerd zijn en concrete regelgeving voor verduurzaming ontbreekt, een ongelijk speelveld tussen koplopers en ondernemers die niet in verduurzaming investeren. Ook is het lastig om financiering te krijgen voor duurzame investeringen of die financiering terug te verdienen. De introductie en verspreiding van nieuwe energiedragers vergt hierdoor nieuwe financieringsopties. Een belangrijke randvoorwaarde voor het gebruik van nieuwe energiedragers op de korte termijn is daarom de ondersteuning van pilots en het oprichten van fondsen of het benutten van bestaande financiële middelen voor koplopers.

Wanneer de technologie verder ontwikkeld is, en er handhaafbare doelen zijn, is financiële ondersteuning voor een groot gedeelte van de markt minder noodzakelijk. Mogelijk is echter ook op de lange termijn gerichte ondersteuning noodzakelijk voor kleine zelfstandig opererende schippers. Ook in de binnenvaart zal de toename van hernieuwbare brandstoffen lastig zijn, zolang er geen gelijk speelveld bestaat met partijen die op fossiele brandstof varen. De onduidelijkheid in het beleid remt hiermee het gebruik van hernieuwbare brandstoffen. Net als bij de zeevaart kan ook de verlader hierbij een rol spelen, wat nu al vaak staande praktijk is bij pilotprojecten.

5.3 Verbetering van de energie-efficiëntie

Ons onderzoek naar klimaatneutrale luchtvaart, binnenvaart, zeescheepvaart en wegverkeer laat zien dat er bij alle vervoerswijzen een potentieel is voor (verdere) verbetering van de energie-efficientie van het vervoer.[15] Dit potentieel zit zowel in technische verbeteringen aan het ontwerp van de vervoersmiddelen en de aandrijflijn, bijvoorbeeld door een verbeterde aerodynamica of hybride aandrijving, als in operationele verbeteringen, zoals hogere beladingsgraden of lagere vaarsnelheden. In alle paden uit hoofdstuk 3 is al een verbetering verondersteld van de energie-efficiëntie (tabel 5.4), als voortzetting van autonome ontwikkelingen of in reactie op bestaande regulering of hogere kosten van hernieuwbare brandstoffen. Verbetering van de energie-efficiëntie kan een relevante bijdrage leveren aan het reduceren van de klimaatimpact van mobiliteit. Inzet op verbetering van de energie-efficiëntie is daarom ook een hoeksteen van het Europese energie- en klimaatbeleid in de vorm van het *energy efficiency first principle*.

Tabel 5.4
Potentieel voor energiebesparing in de verschillende vervoerswijzen

	Wegverkeer	Binnenvaart	Zeevaart	Luchtvaart
Techniek - nieuwe vervoersmiddelen	CO_2-normen EU	Nee	IMO: EEDI en EEXI	ICAO: CO_2-standaard
Operationeel	Nationaal beleid	Nee	IMO SEEMP, CII	Nee
Reductiepotentieel tot 2050 [a)]	Niet gekwantificeerd	15-35%	25-40%	25-35%
Waarvan opgenomen in paden	15-20%[b]	15-20%	33%	30%

a) Uitgedrukt in de hoeveelheid energie die het voer-, vaar- of vliegtuig ingaat per eenheid vervoersprestatie (reizigerskilometer of tonkilometer; in het geval van wegverkeer voertuigkilometers).
b) Kosteneffectief energiebesparingspotentieel binnen wat wettelijk mogelijk is, bijvoorbeeld binnen de eisen voor maximale afmetingen.

Regulering technische energie-efficiëntie loopt primair via internationale gremia

Tabel 5.4 laat zien dat er voor het wegverkeer, de luchtvaart en de zeescheepvaart al regelgeving bestaat voor de technische energie-efficiëntie van de transportmiddelen. Deze regelgeving wordt in

[15] Hier gedefinieerd als de hoeveelheid energie die het voertuig in gaat om een bepaalde vervoersprestatie (in reizigerskilometers of tonkilometers) te realiseren. *Modal split*-beleid gericht op een verplaatsing van kilometers naar energie-efficiënte(re) vervoerswijzen komt in paragraaf 5.4 aan de orde.

internationaal verband vastgesteld. Regelgeving voor de energie-efficiëntie van nieuwe wegvoertuigen wordt door de EU vastgesteld in de vorm van CO_2-normen. Bij het voldoen aan deze normen lag de nadruk tot nu toe op het gebruik van een energie-efficiëntere verbrandingstechnologie en een efficiënter ontwerp van de voertuigen. Aanscherping van de normen leidt ertoe dat het accent de komende jaren steeds meer verschuift naar de uitrol van nulemissietechnologie. Deze gaat gepaard met een grote energiebesparing doordat de elektrische aandrijflijn een hoger rendement heeft. Omdat de normen sturen op CO_2-uitstoot, gaat er echter geen prikkel vanuit om nulemissieauto's of laadpalen zo efficiënt mogelijk te ontwerpen. Hier ligt ruimte om de regelgeving te verbeteren door (ook) een prikkel te introduceren voor energie-efficiënte nulemissietechnologie. Hoewel het voor de (directe) CO_2-uitstoot niet uitmaakt hoe efficiënt een elektrische auto is, heeft de efficientie wel invloed op de benodigde hoeveelheid laadinfrastructuur, materialen (gegeven de gewenste actieradius) en hernieuwbare elektriciteit die nodig is om het wegverkeer aan te drijven, inclusief het bijbehorende ruimtebeslag.

Normen voor efficiëntie in de zeevaart zijn recent aangescherpt

De energie-efficiëntie in de zeevaart kan worden verbeterd door technische aanpassingen aan het schip en door logistieke en operationele maatregelen, zoals het verlagen van de snelheid, schaalvergroting of het verhogen van de beladingsgraad. De potentie van dergelijke maatregelen is substantieel maar deze wordt momenteel nog beperkt benut. Operationele, gedrags- en economische barrières zorgen ervoor dat de implementatie van op energie-efficiëntie gerichte maatregelen achterblijft. Het gaat dan om verborgen kosten, het niet reële maar wel ervaren risico van nieuwe technologie en tegengestelde belangen tussen de betrokken partijen. De verwachting is dat nieuwe regelgeving hier verandering in kan brengen. De IMO heeft onlangs de regelgeving rondom energie-efficiëntie aangescherpt. Deze organisatie reguleert niet alleen de technische energie-efficiëntie van bestaande en nieuwe schepen, maar heeft ook beleid om een efficiënter gebruik van de schepen te meten (in de Carbon Intensity Indicator moeten schepen registreren hoeveel energie ze hebben verbruikt ten opzichte van hun laadvermogen en de afgelegde afstand). Hier zijn nog geen sturingsmaatregelen aan gekoppeld; die volgen mogelijk in 2025 (zie paragraaf 5.1).

Nog geen efficiëntienormen voor de binnenvaart

In de binnenvaartsector is er weinig kennis beschikbaar over de energie-efficiëntie van het vervoer en er is geen regulering op het gebied van de energie-efficiëntie. Het ontbreekt aan grootschalige data over vervoersprestaties en het bijbehorende energiegebruik. Hier ligt een uitdaging voor onderzoek. Beter inzicht in (de verschillen in) de energie-efficiëntie van de huidige vloot kan als basis dienen voor de beleidsinzet op het gebied van energie-efficiëntie van nieuwe of bestaande schepen. Hiervoor kunnen instrumenten worden overwogen die vergelijkbaar zijn met de door de IMO ingevoerde maatregelen voor de zeescheepvaart, gericht op zowel de technische efficiëntie van het scheepsontwerp en de aandrijflijn als het efficiënt(er) gebruik van de schepen. Gezien het internationale karakter van de binnenvaart verdient het de voorkeur dit op Europees niveau te reguleren. Nederland kan hierin als groot binnenvaartland een voortrekkersrol spelen door bijvoorbeeld het initiatief te nemen om de huidige energie-efficiëntie beter in te kaart brengen en met gelijkgezinde landen voorstellen te presenteren voor de normering van nieuwe schepen en de bestaande vloot.

De operationele energie-efficiëntie in de binnenvaart kan worden verbeterd door lagere vaarsnelheden. Een vaarsnelheid die gemiddeld 10 procent lager is, kan door optimalisatie van de vaarsnelheden tijdens de reis tot een besparing leiden van circa 30 procent; daarbij wordt rekening gehouden met vaarwegcondities zoals stroming en diepgang. Digitalisering ten behoeve van *smart shipping,* bijvoorbeeld in de vorm van adviezen over toerental en het al dan niet bijschakelen van

motoren, kan dit potentieel helpen ontsluiten. Het praktische potentieel voor de optimalisatie van de vaarsnelheden hangt sterk samen met de logistieke efficiëntie en eventuele technische efficiëntieverbeteringen, waardoor de potentiële besparing door snelheidsverlaging kleiner wordt. Met pilots en nieuwe concepten wordt ook gewerkt aan logistieke efficiëntieverbetering in de binnenvaart. Deze verbetering wordt bemoeilijkt door de gevolgen van de klimaatverandering op de vaarwegcondities. Zo kunnen schepen door een veranderd afvoerregime van de rivieren minder vracht meenemen.

Potentieel voor verdere efficiëntieverbetering in de luchtvaart neemt af

Voor de luchtvaart bestaat er autonoom een sterke prikkel om de energie-efficiëntie van de vliegtuigen te verbeteren. De brandstofkosten vormen een wezenlijk deel van de operationele kosten van luchtvaartmaatschappijen (grofweg 20-35 procent). Historisch gezien verbetert de energie-efficiëntie van nieuwe generaties vliegtuigen sterk, ondanks het gebrek aan normering dat tot voor kort bestond. De ICAO heeft als ambitie dat de mondiale vlootgemiddelde energie-efficiëntie tussen 2020 en 2050 per jaar met gemiddeld 2 procent verbetert. Voor de Nederlandse situatie schatten we een besparingspotentieel van 1 tot 1,5 procent per jaar tot 2050. Dit potentieel zit vooral in technische verbeteringen, onder andere door het gebruik van lichtere materialen. Op termijn wordt het echter steeds lastiger om nieuwe vliegtuigen te verbeteren, tenzij radicale ontwerpveranderingen worden doorgevoerd. Desalniettemin verbetert de technische efficiëntie van de vloot doordat luchtvaartmaatschappijen nieuwe generaties energie-efficiënte vliegtuigen in gebruik nemen.

De mogelijkheden voor een operationele efficiëntieverbetering in de luchtvaart zijn beperkt. De bezettingsgraden zijn mede door de prijsstrategieën van luchtvaartmaatschappijen al hoog (80 a 90 procent) en de fysieke ruimte in vliegtuigen wordt al efficiënt gebruikt. Wel kan een efficiëntere indeling van het luchtruim tot een bescheiden efficiëntieverbetering leiden. De invoering van de *Single European Sky* (SES) – een initiatief van de Europese Commissie om het Europese luchtruimbeheer te moderniseren en harmoniseren – kan bijdragen aan een afname van het brandstofverbruik. De huidige indeling van het luchtruim kan efficiënter, wat tot kortere vliegafstanden leidt en een lager brandstofverbruik. Invoering van SES blijkt echter lastig; het oorspronkelijke voorstel dateert al uit 2004. Tot op heden is het niet gelukt hier overeenstemming over te bereiken vanwege een gebrek aan samenwerking in de sector. In het programma Luchtruimherziening wordt gewerkt aan een nieuwe indeling van het Nederlandse luchtruim. Dit moet leiden tot kortere vliegroutes en daarmee tot brandstofbesparing en minder geluidsoverlast. Het doel is om deze aanpassingen tussen 2026 en 2030 in te voeren. Wat die herziening kan opleveren in termen van energiebesparing, is niet bekend. Een andere optie om brandstof te besparen is door vliegtuigen op een efficiëntere manier naar de gewenste hoogte te laten stijgen en de luchthaven te laten naderen zonder de noodzaak in stapjes te dalen: de zogeheten *Continuous Climb and Descend Operations*.

Aanpassing technische regulering kent lange doorlooptijd

Aanscherping van de efficiëntiestandaarden en CO_2-normen voor nieuwe voer-, vaar- of vliegtuigen kan mogelijk een groter deel van het resterende verbeterpotentieel ontsluiten dan bovenstaande opties. De huidige standaarden voor het wegverkeer, de luchtvaart en de zeevaart zijn echter recent nog aangescherpt. Het effect van deze aanscherpingen werkt de komende decennia door in de vloten. Het is de vraag hoeveel extra winst er op dit vlak de komende jaren te behalen valt. De regelgeving wordt op internationaal niveau vastgesteld, waardoor individuele landen hier geringe invloed op hebben. Bovendien is de doorlooptijd van deze beleidsprocessen lang. Voor de lucht- en scheepvaart geldt dat de hogere brandstofkosten die gepaard gaan met de energietransitie, ook een (extra) prikkel geven om de energie-efficiëntie te verbeteren, los van een aanscherping

van de efficiëntienormen. Het gebrek aan normering voor de binnenvaart is een duidelijk hiaat in de bestaande regelgeving. Hier kan een extra beleidsinzet op korte termijn effectief zijn.

Nationaal beleid gericht op efficiënt gebruik wegvoertuigen en binnenvaartschepen

Waar de technische eisen aan nieuwe vervoersmiddelen op internationaal niveau worden gereguleerd, kan de operationele energie-efficiëntie van met name het wegverkeer en de binnenvaart ook nationaal worden gestimuleerd en gereguleerd. Beleid gericht op het energie-efficiënt gebruik van voer- en vaartuigen bestaat al meerdere decennia in de vorm van campagnes rond Het Nieuwe Rijden (HNR) en Het Nieuwe Varen. Via deze gedragscampagnes licht de overheid gebruikers voor over het energie-efficiënt gebruik van auto's en schepen. Daarmee kan potentieel tot 10 procent energie worden bespaard. Sinds 2008 maakt HNR onderdeel uit van het rijexamen. Nieuwe auto's die zijn uitgerust met moderne technologie, helpen een deel van het potentieel te ontsluiten in de vorm van schakelindicatoren en verschillende niveaus van hybridisatie. De impact van de rijstijl op het energiegebruik is bij elektrische auto's, door regeneratieve remsystemen, minder groot dan bij auto's met een verbrandingsmotor, waardoor het potentieel van HNR afneemt in de tijd.

Ook de maximumsnelheid en de doorstroming van het verkeer zijn van invloed op de energie-efficiëntie en daarmee op de uitstoot van broeikasgassen. CPB en PBL (2020) laten zien dat de verlaging van de maximumsnelheid op het hoofdwegennet uit 2020 een CO_2-besparing oplevert die kan oplopen tot circa 1 megaton. De energiebesparing als gevolg van een lagere maximumsnelheid op de snelweg is bij elektrische auto's bovendien hoger dan bij auto's met een verbrandingsmotor. De relatieve toename in energiegebruik bij een snelheidsverschil tussen bijvoorbeeld 110 en 130 kilometer per uur, is groter bij een elektrische auto dan bij een benzineauto.

Hogere bezetting en belading in wegverkeer en -vervoer moeilijk te bewerkstelligen

De bezetting en belading van de voertuigen speelt ook een belangrijke rol bij de efficiëntie van het vervoer. Een betere benutting van de capaciteit door bijvoorbeeld meer carpoolen kan bijdragen aan een hogere energie-efficiëntie. Ondanks een toegenomen gebruik van carpoolpleinen is de gemiddelde bezettingsgraad van personenauto's tussen 2010 en 2021 echter met 3 procent afgenomen (KiM 2022b). Dit past in een langjarige trend. Het organiseren van carpoolen vergt meer inspanning dan het gebruik van de eigen auto en is dus vooral interessant voor regelmatig terugkerende verplaatsingen zoals woon-werkverkeer. Omdat carpoolen ingaat tegen de consumentenvoorkeuren, komt het veelal niet vanzelf tot stand (KiM 2021a). Ook een maatregel als een kilometerheffing leidt naar verwachting niet tot wezenlijk hogere bezettingsgraden (CPB & PBL 2020). De vraag is hiermee of er effectieve maatregelen zijn om de trend naar een lagere bezettingsgraad van personenauto's te doorbreken.

De beladingsgraad in het goederenvervoer over de weg is tussen 2000 en 2009 afgenomen van circa 60 naar circa 40 procent en sindsdien ongeveer gelijk gebleven (KiM 2021a).[16] Bij het wegvervoer bestaat al een prikkel om efficiënt om te gaan met de beschikbare capaciteit. Dit bespaart immers kosten. Optimalisatie binnen de eigen onderneming lukt veelal wel, maar een verdere verbetering van de beladingsgraad vereist samenwerking binnen logistieke ketens en tussen

[16] Het gaat om de beladingsgraad naar gewicht van het voertuig. Dit is niet voor alle segmenten van het wegvervoer een goede graadmeter. Bij post- en koeriersdiensten is volume vaak de beperkende factor. Goede data over de belading naar volume zijn voor zover bekend niet voorhanden.

bedrijven die soms met elkaar concurreren, bijvoorbeeld door goederenstromen te combineren (CE Delft et al. 2020). Dit komt niet vanzelf tot stand. In het Klimaatakkoord en eerder in het Energieakkoord zijn afspraken gemaakt om een efficiëntieverbetering in de logistiek te realiseren. Tot op heden is niet duidelijk wat de inspanningen op dit vlak hebben opgeleverd. In de paden voor het wegverkeer in deze studie is een verbetering van de logistieke efficiëntie verondersteld door onder andere de inzet van Lange Zware Voertuigen, hogere beladingsgraden en minder leeg rijden. In theorie is er meer potentieel voor verbetering (zie bijvoorbeeld CE Delft 2023), maar tegelijkertijd blijkt uit de literatuur dat dit potentieel niet zomaar te ontsluiten valt. CE Delft (2023) concludeert dat hiervoor een cultuurverandering nodig is in de sector zodat keuzes (meer) gericht zijn op een maatschappelijk optimale logistieke efficiëntie. Gedragscampagnes kunnen daaraan bijdragen, maar er is meer nodig, zoals prijsprikkels.

Gedragsmaatregelen gericht op aanschaf energie-efficiënte technologie

Nationaal beleid kan ook sturen op de aanschaf van energie-efficiënte vervoersmiddelen of technologieën zoals zuinige banden. De aanschafbelasting voor personen- en bestelauto's (bpm) in Nederland kent een CO_2-component en stuurt daarmee voor auto's met een verbrandingsmotor indirect ook op de energie-efficiëntie. Ook de vrachtautoheffing die in 2026 geïntroduceerd wordt, kent een CO_2-component en stuurt indirect op de inzet van energie-efficiënte voertuigen. Naarmate een groter deel van het autopark aan de uitlaat emissievrij wordt, neemt de effectiviteit van dit beleid af. Overwogen kan worden een prikkel op de energie-efficiëntie van nulemissie-voertuigen toe te voegen aan deze regelingen. De motorrijtuigenbelasting (mrb) is gewichtsafhankelijk en stuurt daarmee ook indirect op energie-efficiëntie. Uit onderzoek blijkt echter dat de mrb weinig effect heeft op de autotypekeuze van mensen (Van Meerkerk et al. 2014). Via de mrb sturen op de autotypekeuze is daarom weinig effectief, zeker in de nieuwmarkt. Mogelijk heeft de mrb wel meer effect op de typekeuze in de tweedehandsmarkt. Hier is weinig onderzoek naar gedaan. Bij andere modaliteiten dan het wegverkeer zijn er geen aanschaf- of bezitsbelastingen en is er dus ook geen ruimte om via die route op de aanschafkeuze te sturen. Wel zou bij subsidieregelingen zoals de motorvervangingsregeling voor binnenvaartschepen gestuurd kunnen worden op *right sizing*, ofwel het voorkomen dat een schip een te krachtige motor heeft.

Reboundeffecten beperken effectiviteit besparingsmaatregelen

Energiebesparingsmaatregelen resulteren in lagere gebruikskosten, en daarmee mogelijk in een grotere vervoersvraag, waardoor onder de streep een kleinere afname van het daadwerkelijke brandstofverbruik overblijft. Deze zogeheten reboundeffecten beperken de effectiviteit van efficientiemaatregelen. De omvang van het reboundeffect is voor het personenautoverkeer vrij uitgebreid onderzocht. In een metastudie constateren Dimitropoulos et al. (2018) een vrij grote spreiding in de onderzoeksresultaten. De omvang van het reboundeffect bedraagt op de lange termijn gemiddeld circa 26 à 29 procent. Wel lijkt de omvang van het reboundeffect in het wegverkeer in de loop van de tijd af te nemen. Hoe groot het reboundeffect is van een overstap van een brandstofmotor naar elektrisch rijden, is onderwerp van nader onderzoek. Reboundeffecten in het wegvervoer en in de lucht- en scheepvaart zijn nog niet uitgebreid onderzocht.

Conclusie: potentieel voor verbetering energie-efficiëntie, maar implementatie is onzeker

Verbetering van de energie-efficiëntie vermindert het beslag dat de mobiliteitssector legt op schaarse energiebronnen en materialen en vergroot de kans dat de mobiliteit in 2050 klimaatneutraal is. Ook verkleint een efficiëntieverbetering de klimaatimpact in de periode dat de sector nog niet klimaatneutraal is en draagt ze er daarmee aan bij dat Nederland de Parijsafspraken kan halen. Een inzet op energiebesparing is daarmee een relevant onderdeel van de klimaatstrategie voor

mobiliteit. Uit de analyse van de vervoerswijzen blijkt dat deze allemaal de potentie hebben om de energie-efficiëntie van het vervoer verder te verbeteren met technische én logistieke maatregelen. We schatten dit potentieel op zo'n 15 tot 30 procent tot 2050, al is er bij alle vervoerswijzen nog potentieel voor verdere verbetering. Of dit potentieel ook kan worden ontsloten, is niet evident.

De energie-efficiëntie van nieuwe vervoersmiddelen wordt internationaal gereguleerd. Normen voor wegvoertuigen, zeeschepen en vliegtuigen zijn recent vastgesteld of aangescherpt. Dit is verwerkt in de hier gehanteerde transitiepaden. Inzet op aanscherping of verbetering van die normering kan op termijn de klimaatimpact van mobiliteit helpen verminderen. Bij de binnenvaart zijn er nog geen normen voor technische of operationele energie-efficiëntie. Hier ligt een kans voor Nederland om een voortrekkersrol te spelen bij het formuleren van nieuw beleid.

De operationele energie-efficiëntie van het wegverkeer en de binnenvaart kan met nationaal beleid worden beïnvloed. Historische trends duiden echter op een steeds minder goede benutting en belading van wegvoertuigen. Ook de trend naar steeds zuinigere auto's is de laatste jaren gestagneerd met de toegenomen populariteit van SUVs. Die trends doorbreken blijkt weerbarstig en is een proces van de lange adem. Veranderingen komen niet vanzelf tot stand. Met een combinatie van gedragscampagnes en gerichte prijsprikkels of normering is hier waarschijnlijk meer haalbaar. Hoe groot dit potentieel is in het licht van de transitie naar nulemissie technologie en hoe dat effectief kan worden ontsloten is onzeker en kan onderwerp zijn voor vervolgonderzoek.

5.4 Minder en anders

De toekomstige energievraag voor mobiliteit hangt samen met de ontwikkeling van de vervoersvolumes en de *modal split*: de verdeling van het vervoer over de vervoerswijzen. Tabel 5.5 laat zien dat alle geschetste paden in deze studie een zekere mate van groei veronderstellen van de vervoersvolumes tot 2050. In de paden zijn geen majeure wijzigingen verondersteld in de modal split.[17] De groeiverwachtingen zijn gebaseerd op continuering van de huidige maatschappelijke trends en voorkeuren en het huidige mobiliteitsgedrag, en veronderstellen geen majeure wijzigingen in het mobiliteits- of ruimtelijk beleid. Veranderingen in het mobiliteitsgedrag, al dan niet in reactie op beleidsingrepen, kunnen echter een belangrijke rol spelen bij de transitie naar klimaatneutraliteit. De ontwikkeling van de vervoersvolumes is namelijk niet alleen afhankelijk van de ontwikkeling van de bevolking en economie, maar hangt ook samen met beleidskeuzes rond bijvoorbeeld de beprijzing van de verschillende vervoerswijzen, infrastructuurinvesteringen en ruimtelijk beleid. Ook veranderende maatschappelijke voorkeuren, al dan niet onder invloed van overheidsbeleid, bepalen mede de ontwikkeling van de mobiliteit. Het mobiliteitsgedrag van consumenten komt niet tot stand in een vacuüm maar wordt beïnvloed door de economische (kosten, belastingstructuur), fysieke (ruimtelijke inrichting, infrastructuur) en sociale (sociale normen en gedrag van anderen) omgeving (Paradies & Van den Brink 2023). Ook de omvang van het goederenvervoer is mede een afgeleide van de economische en fysieke omgeving en van beleidskeuzes op dit gebied. In deze paragraaf verkennen we de rol die deze factoren kunnen spelen bij de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteitssector.

[17] De modal split is niet geëxpliciteerd in de paden. De groeipaden zijn afgeleid van bestaande verkenningen zoals de WLO en de KEV, waarin geen majeure wijzigingen optreden in de modal split.

Energietransitie beïnvloedt vervoersvolumes via vervoerskosten

De ontwikkeling van de vervoersvolumes in het personen- en goederenvervoer hangt onder meer samen met de ontwikkeling van de vervoerskosten. Deze kosten veranderen door de energietransitie. De omvang en richting van die verandering verschilt per vervoerswijze (tabel 5.5) en hangt samen met beleidskeuzes. Verduurzaming van de lucht- en scheepvaart leidt tot hogere brandstofkosten. De productiekosten van hernieuwbare brandstoffen voor de lucht- en scheepvaart liggen naar verwachting een factor twee tot drie hoger dan die van fossiele brandstoffen. In de scheepvaart kan ook het gebruik van een andere aandrijftechnologie een prijsverhogend effect hebben. De kosten voor het gebruik van fossiele brandstoffen nemen daarnaast toe doordat deze onder het EU-ETS (komen te) vallen en door de mondiale handelssystemen die de ICAO en IMO hebben ingevoerd of voorbereiden voor de lucht- en zeescheepvaart (zie paragraaf 5.1).

Tabel 5.5
Verwachte ontwikkeling vervoersvolumes in de paden

	Wegverkeer	Binnenvaart	Zeevaart	Luchtvaart
Autonome groei vervoersvolumes tot 2050 [a)]	2-50%	15-35%	0-45%	20-70%
Impact energietransitie op TCO	lagere kosten	hogere kosten	hogere kosten	hogere kosten
Prijsgevoeligheid [b)]	Matig	Klein	Klein	Groot
Impact energietransitie op vervoer energiedragers door vervoerswijze	Gering	Potentiële afname	Wezenlijke afname	Nihil

a) Het betreft de verwachte groei van de vervoersvolumes uitgedrukt in reizigers- of tonkilometers; bij wegverkeer betreft het de voertuigkilometers.
b) Inschattingen gebaseerd op Geilenkirchen et al. (2010).

De prijsgevoeligheid in de luchtvaartsector is relatief groot (tabel 5.5). De hogere energiekosten als gevolg van de energietransitie remmen de autonome groei van de transportvraag. De energievraag in 2050 kan hierdoor circa 15 procent lager uitvallen. Desondanks verwachten we dat, zonder veranderingen in beleid en gedrag, de transportvraag in de luchtvaart tot 2050 toeneemt. De prijsgevoeligheid in de scheepvaart is voor een groot gedeelte van de markt klein, waardoor het gebruik van duurdere brandstoffen waarschijnlijk een klein effect heeft op de groei van de vervoersvolumes. Voor het vervoer per zeescheepvaart zijn er veelal geen goede alternatieven beschikbaar. Wel zou kostenverhoging op de langere termijn voor sommige markten een effect kunnen hebben op de herkomst- en bestemmingspatronen of zou de ontwikkeling van vervoer van (nieuwe) lagewaarde-activiteiten kunnen afnemen.

Voor de binnenvaart bestaan er in sommige deelmarkten wel alternatieven. Daar kunnen hogere brandstofkosten ertoe leiden dat het goederentransport niet langer per binnenvaartschip maar over de weg of het spoor gaat, zeker omdat de energietransitie bij het wegvervoer op termijn tot lagere vervoerskosten kan leiden. De omvang van deze (*reverse*) *modal shift* van water naar weg is naar verwachting beperkt omdat het voor een groot deel om gescheiden markten gaat. Vanuit het perspectief van de energietransitie hoeft deze verschuiving niet onwenselijk te zijn; het wegverkeer is in dit geval immers ook klimaatneutraal. Wel kan een verschuiving van water naar de weg tot andere ongewenste maatschappelijke effecten leiden op het gebied van congestie en verkeersveiligheid en kan ze een groter beslag leggen op de schaarse hernieuwbare energie. Het verdient dan ook

aanbeveling om te verkennen hoe de energietransitie interfereert met de beleidsambities op het gebied van de modal shift van het goederenvervoer en om hiervoor een strategie te ontwikkelen.

De elektrificatie van het wegverkeer resulteert naar verwachting (zonder beleidswijzigingen) in lagere kosten voor het autogebruik en kan zo de autonome groei van het autogebruik versterken. Hoewel de vaste kosten voor elektrische voertuigen momenteel hoger zijn dan die voor brandstofauto's, is de verwachting dat op termijn ook de vaste kosten vergelijkbaar worden met of lager worden dan die van voertuigen met een verbrandingsmotor. Dit kan reboundeffecten met zich meebrengen (zie ook paragraaf 5.3). Daar staat tegenover dat de brandstofkosten toenemen. Het nieuwe ETS voor het wegverkeer zet een CO_2-prijs op fossiele brandstof. Ook de verplichting om in toenemende mate hernieuwbare brandstoffen bij te mengen kan tot een hogere brandstofprijs leiden. Daardoor is het minder aantrekkelijk om voertuigen met verbrandingstechnologie te gebruiken. Dit kan de transitie naar klimaatneutraal versnellen maar tegelijkertijd het draagvlak voor de transitie ondermijnen zolang elektrisch rijden niet voor iedereen toegankelijk is. In paragraaf 5.5 gaan we hier verder op in.

Prijsbeleid kan reboundeffecten en volumegroei beperken

Een systeem van betalen naar gebruik kan een effectief instrument zijn om de reboundeffecten van elektrisch rijden en van een hogere energie-efficiëntie (deels) te ondervangen. Uit onderzoek blijkt dat wanneer op langere termijn niet langer bezit wordt belast maar gebruik, en dit kostenneutraal gebeurt, bij het lichte wegverkeer zo'n 15 tot 20 procent van het volume kan afnemen. Bij het vrachtverkeer is het effect kleiner doordat dit minder prijsgevoeligheid is. De aangekondigde vrachtautoheffing die in 2026 van kracht moet worden van zo'n 15 cent per gereden kilometer, zou op termijn het autokilometrage met zo'n 3 à 4 procent kunnen verminderen. Met hogere tarieven is een volumereductie mogelijk die kan oplopen tot 5 à 10 procent (PBL 2023b). De omvang van deze effecten is afhankelijk van de gekozen tariefstelling. Hierna gaan we verder in op de bredere afweging rond het beprijzen van mobiliteit in relatie tot de energietransitie en andere maatschappelijke effecten van mobiliteit.

Energietransitie dempt volumegroei in de scheepvaart

Een substantieel deel van het goederenvervoer bestaat momenteel uit fossiele energiedragers, zoals ruwe olie, kolen en olieproducten als benzine en diesel. Met name in de zee- en binnenvaart is dit aandeel relatief groot: dit kan oplopen tot zo'n 30 à 40 procent van het tonnage. Door de energietransitie valt een steeds groter deel van deze goederenstromen weg. Daar komen andere goederenstromen voor in de plaats, zoals waterstofdragers en biogrondstoffen. De verwachting is echter dat het totale vervoer van energiedragers afneemt. Dit remt de groei van de vervoersvolumes in de scheepvaart. Deze afname wordt in de paden gecompenseerd door een toename op andere markten. Voor het wegverkeer en de luchtvaart speelt dit niet of nauwelijks omdat het vervoer van fossiele energie daar een veel kleinere (wegverkeer) of verwaarloosbare (luchtvaart) rol speelt.

Infrastructuurbeleid en ruimtelijke inrichting bepalen mede ons mobiliteitsgedrag

De overheid beïnvloedt de ontwikkeling van de mobiliteit niet alleen via prijsbeleid, maar ook via infrastructuur- en ruimtelijk beleid. De OECD (2021) concludeert zelfs dat niet technologiegericht beleid maar beleid gericht op de herinrichting van straten, ruimtelijke planning en de ontwikkeling van multimodale netwerken centraal moet staan in beleidsstrategieën voor de verduurzaming van de mobiliteit. Dergelijk beleid zorgt voor verduurzaming van het mobiliteitssysteem als geheel, waardoor gebruikers vanuit het systeem verleid worden om duurzamere keuzes te maken. De huidige beleidsinzet is volgens deze redeneerlijn teveel gericht op suboptimalisatie van een systeem

dat in de basis niet duurzaam is. Verduurzaming van alleen de voertuigtechnologie en de brandstoffen lost geen problemen op met betrekking tot de congestie, de verkeersveiligheid en het ruimtegebruik en draagt maar beperkt bij aan het tegengaan van geluidhinder en luchtverontreiniging.

Axsen et al. (2020) onderscheiden vier categorieën van beleid gericht op het vervoersvolume, namelijk 1) het stimuleren van actieve modi (fietsen en wandelen), 2) het verbeteren van het aanbod van openbaar vervoer, 3) ruimtelijke verdichting en ander ruimtelijk beleid gericht op duurzamer en minder vervoer en 4) vermindering van de behoefte aan vervoer. Op zichzelf zijn deze typen beleidsmaatregelen vaak maar beperkt effectief als het erom gaat de mobiliteitsvraag te verminderen, maar als onderdeel van samengestelde beleidspakketten kunnen ze wel bijdragen aan verbeterde effectiviteit van beleid of een hoger draagvlak voor bijvoorbeeld prijsbeleid (Axsen et al. 2020). Zo is het voor het draagvlak voor prijsbeleid belangrijk dat er mogelijkheden zijn om op de prijsprikkel te reageren. Alternatieve vormen van vervoer om essentiële behoeften te bevredigen kunnen daar een belangrijk onderdeel van zijn.

De ruimtelijke inrichting speelt een belangrijke rol bij de manier waarop en de afstanden waarover mensen zich verplaatsen. Voor een groot deel van Nederland geldt momenteel dat de omgeving er vooral toe uitnodigt de auto te gebruiken. Dat is sneller en comfortabeler dan met het openbaar vervoer (OV) of de fiets te reizen. Met ruimtelijk beleid kan het mobiliteitsgedrag in de richting van duurzamer keuzes worden gestuurd (Javaid et al. 2023). Hoge dichtheden, nabijheid van functies en functiemenging stimuleren actieve modi en OV en beperken het autobezit. In de centrale delen van de grotere steden is het autogebruik per inwoner minder dan de helft van het autogebruik op suburbane locaties. Deze ruimtelijke verschillen in mobiliteitsgedrag lijken bovendien toe te nemen (Blomjous & Hilbers 2021). Veel grote steden voeren bewust beleid om binnensteden autoluw te maken (KiM 2023a). In middelgrote en kleine steden en in steden buiten de Randstad is dit minder het geval en zijn inwoners afhankelijker van de auto. In dit kader is ook relevant hoe de huidige woningbouwopgave ingevuld gaat worden. De plekken waar gebouwd gaat worden en de bijbehorende infrastructuur bepalen mede hoe de mobiliteit van de toekomstige bewoners eruit gaat zien. Door woningen te bouwen in de stedelijke centra en nabij OV-knooppunten kan zorgen voor een verbeterde bereikbaarheid van deze woningen per OV en fiets en de afhankelijkheid van de auto kleiner worden (PBL 2023c).

Effect van sociale normen, gebruiken en maatschappelijke voorkeuren

Naast kosten en ruimtelijke keuzes zijn ook sociale normen en gebruiken van invloed op het mobiliteitsgedrag. Deze normen kleuren menselijke voorkeuren en sturen het gedrag. Zo geldt voor veel Nederlanders op dit moment dat autobezit de norm is. Hoewel zo'n 6 procent van de bevolking bewust geen auto heeft, heeft ongeveer driekwart van de huishoudens één of meer auto's. In sociaal opzicht wordt de auto gezien als een teken van zelfredzaamheid, flexibiliteit en autonomie (KiM 2022c). Om van duurzamer mobiliteitsgedrag de sociale norm te maken, kan de overheid in haar communicatie wijzen op wat andere burgers doen en feedbackinstrumenten inzetten om hen bewust te laten worden van de (on)duurzaamheid van hun mobiliteitsgedrag (Fairley et al. 2013; Breukers et al. 2013). Ook bedrijven kunnen dit gedrag beïnvloeden met de regelingen die ze hun werknemers aanbieden voor hun woon-werk- en zakelijk verkeer. Bijvoorbeeld door multimodaal vervoer aan te moedigen, minder te vliegen op korte afstanden of alleen elektrische leaseauto's aan te bieden. Steeds meer bedrijven verduurzamen het mobiliteitsbeleid voor hun werknemers. Zo zijn duurzaamheid en CO_2-reductie, naast medewerkerstevredenheid en kosten, een leidend principe geworden in het zakelijke mobiliteitsbeleid van veel bedrijven (AM et al. 2023). De

overheid stimuleert dit via onder andere een aangekondigde CO_2-normering voor woon-werk- en zakelijk verkeer.

Een groter besef van de impact van klimaatverandering en de rol van het menselijk gedrag daarbij kan ook van invloed zijn op het mobiliteitsgedrag van burgers. De relatie tussen klimaatbesef en mobiliteitsgedrag blijkt in de praktijk echter weerbarstig. Het Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (KiM 2023b) laat zien dat vrijetijdsreizigers met een sterk klimaatbesef zich weliswaar voornemen om minder te vliegen, maar dat de mate waarin ze daartoe daadwerkelijk overgaan samenhangt met andere factoren, zoals de eerdere vliegervaring als kind en de sociale omgeving (de sociale norm). Ondanks hun sterke klimaatbesef wijst deze groep toch primair naar de overheid en andere partijen als het erom gaat de klimaatimpact van vliegen terug te brengen. De individuele consument verandert zijn of haar gedrag maar beperkt. Het KiM concludeert dan ook dat het voor een significant lagere klimaatimpact van de luchtvaart vooralsnog niet toereikend is om een beroep te doen op vrijwillige gedragsverandering. Dat komt niet alleen omdat gedragsverandering lastig is, maar ook omdat consumenten veel en soms tegenstrijdige boodschappen te verwerken krijgen en maar een beperkte verwerkingscapaciteit hebben.

Volumes in het goederenvervoer als afgeleide van onze consumptiepatronen

Ook de vervoersvolumes in het goederenvervoer zijn mede afhankelijk van beleidskeuzes en maatschappelijke voorkeuren en kunnen daarmee worden beïnvloed. Dit hangt onder meer samen met ons consumptieniveau en de mate waarin de economie circulair is. Meer circulair consumeren en produceren betekent niet alleen een groter (en hoogwaardiger) hergebruik van materialen en grondstoffen, maar circulariteit kan ook worden bevorderd door de consumptie te verlagen door van producten af te zien of deze te delen, de levensduur van producten te verlengen door hergebruik en reparatie en door nieuwe eindige grondstoffen te vervangen door hernieuwbare grondstoffen. Een meer circulaire economie kan leiden tot minder vervoer van grondstoffen (KiM 2020), maar kan juist ook tot meer vervoersbewegingen leiden, doordat de aanvoer van stromen meer versnipperd raakt. Het was de ambitie van het kabinet-Rutte IV om het primaire abiotische grondstoffengebruik in 2030 te halveren, als tussenstap naar een volledig circulaire economie in 2050. Met de huidige trends en het huidige beleid is dat doel echter niet binnen bereik. Nieuwe beleidsinstrumenten zijn nodig om circulaire oplossingen te stimuleren (Hanemaaijer et al. 2023). Met het huidige beleid lijkt er dus nog weinig zicht op grote veranderingen in de trends van de transportvolumes in het goederenvervoer, anders dan dat de energietransitie ertoe leidt dat de omvang en samenstelling veranderen van de energiedragers die worden vervoerd.

Wezenlijke besparing door volumemaatregelen mogelijk

Met samengestelde beleidspakketten die enerzijds het autogebruik ontmoedigen via infrastructurele maatregelen en prijsbeleid en anderzijds het gebruik van andere vervoerswijzen stimuleren, kan de overheid consumenten en bedrijven verleiden tot een duurzamer mobiliteitsgedrag, in de vorm van een modal shift van auto naar OV en fiets en een afname van het aantal trips en de reisafstanden. Bij het wegverkeer is de verwachting dat zo'n beleidsstrategie het personenautogebruik kan laten afnemen met zo'n 20 à 30 procent en het bestelautoverkeer met zo'n 15 procent (PBL 2023b). De voorgenomen invoering van de vrachtautoheffing in Nederland leidt naar verwachting tot een bescheiden afname van het aantal vrachtautokilometers. Dit komt vooral door efficiënter vervoer en een kleine wijziging van de modal split. Het vervoer van goederen neemt waarschijnlijk niet of nauwelijks af. Met hogere tarieven zijn grotere effecten mogelijk.

Nut en noodzaak volumebeleid vraagt bredere afweging
Beleidsinstrumenten gericht op het vervoersvolume en het gebruik van klimaatvriendelijke vervoerswijzen hebben naast klimaatwinst vaak meerdere baten. Zo heeft fietsen en wandelen voordelen voor de gezondheid en leidt minder autogebruik tot minder lokale luchtverontreiniging en minder geluidsoverlast. Beleid gericht op ruimtelijke verdichting kan de bereikbaarheid van voorzieningen verbeteren. Litman (2021) concludeert dat een liter brandstofbesparing als gevolg van minder autogebruik grofweg twee keer zoveel maatschappelijke baten met zich meebrengt als dezelfde brandstofbesparing als gevolg van efficiëntere voertuigen of gebruik van hernieuwbare brandstoffen. Maar aan dit type beleidsinstrumenten zijn ook maatschappelijke kosten verbonden.

Vanwege de verschillende kosten en baten die een rol spelen, verdient het aanbeveling om nut en noodzaak voor dit type maatregelen te beschouwen in een bredere context waarin de verschillende doelen van het mobiliteitsbeleid in ogenschouw worden genomen. Het ontwikkelen van een brede visie op de toekomstige mobiliteit, met klimaatneutraliteit als integraal onderdeel, kan daarbij als basis dienen. De Hoofdlijnennotitie voor de Mobiliteitsvisie 2050 van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW 2023) vormt een eerste aanzet hiertoe. Klimaat wordt in deze notitie beschouwd als één van de randvoorwaarden waarbinnen het doel om vitale functies voor iedereen bereikbaar te houden moet worden ingevuld. Hoe deze randvoorwaarde wordt geoperationaliseerd en wat dat betekent voor de visie op het toekomstige mobiliteitssysteem, moet nog worden uitgewerkt. Gezien de uitdagingen rond een klimaatneutrale mobiliteit die we in dit onderzoek hebben geïdentificeerd, verdient het aanbeveling om de klimaatopgave bij de verdere uitwerking van de visie niet enkel als een technische opgave te beschouwen maar deze integraal mee te nemen in de visievorming op het toekomstige mobiliteitssysteem, waaronder de rol die de verschillende vervoerswijzen, infrastructuur en ruimtelijke ordening spelen in dat systeem.

Ook voor de lucht- en scheepvaart geldt dat meerdere maatschappelijke belangen samenkomen bij de afwegingen over de toekomstige ontwikkeling van de vervoersvolumes. Bij de zeevaart hangen de vervoersvolumes sterk samen met de ontwikkeling van de industrie in Nederland en het energiecluster in de Rotterdamse haven. De omvang en aard van de industriële activiteit bepaalt mede de omvang en aard van de goederenstromen van en naar Nederland. Bij de luchtvaart komen maatschappelijke belangen rond klimaat, lokale leefomgeving (luchtkwaliteit en geluid) en bereikbaarheid samen. In de Luchtvaartnota wordt dit onderkend en wordt de klimaatopgave beschouwd als een randvoorwaarde waarbinnen een eventuele groei van de luchtvaart mogelijk is. De ambitie uit de Luchtvaartnota van klimaatneutraliteit in 2070 is inmiddels ingehaald door de doelen die de ICAO voor de mondiale luchtvaart heeft gesteld. Het verdient aanbeveling om na te gaan hoe die ambitieuzere doelen van klimaatneutraliteit in of rond 2050 kunnen uitwerken voor de luchtvaart in Nederland en welke ontwikkeling van de vervoersvolumes daarbij past.

5.5 Draagvlak en rechtvaardigheid

De transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit heeft verregaande gevolgen voor de samenleving. Burgers moeten overstappen op elektrische auto's, en de hogere kosten van duurzame brandstoffen en de CO_2-heffing op fossiele brandstof kunnen autorijden en vliegen duurder maken. Ondernemers moeten de overstap maken naar duurzame vervoersmiddelen en hiervoor de benodigde investeringen doen. Om de transitie te laten slagen is voldoende draagvlak voor deze veranderingen en de bijbehorende beleidsinstrumenten een cruciale randvoorwaarde. In deze paragraaf verkennen we op basis van de recente literatuur welke aspecten rond draagvlak in de transitie naar

een klimaatneutrale mobiliteit een rol spelen. Dit kan als basis dienen voor vervolgonderzoek om deze thematiek verder uit te diepen.

Draagvlak voor beleid hangt ermee samen of de samenleving het beleid als rechtvaardig ervaart. Klimaatrechtvaardigheid kent verschillende aspecten en het verschilt per studie welke typen rechtvaardigheid eronder worden gerekend. Het IPCC (2022) hanteert drie soorten rechtvaardigheid: verdelende rechtvaardigheid, procedurele rechtvaardigheid en rechtvaardigheid van erkenning. Verdelende rechtvaardigheid kijkt naar hoe de kosten en de baten van de transitie zijn verdeeld: wie heeft er profijt van en wie betaalt de rekening? Procedurele rechtvaardigheid heeft te maken met de inrichting van het beleidsproces. Als burgers en bedrijven tijdens het beleidsproces gehoord worden, neemt het draagvlak voor maatregelen vaak toe. Rechtvaardigheid van erkenning kijkt naar de verschillen tussen groepen en heeft aandacht voor wie kwetsbaar is (Newell et al. 2020).

Draagvlak vereist bewuste keuze voor verdelingsbeginselen bij vormgeving beleid

De transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit brengt kosten met zich mee. Hoewel het grootste deel van de Nederlanders aangeeft zich zorgen te maken over de klimaatverandering en een groot deel intensiever klimaatbeleid zegt te steunen, maakt zeker de helft van de bevolking zich ook zorgen over de kosten van dat beleid (CBS 2023). Er zijn verschillende perspectieven mogelijk op hoe deze kosten rechtvaardig kunnen worden verdeeld. Burgers kunnen onderling verschillen in wat zij eerlijk vinden. Het is uiteindelijk aan het Rijk om de belangen af te wegen en keuzes te maken over welk verdelingsprincipe wordt gehanteerd bij de verdeling van kosten en baten. Als beleidsmakers duidelijk zijn over de keuzes voor bepaalde verdelingsprincipes en burgers er actief bij betrekken om in kaart te brengen wat de gevolgen van deze keuzes voor verschillende groepen zijn, kan het draagvlak toenemen. De Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid (WRR 2023) onderscheidt in zijn rapport 'Rechtvaardigheid in klimaatbeleid' vier categorieën van rechtvaardigheidsbeginselen: *het grootste nut, individuele rechten en vrijheden, bijdrage en profijt en draagkracht en solidariteit*.[18] Aan de hand van deze categorieën bespreken we welke verdelingsbeginselen relevant zijn voor de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit (zie ook Figuur 5.1). Hierbij komt aan bod welke keuzes er kunnen worden gemaakt voor een bepaalde vervoerswijze en welke verdelingsprincipes hierbij leidend zijn. Ook bespreken we wat burgers aangeven rechtvaardig te vinden, al hoeft dit niet de doorslag te geven bij de keuzes die het Rijk maakt.

Verdeling op basis van *het grootste nut* speelt tot nu toe een grote rol in het beleid gericht op verduurzaming van de mobiliteit, omdat de beleidsinstrumenten doorgaans een zo groot mogelijke broeikasgasreductie nastreven, tegen zo laag mogelijke kosten voor de maatschappij en ongeacht hoe die kosten zijn verdeeld over iedereen in de maatschappij. Kosteneffectiviteit was bijvoorbeeld een leidend principe bij de uitwerking van het Klimaatakkoord. Burgers vinden de ingeschatte effectiviteit van een maatregel belangrijk (TNO 2021a), maar waarderen die veel minder als deze leidt

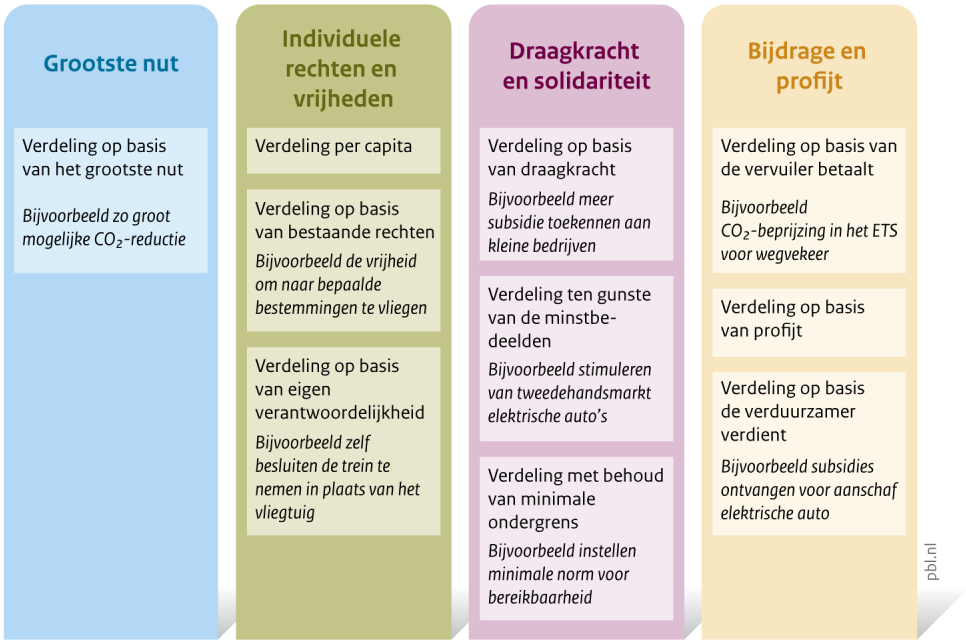
[18] In eerder werk rond brede welvaart (zie Snellen et al. 2021; Weterings & Verwoerd 2020) hanteert het PBL drie verdelingsprincipes, op basis van verschillende ethische stromingen: utilitarisme, egalitarisme en sufficiëntarisme. Utilitarisme gaat over het maximaliseren van het nut voor de grootste groep mensen en komt overeen met de categorie *grootste nut* van de WRR. Het verkleinen van verschillen tussen mensen (egalitarisme) komt terug onder de WRR-categorie *draagkracht en solidariteit*, in de verdelingen op basis van draagkracht en het creëren van het meeste voordeel voor minstbedeelden. In diezelfde categorie valt het behoud van een minimale ondergrens (sufficiëntarisme). Zie Davidson (2021) voor een uitgebreide toelichting over de ethisch-filosofische basis van de verdelingsprincipes van de WRR.

tot een onevenredige verdeling van de kosten tussen bevolkingsgroepen (WRR 2023). De huidige modellen en evaluatiemethoden voor mobiliteitsbeleid nemen deze verdelingseffecten echter maar beperkt mee. De afgelopen jaren is er in het mobiliteitsbeleid meer aandacht voor een brede-welvaartsperspectief (Snellen et al. 2021; KiM 2021b), waarbij meer rekening wordt gehouden met de effecten van beleid op verschillende groepen in de samenleving. Als het Rijk ongewenste verschillen in wie de kosten draagt wil voorkomen, is het van belang om de verdelingsprincipes een expliciete plek te geven bij het evalueren en afwegen van het mobiliteitsbeleid, zeker als er in het kader van de transitie nieuwe beleidsinstrumenten worden ingezet.

De transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit kan ertoe leiden dat *individuele rechten en vrijheden* ingeperkt worden door beleid. Als burgers worden beperkt in hun vrijheid, betekent dit niet dat ze dit automatisch onrechtvaardig vinden. Er is bijvoorbeeld steun voor een verbod op korte vluchten, ook al betekent dit dat reizigers niet meer voor alle bestemmingen het vliegtuig kunnen nemen (Populytics 2023).

Figuur 5.1

Rechtvaardigheidsbeginselen in klimaatbeleid voor mobiliteit



Bron: WRR 2023; bewerking PBL

Verschillende verdelingsprincipes mogelijk bij overstap naar elektrisch rijden

Onder het verdelingsbeginsel *bijdrage en profijt* valt dat diegenen die verantwoordelijk zijn voor uitstoot, er ook de kosten voor dragen ('de vervuiler betaalt') en dat duurzame investeringen worden beloond ('de verduurzamer verdient'), zie ook Figuur 5.1. Dit laatste principe staat centraal bij de subsidies voor elektrische auto's. Het subsidiëren van groene technologie kan effectief zijn in de beginfase, wanneer de nieuwe technologie duurder is dan de gevestigde technologieën. Zo kunnen (vaak meer vermogende) koplopers worden verleid om te investeren in de technologie (zie hoofdstuk 2.3). Op de langere termijn kan deze verdeling echter tot problemen leiden. In 2019 ontstond kritiek op dergelijke subsidies omdat deze voor elektrische auto's voornamelijk bij leaserijders met hoge inkomens terecht kwamen (zie bijvoorbeeld Algemeen Dagblad 2019), terwijl elektrisch rijden tegelijkertijd niet voor iedereen toegankelijk was. Als beleidsmakers lagere inkomensgroepen ook de kans willen geven om elektrisch te gaan rijden wanneer de technologie breder wordt toegepast,

kunnen de verdelingsbeginselen in de categorie *draagkracht en solidariteit* worden gevolgd. Dit zijn de verdelingsbeginselen waarbij er rekening wordt gehouden met draagkracht, een minimale ondergrens voor groepen in de samenleving wordt behouden of de minstbedeelden het meeste voordeel hebben van de maatregel. Burgers waarderen de verdelingsbeginselen in de categorie *draagkracht en solidariteit* als het meest rechtvaardig (WRR 2023). Ook TNO (2020; 2021a) constateert in twee studies over het maatschappelijk draagvlak bij burgers voor verschillende klimaatmaatregelen dat de ingeschatte eerlijkheid van een maatregel in grote mate het draagvlak ervoor bepaalt. Onder eerlijkheid wordt hier met name een evenredige verdeling van baten en lasten verstaan. Uit onderzoek van Vringer en Carabain (2019) naar het maatschappelijk draagvlak van het transitiebeleid blijkt dat burgers en bedrijven klimaatbeleid in het algemeen steunen, maar dat dit niet direct leidt tot steun voor specifieke beleidsmaatregelen. Voor de onderzochte regelingen was eerlijkheid het meest bepalend voor het draagvlak. Met eerlijkheid bedoelen de onderzoekers niet alleen rechtvaardigheid maar ook de onpartijdigheid en openheid van de overheid.

Bij de overstap naar elektrisch rijden speelt draagkracht een belangrijke rol. Elektrisch rijden is nog lang niet voor iedereen weggelegd. De hoge aanschafkosten van het voertuig, het gebrek aan een volwassen tweedehandsmarkt en de beschikbaarheid van laadinfrastructuur kunnen een barrière vormen voor de overstap. Het ETS voor het wegverkeer en de toepassing van biobrandstoffen en e-brandstoffen kunnen er echter toe leiden dat het rijden met benzine- en dieselvoertuigen juist duurder wordt. Lagere inkomensgroepen kunnen hierdoor geraakt worden, omdat zij met hogere kosten te maken krijgen als zij fossiel blijven rijden. Andere mitigatiestrategieën, zoals overstappen op het OV of de fiets, zijn niet altijd een optie. Met name in de stadsranden, de suburbane kernen en het landelijk gebied is de bereikbaarheid per OV en fiets beperkt (Bastiaanssen & Breedijk 2022). Sommige mensen hebben werktijden die niet aansluiten bij het OV-aanbod en zijn daardoor aangewezen op de auto. Om de verschillen tussen groepen te verkleinen kan beleid worden gemaakt om elektrische auto's betaalbaarder te maken voor lagere inkomensgroepen, bijvoorbeeld met maatregelen gericht op een goed functionerende tweedehandsmarkt. Daarbij gaat het er niet alleen om een betaalbaar aanbod van elektrische auto's te faciliteren, maar ook een beter aanbod van alternatieven en de nabijheid van bestemmingen kan lagere inkomensgroepen helpen.

Draagvlak voor verduurzamingsbeleid luchtvaart groter dan bij auto

Ook in de luchtvaartsector zorgt de transitie naar klimaatneutraliteit voor verandering. Vliegen wordt duurder doordat alternatieve energiedragers worden gebruikt en de capaciteit van luchthavens eventueel wordt beperkt. De vraag is of de samenleving dit aanvaardbaar vindt. Het antwoord hangt mede af van welke bevolkingsgroepen door de hogere vliegkosten (het meest) worden geraakt. Een kwart van de Nederlanders heeft in de afgelopen vijf jaar niet gevlogen (KiM 2023b). De belangrijkste reden om niet te vliegen zijn de kosten, gevolgd door vliegangst en gezondheidsredenen. Voor 10 procent is het milieu een reden om niet te vliegen (KiM 2018). Daarentegen was 20 procent van de Nederlanders verantwoordelijk voor meer dan de helft van de vluchten van de afgelopen vijf jaar. Met name hoogopgeleiden en personen met een hoog inkomen vliegen relatief vaak. Enerzijds zullen kostenverhogingen in de luchtvaart dus vooral neerslaan bij de hogere inkomens, die nu al relatief veel vliegen. Anderzijds kunnen die kostenververhogingen er, afhankelijk van de vormgeving, toe leiden dat minder mensen zich het kunnen veroorloven om (regelmatig) te vliegen. Een hogere vliegbelasting naarmate mensen meer vluchten maken, kan deze vervoerswijze voor een grotere groep toegankelijk houden (zie bijvoorbeeld PBL 2021), hoewel het de vraag is of deze maatregel uitvoerbaar is. Ook kan de hogere vliegbelasting ertoe leiden dat reizigers uitwijken naar vliegvelden buiten Nederland; dat effect is hierbij een punt van aandacht.

Bij de klimaatraadpleging die de Tweede Kamer in 2023 heeft georganiseerd, werd deelnemers gevraagd hoeveel de overheid op bepaalde maatregelen moet inzetten. Daaruit bleek er een breed draagvlak te zijn om vliegen te ontmoedigen en reizen met de trein te stimuleren. Veel respondenten vinden het dan wel belangrijk dat de treininfrastructuur wordt verbeterd. Verder blijkt dat de respondenten het over het algemeen acceptabeler vinden om de kosten van vliegen te verhogen dan die van autorijden, omdat zij autorijden zien als een basisbehoefte (Populytics 2023). Hoe ver iemand vliegt, maakt ook uit: er is meer draagvlak voor het duurder maken van vluchten binnen Europa dan voor het duurder maken van intercontinentale vluchten (I&O Research 2020). In de klimaatraadpleging zetten deelnemers naast het beprijzen van vliegen in op het verbieden van korte vluchten op routes waar ook een vervangende treinreis mogelijk is. Sommige deelnemers geven de voorkeur aan verbieden boven beprijzen, omdat die maatregel ervoor zorgt dat vliegen niet alleen voorbehouden blijft aan de hoge inkomensgroepen. Daarentegen vindt een kleiner deel van de deelnemers het verbieden van korte vluchten een realistischer en haalbaarder maatregel dan beprijzen en uiten sommige deelnemers zorgen over het wegnemen van de keuzevrijheid (Populytics 2023).

Zoals is toegelicht in paragraaf 5.4, blijkt uit onderzoek van het KiM (2023b) dat een sterk klimaatbesef ervoor kan zorgen dat mensen nu al minder willen vliegen, maar dat niet zeker is dat ze dat ook gaan doen. Veel respondenten die aangeven te willen vliegen maar zich wel bewust zijn van de klimaatimpact daarvan, vinden het voornamelijk van belang dat de overheid haar verantwoordelijkheid neemt om de klimaatimpact van vliegen te verminderen. Maatregelen als beprijzing en capaciteitsplafonds ondersteunen de beeldvorming onder de bevolking dat de overheid actie onderneemt.

Strategie van beleid voor ander mobiliteitsgedrag hangt af van bereidheid burgers

Koch en Vringer (2023) laten in hun onderzoek naar circulair consumentengedrag zien dat mensen in verschillende mate bereid zijn om energie te besparen op mobiliteit, als dit niet duurder is of meer moeite kost. Zo is het merendeel van de Nederlanders bereid energiezuinig te rijden en alleen te vliegen voor vakanties van langer dan twee weken. Het grootste deel van de respondenten brengt dit ook al in de praktijk. Mensen zijn ook bereid om een energiezuinige of elektrische auto te kopen, maar de meerderheid doet dit nog niet. Het grootste deel van de respondenten zou bereid zijn het aantal autokilometers te beperken door dicht bij huis op vakantie te gaan en regelmatige vrijetijdsactiviteiten dicht bij huis te houden of er met de fiets of het OV heen te reizen. Hier ligt een kans voor beleidsmakers om het gemak en de betaalbaarheid van deze opties te verbeteren, zodat mensen wel een elektrische auto kopen of minder kilometers reizen voor vakantie of vrije tijd. Met de trein of bus op vakantie gaan in plaats van met de auto of het vliegtuig is beduidend minder populair: minder dan de helft van de respondenten is hiertoe bereid, terwijl het wel veel milieuwinst op zou leveren. Als de overheid wil dat mensen meer met de trein of bus op vakantie gaan, kunnen beleidsmakers niet alleen denken aan maatregelen die het gemak en de betaalbaarheid hiervan aanpakken, maar ook aan stimulerende maatregelen die zorgen dat burgers meer bereid worden om alternatieve vervoerswijzen te gebruiken.

Rechtvaardige transitie voor ondernemers vraagt aandacht voor kleine bedrijven

De klimaattransitie heeft niet alleen invloed op burgers, maar ook op bedrijven. Voor ondernemers is het van belang dat het klimaatbeleid consistent is en voldoende handelingsperspectief en investeringszekerheid biedt. Het Nationaal Klimaatplatform (2023) signaleert dat ondernemers behoefte hebben aan een overheid die richting geeft voor de lange termijn en beschikbare financiële ondersteuning overzichtelijk organiseert. Alleen dan kunnen bedrijven effectief verduurzamen.

Ondernemers zullen bijvoorbeeld moeten overstappen op elektrische bestel- en vrachtauto's. Vrachtauto's en vooral bestelauto's worden veelal gebruikt door kleine bedrijven,[19] die minder investeringsruimte hebben dan grote bedrijven en langer doorrijden met hun voertuigen (Topsector Logistiek & Connekt 2017). Dit speelt een rol bij de zorgen die ondernemers hebben over het invoeren van zero-emissiezones voor de stadslogistiek in veel Nederlandse binnensteden (zie bijvoorbeeld Nieuwsblad Transport 2023). Als beleidsmakers niet alleen het gebruik van nulemissievoertuigen willen stimuleren maar ook willen zorgen voor een gelijke verdeling van kosten en baten over grote en kleine bedrijven, verdient het aanbeveling om expliciet rekening te houden met deze kleinere ondernemingen. Dit gebeurt bijvoorbeeld al bij de differentiatie van de AanZET-subsidiebedragen, die afhankelijk zijn van de grootte van de onderneming.

Transport in de binnenvaart wordt duurder door de verschuiving van fossiele naar duurzame brandstoffen. Die extra kosten worden waarschijnlijk grotendeels of volledig doorberekend in de productprijzen. Omdat de transportkosten maar een klein deel zijn van de totale productprijs, is de impact op de consument beperkt. Voor bedrijven in de Nederlandse binnenvaartsector daarentegen kunnen de investeringen die nodig zijn om de transitie te maken, wel een probleem vormen. Het gaat hierbij immers voor het grootste deel om eenmansbedrijven (CBS 2023b) met een relatief oude vloot. Een deel van die bedrijven heeft naar verwachting weinig investeringsruimte om de nodige aanpassingen aan hun schepen te kunnen doen. Als het Rijk ervoor wil zorgen dat ook kleinere bedrijven in de sector mee kunnen in de transitie, is het van belang om hen te steunen bij deze investeringen. Bedrijven moeten de mogelijkheid hebben om te reageren op het verduurzamingsbeleid. Bij de zeevaart speelt deze kwestie minder, al zijn er in Nederland ook daar relatief veel eenmansbedrijven en bedrijven uit het midden- en kleinbedrijf (MKB) actief. In elk geval is het belangrijk om bij het inrichten van het transitiebeleid oog te hebben voor de draagkracht van verschillende typen scheepvaartbedrijven.

Betrekken van burgers en bedrijven bij het beleidsproces leidt tot nieuwe inzichten

Voor het creëren van draagvlak is het van belang op welke manier de keuze voor de verdeling van lusten en lasten tot stand is gekomen. Als burgers en andere belanghebbenden bij het beleidsproces worden betrokken, kan dit het publieke vertrouwen ten goede komen en ervoor zorgen dat zij het proces en de uitkomsten daarvan rechtvaardiger vinden (Richards et al. 2004; WRR 2023). Bovendien kan participatie ertoe leiden dat deelnemers beter zijn geïnformeerd over vraagstukken en begrijpen wat de voor- en nadelen van beleidskeuzes zijn. Voor de overheid kan burgerparticipatie leiden tot nieuwe inzichten en bijdragen aan een betere invulling van beleid. Burgerparticipatie stelt de overheid beter in staat de gevolgen van keuzes voor verschillende groepen te overzien en te begrijpen wat burgers acceptabel vinden. Voor het slagen van de transitie is de betrokkenheid van burgers essentieel. Daarbij gaat het zowel om burgerparticipatie als om het opstarten van initiatieven en het aanpassen van gedrag. Voor aandachtspunten bij het verbeteren van de burgerbetrokkenheid verwijzen we naar Bouma et al. (2023).

Een eerlijke transitie heeft oog voor kwetsbare groepen

Om in 2050 een volledig klimaatneutrale mobiliteit te realiseren, moet een groot deel van de bevolking meedoen in de transitie. De EU zet in op een eerlijke transitie (*fair transition*) richting

[19] Meer dan de helft van de bestelautokilometers worden gereden door bedrijven met minder dan tien werknemers (CBS 2023a).

klimaatneutraliteit (Europese Commissie 2021), waarbij niemand mag achterblijven. Om hiervoor te zorgen verdienen met name huishoudens aandacht die voorlopig nog afhankelijk zijn van voertuigen op (fossiele) brandstoffen. Door maatregelen die (fossiel) autorijden duurder maken of ontmoedigen kan het risico op vervoersarmoede toenemen als geschikte alternatieven ontbreken. Het zal per individu verschillen of deze een mindere mate van bereikbaarheid ook als negatief ervaart (te meten als *transport adequacy*, zie Ettema et al. 2023). Lage inkomensgroepen zijn het meest kwetsbaar, met name als zij in gebieden wonen waar de bereikbaarheid per OV en fiets beperkt is en de autoafhankelijkheid dus vaak groot. TNO (2024) laat in een recente studie zien dat tussen de 113.000 en 270.000 huishoudens tot deze groep behoren. In de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit is het dus zaak te voorkomen dat de vervoersarmoede toeneemt en aandacht te hebben voor de kwetsbare groepen die hierbij een risico lopen. Financiële compensatiemaatregelen kunnen helpen om de hogere kosten op te vangen, maar deze blijken soms moeilijk te kunnen worden gericht op de mensen die die compensatie werkelijk nodig hebben. TNO (2024) geeft bijvoorbeeld aan dat kwetsbare huishoudens weliswaar veel baat hebben bij een accijnsverlaging op brandstof, maar dat 98 procent van de kosten van deze maatregel ten bate komen van niet of minder kwetsbare huishoudens. Als de overheid kwetsbare groepen aanvullend wil steunen, is het dus van belang uit te zoeken hoe dit effectief kan gebeuren. Door inzichtelijk te maken in welke mate verschillende groepen banen en noodzakelijke voorzieningen kunnen bereiken en hoe hun vervoersmogelijkheden hieraan bijdragen, wordt het mogelijk om te beoordelen of investeringen tot verbetering leiden. Verschillende uitgangspunten zijn hierbij mogelijk. Een mogelijkheid is om de verschillen in bereikbaarheid tussen bevolkingsgroepen te verkleinen. Een andere optie is het instellen van een norm voor de minimale bereikbaarheid (Bastiaanssen & Breedijk 2022). Als deel van het Programma Mobiliteitsvisie 2050 heeft het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat al naar dergelijke nieuwe normen voor bereikbaarheid gekeken (zie IenW 2023; en de onderliggende rapportage Rebel & Goudappel 2023). Door op de weg naar klimaatneutraliteit aandacht te hebben voor het behoud van bereikbaarheid, wordt het mogelijk een inclusieve transitie te realiseren.

6 Discussie en vervolgonderzoek

In deze studie hebben we op basis van de huidige kennis over technologieën, kosten en andere relevante factoren onderbouwde en consistente paden geschetst die leiden naar een klimaatneutrale mobiliteit in 2050 in Nederland. Omdat klimaatneutrale technologie in die transitie een cruciale rol speelt, hebben we daarbij verkend welke technologieën in beeld zijn, hoe ver die technologieën zijn gevorderd en welke uitdagingen gepaard gaan met de verdere ontwikkeling en uitrol ervan. Ook hebben we de autonome trends van de vervoersvolumes en de verbetering van de energie-efficiëntie in kaart gebracht en verkend welke invloed de transitie daarop zou kunnen hebben. Dit heeft geleid tot een aantal (technologie)paden, als basis voor het denken over kansen, uitdagingen en handelingsperspectieven die gepaard gaan met de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. Die uitdagingen zijn groot. Zo is zeker niet evident dat de hernieuwbare brandstoffen die nodig zijn voor de verduurzaming van de lucht- en scheepvaart, ook tijdig in voldoende mate beschikbaar zijn. Deze vraag komt in deze studie niet uitgebreid aan bod. In de 'Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050' (TVKN) kijkt het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) op het niveau van het Nederlandse energiesysteem wel naar de beschikbaarheid van hernieuwbare energie in relatie tot de vraag vanuit verschillende economische sectoren, waaronder mobiliteit. Dat geeft een beter beeld van wat wel en niet kan. Ook bij de beschikbaarheid van kritieke grondstoffen en materialen zijn er grote uitdagingen. Het is daarom niet evident dat de geschetste paden zomaar te realiseren zijn.

Transities worden in de literatuur gedefinieerd als grootschalige disruptieve veranderingen in maatschappelijke systemen, zoals het mobiliteitssysteem, die over meerdere decennia plaatsvinden (zie bijvoorbeeld Loorbach et al. 2017). In de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit speelt technologie een centrale rol, maar met de introductie van die technologie gaan allerhande vraagstukken gepaard die niet of slechts verkennend in deze studie aan bod komen. Denk aan het veranderen van verdienmodellen en waardeketens, de governance van de transitie, de ruimtelijke effecten en de wisselwerking met ruimtelijke keuzes, en het draagvlak voor de transitie en de verdelingseffecten ervan. In deze rapportage verkennen we de belangrijkste uitdagingen die gepaard gaan met de uitrol van de technologie op hoofdlijnen. In de onderliggende rapportages wordt hier nader op ingegaan, maar ook niet voor ieder onderwerp volledig (zie Davydenko et al. 2024; Geilenkirchen et al. 2024; Van Meerkerk et al. 2024; Traa et al. 2024). Gezien het karakter van deze verkenning is dat ook niet de ambitie.

Daarnaast verkennen we in deze studie de rol van gedragsverandering, al hebben we dat onderwerp niet uitgewerkt in toekomstbeelden voor een mobiliteitssysteem dat wezenlijk anders is dan het huidige. De paden in deze studie gaan primair uit van de huidige voorkeuren, het huidige gedrag en *business-as-usual*-trends en -ontwikkelingen. In eerder onderzoek (PBL 2023a) heeft het PBL verkend hoe de ruimtelijke inrichting van Nederland eruit kan zien als maatschappelijke voorkeuren wezenlijk zouden veranderen, in de vorm van vier normatieve toekomstscenario's waarin ook de consequenties voor het mobiliteitssysteem zijn onderzocht. In deze normatieve scenario's verandert het mobiliteitsgedrag wezenlijk. Vliegen krijgt bijvoorbeeld een (veel) kleinere rol dan nu en ook de rol van de auto verandert. Naast mogelijke veranderingen in de maatschappelijke voorkeuren spelen hier ook onzekerheden rondom geopolitieke veranderingen die invloed kunnen hebben op de internationale handelsstromen. Dit materiaal zou in een vervolgonderzoek gecombineerd kunnen worden met de inzichten uit de huidige studie om alternatieve duurzame mobiliteitssystemen te verkennen. De technologieën en energiedragers die voor de verschillende vervoerswijzen

gebruikt gaan worden, zullen daarbij waarschijnlijk niet wezenlijk verschillen van de technologiepaden in deze studie.

Ook de samenhang tussen de transitie naar klimaatneutraliteit en andere transities binnen en buiten het mobiliteitssysteem die daaraan (kunnen) raken, bestuderen we in deze studie niet diepgaand. Denk aan de transitie naar automatisch rijden, de toename van deelmobiliteit en de beoogde transitie naar een circulaire economie. Het materiaal uit deze studie kan worden benut voor onderzoek naar de samenhang tussen deze transities en de rol die de verschillende manieren om mobiliteit te verduurzamen daarbij kunnen spelen.

De ontwikkeling van technologie staat niet stil. Het is goed mogelijk dat er ook op het gebied van de mobiliteit nog disruptieve innovaties plaatsvinden die impact hebben op de paden. Ook het gedrag van mensen verandert. Hoe klimaatneutrale mobiliteit er precies uit gaat zien, weten we nog niet. De exacte richting van de transitie en het tempo waarin deze zich voltrekt, zijn vooraf niet te voorspellen. Dit zal pas gedurende het proces duidelijk worden. Tot 2050 zal nog veel veranderen wat we nu nog niet weten. Denk bijvoorbeeld aan technologiedoorbraken, onverwachte maatschappelijke en geopolitieke gebeurtenissen of veranderingen in de maatschappelijke voorkeuren. Die ontwikkelingen kunnen van invloed zijn op het verloop van deze transitie. Dat maakt het verstandig om de paden naar klimaatneutraliteit periodiek aan te scherpen. Tegelijkertijd is de onzekerheid over toekomstige ontwikkelingen geen argument om af te wachten. De opgave richting een klimaatneutraal 2050 is groot en de tijd is beperkt gegeven de lange levensduur van de vloten in de mobiliteitssector en de enorme vraag naar hernieuwbare brandstoffen met bijbehorende infrastructuur die de transitie vereist. Transities vragen om adaptief beleid dat in staat is om enerzijds ver vooruit te kijken, doelen te stellen en richting te geven, en anderzijds tijdig bij te sturen in termen van oplossingsrichtingen of kansen te pakken die zich door maatschappelijke ontwikkelingen voordoen. Dit alles vraagt om flexibiliteit van het systeem, waarbij het loont om meerdere technologische paden naast elkaar te ontwikkelen en op enige schaal te implementeren.

De paden in deze studie moeten als schetsmatig worden beschouwd, niet als dwingende routes. Tegelijkertijd geven ze wel een indicatie van het tempo dat nodig is om in 2050 klimaatneutraal te zijn. Een te grote achterstand op dat tempo is niet in te halen gezien de traagheid van het systeem.

Richtingen voor vervolgonderzoek

Op basis van deze studie zien wij ruimte voor vervolgonderzoek op het gebied van onder andere:

- Verdelingsvraagstukken. Veel onderzoek is gericht op de opkomst en uitrol van nieuwe technologie. Een belangrijk aspect van de transitie is echter hoe de af- of ombouw van de huidige vloot wordt georganiseerd. Voor personenmobiliteit brengt dit verdelingsvraagstukken rondom de lusten en lasten van de transitie met zich mee. Maar ook in het goederenvervoer is het niet evident dat alle bedrijven gemakkelijk kunnen omschakelen. Dit kan de haalbaarheid van de transitie ondermijnen, evenals het draagvlak ervoor. In deze studie hebben we deze thematiek alleen verkennend behandeld, maar meer kennis is nodig over de mechanismen die voor verschillende doelgroepen gelden om de vloot om of af te kunnen bouwen en over de (beleids)maatregelen die hier impact op hebben.
- Effectieve manieren om een betere energie-efficiëntie van het personen- en goederenvervoer te bevorderen. De vraag is welke technische en logistieke of operationele maatregelen hierbij effectief zijn (op het niveau van individuele bedrijven en vooral ook voor verschillende goederenvervoersegmenten). Wat kan de sector zelf organiseren en waar ligt een rol voor de overheid?

- Het verder verkennen van de institutionele kant van de transitie, waaronder de wisselwerking tussen nationaal en regionaal of lokaal beleid. Deze wisselwerking komt in de huidige studie beperkt aan bod, terwijl regionale en lokale overheden wel een belangrijke rol spelen bij de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. Denk aan de uitrol van laadinfrastructuur of aan de inrichting van het lokale en regionale mobiliteitssysteem. Veel regio's en steden hebben vergaande ambities geformuleerd om de klimaatverandering tegen te gaan. In onze ogen ontbreekt het echter aan een goed beeld van hoe die ambities samenhangen met de doelen en beleidsmaatregelen van het Rijk op dit vlak. Hoe kunnen die elkaar (meer) versterken?
- Interacties tussen de energietransitie in de mobiliteitssector en ontwikkelingen in de mobiliteitstransitie, inclusief de ruimtelijke ordening. Hierbij gaat onder andere om de balans tussen wat nodig is voor een klimaatneutrale mobiliteit en het in bredere zin verminderen van de negatieve impact van mobiliteit op de leefbaarheid van de gebouwde omgeving en het behoud van essentiële bereikbaarheid.
- Toepassen van kaders uit de transitiewetenschap op het beleid gericht op een klimaatneutrale mobiliteit. In deze studie schetsen we wel een handelingsperspectief voor het beleid, wat veelal neerkomt op het reguleren, stimuleren of faciliteren van een technologie. Het is echter de vraag of de transitie met deze instrumenten voldoende snel kan worden gerealiseerd. Hoe kunnen we de kennis over transitiesturing en systeeminnovatie toepassen voor een klimaatneutrale mobiliteit?
- De interactie van de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit en het energiesysteem. Welk beleid is nodig om problemen te voorkomen en een mogelijke synergie te benutten? Hier liggen vraagstukken rond de toepasbaarheid van slim laden en vehicle-to-grid-technologie. Ook is het zaak goed zicht te geven op de barrières en kansen die er zijn om de uitrol van laadinfrastructuur voor elektrisch vervoer te versnellen.
- Verkennen wat er nodig is voor adaptief beleid in de transitie. Hoe is rekening te houden met verandering en nieuwe kansen? Kunnen alternatieve technologieën snel worden opgeschaald? Wat betekent dat voor de kosten van de transitie?
- Normatieve toekomstscenario's, zoals die in PBL (2023a), toepassen om te komen tot beelden voor nieuwe mobiliteitssystemen. In deze scenario's wordt rekening gehouden met veranderde maatschappelijke voorkeuren die leiden tot een wezenlijk ander mobiliteitsgedrag. Ook kan hierbij de invloed van geopolitieke veranderingen worden verkend. Hoe kan dit worden toegepast in beleid?
- De wisselwerking tussen de transitie naar een circulaire economie en de transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit. Hierbij kan het bijvoorbeeld gaan over de grondstoffen die nodig zijn voor elektrische voertuigen, maar ook over de gevolgen van andere productie- en consumptiepatronen voor de transportsector.

Tot slot

De transitie naar een klimaatneutrale mobiliteit vormt een grote maatschappelijke uitdaging. De klimaatimpact van mobiliteit kan afnemen door duurzame energiedragers te gebruiken, de energie-efficiëntie van het vervoer te verhogen, klimaatvriendelijke vervoerswijzen te benutten en de vraag naar vervoer te verminderen. Uit deze studie blijkt dat er technisch veel kan. Nieuwe technologieën voor duurzame mobiliteit zijn in ontwikkeling of worden al uitgerold in de samenleving. Het pad naar klimaatneutraliteit is ingeslagen, maar de uitdagingen om duurzame technologie tijdig te implementeren zijn groot. Om het emissiereductietempo op weg naar klimaatneutraliteit in 2050 te versnellen, is het niet alleen nodig om duurzame energie in te zetten. Ook is een rol weggelegd voor energiebesparing. Gedragsverandering kan hier een belangrijke bijdrage aan leveren.

Referenties

Algemeen Dagblad (2019), 'Elektrische auto is een subsidieslurper', ad.nl; https://www.ad.nl/politiek/elektrische-auto-is-een-subsidieslurper.

AM, RDC, VNA, NS & VMS Insight (2023), *Nationaal Zakelijke Mobiliteitsonderzoek 2023. Samenvatting,* Automotive Management.

Axsen, J., P. Plotz & M. Wolinetz (2020), 'Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO2 mitigation in road transport', *Nature Climate Change* 10: 809-818, https://doi.org/10.1038/s41558-020-0877-y

Bastiaanssen, J. & M. Breedijk (2022), *Toegang voor iedereen? Een analyse van de (on)bereikbaarheid van voorzieningen en banen in Nederland,* Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Blomjous, D. & H. Hilbers (2021), *Verkenning stedelijk personenverkeer in Nederland,* Bijdrage aan het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 2021, Utrecht.

Bode et al. (2019), *Staat van Transitie: Dynamiek in mobiliteit, klimaatadaptatie en circulaire economie,* Rotterdam: The Dutch Research Institute For Transitions.

Bouma, J. et al. (2023), *Betrokken burgers – Onmisbaar voor een toekomstbestendige leefomgeving*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Breukers, S., R. Mourik, J. Backhaus, T. Mathijsen, S. Brunsting, J.C.M. Uyterlinde & M. Pol (2013), *Effectief beleid voor duurzaam gedrag: Een internationale vergelijking*, Studie voor de Raad voor de leefomgeving en infrastructuur (Rli).

CBS (2023), *Klimaatverandering en energietransitie: opvattingen en gedrag van Nederlanders in 2023*, cbs.nl, https://longreads.cbs.nl/klimaatverandering-en-energietransitie-2023/opvattingen-over-klimaatverandering/

CBS Statline (2023a), 'Bedrijfsbestelauto's; km's, bedrijfstak, bedrijfsgrootte', Centraal Bureau voor de Statistiek; https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/85620NED/table?ts=1697179859686 (cbs.nl) [Geraadpleegd op 13 oktober 2023].

CBS Statline (2023b), 'Bedrijven; bedrijfsgrootte en rechtsvorm', Centraal Bureau voor de Statistiek; https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/81588NED/table?dl=4638 (cbs.nl) [Geraadpleegd op 13 oktober 2023].

Chappin, M., M. Hekkert, M. van Leeuwen & D. Both (2018), *Innovatiesysteemanalyse voor beleidsanalysten*, RVO en Universiteit Utrecht.

CE Delft (2014), *CO_2-reductie door gedragsverandering in de verkeerssector,* Delft: CE Delft.

CE Delft (2020a), *Bio-Scope. Toepassingen en beschikbaarheid van duurzame biomassa,* Delft: CE Delft.

CE Delft (2020b), *Elektrificatie en vraagprofiel 2030, rapport expertraject TenneT E-top*, Delft: CE Delft.

CE Delft, TNO & Topsector Logistiek (2020), *Outlook Hinterland and Continental Freight 2020*, Topsector Logistiek.

CE Delft (2023), *Logistieke efficiëntie. Beoordeling van potentiële maatregelen,* Delft: CE Delft.

CPB & PBL (2015), *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving. Cahier Mobiliteit*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

CPB & PBL (2020), *Kansrijk mobiliteitsbeleid 2020*, Den Haag: Centraal Planbureau en Planbureau voor de Leefomgeving.

CPB & PBL (2023), *Afschaffing fossiele-energiesubsidies: eerder een hersenkraker dan een no-brainer*, Den Haag: Centraal Planbureau & Planbureau voor de Leefomgeving.

Davidson, M. (2021), *Verdelende rechtvaardigheid in het klimaatbeleid*, Den Haag: Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid.

Davydenko, I., H. Hilbers & H. de Wilde (2024), *Klimaatneutrale Luchtvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving & TNO.

Dimitropoulos, A., W. Oueslati & C. Sintek (2018), 'The rebound effect in road transport: A meta-analysis of empirical studies', *Energy Economics* 75,

EC (2024), *Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society*, COM(2024) 63 final.

Elzinga, R., M.J. Janssen, J. Wesseling, S.O. Negro & M.P. Hekkert (2023), 'Assessing mission-specific innovation systems: Towards an analytical framework', *Environmental Innovation and Societal Transitions* 48.

ESABCC (2023), *Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate change target and a greenhouse gas budget for 2030-2050*, European Scientific Advisory Board on Climate Change, DOI: 10.2800/609405.

Ettema, D., I. Geigenmuller, P. van den Berg, & D. van Lierop (2023), *What is Transport Adequacy? Quantifying Experienced Transport Poverty in the Netherlands*, Utrecht: Universiteit Utrecht.

Europese Commissie (2021), 'Questions and answers: A fair transition towards climate neutrality', ec.europa.eu, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/QANDA_21_6823

Fairley, K., M. Stallen & E. Sent (2013), 'De kracht van sociale normen', *ESB* 98: 27-31.

Geilenkirchen, G.P., J. Harmsen, R. Verbeek, J. Faber & E. van der Toorn (2024), *Klimaatneutrale zeescheepvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving & TNO.

Geilenkirchen, G.P., K.T. Geurs, H.P. van Essen, A. Schroten & B. Boon (2010), *Effecten van prijsbeleid in verkeer en vervoer. Kennisoverzicht*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Hanemaaijer, A. et al. (2023), *Integrale Circulaire Economie Rapportage 2023*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Hebinck, A., G. Diercks, T. von Wirth, P.J. Beers, L. Barsties, S. Buchel, R. Greer, F. van Steenbergen & D. Loorbach (2021), 'An actionable understanding of societal transitions: the X-curve framework', *Sustainability Science* 17: 1009-1021, https://doi.org/10.1007/s11625-021-01084-w.

Hekkert, M.P., R.A.A. Suurs, S.O. Negro, S. Kuhlmann & R.E.H.M. Smits (2007), 'Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change', *Technological Forecasting & Social Change* 74: 413-432.

Hekkert, M.P., M.J. Janssen, J.H. Wesseling & S.O. Negro (2020), 'Mission-oriented innovation systems', *Environmental Innovation and Societal Transitions* 34: 76-79, https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.11.011.

Hurtig O., M. Buffi, N. Scarlat, V. Motola, A. Georgakaki, S. Letout, A. Mountraki & G. Joanny (2022), *Clean Energy Technology Observatory: Advanced biofuels in the European Union – 2022 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, doi:10.2760/938743, JRC130727.

IEA (2021), *The role of critical minerals in clean energy transitions*, Paris: IEA.

IenW (2023a), *Uitwerking bereikbaarheidsdoelen, Programma Mobiliteitsvisie 2050*, Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

IenW (2023b), *Plan en tijdspad voor verduurzaming van vrachtwagens*, Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

IPCC (2022), 'Summary for Policymakers', pp. 3-33 in: H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds.), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

I&O Research (2020), *Duurzaam denken is nog (steeds) niet duurzaam doen*, Amsterdam: I&O Research.

ITF (2023), 'The potential of E-fuels to decarbonise ships and aircraft', *International Transport Forum Policy Papers*, No. 111, Paris: OECD Publishing.

Javaid, A., N. Milojevic-Dupont, F. Nachtigall, F. Wagner, F. Creutzig & P. Berrill (2023, in voorbereiding), 'Urban form influences travel distances, car ownership, and mode choice: Evidence from 19 European cities', *Research Square*.

Jowitt, S.M., G.M. Mudd & J.F.H. Thompson (2020), 'Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production', *Communications Earth & Environment* 1.

KiM (2018), *De Vliegende Hollander*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2020), *Langetermijntrends goederenvervoer*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2021a), *Verkenning Ruimte in het systeem,* Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2021b), *Uitwerking van brede welvaart voor de monitoring en evaluatie van mobiliteitsbeleid*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2022a), *Energieketens voor CO_2-neutrale mobiliteit. Efficiëntie, kosten en ruimtegebruik in beeld,* Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2022b), *Mobiliteitsbeeld 2022, kerncijfers,* Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2022c), *Verklaringen voor de verschillen in autobezit bij Nederlandse huishoudens*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2023a), *Autoluw beleid gemeenten. Doelen, effecten en rollen,* Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2023b), *Klimaatbesef en minder vliegen?*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

KiM (2023c), *De tweedehandsmarkt voor elektrische personenauto's*, Den Haag: Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid.

Koch, J. & K. Vringer (2023), *Hoe 'circulair' zijn Nederlandse consumenten? Een empirisch onderzoek naar gedrag, bereidheid en de potentiële milieuwinst van circulair consumeren*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Kunseler, E. & E. Dammers (redactie) (2023), *Strategisch onderzoek in het veranderende speelveld van wetenschap, beleid en samenleving. Essaybundel*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Litman, T. (2021), *Smart transportation emission reduction strategies. Identifying truly optimal ways to conserve energy and reduce emissions,* Victoria Transport Policy Institute.

Loorbach, D., N. Frantzeskaki & F. Avelino (2017), 'Sustainability transitions research', *Annual Review of Environment and Resources* 42: 599-626.

Meerkerk, J. van, M. Verbeek & D. Blomjous (2024), *Klimaatneutraal wegverkeer in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving & TNO.

Meerkerk, J. van, G. Renes & G. Ridder (2014), *Greening the Dutch car fleet: the role of differentiated sales taxes*, PBL Working Paper 18, The Hague: PBL.

Ministerie van Financiën (2024), *Belastingen in een maatschappelijk perspectief: Bouwstenen voor een beter belastingstelsel*, Den Haag: Ministerie van Financiën.

Minnen, J. van, B. Strengers & B. Daniëls (2024, in voorbereiding), *Beschikbaarheid biogrondstoffen in NL en de EU. Notitie bij studie Trajectverkenning klimaatneutraal Nederland 2050*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Nabielek, P., Vandenbussche, L., Loeber, A.M.C., Boonstra, H.A., Klaassen, P. & L. Verwoerd (2023), *Working Paper. An evaluation framework for the transformative capacity of Dutch Climate Policy*, The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Nationaal Klimaatplatform (2023), *Daadkracht en draagvlak*, Den Haag: Nationaal Klimaatplatform.

Netbeheer Nederland (2023), *Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's. Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050*, Netbeheer Nederland.

Newell, P., S. Srivastava, L. O. Naess, G. A. Torres Contreras & R. Price (2020), *Towards Transformative Climate Justice: Key Challenges and Future Directions for Research*, Institute of Development Studies.

Nieuwsblad Transport (2023), 'Zero-emissiezones funest voor kleine ondernemers', nt.nl, https://www.nt.nl/wegvervoer/2023/06/09/zero-emissie-zones-funest-voor-kleine-ondernemers/?gdpr=deny

OECD (2021), *Transport Strategies for Net-Zero Systems by Design*, Paris: OECD Publishing.

Paradies, G. & R. van den Brink (2023), *Anders consumeren om klimaatdoelen te halen. Een verkenning van manieren om het systeem te veranderen en hoe iedereen daaraan kan bijdragen*, TNO.

PBL (2020), *Actualisatie invoer WLO autopark mobiliteitsmodellen 2020*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL (2021), *Reflectie op de leefomgevingsthema's in het coalitieakkoord 2021-2025*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL (2023a), *Vier scenario's voor de ruimtelijke inrichting van Nederland in 2050. Ruimtelijke Verkenning 2023*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL (2023b), *Analyse Leefomgevingseffecten Verkiezingsprogramma's 2023-2027*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL (2023c), *Balans van de Leefomgeving 2023. Toekomstbestendig kiezen, rechtvaardig verdelen*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL et al. (2022), *Klimaat- en Energieverkenning 2022*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL et al. (2023a), *Klimaat- en Energieverkenning 2023*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL et al. (2023b), *Geraamde ontwikkelingen in nationale emissies van luchtverontreinigende stoffen 2023. Rapportage bij de Klimaat- en Energieverkenning 2022*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL (2024, in voorbereiding), *Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Populytics (2023), *Burgerkeuzes in kaart: resultaten van de Nationale Klimaatraadpleging 2023*, Delft: Populytics.

Rebel & Goudappel (2023), *Verkenning mogelijkheden integrale bereikbaarheidsdoelen bij Mobiliteitsvisie 2050*, Rebel & Goudappel.

Rotmans, J., R. Kemp & M. van Asselt (2001), 'More evolution than revolution: transition management in public policy', *Foresight* 3 (1): 15-30.

Richards, C., K. Blackstock & C. Carter (2004), *Practical Approaches to Participation*, Aberdeen: Macaulay Institute.

RIVM (2023), *National Inventory Report 2023. Greenhouse gas emissions in the Netherlands 1990-2021*, Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment.

RIVM (2024), Emissieregistratie. Zie: https://www.emissieregistratie.nl/data/overzichtstabellen-lucht/broeikasgassen.

Schipper, L. & C. Marie-Lilliu (1998), *Transportation and CO_2 Emissions: Flexing the Link – A Path for the World Bank*, Paris: International Energy Agency.

SER (2020), *Biomassa in balans. Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biogrondstoffen*, Den Haag; Sociaal-Economische Raad.

Snellen, D., J. Bastiaanssen & M. 't Hoen (2021), *Brede welvaart en mobiliteit*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Strengers, B. & H. Elzenga (2020), *Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa. Verslag van een zoektocht naar gedeelde feiten en opvattingen*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Staatscommissie Parlementair Stelsel (2018), *Lage Drempels, Hoge Dijken*, Amsterdam: Boom.

TNO (2009), *Daadwerkelijk rijgedrag met Het Nieuwe Rijden*, Delft: TNO.

TNO (2020), *Maatschappelijk draagvlak voor klimaat- en energiebeleid. Resultaten van een vragenlijstonderzoek*, Amsterdam: TNO.

TNO (2021a), *Wat is het maatschappelijk draagvlak voor klimaatbeleid? Onderzoek naar beleidsopties van de studiegroep Invulling klimaatopgave Green Deal*, Amsterdam: TNO.

TNO (2021b), *Transition to e-fuels: a strategy for the Harbour Industrial Cluster Rotterdam*, Den Haag: TNO.

TNO (2024), *De energietransitie en het risico op vervoersarmoede. Een microdata-analyse van huishoudens met laag inkomen en hoge brandstofkosten*, Amsterdam: TNO.

Tol, D., T. Frateur, M. Verbeek, I. Riemersma & H. Mulder (2022), *Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe*, Den Haag: TNO.

Topsector Logistiek & Connekt (2017), *Gebruikers en inzet van bestelauto's in Nederland*, Delft: Topsector Logistiek & Connekt.

Traa, M., R. Verbeek, G. Geilenkirchen & J. Harmsen (2024), *Klimaatneutrale binnenvaart in 2050. Een verkenning van beelden en paden daar naartoe*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving & TNO.

Vringer, K. & Ch. Carabain (2019), *Maatschappelijk draagvlak voor transitiebeleid, een verkennend onderzoek naar de legitimiteit van transitiebeleid rond energie en circulaire economie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Weterings, A. & L. Verwoerd (2020), *Verkennen waar wat werkt. Vormgeven aan lerend en adaptief beleid*. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Weterings, A. et al. (2022), *Inzicht in arbeidsmarktknelpunten voor de uitvoering van het klimaatbeleid. Opzet en uitkomsten van het PBL-ROA-model*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving/Maastricht ROA.

WKR (2023), *Wetenschap onderstreept noodzaak tot versterking klimaatbeleid*, Brief van de Wetenschappelijke Klimaatraad aan de voorzitter van de Tweede Kamer der Staten-Generaal, WKR2023-003.

WRR (2023), *Rechtvaardigheid in klimaatbeleid*, Den Haag: Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid.