



Planbureau voor de Leefomgeving

Trajecten naar een klimaatneutrale Nederlandse industrie met klimaatneutrale grondstoffen

Achtergrondstudie binnen het project Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050

Dick van Dam, Mariësse van Sluisveld, Bert Daniels, Bart Strengers

24 April 2024

PBL

Colofon

Trajecten naar een klimaatneutrale Nederlandse industrie met klimaatneutrale grondstoffen

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2024

PBL-publicatienummer: 5211

Contact

dick.vandam@pbl.nl

Auteurs

Dick van Dam, Mariësse van Sluisveld, Bert Daniëls, Bart Strengers

Met dank aan

De auteurs zijn dank verschuldigd aan de diverse interne en externe reviewers, meedenkers en dataverzamelaars.

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: Dam, D. van, Sluisveld, M. van, Daniëls, B., en Strengers, S. (2024), Trajecten naar een klimaatneutrale Nederlandse industrie met klimaatneutrale grondstoffen. Achtergrondstudie Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

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.

Inhoud

Samenvatting	4
1 Leeswijzer	8
2 Inleiding en sectorbeschrijving	8
3 Trajecten naar klimaatneutrale industrie	18
3.1 Internationale vraagontwikkeling	18
3.2 Positie van Nederland in de mondiale klimaattransitie	19
4 Technische trajecten per industriector	23
4.1 Beschrijving per sector	24
4.2 Energiedragers en grondstoffen	26
4.2.1 Vraag naar energiedragers	26
4.2.2 Grondstoffen	35
4.2.3 Productie van brandstoffen	44
4.3 Uitstoot van broeikasgassen	47
4.4 Investerings	49
4.5 Robuuste elementen in de trajecten	50
5 Huidig en aanvullend beleid	52
5.1 Industriebeleid in het algemeen	52
5.2 Klimaatbeleid voor de industrie	52
5.2.1 Beprijzing van uitstoot	52
5.2.2 Subsidies	55
5.2.3 Overig beleid	55
5.2.4 Ontwikkeling industrie-uitstoot	56
5.3 Mogelijke knelpunten en denkrichtingen voor oplossingen	57
Referenties	61
Appendix	67

Samenvatting

In dit achtergronddocument, dat onderdeel is van de PBL-studie 'Trajectverkenning Klimaatneutraal Nederland 2050' (TVKN 2050), worden drie trajecten beschreven richting een klimaatneutrale industrie. Ook worden beleidsopties verkend die de industrie kunnen stimuleren en helpen klimaatneutraal te worden, en die aansluiten bij de genoemde trajecten.

Uitgangspunt: industrie wordt klimaatneutraal en blijft belangrijk in Nederland

Voor de drie trajecten is het uitgangspunt dat de bestaande productieprocessen van de industrie in 2050 vrijwel geen broeikasgassen meer uitstoten. Verder gaan we uit van nog altijd belangrijke rol voor de industrie en veronderstellen we geen grootschalige afbouw van de industrie. Bepaalde sectoren of bedrijven zullen zich vanwege onder andere regionale verschillen in bijvoorbeeld energieprijzen in de toekomst mogelijk elders vestigen, maar conform de uitgangspunten van TVKN gaan we hier in de kwantitatieve uitwerking niet vanuit.

Het is goed mogelijk dat richting 2050 op grote schaal negatieve emissies kunnen worden gerealiseerd door nieuwe processen in de industrie, bijvoorbeeld door bioraffinage in combinatie met opslag van vrijkomende CO₂. Deze negatieve emissies worden in deze studie apart van de emissies door de genoemde productieprocessen besproken.

Drie trajecten, die verschillen in mate van circulariteit en afbouwsnelheid van fossiel

De drie trajecten zijn gebaseerd op bestaande plannen en diverse studies, zowel uit binnenland als buitenland. Op basis van publieke data over de productieprocessen zijn voor de drie trajecten de energie- en grondstofvraag en emissies per sector in de tijd uitgestippeld. De trajecten vormen alle drie plausibele paden met een diverse mix van emissiereducerende maatregelen, die niet de hoeken van het speelveld beschrijven maar uitgaan van relatief gematigde aannames.

- In een 'centraal' genoemd traject blijft de industriële productie stabiel en verandert de industrie door onder meer een geleidelijke afbouw van fossiele brandstoffen, inzet van CO₂-afvang en -opslag, elektrificatie en de inzet van CO₂-arme waterstof en biograndstoffen.
- We hebben ook een eerste alternatief traject bepaald, waarin de inzet van fossiele energie en grondstof minder en minder snel afneemt dan in het centrale traject en er dus meer CO₂-afvang en -opslag plaatsvindt.
- In het tweede alternatieve traject neemt de inzet van fossiele energie sneller af en wordt in grotere mate ingezet op elektrificatie. Tegelijk worden fossiele grondstoffen versneld vervangen door recycelaat en biograndstoffen.

Productie van hernieuwbare koolwaterstoffen voor brandstof en grondstof vervult sleutelrol

De productie van alternatieven voor fossiele koolwaterstoffen (met name olie) als brandstof (voor met name lucht- en scheepvaart) en chemische grondstof moet grotendeels nog van de grond komen. Vanwege de verwachte enorme schaal van deze industrie kan de opbouw hiervan ingrijpende gevolgen hebben voor de structuur en ruimtelijke verdeling van de Nederlandse industrie. Er is een veelheid aan productieroutes mogelijk, waarbij biograndstof, CO₂ en afval de koolstofbronnen vormen en waterstof ook een belangrijke rol als grondstof vervult.

Voor de structuur en het volume van de productie van alternatieven voor fossiele brandstoffen en grondstoffen lijkt een aantal zaken bepalend:

- Bij de productie van biobrandstoffen (op basis van grotendeels geïmporteerde biograndstoffen) kan Nederland een grote rol spelen, zelfs als exporterend land; bij synthetische brandstoffen lijkt dit minder waarschijnlijk omdat dit grote hoeveelheden groene waterstof vereist, waarvoor de productieomstandigheden mogelijk elders beter zijn dan in Nederland.
- Momenteel worden in Nederland veel fossiele brandstoffen op basis van geïmporteerde ruwe olie voor de export geproduceerd. In deze studie voorzien we dat dit bij hernieuwbare brandstoffen in veel mindere mate het geval zal zijn.
- Bij biograndstoffen of recycelaat voor de chemische industrie geldt dat import nodig is voor de vervanging van fossiele grondstof. Het kan hierbij gaan om de import van ruwe biograndstoffen of afval, ofwel om de import van de hieruit geraffineerde substituten voor olieproducten, zoals nafta.

Robuuste elementen in de trajecten en belangrijkste onzekerheden

De trajecten zijn omgeven met stuurbare onzekerheden (hoe zal het beleid eruit zien, waar wordt geïnvesteerd in infrastructuur) en minder goed stuurbare onzekerheden (wat gebeurt er in het buitenland, welke innovatie vindt plaats). Desondanks zijn er enkele robuuste aspecten die in alle trajecten terugkomen:

- Zeer grote toename in de vraag naar elektriciteit in de industrie, ten minste een factor 2,5 ten opzichte van de huidige vraag. Mogelijk wordt het zelfs een verzesvoudiging tot 2050 (inclusief de productie van waterstof voor hernieuwbare brandstoffen).
- We voorzien een blijvende vraag naar CO₂-infrastructuur in de komende decennia, vooral voor afvang en opslag en later ook voor gebruik van CO₂ in de industrie.
- De vraag naar waterstof in de industrie zal naar verwachting groeien en mede door het huidige beleid geleidelijk door groene waterstof worden vervangen. Waterstof zal ook als energiedrager worden ingezet.
- Aardgas (als energiedrager en grondstof) en aardolie (als grondstof), voor het overgrote deel geïmporteerd, blijven tot ten minste 2040 belangrijk in Nederland, mogelijk zelfs tot voorbij 2050, in combinatie met CO₂-afvang en -opslag.
- Biograndstof is voornamelijk nodig als grondstof voor de chemie en voor de productie van transportbrandstoffen. De inzet van biograndstoffen in de industrie buiten de chemie en brandstoffenproductie blijft beperkt, met name vanwege beperkte beschikbaarheid en de afbouw van de stimulering van het gebruik van biograndstoffen voor warmteproductie.

Mogelijke knelpunten en opties voor beleid

Er ligt met het EU-ETS en de nationale CO₂-heffing al een basis voor **emissiebeprijzing** in de industrie, al kan dit worden verbeterd; niet alle emissies worden (in voldoende mate) beprijsd en het realiseren van negatieve emissies wordt nog onvoldoende beloond.

Ook de verduurzaming in **grondstofgebruik** kan middels beleid worden gestuurd, bijvoorbeeld door een oplopend percentage hernieuwbare of gerecyclede grondstoffen te eisen in de chemie. Voor plastics – gericht op 2030 – is dit door het kabinet aangekondigd in april 2023 en ook in de EU wordt dit voor verschillende productgroepen voorgesteld. Het is hierbij verstandig om te sturen op recyclingtechnieken met een zo hoog mogelijke opbrengst, zeker wanneer grondstoffen schaars zijn. Grondstofbeleid is het meest effectief wanneer het ten minste gezamenlijk met buurlanden, maar beter nog op Europese schaal wordt ingezet. De verwachte hoeveelheid benodigde biograndstof en gerecyclede grondstof voor de chemie en brandstoffenproductie is groter dan de huidige en toekomstige in Nederland beschikbare hoeveelheden. Behoud van de chemische industrie en de

hernieuwbare brandstoffenproductie in Nederland vereist daarom grootschalige import- en verwerkingsinfrastructuur voor deze grondstoffen.

Energie-infrastructuur en arbeidsmarkt kunnen bottlenecks vormen en vereisen langetermijnplanning. Daarbij is het ook belangrijk om álle grote en kleine industriële bedrijven mee te nemen in de langetermijnplanning van de infrastructuur: de volledige industrie moet immers uiteindelijk klimaatneutraal gaan produceren. Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat zet hierop in met het Programma Infrastructuur voor een Duurzame Industrie (PIDI). Proactief in infrastructuur investeren – met name gericht op toekomstige markten – kan ook helpen om investeringen in nieuwe industrie aan te trekken. Vanwege de sterke verbindingen en grensoverschrijdende productieketens loont het om energie-infrastructuur specifiek en industriebeleid in het algemeen ten minste met buurlanden (België en Duitsland) af te stemmen. Daarnaast kan het ook helpen om middels de structuur van aansluittarieven industriële bedrijven te stimuleren om flexibel gebruik te gaan maken van het elektriciteitsnet. Dit kan financieel voordeel opleveren voor bedrijven, investeringen in energieopslag stimuleren en zorgen dat netten efficiënter worden gebruikt.

Verschillen in transitiesnelheden tussen Nederland en Europa enerzijds en andere werelddelen anderzijds kunnen de **concurrentiepositie** van de industrie schaden. Om dit te voorkomen kunnen beleidsinstrumenten zoals een heffing op geïmporteerde emissie-intensieve producten (zoals met het Carbon Border Adjustment Mechanism) of normering van emissie-arm geproduceerde materialen (zoals de eerder genoemde normering voor plastics) verder worden uitgewerkt en ingezet voor sectoren waar dat nodig is.

De overheid doet er goed aan om in de mix van beleidsinstrumenten ook **andere maatschappelijke opgaven** dan de klimaatopgave mee te wegen. Voor de industrie gaat het hierbij om onder meer strategische onafhankelijkheid en invloed op kwaliteit van natuur, water en bodem en gezondheid van omwonenden. Strategische onafhankelijkheid kan worden gewaarborgd wanneer de overheid een visie ontwikkelt welke industrie strategisch belangrijk en is en specifieke aandacht verdient. Behoud van natuurkwaliteit en het voorkomen van negatieve effecten voor de gezondheid van omwonenden kan worden gewaarborgd door strikte normering en/of beprijzing en handhaving van milieu- en gezondheidseisen en duurzaamheidsvoorwaarden van biograndstoffen die steeds meer worden gebruikt. Daarnaast is het voor maatschappelijk draagvlak én investeringszekerheid belangrijk om te verkennen onder welke voorwaarden industriële bedrijven op lange termijn een functie hebben binnen de duurzame maatschappij. Het gaat daarbij niet alleen om productgroepen die in omvang zullen afnemen (zoals aardolieproducten), maar juist ook om productgroepen die in de toekomst zullen groeien (zoals biobrandstoffen en recycalaat). Op basis van deze voorwaarden is het mogelijk om langjarig en voorspelbaar overheidsbeleid te voeren.

Een **lagere vraag** naar producten en materialen kan de verduurzamingsopgave van de industrie vergemakkelijken, omdat dit het beslag op grondstoffen en (fossiele of CO₂-arme) energie vermindert. Energie- en materiaalefficiëntie zijn daarom belangrijk, maar ook het verlengen van de levensduur van producten en op andere wijze de invulling van dezelfde behoeften met minder materiaal. Het huidige systeem van volumedoelen voor afval en instrumenten, zoals de Uitgebreide Productenverantwoordelijkheid (UPV), geeft nog onvoldoende prikkels om in het ontwerp, de productie en het gebruik van producten minder grondstoffen te gebruiken of om een langere levensduur van producten te bevorderen. Wanneer beleidsprijkkels sterker gericht zijn op dergelijke effecten, kan ook emissiereductie sneller tot stand worden gebracht. Belangrijke kanttekening hierbij is het internationale karakter van de productieketens, waardoor de nationale consumptie en nationale

productie voor de meeste ketens niet direct met elkaar verbonden zijn. Een lagere nationale consumptie heeft echter op mondiale schaal hoe dan ook een kleiner beslag op hulpbronnen en een kleinere milieudruk tot gevolg.

1 Leeswijzer

Deze achtergrondstudie is onderdeel van de PBL-studie ‘Trajectverkenning klimaatneutraal 2050 (TVKN)’, waarin wordt verkend hoe Nederland klimaatneutraal kan worden en wat daarvoor nodig is (Daniëls en Strengers, 2024). Er zijn ook separate (achtergrond)studies over de vraagsectoren gebouwde omgeving (Wetzels et al., 2024), mobiliteit (Geilenkirchen et al., 2024) en landbouw (Westhoek et al., 2024), en voor elektriciteitsproductie (TNO, 2024), biograndstoffen (Van Minnen et al., 2024) en waterstofproductie (Elzenga en Strengers, 2024). De samenhang tussen de verschillende vraag- en aanbodsectoren wordt behandeld in het hoofdrapport (Daniëls en Strengers, 2024).

De trajecten in hoofdstuk 3 en 4 zijn een bottom-up inschatting van de transitie van de industriesector en van de bijbehorende inzet van grondstoffen. Deze zijn samen met de trajecten van de andere sectoren ingepast in een integrale analyse van het nationale energiesysteem met behulp van het OPERA-model (Daniëls en Strengers, 2024). Uit deze analyse volgen ook productievolumes van hernieuwbare brandstoffen zoals die in de industrie worden geproduceerd.

Hoofdstuk 2 bevat een algemene inleiding over de industrie, met daarbij toelichting op de betekenis van een klimaatneutrale industrie, de doelen en het beleid.

Hoofdstuk 3 bespreekt de verwachte internationale vraagontwikkeling per industriesector, voor zover consistent met klimaatneutraliteit in 2050, gebaseerd op bestaand onderzoek. Daarna wordt de rol van de Nederlandse industrie in een internationaal klimaatneutraal speelveld besproken.

Hoofdstuk 4 bevat per industriesector drie technische trajecten, die leiden tot een bepaalde vraag naar energiedragers en grondstoffen. Ook enkele belangrijke onzekerheden worden beschreven. In Hoofdstuk 5 volgt een beschouwing van huidig en beleid en toekomstige beleidsopties voor de industrie.

2 Inleiding en sectorbeschrijving

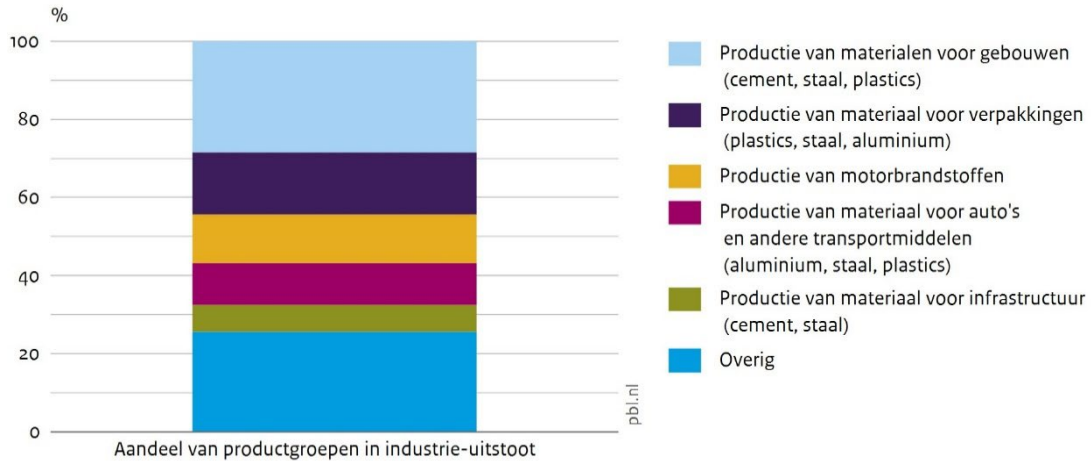
Industrie en grondstofverwerking dienen veel verschillende toepassingen

De industrie maakt producten voor consumenten en bedrijven. Bij het maken van deze producten komen momenteel grote hoeveelheden broeikasgassen vrij. Ongeveer een derde van de broeikasgasuitstoot van het Nederlands grondgebied komt voor rekening van de industrie, wanneer we zowel de directe uitstoot bij industriële installaties zelf als de indirecte uitstoot bij de productie van elektriciteit en warmte voor gebruik in de industrie meerekenen. De productie is daarbij voor binnen- en buitenland en daarom is het goed om het internationale perspectief van de industrie mee te nemen. Figuur 1 laat voor Europa zien welke productgroepen verantwoordelijk zijn voor de broeikasgasuitstoot van de industrie. De industrie-uitstoot op Europees niveau zit vooral in het maken van materialen voor gebouwen, verpakkingen en vervoersmiddelen inclusief het maken van transportbrandstoffen. Onder ‘overig’ vallen andere producten zoals verwerkte etenswaren en elektronica. Een dergelijk overzicht maakt de relatie tussen consumptie en productie inzichtelijk. In deze achtergrondstudie ligt de focus bij de uitstoot door de industriële productie in Nederland, maar die productie is afhankelijk van de consumptie, zowel in Nederland als daarbuiten. Voor

Nederland zal een dergelijk plaatje er anders uitzien (meer brandstoffen, minder cement voor gebouwen).

Figuur 1

Aandeel van productgroepen in de broeikasgasuitstoot van de Europese industrie



EU-cijfers over 2015, totale uitstoot ongeveer 860 Mt CO_{2,eq}. PBL-analyse gebaseerd op o.a. Material Economics (2018, 2019). Europese cijfers zijn getoond omdat de industrie in Nederland niet representatief is voor consumptie; sommige sectoren zijn relatief groot (zoals aardolieraffinage en chemie) of ontbreken juist (klinkerproductie voor cement). Zie ook CBS (2018).

Scope industrie en grondstoffen

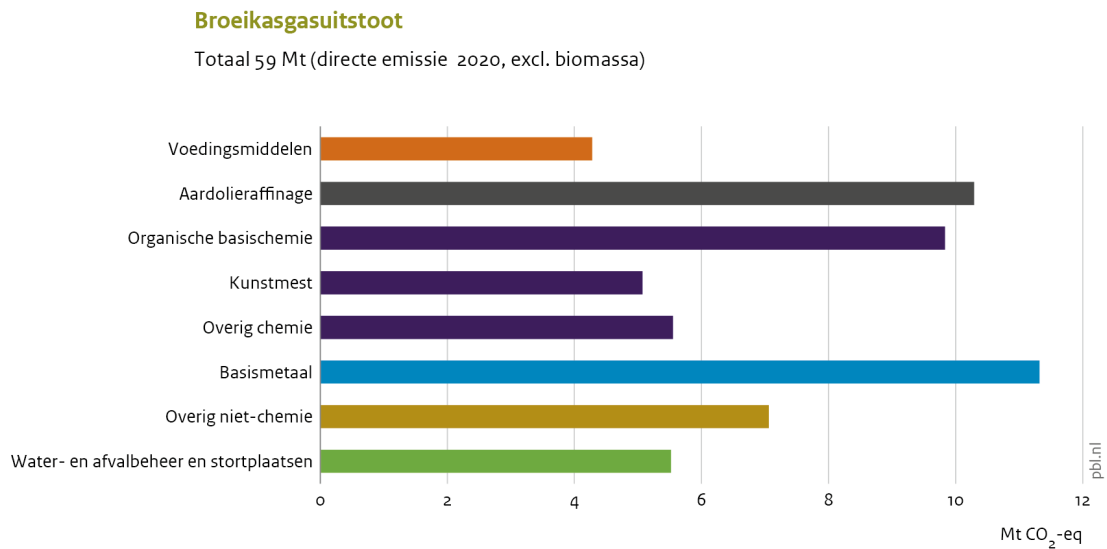
We beschouwen hier alle industriële sectoren (sectie C volgens de SBI-indeling van het CBS), inclusief de industriële activiteiten in de energiesector, zoals de winning en productie van brandstoffen en grondstoffen (zowel van fossiele, synthetische als biogene oorsprong; sectie B volgens de SBI-indeling van het CBS). De toekomstige waterstofproductie uit water en elektriciteit wordt hier niet behandeld want deze is ondergebracht in een separate achtergrondstudie (Elzenga en Strengers, 2024). Waterbeheer en afvalverwerkingsinstallaties (sectie E volgens de SBI-indeling van het CBS) zijn wel opgenomen in de kwantitatieve trajecten voor de industrie. Naast CO₂ zijn ook overige broeikasgassen onderdeel van de scope.

De cijfers zijn beperkt tot Nederland, waarbij de meest emissie-intensieve delen van de waardeketen van materialen zijn meegerekend. De oogst en import van biograndstoffen is beschreven in respectievelijk de achtergrondstudie over landbouw en landgebruik (Westhoek et al., 2024) en de notitie over biograndstoffen (Van Minnen et al., 2024). De uitstoot en het energiegebruik van de (groot)handel valt onder separate studies over gebouwde omgeving en mobiliteit. Het gebruik van industriële producten levert nauwelijks directe uitstoot op, afgezien van het verbruik van brandstoffen. Dat laatste wordt besproken in de achtergrondstudies van de vraagsectoren. Transport van grondstoffen en materialen en de bijbehorende uitstoot is niet weergegeven in de figuur. Dit wordt behandeld in de studie over de mobiliteitssectoren. Op deze manier worden alle uitstoot en energieverbruik die met materialen (en de productie van brandstoffen) te maken hebben in kaart gebracht. De interactie met het buitenland is niet opgenomen in de cijfers in de achtergrondstudies,

maar in de aanbevelingen wordt wel rekening gehouden met het internationale karakter van de waardeketens.

Een gebruikelijke indeling van de industrie in studies ten behoeve van het beleid is een indeling per sector. Een verdeling van broeikasgasemissies naar sector is te zien in Figuur 2, waarbij de verbranding van restgassen uit staalproductie aan basismetaleel is toegerekend. De cijfers in deze figuur en verder in dit document zijn specifiek voor Nederland, tenzij anders aangegeven. Qua uitstoot is de chemie de grootste sector, maar deze is in de figuur onderverdeeld in organische basischemie (vooral grondstoffen voor plastics), kunstmestproductie en overige chemie (paars). Meer dan driekwart van de industrie-uitstoot is geconcentreerd in een vijftal regionale clusters, zoals weergegeven in Figuur 3. Drie daarvan worden gedomineerd door raffinage en (organische) chemie.

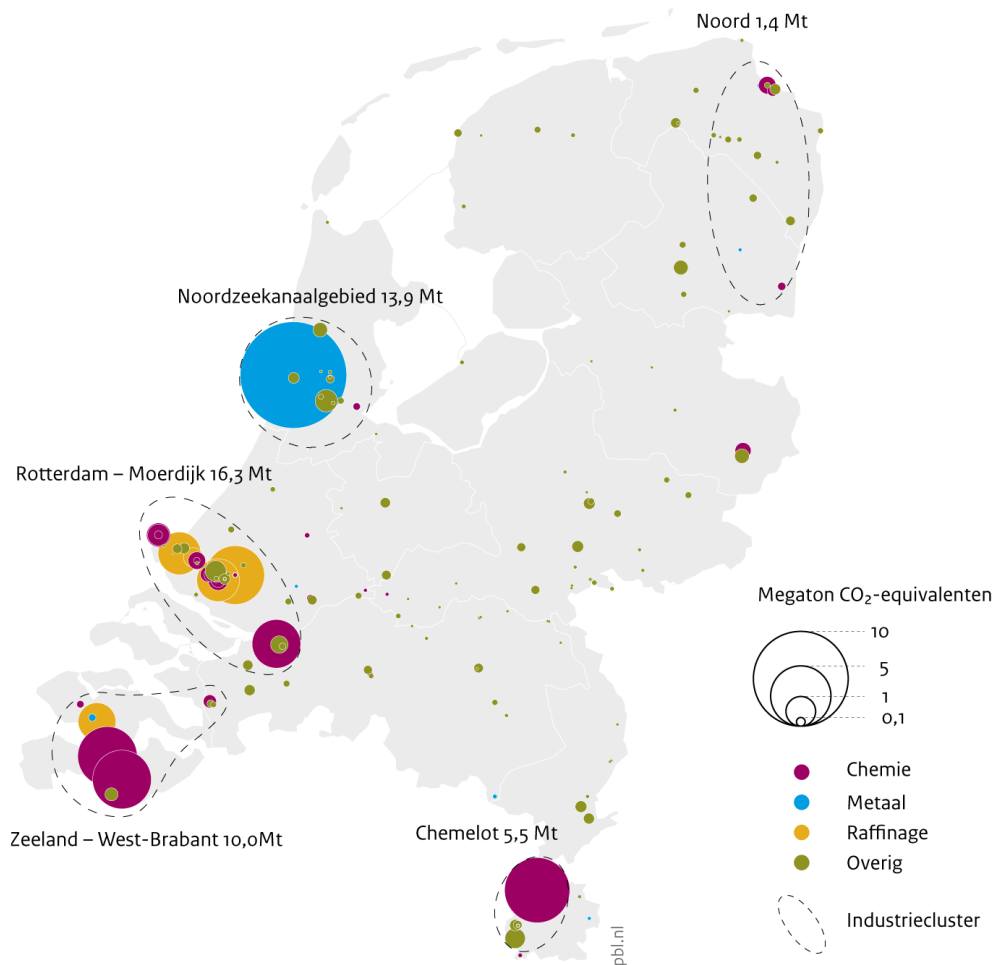
Figuur 2



Basismetaleel is inclusief verbranding van restgassen uit staalproductie.

Figuur 3

Grootste industriële CO₂-uitstoters en belangrijkste industriecusters, 2019



Bron: Nederlandse Emissieautoriteit; bewerking PBL

De weergegeven directe uitstoot per sector en cluster is uitgedrukt in Mt (megaton) CO₂-equivalent.

De verschillende sectoren zijn elders in detail beschreven; onder andere in Berenschot (2021) en in de diverse publicaties in het kader van MIDDEN (Manufacturing Industry Decarbonisation Data Exchange Network, een initiatief van PBL en TNO om gegevens over de Nederlandse industrie en haar decarbonisatie-opties te ontsluiten (PBL en TNO, 2021)).

Typerend voor bijna alle industriële bedrijven is dat ze op een internationale markt actief zijn. Grondstoffen, halffabricaten en eindproducten worden vaak betrokken van en verkocht aan partijen elders in de Europese Unie en (in mindere mate) de rest van de wereld (zie ook Tabel A4 in de appendix). Omgekeerd kopen en verkopen buitenlandse bedrijven hun grondstoffen, halffabricaten en producten in Nederland. Omdat de bedrijven op een internationale markt concurreren is het belangrijk om gedurende de transitie naar een klimaatneutrale samenleving rekening te houden met de situatie van bedrijven elders. Binnen deze studie wordt ervan uitgegaan dat de voornaamste handelspartners, met name de ons omringende landen, in dezelfde transitie zitten en daarom hun industrie eveneens verduurzamen. Meest relevant hierin is de recente aanscherping van het EU ETS, waarin rond 2040 geen emissierechten meer worden uitgegeven voor de grote industrie. Zie voor een meer specifieke analyse van de omringende landen in Boot (2022). Volgens de Net Zero Tracker

(2024) waren in april 2024 voor 92% van de wereldeconomie doelen aangekondigd voor netto-nul CO₂- of broeikasgasuitstoot. Voor Nederlandse bedrijven die concurreren buiten de EU kan de relatieve marktpositie op korte termijn wel sterker veranderen dan bedrijven die op de EU gericht zijn, omdat de EU eerder klimaatneutraal beoogt te zijn dan veel landen buiten de EU.

De hier getoonde cijfers over uitstoot en energieverbruik hebben betrekking op de installaties op Nederlands grondgebied. Verandering van productieprocessen en omschakeling naar CO₂-vrije energiedragers leidt tot directe emissie-effecten in Nederland zelf. Voor grondstoffen is de situatie iets anders: vanwege het internationale karakter van de waardeketens bestaat er niet altijd een direct verband tussen de omschakeling van fossiele naar alternatieve *grondstoffen* in Nederland met uitstootreductie in Nederland. Dat geldt natuurlijk ook omgekeerd, zij het in mindere mate omdat Nederland een relatief grote raffinage en chemische industrie kent.

Wat betekent klimaatneutraliteit voor de industrie?

Op mondiale schaal is afgesproken de temperatuurstijging te beperken tot ruim onder de 2°C, en te streven naar 1,5°C. Dit doel impliceert volgens de internationale gemeenschap, waaronder de EU, een pad naar klimaatneutraliteit voor de gehele Europese samenleving in 2050, zoals vermeld als bindende doelstelling in de Europese Klimaatwet (EU-verordening 2021/1119). De Nederlandse Klimaatwet is aangescherpt in 2023 en bevat nu ook het doel van klimaatneutraliteit in 2050. Wat een klimaatneutrale samenleving betekent voor de Nederlandse industrie is overigens niet zonder meer duidelijk. Het lijkt misschien logisch om ook een klimaatneutrale industrie als uitgangspunt te nemen. Dit is echter niet per se voor de hand liggend omdat de industrie meer emissiereductiemogelijkheden kent dan sommige andere sectoren, en grootschalig negatieve emissies kan realiseren door het afvangen en opslaan van CO₂ die vrijkomt bij de productie en inzet van biogene brand- of grondstoffen of direct uit de lucht afgevangen CO₂. Negatieve emissies kunnen ook worden gerealiseerd door het langdurig vastleggen van deze koolstof in producten. Deze negatieve emissies kunnen ook na 2050 nog resterende emissies uit andere sectoren, zoals de landbouw of mobiliteit, compenseren. Daarom is de kans groot dat de emissie van de industrie in 2050 netto negatief moet zijn.

Het potentieel van negatieve emissies is echter onzeker, omdat dit in grote mate bepaald wordt door het volume van de productie van geavanceerde biogene brand- en grondstoffen in 2050 (meer hierover in hoofdstuk 4.2). Dit is een industrietak die voor het grootste deel nog moet worden ontwikkeld. Ook de omvang van de productie van koolstofhoudende *synthetische* brand- en grondstoffen, zoals kerosine of methanol geproduceerd uit niet-fossiele CO₂ in combinatie met waterstof, is onzeker. De biogene (of uit de lucht afgevangen) CO₂ die hiervoor nodig is, is niet meer beschikbaar voor het realiseren van negatieve emissies. Een vast totaal emissiedoel voor de industrie – waarbij negatieve emissies door de productie van geavanceerde biogene brand- en grondstoffen mogen meetellen – zou daarom geen duidelijk handelingsperspectief geven voor bestaande industriële bedrijven. Bij een vaststaand emissiedoel is de noodzaak tot emissiereductie niet absoluut, wanneer er binnen de sector ook grootschalige compensatie met negatieve emissies mogelijk is. Het compenseren met negatieve emissies binnen de industriële sector kan er dus voor zorgen dat bepaalde emissiebronnen niet worden aangepakt terwijl dat wel technisch mogelijk is.

Naast de doelen voor de totale Nederlandse grondgebied-emissies geeft de Nederlandse overheid in het Klimaatakkoord van 2019 aan te streven naar een klimaatneutrale industrie in 2050, waarbij het de bedoeling is dat in 2050 industriële bedrijven zich nog altijd in Nederland willen vestigen: “In 2050 zien wij een Nederland voor ons met een bloeiende, circulaire en mondiaal toonaangevende industrie, waar

de uitstoot van broeikasgassen nagenoeg nul is. (...) Het realiseren van de reductieambities moet (...) hand in hand gaan met behoud van een aantrekkelijk vestigingsklimaat voor industriële bedrijven. Dat draagt bij aan onze welvaart, ons welzijn en werkgelegenheid.” (Klimaatakkoord, 2019). Deze visie is later bevestigd in diverse kamerbrieven van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, ook naar aanleiding van de hoge energieprijzen in met name 2022. Op Europees niveau is er geen specifiek industriedoel, maar is er wel een gezamenlijk doel – en bijbehorende CO₂-emissieruimte – voor de sectoren die onder het Europese emissiehandelssysteem EU ETS vallen (industrie, elektriciteitsopwekking en continentale luchtvaart). Dit EU ETS (vanaf nu ook ETS of ETS₁ genoemd) zorgt voor een onontkoombare CO₂-emissiereductie door een afnemend aantal uitstootrechten die onder een marktprijs worden verhandeld, wat zorgt voor een effectieve prijs op CO₂-uitstoot.

De ongeveer 300 grootste uitstoters in de Nederlandse industrie nemen deel aan het ETS, evenals de elektriciteitsopwekking, de intra-Europese luchtvaart en vanaf 2024 ook het grootste deel van de zeescheepvaart. De jaarlijks beschikbare hoeveelheid uitstootrechten neemt na de herziening in 2023 af met 4,4 procentpunt per jaar. Wanneer dit reductiepercentage niet meer wordt gewijzigd zal al in 2039 de jaarlijks beschikbaar komende hoeveelheid CO₂-rechten op nul uitkomen (meer hierover in Hoofdstuk 5.2). Ook voor het brandstofverbruik van de mobiliteitssector en de gebouwde omgeving zal in 2027 een emissiehandelssysteem worden ingevoerd, waaraan ook de kleine industrie zal deelnemen (Europees Parlement, 2022). Negatieve emissies zijn op dit moment niet compatibel met EU ETS, maar hier wordt wel onderzoek naar gedaan.

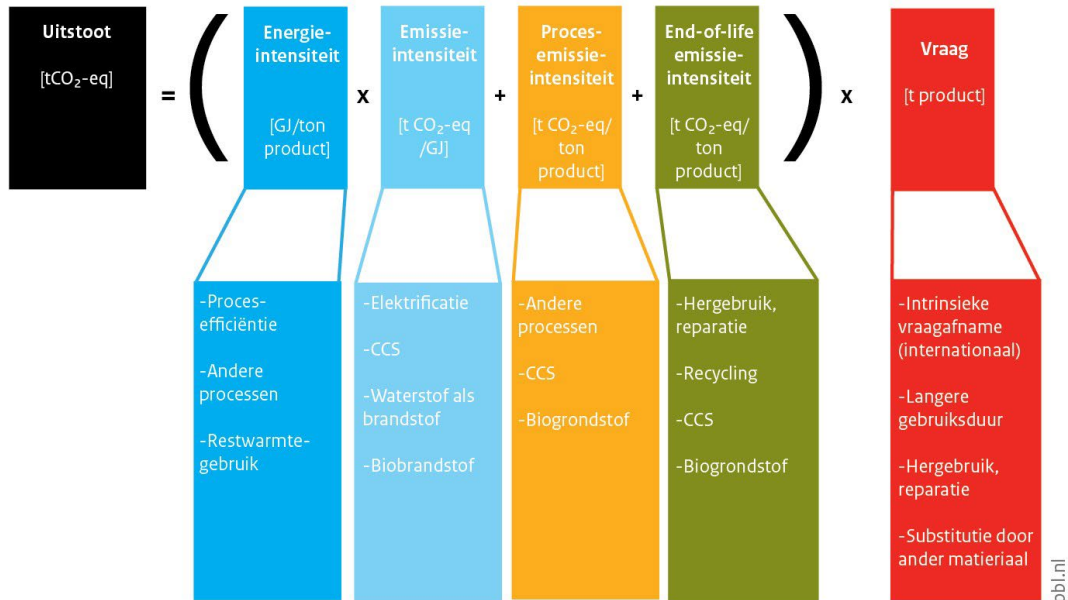
In deze achtergrondstudie kiezen we voor de volgende aanpak: we gaan er van uit dat alle bestaande industriële activiteiten (zo'n 55 megaton CO₂-eq in 2020) nagenoeg klimaatneutraal moeten zijn in 2050, en grote delen zelfs voor 2040 conform het afbouwpad van EU ETS. Daarnaast kunnen er negatieve emissies gerealiseerd worden in de industriële sector (ordegrootte 1-20 megaton CO₂-eq per jaar) waarvan de omvang grotendeels afhangt van het volume, de aard en de locatie van de productie en verwerking van biobrandstoffen en biogrondstoffen.

De broeikasgasemissies van de industrie zijn afhankelijk van de omvang en aard van de productie. De omvang hangt af van vraag naar producten, en alles wat daarmee samenhangt (demografie, inkomens, productbeleid, consumptiebeleid) en – voor de Nederlandse emissies – ook de positie van de Nederlandse industrie op de wereldmarkt (waarover meer in hoofdstuk 3.2). Naast de omvang van de productie zijn de emissies vooral afhankelijk van hoe energie- en materiaalefficiënt de productieprocessen zijn en hoe emissie-intensief de benodigde energie en grondstoffen worden.

Het schema in Figuur 4 (deels gebaseerd op Material Economics (2018)) geeft de afhankelijkheid van de uitstoot van deze aspecten weer, met daarbij de oplossingen die voor verlaging van de uitstoot kunnen zorgen in het traject naar klimaatneutraal toe. De factoren liggen niet allemaal binnen het domein van de industrie zelf en worden ook beïnvloed door het internationale karakter van de materiaal- en productstromen.

Figuur 4

Overzicht van factoren die de broeikasgasuitstoot van een productieketen beïnvloeden



Bron: PBL

Uit dit theoretisch kader worden de aangrijpingspunten voor emissiereductie duidelijk: allereerst het verminderen van energie- en materiaalverliezen in het productieproces en het minimaliseren van de uitstoot bij het produceren en gebruiken van de benodigde energie. Daarnaast ook het minimaliseren van procesemissies en aan het einde van de levensduur, zoals bij afvalverwerking of recycling. Tot slot ook het minimaliseren van de vraag naar (en dus de productie van) de producten en de materiaalbehoefte per product of voor de functie van het product. Bij de vraag is ook substitutie door minder energie- of emissie-intensieve materialen relevant. De vraag komt overigens voor een groot deel uit het buitenland, zoals ook aan de Nederlandse vraag wordt voldaan door import van goederen.

Om de uitstoot daadwerkelijk op nul te krijgen moeten hoe dan ook de emissie-intensiteit van de energieproductie, van de productieprocessen zelf en aan het einde van de levensduur naar nul toe. Dit wordt gemakkelijker door de gevraagde hoeveelheid energie en materiaal per eenheid product en de totale vraag naar producten te reduceren. Hoe sterker deze twee variabelen worden gereduceerd, des te lager is de benodigde hoeveelheid CO₂-vrije energie-opwek of CO₂-afvang en -opslag (CCS).

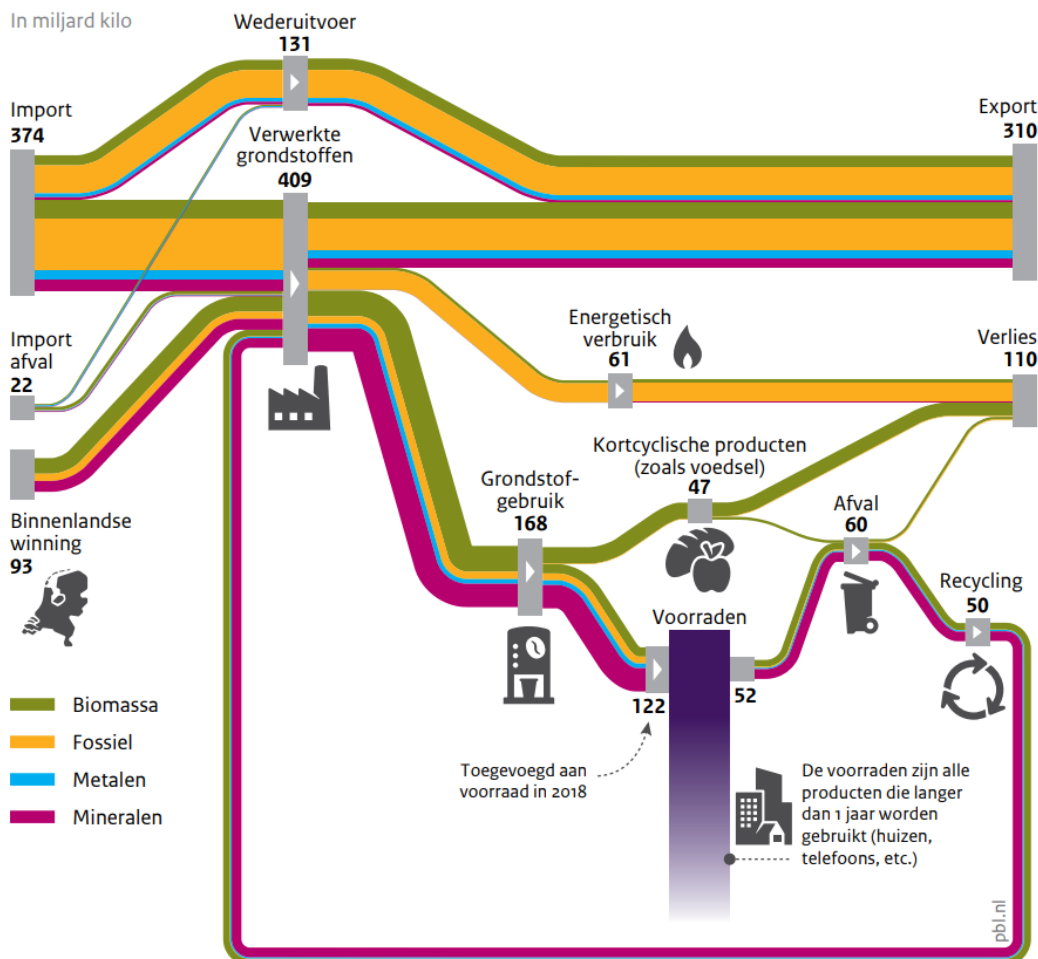
In bepaalde processen is nul-emissie niet mogelijk of kostbaar, omdat CO₂ (in relatief kleine hoeveelheden) vrijkomt bij verwerking van de grondstof zelf, bijvoorbeeld bij de productie van sommige metalen en keramiek. Het kan kosteneffectiever zijn om, in plaats van het reduceren van die laatste kleinschalige procesemissies, te compenseren met negatieve emissies. Daarover meer in hoofdstuk 4.

Doelen voor de grondstoffentransitie

Behalve van energie is de industrie ook grootgebruiker en toeleverancier van grondstoffen en producten; het vervult een centrale rol in de grondstofstromen in de economie. Figuur 5, overgenomen uit PBL (2023), laat de grondstofstromen (inclusief energie) zien voor 2020 en toont dat de Nederlandse industrie zo'n 409 miljoen ton grondstoffen op jaarbasis verwerkt. Zo'n 200 miljoen ton daarvan wordt geëxporteerd, 61 miljoen ton, voornamelijk fossiele producten, wordt energetisch verbruikt en circa 168 miljoen ton is voor Nederlands grondstofgebruik, bijvoorbeeld toevoegingen aan de materiaalvoorraad of voedsel.

Een dergelijk plaatje vertekent wel omdat tonnen materiaal sterk kunnen verschillen in milieudruk, kosten en schaarste. Recycling lijkt bijvoorbeeld al een groot percentage te zijn (50 van de 60 miljard kilo afval), maar dit betreft voor een groot deel laagwaardige recycling van bijvoorbeeld puin als funderingsmateriaal. Het zegt daarmee weinig over de economische aspecten en over de milieubijdrage van recycling.

Figuur 5
Grondstofstromen (inclusief energie) in de Nederlandse economie in 2020



Bron: CBS 2023

Het belang van circulariteit voor de industrie

Zolang de emissies van de productieprocessen en het energiegebruik nog niet nul zijn, zal ook beleid gericht op andere producten en consumptie mee kunnen helpen om de klimaatimpact omlaag te brengen. Bovendien kan dit helpen om investeringen in technische maatregelen te verminderen, en om het beslag op duurzame hulpbronnen zoals CO₂-vrije elektriciteit en biograndstoffen te verkleinen. Een deel van de genoemde oplossingen naar een industrie zonder uitstoot zijn ook opgenomen in het Rijksbrede programma *Nederland Circulair in 2050* uit 2016. Hierin staat tevens de ambitie vermeld om uiterlijk in 2050 een volledig circulaire economie tot stand te brengen, met een tussendoel van 50% minder gebruik van primaire grondstoffen (mineraal, fossiel en metalen) in 2030. Daarbij is echter niet gespecificeerd ten opzichte van welk jaar dat tussendoel geldt. Ook moet wat een volledig circulaire economie concreet betekent moet nog worden ingevuld in termen van doelen en monitoring (PBL, 2019; PBL, 2021), hoewel in het Nationaal Programma Circulaire Economie al wel een aanzet wordt gegeven (Rijksoverheid, 2023). Voor de toekomstperspectieven van de industrie is het relevant wat de overheid bedoelt met het eindbeeld van een volledig circulaire economie, en dan met name wat dit betekent voor de productie van primaire materialen en voor de afvalsector.

In de meeste publicaties omvatten strategieën om de economie meer circulair te maken het volgende: het afzien van of delen van producten, het hergebruiken van producten en onderdelen en het repareren ervan, het recyclen van materialen en het vervangen van grondstoffen door alternatieven met minder milieudruk (zie o.a. PBL, 2023). Dit kan voor de industrie niet alleen een verandering in grondstoffen betekenen (naar gerecyclede en biotische grondstoffen) maar ook een afname van de vraag naar basismaterialen. In de trajecten in dit document gaan we voornamelijk uit van een krimp bij de productie van de meeste primaire materialen en bij de verbranding van afval, maar we veronderstellen dat deze sectoren ook in 2050 nog bestaan. De doelen rond circulaire economie zijn niet in de wet vastgelegd. Het kabinet ziet de rol van de circulaire economie vooral in de context van de klimaatopgave, die wel wettelijk is verankerd (Coalitieakkoord, 2021).

Ook de Europese Unie streeft naar een circulaire economie (Europese Commissie, 2015). Concreet gekwantificeerde Europese doelen hebben vooral nog betrekking op recycling. De recyclingpercentages variëren sterk per materiaal: verpakkingsglas voor ongeveer 90% in Nederland en 79% in Europa (FEVE, 2020), papier voor 90% in Nederland en 70% in Europa (PRN, 2022) en voor metalen is het percentage ongeveer 25% in Europa (Eurostat, 2022). Van het plastic afval wordt in Europa zo'n 35% aangeboden voor recycling, maar slechts 10% van de plasticsvraag betreft gerecycled materiaal (PlasticsEurope, 2022). Er bestaat een Europees doel om per 2025 minimaal 25% van de in Europa geproduceerde PET-flessen uit gerecycled materiaal te laten bestaan en in 2030 30% van alle plastic flessen. De Europese Commissie wil dit verder uitbreiden naar meer plastic verpakkingen en doortrekken tot 65% in 2040 (Europese Commissie, 2022). Ook voor andere plastics en elektronica en voertuigen bestaan dergelijke Europese recycelaatsdoelstellingen (zie ook Lase et al. (2023)), terwijl in de herziene Ecodesign-verordening voor producten ook recycelaatsdoelstellingen worden opgenomen (Europese Commissie, 2022a). In Nederland kondigde het kabinet in april 2023 aan om voor plastics voor de Nederlandse markt een percentage van 25-30% recycelaat of biograndstof voor 2030 verplicht te stellen. Daarnaast werkt de Europese Commissie aan het *Sustainable Carbon Cycles* initiatief, dat als ambitie voor 2030 heeft dat 20% van de koolstof in de industrie van duurzame niet-fossiele grondstoffen moet komen (Europese Commissie, 2021; CIEP, 2022). Internationale studies (Material Economics, 2018 en 2019; IRP, 2020; IEA, 2019) geven aan dat de industriële broeikasgasuitstoot met maximaal 30% (cijfer voor 2050, ten opzichte van business-as-usual) kan dalen door onder andere een toename van circulaire businessmodellen die langduriger

productgebruik, hergebruik en toepassing van recycalaat stimuleren. Een meer circulaire omgang met materialen kan ook zorgen voor verminderde impact als het gaat om verzuring, verontreiniging van ecosystemen en andere leefomgevingsaspecten (OECD, 2019; PBL, 2023). Het kan ook helpen om problemen rond de schaarste aan specifieke grondstoffen te verminderen.

In de volgende hoofdstukken beschrijven we hoe de Nederlandse industriële sectoren klimaatneutraal kunnen worden, waarbij we drie trajecten onderscheiden. We beschrijven eerst drie varianten op de ontwikkeling van de (internationale) vraag naar industriële producten. Daarna kijken we naar de verhouding tussen de internationale ontwikkelingen en de Nederlandse industrie.

3 Trajecten naar klimaatneutrale industrie

In veel studies wordt gesteld dat de industrie (samen met de elektriciteitssector) eerder dan de rest van de samenleving klimaatneutraal moet zijn, omdat emissiereductie hier sneller kan dan in andere sectoren, zeker wanneer negatieve emissies aan de industrie worden toegeschreven (Van Sluisveld et al. (2021)). Het in het Europese Fit-for-55-pakket voorgestelde reductiepad van het Europese emissiehandelssysteem (ETS) sluit aan bij deze inzichten. De CO₂-uitstoot gaat in de meeste scenario's eerder naar nul dan de uitstoot van overige broeikasgassen, en dat geldt ook voor de CO₂-uitstoot in de industrie. In Nederland was de industriële CO₂-uitstoot 88% van de totale industriële broeikasgasuitstoot (2022). Van de resterende 12% heeft bijna de helft betrekking op methaan uit de afvalsector (PBL, 2023b; CBS Statline, 2023). In deze achtergrondstudie gaan we uit van een klimaatneutrale industrie in 2050. Grootschalige negatieve emissies bij de verwerking van bio-brandstoffen en biograndstoffen zijn nog geen onderdeel van dit uitgangspunt maar worden apart onderzocht. Het is namelijk denkbaar dat een cross-sectoraal afgestemd scenario snellere ontwikkelingen in de industrie vereist dan hier beschreven. Dit kan ook betekenen dat de industrie in 2050 en daarna een forse negatieve uitstoot moet hebben om op kosteneffectieve wijze klimaatneutraliteit te bereiken. Dat wordt verder toegelicht in het hoofdrapport (Daniëls en Strengers, 2024).

3.1 Internationale vraagontwikkeling

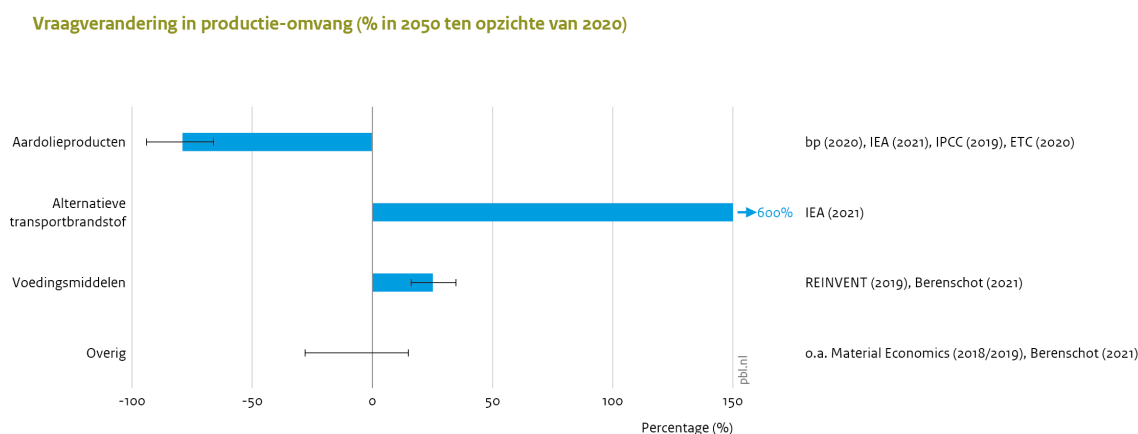
In dit hoofdstuk onderzoeken we de belangrijkste veranderingen aan de materiaalvraag in een nagenoeg klimaatneutrale wereld. We baseren ons daarbij op bestaande publicaties die de transitie naar een klimaatneutrale wereld verkennen.

De bestaande beelden richting een klimaatneutrale wereld gaan uit van een stabiele vraag naar de meeste materialen (zie o.a. Figuur 3.15 in IEA (2021); REINVENT (2017, 2018). Een Europees beeld staat beschreven in Material Economics (2018, 2019)), terwijl scenario's die geen klimaatdoel meenemen vaak een sterke groei laten zien (bijvoorbeeld IRP (2020) en OECD (2019)). Bij een stabiele vraag naar materialen en groei van de wereldbevolking en de collectieve welvaart wordt de economie efficiënter qua materiaalverbruik. Dat gebeurt vooral in de verwerkende industrie, bouwsector en in de gebruiksfase. Daarnaast vindt er in de scenario's meer hergebruik en toepassing van recycleert plaats, zowel door beleidsmaatregelen als door toename van beschikbare reststromen die kunnen worden hergebruikt en gerecycled. Dit betekent een trendbreuk met de ontwikkelingen van de laatste decennia, die juist een sterke groei kenden in materiaalverbruik en productenvraag (OECD, 2019). En mocht de groei toch groter zijn blijkt uit de genoemde beelden, dan is het aannemelijk dat deze groei voornamelijk buiten West-Europa optreedt (OECD, 2019), waardoor je alsnog uitkomt op een min of meer stabiel beeld in Europa en vooral Nederland. Dit kan worden versterkt door structureel hogere energieprijzen in de EU en Nederland vergeleken met elders.

De voornaamste uitzondering op de veronderstelde stabiele vraag naar producten is de vraag naar koolwaterstoffen voor transportbrandstoffen, voornamelijk door elektrificatie van auto's en ander vervoer. Transportbrandstof is een atypisch product omdat het een energiedrager is. De productie ervan door aardolieraffinaderijen wordt tot de industrie gerekend en daarom behandelen we de transportbrandstoffen ook als industrieproduct. De vraag naar fossiele transportbrandstoffen uit

aardolie zal sterk afnemen. De in de geciteerde studies geschetste verwachting is dat het productie-volume van aardolieraffinage in een netto-nul-emissie-beeld in 2050 zal mondiaal zijn gekrompen met twee derde tot zelfs meer dan 90% ten opzichte van de omvang rond 2020 (zie Figuur 6). Deels, maar niet volledig, vanwege elektrificatie van transport, zal de aardolieraffinage worden vervangen door toegenomen productie van biobrandstoffen en synthetische brandstoffen. Concawe, onderdeel van de Europese brancheorganisatie voor brandstofproducenten, gaat in een scenario conform het IEA 'Sustainable Development' scenario uit van een halvering van de Europese productvraag in 2050 ten opzichte van 2020 (Concawe, 2019).

Figuur 6



Een belangrijke onzekerheid voor de vraag naar materiaal in diverse sectoren (staal, non-ferrometaal, plastics, papier, glas, keramische producten) is in hoeverre circulair materiaalgebruik (op ten minste Europese schaal) in grotere mate wordt omarmd. Dat beïnvloedt ten eerste hoe groot de totale vraag naar de geproduceerde materialen wordt, maar ook hoe het aandeel recycलाattoepassing en hernieuwbare materialen zich zal ontwikkelen.

De mondiale of Europese vraagontwikkeling is niet automatisch hetzelfde als de ontwikkeling van de productie van de bedrijven in Nederland. Zo zijn sommige sectoren sterker dan gemiddeld vertegenwoordigd in Nederland, zoals de aardolieraffinage en chemie. Andere sectoren, zoals klinkerproductie voor cement, zijn juist niet meer vertegenwoordigd in Nederland. Er zijn veel historische factoren waarom bepaalde industriële sectoren wel of niet gevestigd zijn in Nederland (zie bijvoorbeeld Schot et al. (2003), De la Bruhèze et al. (2003) en Verbong (2022)), en in de toekomst zullen allerlei factoren ervoor kunnen zorgen dat de ontwikkeling van de productievolumes in Nederland afwijkt van de Europese en mondiale trends. Voor deze studie verkennen we in hoeverre deze factoren kunnen veranderen in de huidige mondiale klimaattransitie.

3.2 Positie van Nederland in de mondiale klimaattransitie

In deze paragraaf kijken we naar de specifieke rol van de Nederlandse industrie in Europa en de wereld en onderzoeken we hoe die verandert in de transitie naar een klimaatneutrale wereld.

Verschillende voordelen van Nederland als vestigingslocatie van de industrie zullen blijven. De samenwerking in clusters, de bestaande en in voorbereiding zijnde energie-infrastructuur en diverse diepzeehavens. Verder de nabijheid van afnemers, zowel bedrijven als consumenten, een goed opgeleide beroepsbevolking en een internationaal georiënteerd rechtssysteem. De productie van elektriciteit met windturbines op de Noordzee heeft een forse groeipotentie. Nederland heeft verder een relatief groot potentieel voor de onderzeese opslag van CO₂.

Nederland kent ook een aantal zwaktes. De beschikbare ruimte op land voor energieopwekking en infrastructuur is relatief beperkt, waardoor de industrie als het gaat om ruimtebeslag moet concurreren met bijvoorbeeld woningbouw, landbouw of natuur. Hoewel de potentiële opwekking van windenergie op de Noordzee ruim is, is er in Noordwest-Europa een relatief beperkte eigen productie van hernieuwbare energie mogelijk, in verhouding met de grote bevolkingsdichtheid en de grote omvang van industriële activiteit. Dit brengt een risico op voortgezette importafhankelijkheid en hoge prijzen voor energiedragers met zich mee, ook op lange termijn. Voor biograndstoffen is het productiepotentieel in Noordwest-Europa ook beperkt, maar Nederland is wel gunstig gelegen voor de import daarvan.

De Nederlandse uitgangssituatie biedt verschillende kansen voor de transitie. Nederland treft voorbereidingen om CO₂ op te slaan onder de Noordzee. Dit biedt de komende decennia kansen voor zowel emissiereductie bij de bestaande industrie als voor negatieve emissies, mogelijk in samenwerking met buurlanden. Nederland kan, vanuit de huidige positie als doorvoerhaven van fossiele en minerale grondstoffen, ook in de verwerking en doorvoer van nieuwe grondstoffen een belangrijke rol gaan spelen. Dat geldt met name voor nieuwe producten en grondstoffen: gerecyclede grondstoffen en biograndstoffen maar ook groene of blauwe waterstof.

De specifieke uitgangssituatie brengt voor Nederland ook risico's met zich mee voor de transitie. De energievoorziening van de Nederlandse industrie zal voorlopig grotendeels gebaseerd zijn op aardgas, dat voorheen voor een aanzienlijk deel door Rusland aan Europa werd geleverd. Door de Russische inval in Oekraïne is de import van Russisch gas grotendeels weggefallen en als dit zo blijft heeft dit tot gevolg dat de aardgasprijzen in Europa structureel hoger zullen zijn dan elders, in het bijzonder wanneer de aardgasconsumptie niet in sterke mate wordt afgebouwd. Ten tweede kan de prioriteit in bijvoorbeeld infrastructuur aanleg, regelgeving en subsidiering door de dominante aanwezigheid van veel grote fossiele bedrijven liggen op continuering van bestaande processen, met als risico dat nieuwe spelers en nieuwe grondstoffen minder aandacht krijgen. Een – overigens niet specifiek Nederlands – risico bestaat in veranderend beleid ten aanzien van verduurzamingsopties, zoals op het gebied van biograndstoffen, kernenergie, CO₂-opslag en de productie van CO₂-vrije elektriciteit. Ook is er een risico dat energieopslag en -transport niet in voldoende mate kunnen worden opgeschaald, waardoor het niet eenvoudig kan zijn om alle uren van het jaar betaalbare CO₂-vrije energie beschikbaar te hebben. Aan de grondstoffenkant blijft Nederland afhankelijk van import, bijvoorbeeld van afval of recycleert en biograndstof. Maatschappelijke weerstand tegen opschaling van handel en verwerking van deze grondstoffen vormt ook een risico. Tot slot zijn trage vergunningsprocedures en de krappe arbeidsmarkt factoren die de klimaattransitie van de Nederlandse industrie parten kunnen (blijven) spelen.

De drie trajecten in deze achtergrondstudie: aannames en afhankelijkheden

Op basis van het bovenstaande concluderen we dat het niet duidelijk is in hoeverre de Nederlandse situatie ten opzichte van andere landen per saldo grote voordelen of nadelen met zich meebrengt, die op voorhand een afwijkende ontwikkeling aannemelijk zouden maken. Daarom nemen we in

de trajecten in dit document aan dat de rol van de industrie in Nederland ten opzichte van het buitenland vergelijkbaar blijft en dat er dus geen heel grote relatieve toename of afname van activiteit zal zijn. Met andere woorden: activiteiten die wereldwijd afnemen doen dat ook in Nederland, activiteiten die wereldwijd toenemen doen dat ook in Nederland. Dit uitgangspunt doet weliswaar geen recht aan specifieke omstandigheden voor verschillende productgroepen, maar het biedt wel een logisch startpunt voor toekomstige analyses waarin grotere afwijkingen in activiteitsniveaus onderzocht zouden kunnen worden. Ook recent onderzoek van het Sustainable Industry Lab acht behoud van een substantiële industriële productie in Nederland waarschijnlijk (Sustainable Industry Lab, 2023). Er is voor gekozen om de omvang van de industriële productie in de drie trajecten gelijk te houden, zodat effecten van verschillen in technische invulling niet worden vermengd met verschillen in omvang.

Grote hoeveelheden grondstoffen, aardolie en kolen, worden al sinds jaar en dag geïmporteerd. Ook aardgas wordt nu in toenemende mate geïmporteerd sinds de afbouw van het Groningenveld. Ook in de toekomst zal Nederland in grote mate afhankelijk van import blijven, als het gaat om biograndstoffen bijvoorbeeld. Bedrijven kunnen kiezen om ofwel primaire grondstoffen (zoals ruwe biograndstoffen), ofwel direct inzetbare energiedragers (zoals waterstof en synthetische brandstoffen), ofwel halffabricaten (denk aan direct gereduceerd ijzer (DRI) of ammoniak), ofwel eindproducten (staal, kunstmest) te importeren. Bij import in de vorm van grondstoffen blijft de industriële productie in Nederland op peil. Bij de import van halffabricaten vindt de fabricage van eindproducten nog in Nederland plaats, maar de meest energie- of grondstof-intensieve stap elders. Het is ook mogelijk dat bepaalde industrie sectoren (geheel of deels) verdwijnen uit Nederland. Dergelijke ontwikkelingen zijn sterk afhankelijk van toekomstige structurele productiekostenverschillen tussen Nederland en elders. Dat hangt af van natuurlijke, geografische en marktomstandigheden, maar ook van beleid, zoals het ETS inclusief het effect van maatregelen als de koolstofheffing aan de grens (*carbon border adjustment mechanism*, CBAM). De productiekosten worden ook beïnvloed door nationaal beleid zoals de Nederlandse CO₂-heffing en SDE++. Ecorys onderzocht onlangs verschillen in hernieuwbare-energieprijzen voor de industrie tussen verschillende landen of regio's, en concludeerde dat toekomstige prijsverschillen voor hernieuwbare energie waarschijnlijk lager zijn dan de huidige prijsverschillen voor kolen, aardgas en elektriciteit (Ecorys, 2022). Wel is de verwachting dat het technisch productiepotentieel voor relatief goedkope waterstofproductie uit elektrolyse in Europa veel kleiner is dan in andere werelddelen (IRENA, 2022). Het is hoe dan ook goed denkbaar dat er verschuivingen gaan plaatsvinden in de activiteitsniveaus, met name als het gaat om energie-intensieve basisproducten.

Alternatieve richtingen

Het is goed mogelijk dat de omvang van de industrie in Nederland zich anders zal ontwikkelen dan is aangenomen in deze achtergrondstudie, en zoals hierboven omschreven (ETES, 2022). Voor de volledigheid lichten we hieronder kort toe wat de mogelijke gevolgen kunnen zijn van twee alternatieve paden, die allebei leiden tot een relatieve krimp ten opzichte van de huidige situatie:

Alternatief A: nationale/regionale focus. Nederland richt zich hierbij op zo veel mogelijk onafhankelijkheid van het buitenland, met name van landen buiten de Europese Unie. Dat betekent naast minder import ook een productie die meer gericht is op de eigen vraag, en minder op de export. Er is ondersteuning voor lokale productie van belangrijke energiedragers en grondstoffen, met name voor zover ze gebruikt worden in Nederland. Dit uit zich vooral in grootschalige productie van bijvoorbeeld waterstof uit elektrolyse, terwijl aardgaswinning in Nederland (met name in de Nederlandse wateren) nog lang voortduurt. Hoewel onafhankelijkheid belangrijk is, verwachten we

dat de ruimte in Nederland te beperkt is voor bijvoorbeeld verregaande lokale productie van biograndstoffen. Voor waterstof uit elektrolyse geldt dit in mindere mate (zie ook de achtergrondstudies over biograndstoffen en waterstof). Ook worden minder energie-intensieve basisproducten geproduceerd voor het buitenland.

Alternatief B: makkelijker afscheid nemen van de basisindustrie en meer vertrouwen op import. Door toenemende druk op de leefomgeving en/of beperkte publieke steun voor industriële bedrijven wordt geen moeite gedaan om zware industrie in Nederland te houden, en wordt erop vertrouwd dat belangrijke producten en energiedragers in toenemende mate kunnen worden geïmporteerd. Dit impliceert verdergaande afhankelijkheid van het buitenland. Mogelijk kan uitbreiding van productie elders schoner of efficiënter dan productie in Nederland, bijvoorbeeld door ruime aanwezigheid van hernieuwbare energie (bijvoorbeeld zon in het Midden-Oosten). In dit alternatief heeft Nederland vertrouwen in de vrije marktwerking en stabiele geopolitieke verhoudingen. De Nederlandse invloed op leveringszekerheid en prijzen is in dat geval echter beperkt, tenzij Nederland landen waar vanuit we importeren ook van zichzelf afhankelijk maakt. Dat kan echter leiden tot sterke ongelijkheid, omdat eventuele overlast van industriële productie elders plaatsvindt terwijl Nederland de producten gebruikt.

In dit document is ervoor gekozen om dergelijke alternatieve richtingen niet op te nemen in de gekwantificeerde trajecten. De belangrijkste reden is dat deze richtingen grote verplaatsingen van activiteiten en emissies ('carbon leakage') met zich meebrengen, die het zicht op de Nederlandse bijdrage aan de mondiale emissiereductie vertroebelen. Ze brengen een element van willekeur met zich mee, omdat pas op basis van een bredere systeemanalyse te beoordelen is welke internationale verschuivingen meer of minder logisch zijn. Daarom gaan we vooralsnog in alle trajecten uit van de ontwikkeling zoals omschreven in de voorgaande paragraaf.

4 Technische trajecten per industriesector

Dit hoofdstuk bevat drie technische trajecten die de decarbonisatie per industriesector beschrijft. Er is voor gekozen om de trajecten te laten samenhangen met de eerder geïntroduceerde vraagtrajecten zoals getoond in Tabel 1. Dit geeft een beeld van de ontwikkelingen van energiedragers in combinatie met verandering van de vraag. Aan het eind van dit hoofdstuk worden ook kort de omvang en kosten van de investeringen besproken. Alle trajecten komen in 2050 uit op een broeikasgasuitstoot van enkele megatonnen CO₂-equivalenten, met name vanwege de uitstoot van de overige broeikasgassen en procesemissies.

Bij het definiëren van drie mogelijke trajecten naar een klimaatneutrale industrie en grondstoffenvoorziening hebben we gedifferentieerd in de technische decarbonisatiemaatregelen en de mate van recyclaatzet en in de omvang van de aardolieraffinage. In Tabel 1 staat het aspect van de vraag uitgewerkt voor deze trajecten. In dit hoofdstuk worden de trajecten verder uitgewerkt met technische (decarbonisatie)maatregelen.

Tabel 1
Drie mogelijke trajecten richting een klimaatneutrale industrie: kenmerken

Centraal traject	Alternatief 1: meer fossiel en CCS, minder circulaire grondstof	Alternatief 2: minder fossiel, meer circulaire grondstof
<i>Dominante visie uit de geraadpleegde studies</i>	<i>Kenmerk: focus op snelle en goedkope reductie op korte termijn</i>	<i>Kenmerk: versnelling circulaire industrie</i>
Algemeen: totale vraag naar materialen blijft stabiel, mede door meer hergebruik. Dit betekent een trendbreuk met de sterke toename in het verleden.	Productieniveau gelijk aan centrale traject.	Productieniveau gelijk aan centrale traject.
Verdere kenmerken: <ul style="list-style-type: none"> Meer secundaire productie van plastics, minder primaire productie. Biograndstoffen vervangen deels fossiele grondstof. Meer afval wordt aangewend voor het maken van nieuwe producten, dus minder afval wordt verbrand. Aardolieraffinage: ruime afname productie (driekwart minder). Deels omvorming naar biobrandstoffen (o.a. kerosine) en synthetische brandstof. 	Enige toename van toepassing recyclaat, maar minder dan in het centrale traject.	Sterkere toename van toepassing van recyclaat en biograndstoffen dan bij het centrale traject.
	Beperktere afname aardolieraffinage. Dat betekent dat uitstoot door verbranding van aardoliegebaseerde transportbrandstoffen in Nederland moet worden gecompenseerd door negatieve emissies óf dat de transportbrandstoffen buiten Nederland worden ingezet. Als aardolieraffinage niet sterk afneemt, vereist dit grote hoeveelheden negatieve emissies (alleen al in Nederland is de uitstoot door transportbrandstoffen meer dan 30 Mt CO ₂ per jaar).	Omvang van aardolieraffinage is sterk afgenomen.
	Meer gericht op continuering van de huidige processen; grotere inzet van de afvang en opslag van CO ₂ (CCS) en waterstof geproduceerd uit aardgas en restgassen. Minder en latere elektrificatie.	Ten opzichte van het centrale traject een snellere en meer vergaande directe elektrificatie (boilers, fornuizen en warmtepompen), minder inzet van CCS en waterstof dan in andere trajecten.




De drie technische trajecten zijn – in overeenstemming met de gehanteerde uitgangspunten van de bredere TVKN-studie – geen ‘hoekpunten’, maar zijn alle drie mogelijke richtingen waarin de industrie zich kan ontwikkelen.








De trajecten zijn samengesteld uit een combinatie van ontwikkelingen. Het gaat bijvoorbeeld om elektrificatie (snelheid en omvang), waterstofinzet (ontwikkelingssnelheid en omvang), CCS (ontwikkelingssnelheid en omvang), afbouw van de inzet van fossiele energiedragers (snelheid en mate van afbouw), mate en type van toepassing recycleert en de samenstelling en ingroei van biograndstoffen. Ook andere combinaties van ontwikkelingen zijn denkbaar (zie bijvoorbeeld Sánchez Diéguez et al. (2022)). In de appendix staat meer uitleg over de gemaakte keuzes die in vervolgstudies kunnen helpen om variaties te maken op de huidige trajecten.

4.1 Beschrijving per sector

De tabel hieronder geeft de belangrijkste mogelijkheden voor de technische decarbonisatie per industriesector en de invulling per traject.

Tabel 2
Mogelijke technische trajecten per sector. Kwantificering van de trajecten is in de appendix opgenomen.

Sector (met aandeel in uitstoot van de Nederlandse industrie)	Centraal traject: Dominante visie uit meeste studies en berichten en verwachtingen van belanghebbers en experts	Belangrijkste bronnen ^{d)}	Alternatief 1: fossiel/lineair. Focus op snelle en goedkope reductie	Alternatief 2: niet-fossiel/circulair. Versneling circulaire industrie en meer elektrificatie
Staal 	Eerste hoogoven uiterlijk 2030 vervangen door DRI ^{a)} , op basis van eerst aardgas en rond 2040 waterstof, in combinatie met elektrische ovens. Tweede hoogoven wordt ook vervangen door DRI rond 2040. Overige processen gaan rond 2040 over op (groene) waterstof als brandstof. Toename van inzet van schroot in de productieprocessen.	Material Economics (2019); Roland Berger (2021).	Ook DRI, maar blijft grotendeels aardgas gebruiken tot 2045. De CO ₂ die daarbij vrij komt wordt afgevangen en opgeslagen (CCS).	Zelfde als centraal, maar eerder over op (groene) waterstof; al rond 2035.
Fossiele transportbrandstoffen en andere olieproducten (met name aardolieraffinage) 	CCS ^{b)} bij waterstofproductie (Shell, ExxonMobil). Geproduceerde ‘blauwe’ waterstof uit restgassen (H-vision) als brandstof voor kraakfornuizen en deels boilers. Deels elektrificatie. Productie van hernieuwbare brandstoffen (biobrandstof en synthetische brandstof) vervangt deel van de wegvallende vraag naar fossiele transportbrandstoffen.	RVO (2021); H-Vision (2019); DNVGL (2018); PBL, TNO en RVO (2022).	Groter deel van de fornuizen en boilers draait op waterstof geproduceerd uit restgas in combinatie met CCS (blauwe waterstof).	Meer boilers en fornuizen elektrificeren. Na 2030 restgassen omzetten in grondstoffen (o.a. methanol).
Chemie: kunststofketen 	Stoomnetwerk optimaliseren (o.a. door middel van damprecompressie, zie bijvoorbeeld Dow) en elektrificeren. Restgassen omvormen in waterstof (met CCS) als brandstof voor (kraak)fornuizen. Elektrificatie	VNCI (2021); DOW (2021); RVO (2021); Material Economics (2019); PlasticsEurope (2021);	Groter deel inzet van blauwe waterstof voor fornuizen en boilers, dus minder elektrificatie. Minder	Secundaire productie en biograndstof zo snel mogelijk opschaalen. Meer en sneller elektrificeren.

	van resterende krakers (na 2030), fornuizen en ketels. Mechanische recycling en (vooral) chemische recycling schaaft op. Sterke toename van inzet biograndstof, zowel als input van krakers als via andere productieroutes.	RIVM (2019); CE Delft (2021); Renewable Carbon Initiative (2022)	recycling dan bij centraal traject. Nog een substantieel deel fossiele grondstof in 2050.	
Chemie: kunstmest 	CCS bij ammoniakproductie, in ieder geval bij Yara . Geleidelijke vervanging door ammoniak uit waterstof geproduceerd door middel van elektrolyse. Deels biograndstof voor gebruik in ureum-kunstmest en voor andere CO ₂ -toepassingen.	RVO (2021); Material Economics (2019)	Meer CCS, langzamere opschaaling elektrolyse. Flink deel ammoniakproductie uit aardgas (met CCS) blijft in bedrijf in 2050.	Snel meer waterstof uit elektrolyse. Ureum-kunstmest wordt minder geproduceerd.
Chemie: overig 	Waterstofproductie van grijs naar blauw (CCS), bij Air Liquide en Air Products . Geleidelijke vervanging door groen (elektrolyse). Overig: voornamelijk elektrificatie van stoomproductie. Verder enige geothermie en restwarmte en CCUS ^{b)} .	VNCI (2021)	Meer CCS, langzamere opschaaling elektrolyse.	Snel meer elektrolyse ter vervanging van waterstofproductie op basis van aardgas
Voedingsmiddelen en papier 	De productie van warmte en stoom kan verregaand worden geëlektrificeerd door middel van warmtepompen, elektrische ketels en innovatieve technieken (zie o.a. HollandMalt , Pepsico en Bunge). Daarnaast biogas (door lokale aanwezigheid van reststromen) en geothermie.	Zesde cluster (2020); VNP (2018)	Nog lang door met aardgas. Ook beperkte inzet van waterstof voor warmteproductie na 2030.	Grootschalige inzet van warmtepompen. Aardgas geheel uitgefaseerd in 2040.
Bouwmaterialen 	Glas: vooral elektrificatie, met gedeeltelijk inzet van waterstof. Keramiek: na 2030; deels elektrificatie, deels waterstof. Voor zowel beton als voor andere bouwmaterialen kunnen biobased materialen een deel van de markt overnemen (Van der Velde en Van Leeuwen, 2019). Dit kan zich uiten in een algemene verminderde toename in de vraag naar (niet-biobased) bouwmaterialen.	VNG (2012); KNB (2020); Zesde cluster (2020)	Glas, keramiek: lang door met aardgas. Dan deels elektrificatie, deels waterstof.	Voornamelijk elektrificatie.
Overig metaal 	Hoge-temperatuurwarmte: waterstof, elektrificatie.	Zesde cluster (2020); Material Economics (2018)	Gelijk aan centraal traject.	Gelijk aan centraal traject.
Afvalverwerking 	Minder afvalaanbod en zo veel mogelijk nuttig gebruik van afval, dus afname afvalverbranding. Toename diverse recyclingprocessen. Verder inzet van CCS bij afvalverbranding. Verschillende recyclingprocessen verdringen verbranding geleidelijk.	RVO (2021)	Sneller en meer CCS bij afvalverbranding. Minder recycling dan bij centraal traject.	Sterkere toename recycling. Ook inzet CCS, maar minder. Recycling verdringt verbranding volledig in 2050.
Overig 	Voornamelijk lage-temperatuurwarmte: elektrificatie. Overige broeikasgassen: tot 2040 wordt pad van de Klimaat- en Energieverkenning 2022 (PBL, 2022a) gebruikt.		Gelijk aan centraal traject.	Gelijk aan centraal traject.

- a) DRI = Direct Reduction of Iron.
- b) CCUS / CCU / CCS = Carbon Capture and Utilisation or Storage. Voor raffinage en waterstofproductie is SDE++-subsidie verleend voor afvang en opslag van CO₂, daarom wordt gebruik (utilisation) daar niet genoemd.
- c) Niet vermeld: verschillende gesprekken met bedrijven en experts; Cluster Energie Strategieën gepubliceerd in 2022 (analyse PBL, TNO en RVO (2022)).

Uiteraard is de toepassing van de technische aanpassingen in deze tabel afhankelijk van diverse factoren: kosten, infrastructuur, vergunningen, beschikbaarheid technologie et cetera. De beschreven technische aanpassingen kunnen desondanks inzichten bieden in keuzes die nu gemaakt moeten worden om in of voor 2050 op netto-nul-emissie uit te komen. Daarop wordt verder ingegaan in de volgende paragrafen en het volgende hoofdstuk.

4.2 Energiedragers, grondstoffen en brandstoffen

Om de gekwantificeerde trajecten vorm te geven, schatten we ingroeipaden voor energiedragers als elektriciteit en waterstof voor verschillende temperatuurniveaus van warmte en voor procesfornuizen. De ingroeipaden zijn verschillend voor de drie trajecten en gebaseerd op diverse publicaties. De ingroeipaden worden voor de decarbonisatie-opties per industriële installatie in de MIDDEN-database (PBL en TNO, 2021) toegepast op de bestaande industrie. Voor sommige grote bedrijven zijn specifieke trajecten bepaald. Door het totaalbeeld van de industrie te vergelijken met statistieken uit de Energiebalans van CBS (voor 2020) en de Klimaat- en Energieverkenning 2022 zijn de ontwikkelingen van de verschillende energiedragers in beeld gebracht. Ook de volumeverandering beschreven in Hoofdstuk 3.1 is hier in verwerkt. Meer achtergrondinformatie over de gemaakte keuzes en berekeningen achter de trajecten is te vinden in de appendix. De aanbodzijde van de energiedragers is beschreven in andere achtergrondstudies (TNO, 2024; Elzenga et al., 2024; Van Minnen et al., 2024).

In het eerste onderdeel (4.2.1) wordt de energetische en non-energetische energievraag voor de industriële productie gebaseerd op alleen de decarbonisatie van de **bestaande processen**. Vervolgens bespreken we in paragraaf 4.2.2 de extra vraag naar energiedragers en grondstoffen die nodig is voor het (deels) **vervangen van fossiele grondstoffen in de chemie**. Tot slot, in paragraaf 4.2.3, behandelen we de **productie van alternatieve brandstoffen** en de vraag naar energiedragers en grondstoffen die daarvoor nodig is. De totale vraagcijfers worden opgebouwd in de volgende paragrafen. De energievraag in de toekomstige jaren bestaat dus uit 1) bestaande industrie, 2) vraag voor productie van alternatieven voor fossiele grondstoffen en 3) vraag naar energie voor de productie van hernieuwbare brandstoffen, die achtereenvolgens in de volgende paragrafen worden behandeld. De onderdelen 2) en 3) zijn uiteraard sterk met elkaar verbonden maar dat wordt elders besproken, onder andere in het TVKN-hoofdrapport (Daniëls en Strengers, 2024).

4.2.1 Vraag naar energiedragers

Elektriciteit

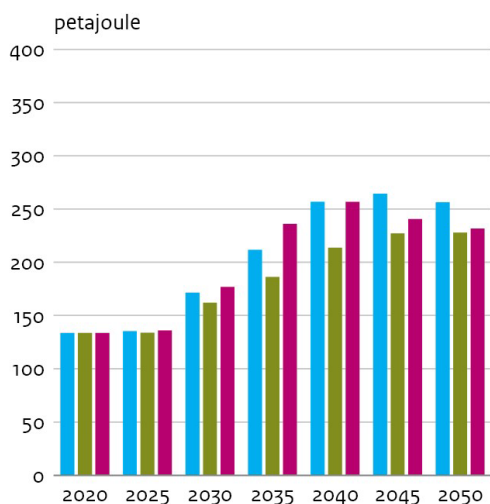
Voor elektriciteit is de ontwikkeling volgens de verschillende trajecten weergegeven in Figuur 7. Aan de linkerkant van deze figuur is de ontwikkeling van de directe elektriciteitsvraag getoond, gebaseerd op de huidige vraag en de additionele vraag door elektrificatie van productieprocessen. Een

deel van de processen in de trajecten wordt niet direct geëlektrificeerd, maar maakt gebruik van waterstof als energiedrager. In de trajecten gaan we er vanuit dat deze energetisch ingezette waterstof ofwel wordt geproduceerd uit restgassen die vrijkomen bij de processen, ofwel wordt geproduceerd door middel van elektrolyse. In het laatste geval is er sprake van indirecte elektriciteitsvraag, en deze is aan de rechterkant van Figuur 7 getoond, opgeteld bij de directe elektriciteitsvraag. Overigens kan de waterstof ook worden geïmporteerd (zie ook Elzenga en Strengers, 2024). In Figuur 8 is de directe elektriciteitsvraag wederom getoond, maar nu uitgesplitst per industriesector.

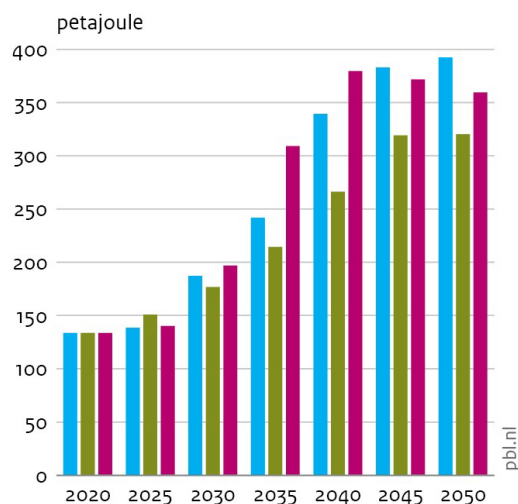
Figuur 7

Elektriciteitsvraag industrie, exclusief productie van alternatieve grondstoffen en transportbrandstoffen

Alleen direct



Direct plus indirecte elektriciteitsvraag voor waterstofproductie voor gebruik in de industrie



- Centraal
- Alternatief 1
- Alternatief 2

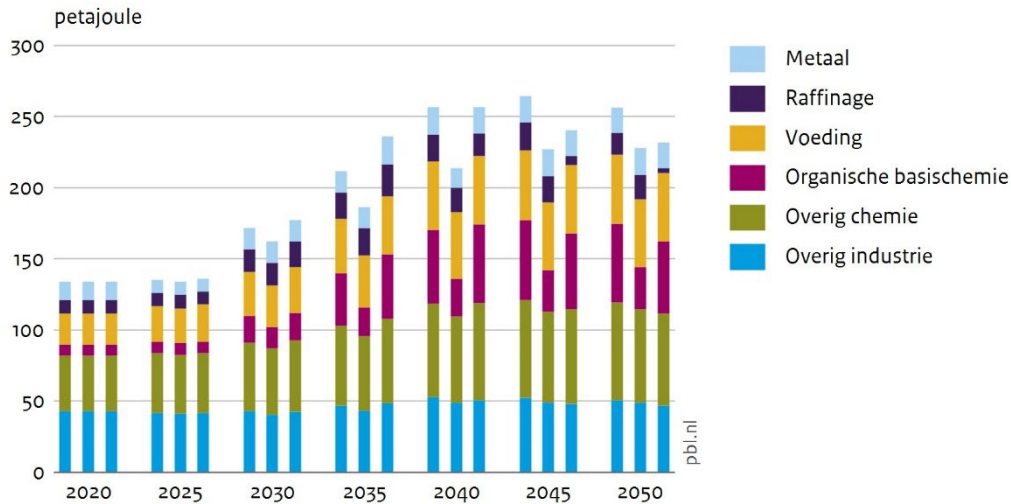
Bron: PBL

NB De waarden in deze figuur zijn nog zonder de waterstofvraag voor synthetische grondstoffen en transportbrandstoffen (zie daarvoor Figuur 22). Ook potentiële energie-intensieve nieuwe industrie is niet meegenomen.

De transitie van de industrie heeft dus in alle trajecten een hoger direct elektriciteitsverbruik tot gevolg. Dit komt vooral door elektrificatie en in mindere mate door de toepassing van CO₂-afvang en -opslag. In het centrale traject vindt elektrificatie sneller en verdergaander plaats dan in het eerste alternatieve traject, wat resulteert in een grotere elektriciteitsvraag. In het tweede alternatieve traject gaat de toename van elektriciteitsvraag nog iets sneller, maar neemt die weer iets af door toenemend circulair materiaalgebruik.

Figuur 8

Directe elektriciteitsvraag industrie per traject, per sector



Bron: PBL

Dit is exclusief productie van hernieuwbare grond- en brandstoffen en waterstof uit elektrolyse. Ook potentiële energie-intensieve nieuwe industrie zoals productie van kweekvlees is niet meegenomen.

De verwachte groei in elektriciteitsvraag tot 2030 is vergelijkbaar met die in de Klimaat en Energieverkenning (KEV) van 2022: in Figuur 7b is het directe en indirecte verbruik gezamenlijk zo'n 160-175 PJ voor 2030, ten opzichte van 161 PJ in de KEV van 2022 (PBL, 2022a). Andere studies komen tot veel grotere hoeveelheden: de Routekaart Elektrificatie in de Industrie (TKI Energie en Industrie, 2021) schat voor 2030 288 PJ extra (dus totaal >400 PJ) en in 2050 zelfs 450 PJ extra, in een scenario dat bijna volledig inzet op elektrificatie. In deze TVKN-studie wordt meer de balans gezocht tussen elektriciteit, waterstof en nog een beperkt resterend deel fossiele brandstof in 2050. De Cluster Energiestrategieën opgesteld door de industriële clusters komen samen op 270 PJ in 2030 exclusief waterstofproductie uit elektrolyse volgens de reflectie van PBL, TNO en RVO (2022), maar dat getal omvat een ruime inschatting van datacenters en niet-gespecificeerde nieuwe industrie.

Elektrificatie kan ook mogelijkheden bieden voor de industrie om als buffer te fungeren en zo variabele elektriciteitsproductie te accommoderen. Dit kan door het toepassen van een hybride proces met bijvoorbeeld zowel elektrische warmtetoevoer als warmtetoevoer op basis van brandstof, of door het afschakelen of terugregelen van bepaalde processen waarbij de mogelijkheid bestaat om producten of halffabricaten op te slaan ('buffer') zodat levering kan doorgaan ook wanneer de productie is teruggeschakeld. De potentie hiervoor wordt vooral gezien bij de chemie, de voedingsmiddelen- en de metaalindustrie, en wordt geschat op hooguit 1-3 GW, afhankelijk van de duur van de aangepaste elektriciteitsvraag (zie DNVGL, 2020). Ook thermische opslag, bijvoorbeeld gekoppeld aan elektrische boilers, kan een rol spelen in de balancering van het elektriciteitsnet (LDES Council & McKinsey & Company, 2022). Het TVKN-achtergronddocument over de elektriciteitssector gaat hier verder op in (TNO, 2024).

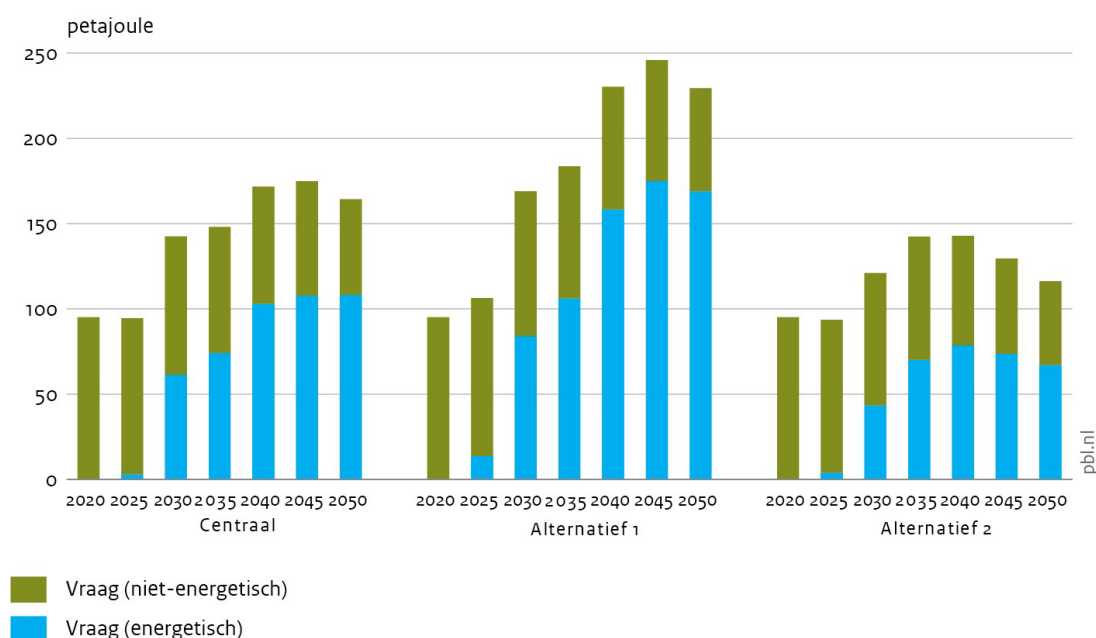
Waterstof

De totale vraag naar waterstof in de industrie per traject is weergegeven in Figuur 9. Een aantal kleine waterstofverbruikers en waterstof dat voorkomt in restgassen is hier buiten beschouwing gelaten, zie Weeda en Segers (2020) voor meer informatie daarover. De extra vraag voor alternatieve transportbrandstofproductie en alternatieve grondstofproductie is hier nog niet in opgenomen en kan groot zijn, zie daarvoor Figuur 9. Het is duidelijk dat de vraag naar waterstof toeneemt ten opzichte van de huidige vraag, maar in welke mate varieert sterk per traject. De toename zit met name in de energetische toepassing, dat wil zeggen voor de ondervuring van de processen in met name fornuizen, middels waterstof geproduceerd uit lokaal beschikbare restgassen.

Figuur 9

Vraag naar waterstof in de industrie naar toepassing

exclusief alternatieve brandstof- en grondstofproductie



Bron: PBL

NB De waarden in deze figuur zijn exclusief de waterstofvraag voor synthetische grondstoffen en synthetische transportbrandstoffen (zie daarvoor Figuur 22).

De waterstof kan worden geproduceerd in de industrie zelf, bijvoorbeeld uit restgassen die vrijkomen bij kraakprocessen in de raffinage en basischemie. Momenteel wordt ongeveer 100 PJ restgas ingezet in de chemie en 80 PJ bij raffinage. Bij toepassing van afvang en opslag van de daarbij vrijkomende CO₂ wordt deze waterstof blauwe waterstof genoemd. Er kan ook extra blauwe waterstof geproduceerd worden uit bijvoorbeeld aardgas, maar in geen van de trajecten is verondersteld dat er hiervoor nieuwe waterstofproductie-eenheden worden gebouwd. Wel vindt er een verschuiving plaats van de bestaande grijze naar blauwe waterstofproductie, door CCS toe te passen. De

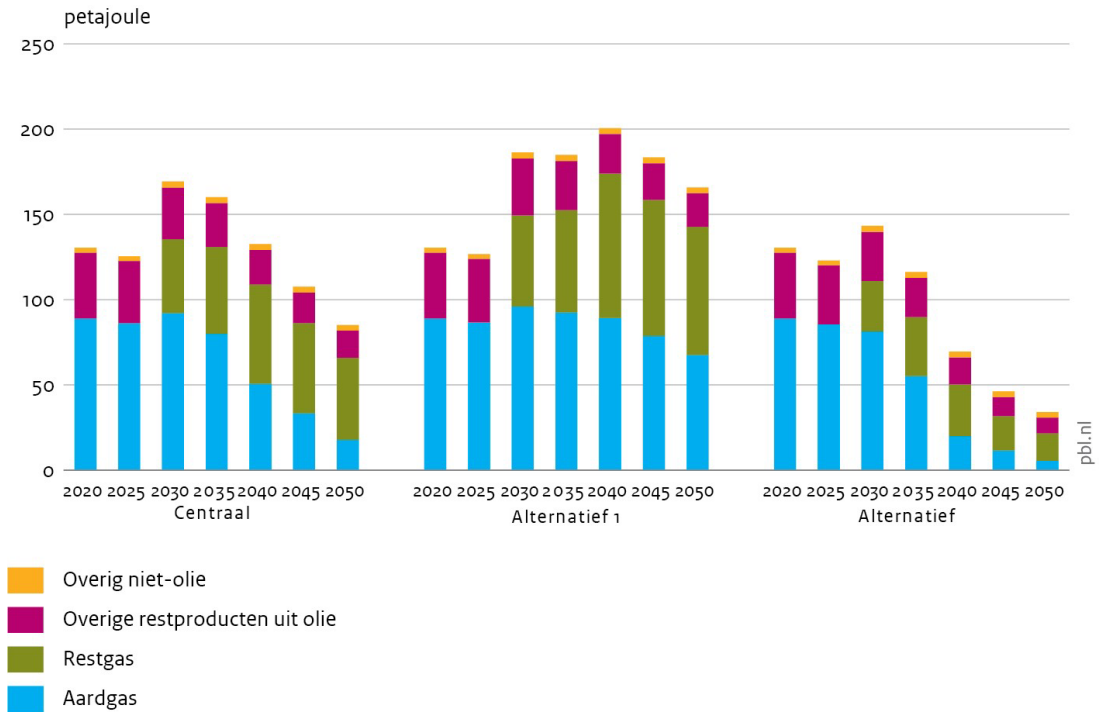
waterstof kan ook worden geproduceerd uit hernieuwbare elektriciteit en water (elektrolyse). Dit is groene waterstof. Groene-waterstofproductie komt nu nog nauwelijks voor in de industrie, maar wordt wel een grote groei toegedicht in nationale en internationale studies (o.a. PBL, TNO en RVO, 2022; IEA, 2021). De productie van waterstof uit elektrolyse wordt in detail besproken in de TVKN-achtergrondstudie over waterstof (Elzenga en Strengers, 2024).

De waterstofproductie in de industrie is verder gespecificeerd in Figuur 10 (naar grondstof) en Figuur 11 (naar type).

Figuur 10

Productie van waterstof in de industrie naar grondstof

Exclusief nieuwe grootschalige elektrolyzers

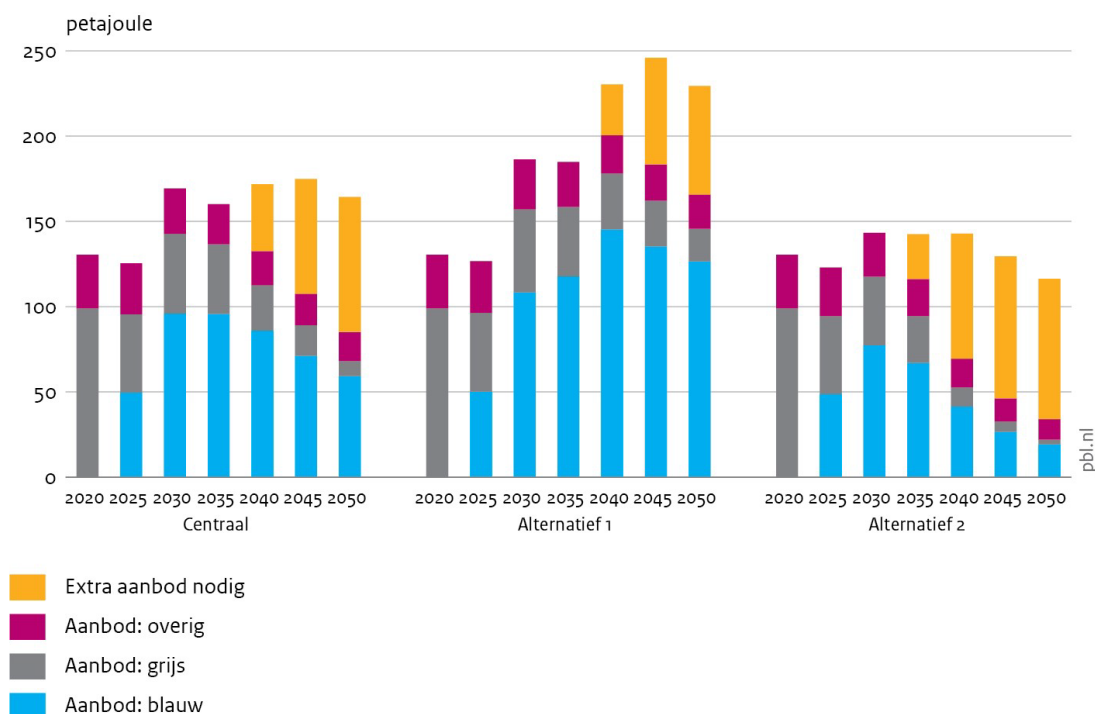


Bron: PBL

Figuur 11

Productie van waterstof in de industrie naar type

Aangevuld met extra aanbod dat nodig is om aan de vraag in de industrie te voldoen



Bron: PBL

Grijs: productie van grijze waterstof (uit fossiele grondstof).

Blauw: productie van blauwe waterstof (uit fossiele grondstof met CCS). De hoeveelheid blauwe waterstof is hier weergegeven naar rato van het CO₂-afvangpercentage. Dus voor SMR met CCS is 60% van de geproduceerde waterstof als blauw geclassificeerd (bij alleen pre-combustion afvang) of 90% (bij afvang van de CO₂ uit zowel de geconcentreerde stromen als rookgassen). Voor ATR is 88% van de geproduceerde waterstof als blauw geclassificeerd. N.B. In veel andere studies (en ook het TVKN-achtergronddocument over waterstof (Elzenga en Strengers, 2024)) wordt de volledige hoeveelheid van geproduceerde waterstof als 'blauw' geclassificeerd, ook als slechts een deel van de CO₂ wordt afgevangen. Dat is niet onlogisch wanneer de hoeveelheden geproduceerde waterstof centraal staan. Omdat het afvangpercentage relevant is voor het bereiken van klimaatneutraliteit is hier voor een aanpak gekozen waarbij het aandeel blauwe waterstof van een productie-eenheid schaal met het afvangpercentage ervan (de rest is dan grijs).

Paars: overige waterstofproductie in de industrie, met name als bijproduct van bestaande processen.

Oranje: om de vraag te matchen is er een aanvullende hoeveelheid waterstofproductie nodig buiten de Nederlandse industrie. Dit kan worden ingevuld door elektrolyse of import (zie ook Elzenga en Strengers, 2024).

NB De waarden in deze figuur zijn exclusief de waterstofvraag voor synthetische grondstoffen en synthetische transportbrandstoffen (zie daarvoor Figuur 21).

De toename in de vraag naar waterstof in het eerste alternatieve traject (middendeel in Figuur 11) wordt grotendeels veroorzaakt door waterstofgestookte fornuizen in chemie en raffinage. Aan deze vraag kan worden voldaan door blauwe waterstof geproduceerd uit restgassen die vrijkomen bij de kraakprocessen op de locatie zelf, deels aangevuld door aardgas en/of elektriciteit.

Voorbeelden hiervan zijn het H-Vision-project in Rotterdam en de plannen van Dow Chemical in Terneuzen. Deze blauwe waterstof is weergegeven in de blauwe balken in Figuur 10. In het eerste alternatieve traject groeit de primaire plasticsproductie meer en krimpt de raffinage minder dan in de andere trajecten. In deze sectoren vindt in 2050 nog op waterstofproductie uit restgassen en aardgas plaats, waarbij in de andere trajecten deze sectoren niet of minder groeien of zelfs krimpen, en daarnaast een grotere inzet van elektrische fornuizen voorkomt.

De extra vraag naar waterstof buiten locaties waar restgassen beschikbaar zijn is in 2030 nog beperkt maar loopt op tot 50-80 PJ in 2050 (in alle trajecten; dit zijn de groene balken in Figuur 11).

In de Figuren 9-11 is de waterstof die momenteel (in lage concentraties) voorkomt in restgassen, zoals raffinaderijgas en hoogovengas, niet weergegeven. Verder ontbreekt zoals eerder gemeld de vraagtoename door nieuwe industrie, zoals synthetische brandstoffen, die in potentie zeer veel waterstof vragen. Deze productie, inclusief verschillende denkrichtingen en dynamiek, wordt apart besproken in paragraaf 4.2.3 en in het hoofdrapport.

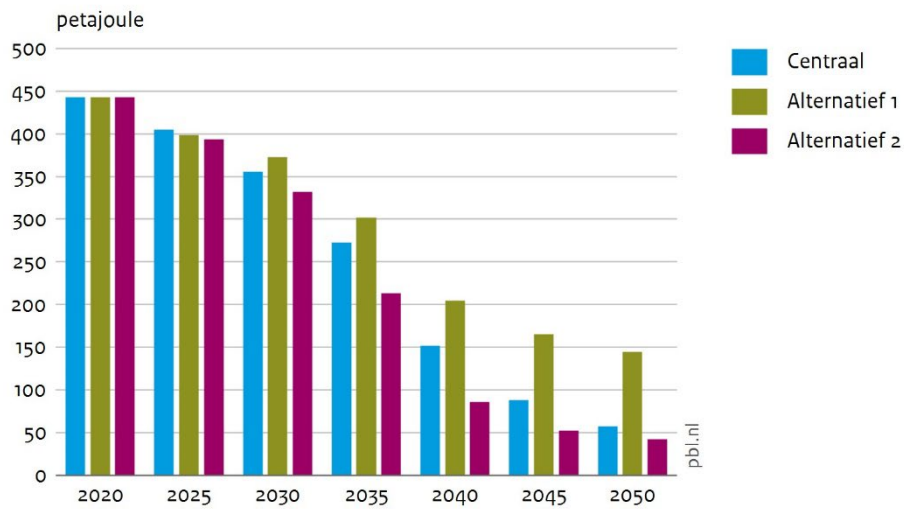
Aardgas

Bij de sterke toename van elektriciteit en waterstof uit elektrolyse past een forse afname van de aardgasinzet. Deze wordt getoond in Figuur 12. Het eerste alternatieve traject kent een minder snelle en minder vergaande afname van de aardgasvraag. Dit is voornamelijk verklaarbaar doordat in dit traject waterstofproductie op basis van aardgas (vooral bij kunstmest en industriële gassenproducenten, in combinatie met CCS) minder snel afneemt, en doordat de warmtevoorziening in sectoren als voeding en papier minder snel wordt geëlektrificeerd.

Ook wanneer restgassen worden verwerkt tot waterstof is waarschijnlijk aardgas nodig. De productie van waterstof met CCS leidt namelijk tot energieverlies (naar schatting zo'n 23% volgens H-Vision (2019)). Dit kan worden gecompenseerd door extra aardgas om eenzelfde energiehoeveelheid aan waterstof te produceren als de energiehoeveelheid van de nu verbrande restgassen (als de rest van de processen gelijk blijven). Dit zou ook kunnen worden opgevangen door een deel van de fornuizen te elektrificeren, waardoor minder waterstof nodig is maar evenveel restgas beschikbaar blijft. In de cijfers in Figuur 12 is gebruik van aardgas verondersteld ter aanvulling van restgas om het energieverlies te compenseren.

Figuur 12

Aardgasvraag

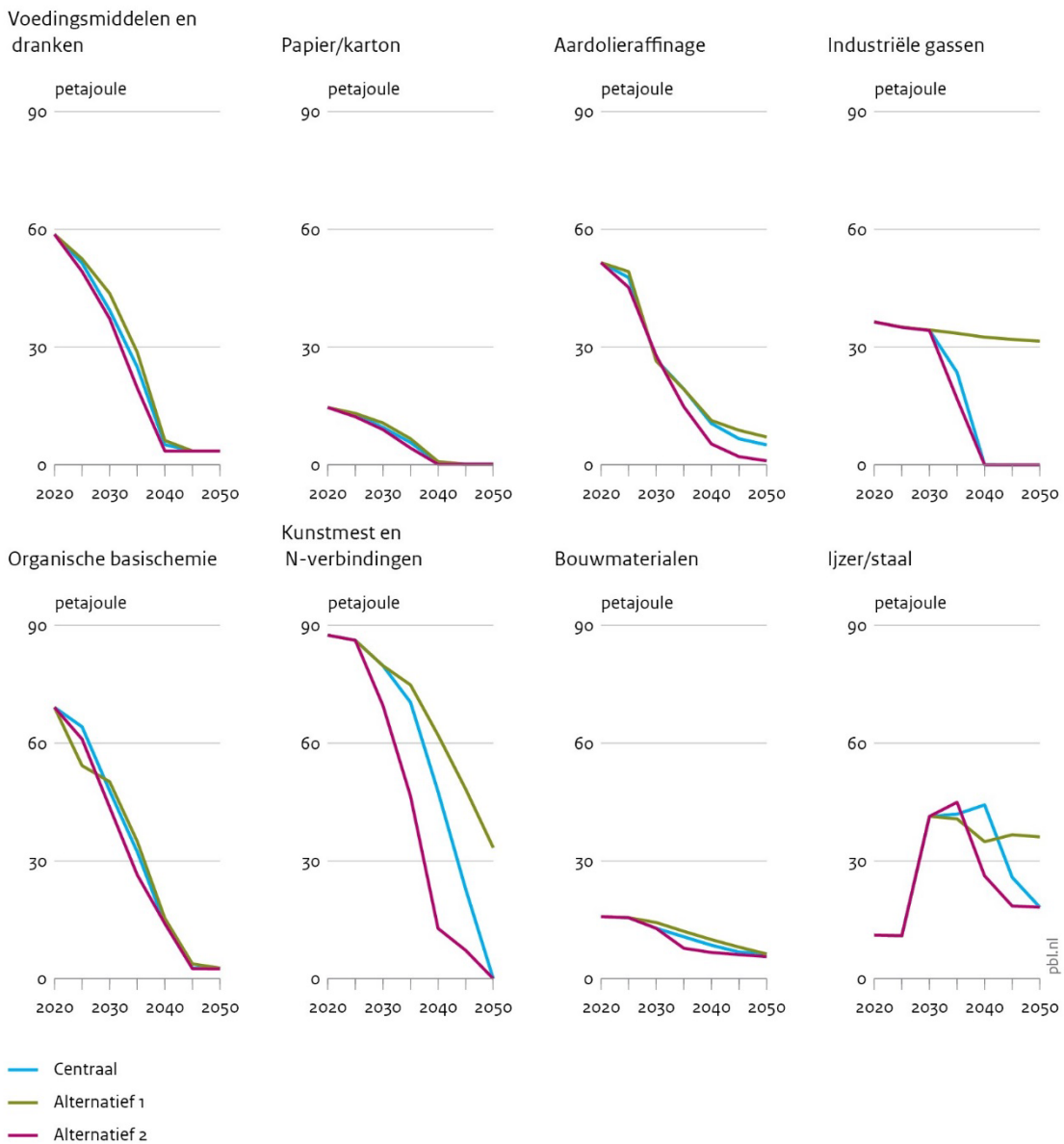


Bron: PBL

In Figuur 13 is de ontwikkeling van de aardgasvraag uitgesplitst per sector voor de verschillende trajecten, waarbij alleen de grootste sectoren zijn weergegeven. Grote afnames zijn voornamelijk te zien in de organische basischemie, de raffinage en de voedingsindustrie. Bij de ijzer- en staalindustrie is een (tijdelijke) toename te zien door toepassing van DRI op basis van aardgas. Op de langere termijn wordt inzet van aardgas in twee van de drie trajecten weer kleiner omdat groene waterstof wordt ingezet.

Figuur 13

Afname vraag naar aardgas voor acht belangrijke sectoren



Bron: PBL

Overige energiebronnen

(Ultradiepe) geothermie, aquathermie en andere energiebronnen zijn niet specifiek verkend, maar kunnen voor sommige industrielocaties en -sectoren een belangrijke rol spelen. Daarnaast is de gangbare verwachting dat de productie van restwarmte op/bij industrieclusters blijvend zal zijn (door o.a. chemische recycling, productie van hernieuwbare brandstoffen en ook elektrolyse). De omvang is nog wel onzeker, mede doordat de industrie zelf mogelijk ook efficiënter met restwarmte zal omgaan. Er liggen desondanks blijvende kansen voor warmtenetten op basis van industriële restwarmte (zie ook Wetzels et al. (2024)).

4.2.2 Grondstoffen

In de trajecten neemt het aandeel materiaal dat wordt hergebruikt (zonder verdere verwerking opnieuw gebruikt) of gerecycled (verwerkt tot nieuwe grondstof) toe. Dit leidt ertoe dat de vraag naar primaire materialen en producten in alle trajecten minder snel toeneemt dan in het verleden (zie ook paragraaf 3.1). Een toename in het aandeel recycleaattoepassing heeft op mondiale schaal een kleiner productievolume van primaire basismaterialen tot gevolg (zie ook Figuur 5) en daarmee ook een afname van broeikasgasuitstoot. Dit is uiteraard alleen het geval als de toepassing van recycleaat leidt tot minder uitstoot in de gehele productieketen, inclusief eventuele verbranding van het gebruikte materiaal en bijbehorende energierugwinning. Bij sommige materialen is dit echter urgenter dan bij andere: bij metalen die niet erg schaars zijn is de noodzaak tot minder primaire productie minder groot dan bij plastics, die veel emissies in de keten tot gevolg hebben. Door voorraadvorming, ofwel het blijvend voortbestaan van materialen in de samenleving, is de hoeveelheid productie voor de meeste producten overigens blijvend hoger dan de hoeveelheid beschikbaar afval.

Naast hergebruik en recycling zijn er nog andere opties om grondstofgebruik te veranderen, bijvoorbeeld door voor een productgroep andere materialen te gebruiken (bijvoorbeeld veel meer hout in de bouw). Dat is niet expliciet meegenomen in deze studie, al kan het wel de toename van de totale vraag naar bestaande energie-intensieve materialen temperen. Dat sluit aan bij de aangenomen beperkte groei van productievolume aangenomen in deze studie (zie paragraaf 3.1).

Fossiele grondstoffen

Materialen en producten gebaseerd op fossiele grondstoffen (aardolie, aardgas) hebben bij de productie CO₂-uitstoot tot gevolg. Echter, ook bij de winning van de grondstoffen en aan het eind van de levensduur bij afvalverbranding, zoals plastics, vindt uitstoot plaats en voor sommige producten ook bij gebruik of verbruik, vooral bij ureumkunstmest, maar ook in beperkte mate bij smeer- en oplosmiddelen. Bij verbranding van fossiel afval kan afvang en opslag van CO₂ (CCS) plaatsvinden. Echter, de schaal van het grondstofverbruik en de uiteindelijk onvermijdbare uitstoot in de keten vereisen dat in een klimaatneutrale samenleving de fossiele grondstof uiteindelijk wordt vervangen door recycleaat, biograndstof of synthetische grondstof, met compensatie van de resterende fossiele uitstoot.

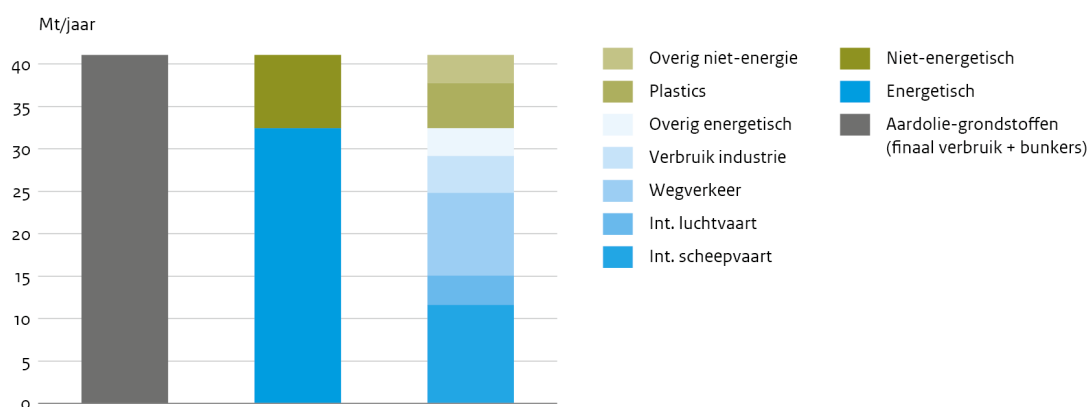
Vanwege het grote aandeel in de broeikasgasuitstoot bij verbranding van de producten leggen we hier de nadruk op de inzet van grondstoffen op basis van aardolie (zie Figuur 14). De hoeveelheid in Nederland verbruikte aardoliegrondstoffen en -producten (finaal verbruik en bunkers) is zo'n 41 miljoen ton per jaar (1760 PJ). Het overgrote deel wordt ingezet voor energetische toepassing, met name in de transportsector in binnen- en buitenland. In een klimaatneutrale toekomst zal deze toepassing geheel of grotendeels door andere energiebronnen worden vervangen. Dit wordt besproken in het TVKN-hoofdrapport (Daniëls en Strengers, 2024) en kort in paragraaf 4.2.3. Een deel van de aardolieproducten wordt verbrand bij de industrie in het productieproces en de emissies die daardoor ontstaan kunnen door middel van CCS gereduceerd worden, of door het aanpassen van de productieprocessen en/of de grondstoffen zelf.

Een relatief klein deel van het gebruik van aardoliegrondstoffen en -producten, minder dan 9 miljoen ton of 380 PJ per jaar, wordt in Nederland gebruikt voor niet-energetische toepassing, vrijwel altijd in de chemie. Dit is voor het grootste deel nafta en LPG die worden ingezet in stoomkrakers voor de productie van onder andere ethyleen en propyleen, waar uiteindelijk plastics zoals polyethyleen (PE) en polypropyleen (PP) van worden gemaakt (CBS, 2021a). Ongeveer 2,5 miljoen ton

aardolieproducten (ruim 100 PJ) komt vrij bij het kraakproces als restgas en wordt vervolgens verbrand voor voornamelijk warmteproductie. Dit is zichtbaar als energetisch verbruik in de industrie in Figuur 14. Een klein deel van de aardolieproducten wordt teruggeleid naar de krakers. Het overige deel wordt verder verwerkt, onder andere tot ruim 5 miljoen ton plastics (CE Delft, 2021a; VNCI, 2021). Van deze plastics wordt ongeveer de helft geëxporteerd en de rest tot producten verwerkt. Vervolgens wordt de helft van de kunststofproducten ook geëxporteerd (VNCI, 2021).

Figuur 14

Toepassing aardoliegrondstoffen in Nederland (gemiddeld, 2016-2020. Bron: CBS)

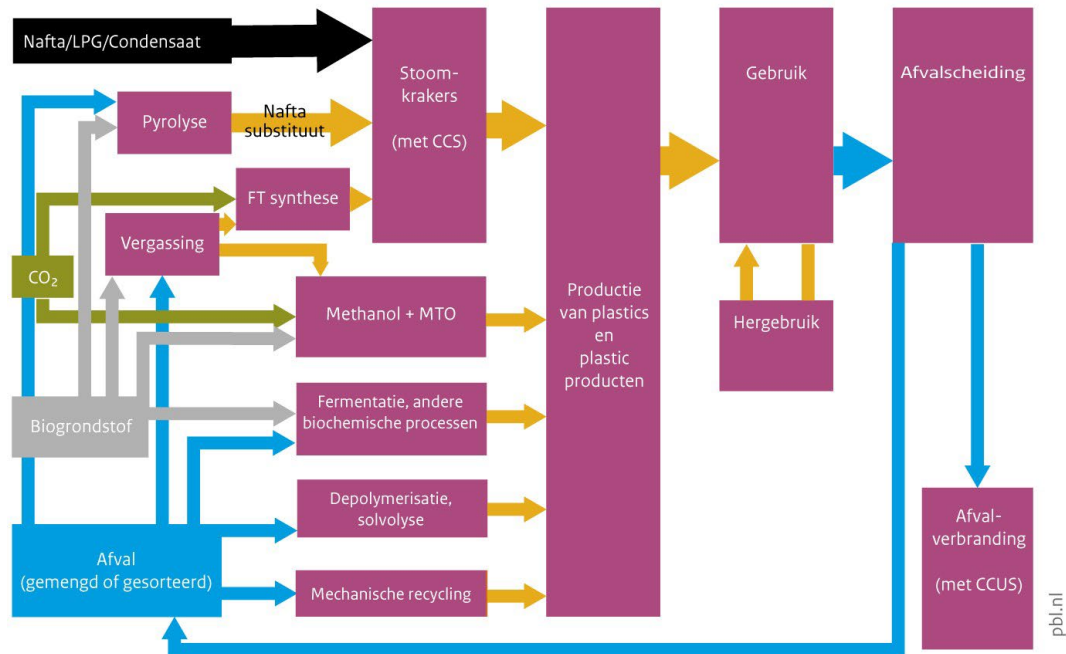


In de trajecten gaan we er vanuit dat de inzet van aardoliegrondstoffen voor het maken van producten voor het grootste deel wordt vervangen door gerecyclede grondstof en biograndstof. Er worden diverse mogelijkheden voorzien; mechanische recycling, chemische recycling (waar vergassing, pyrolyse, depolymerisatie en solvolyse onder valt) en het gebruik van biograndstoffen zoals suikers of ligno-cellulose. Ook synthetische koolwaterstoffen op basis van (niet-fossiele) CO₂ en (groene) waterstof zouden op langere termijn, na 2040, een rol kunnen spelen, al worden alternatieven op dit moment een groter potentieel toegedicht (zie o.a. VNCI (2021); Material Economics (2019); Kramer (2023); Kaiser & Bringezu (2020)). Figuur 15 toont een overzicht van de mogelijke routes om tot plastics te komen, uit zowel fossiele bronnen, biograndstoffen en afval. Er zijn overigens nog meer routes denkbaar dan hier getoond. Verder worden grondstoffen en brandstoffen nu vaak gezamenlijk geproduceerd, en dat geldt mogelijk ook voor toekomstige productieprocessen.

Figuur 15

Mogelijke klimaatneutrale productieroutes naar plastics

inclusief verwerking van plastic afval



Bron: PBL

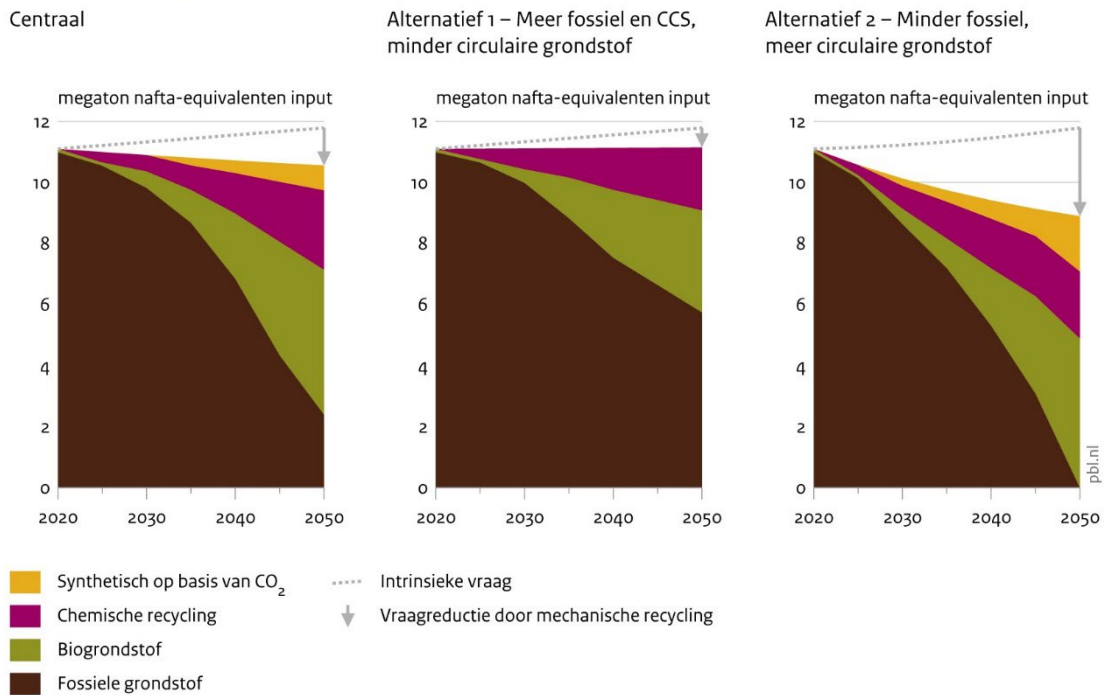
LPG = Liquid Petroleum Gas, FT = Fischer Tropsch, MTO = Methanol To Olefins, CCUS = Carbon Capture and Utilization or Storage.

Momenteel wordt in de EU in ongeveer 10% van de vraag naar plastics voorzien door mechanisch gerecyclede grondstof, in Nederland is het bijna 13% (PlasticsEurope, 2022). In 2021 was ongeveer 2% van de geproduceerde plastics biobased (PlasticsEurope, 2022). De bijdrage van chemische recycling is nog zeer klein.

Op basis van diverse studies (VNCI, 2021; Renewable Carbon Initiative, 2022; TNO, 2022; Material Economics, 2019; Stegmann et al., 2022; Lase et al., 2023; IEA, 2021; KPMG, 2023; Lange et al., 2024) schetsen we hier drie trajecten voor grondstofherkomst van plastics en andere kraakproducten. Momenteel wordt alle fossiele grondstof ingezet in stoomkrakers in de vorm van vooral nafta en LPG. Voor de toekomst kan dit anders zijn; zoals te zien is in Figuur 15 zijn er ook andere routes denkbaar om tot plastics te komen. Figuur 16 toont de drie uitgewerkte trajecten in deze achtergrondstudie. Mechanische recycling is hierin niet weergegeven omdat dit buiten de basischemie om gaat. Het totaal aan input verandert omdat we per traject verschillende mate van mechanische recycling van plastic afval veronderstellen (van 15% in 2050 in het eerste alternatieve traject tot 60% in 2050 in het tweede alternatieve traject). De totale vraag naar plastics en chemicaliën groeit in ieder traject in gelijke mate. In de ontwikkeling van de gebruikte grondstoffen speelt beleid een grote rol; dit wordt besproken in hoofdstuk 5.

Figuur 16

Grondstoffen organische basischemie



Bron: PBL

De toekomstige verdeling van productieroutes is uiteraard zeer onzeker; alle op te schalen routes zijn met implementatiebarrières omgeven en vereisen grote veranderingen in de internationale waardeketens (CIEP, 2022). In deze studie verkennen we niet alle routes in detail. Het is de verwachting dat een deel van de biograndstof en een deel van de chemisch gerecyclede grondstof in de organische chemie als input zullen dienen voor de stoomkrakers, omdat hun samenstelling lijkt op die van nafta en LPG. Voor een ander deel van de biograndstof en chemisch gerecyclede grondstof in de organische chemie veronderstellen we alternatieve processen om tot eindproducten te komen, bijvoorbeeld met vergassing (via methanol), fermentatie of depolymerisatie. Dit resulteert in de ontwikkeling van de bijdragen zoals weergegeven in Figuur 16. In het aandeel biograndstof is niet meegenomen dat ook een deel van het recyclaat van biogene herkomst wordt, weliswaar met enige vertraging door de gebruiksperiode. Voor het totaal maakt dit niet uit, maar het betekent dat de samenstelling van het recyclaat geleidelijk ook een steeds groter aandeel biogene grondstof bevat, al is dit niet meer als zodanig onderscheidbaar. In het tweede alternatieve traject wordt de hoeveelheid fossiele grondstof in 2050 tot nul gereduceerd, in de andere twee blijft er nog een deel fossiel over. Beide varianten komen voor in de geraadpleegde studies (VNCI, 2021; Renewable Carbon Initiative, 2022; TNO, 2022; Material Economics, 2019; TNO, 2020; zie ook Appendix).

Vraag naar gerecyclede grondstof

Om in te schatten hoe veel recyclaat als input nodig is voor de chemische recycling, werken we hier de drie trajecten van Figuur 16 verder uit, waarbij we ook rekening houden met de vraag naar recyclaat voor mechanische recycling. We onderscheiden daarbij vier verschillende routes, die

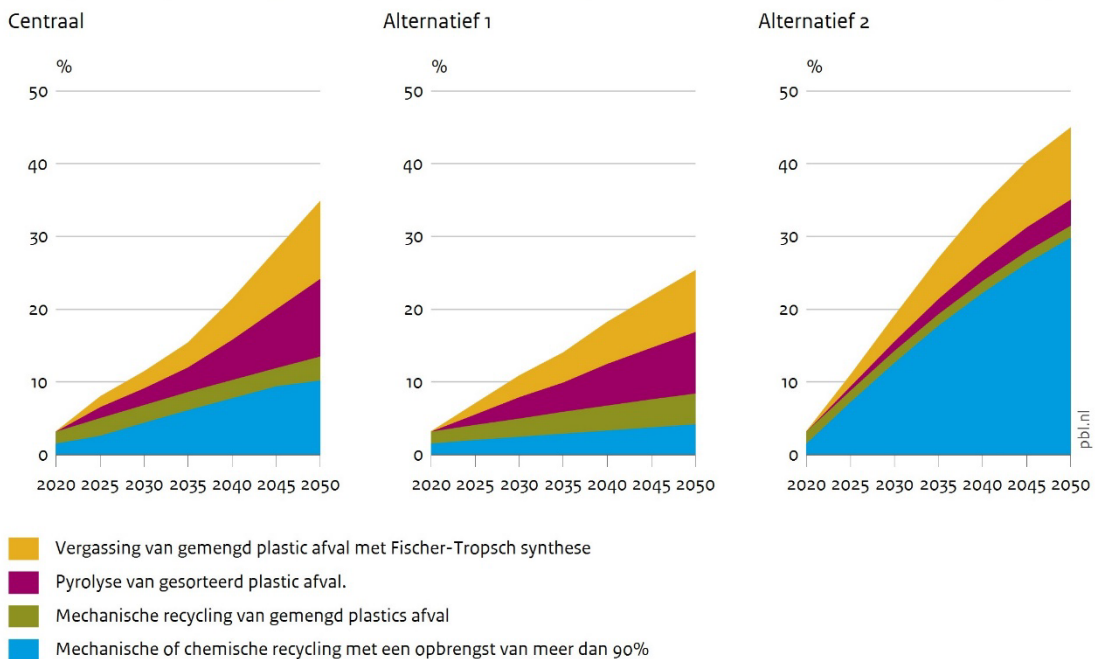
verschillen in de opbrengst per ton afval (data op basis van o.a. Lase et al. (2023), De Leeuw en Koelemeijer (2022) en CE Delft (2022a)).

1. Recycling met ten minste 90 w% opbrengst aan plastics, bijvoorbeeld mechanische recycling van zuivere stromen en chemische recyclingprocessen als solvolyse en depolymerisatie.
2. Mechanische recycling van gemengde plastics. Gemiddelde opbrengst van afval naar plastics van 70 w%.
3. Pyrolyse van gesorteerd plastic afval. Gemiddelde opbrengst van afval naar plastics van 50 w%.
4. Vergassing van gemengd afval in combinatie met Fischer-Tropsch-synthese. Gemiddelde opbrengst van afval naar plastics van 50 w%.

Voor ieder van de routes veronderstellen we een bepaalde ingroei, op basis van bestaande studies (zie Figuur 17 en de appendix).

Figuur 17

Welk percentage van de grondstof voor plastics en organische chemicaliën komt voort uit recycling?



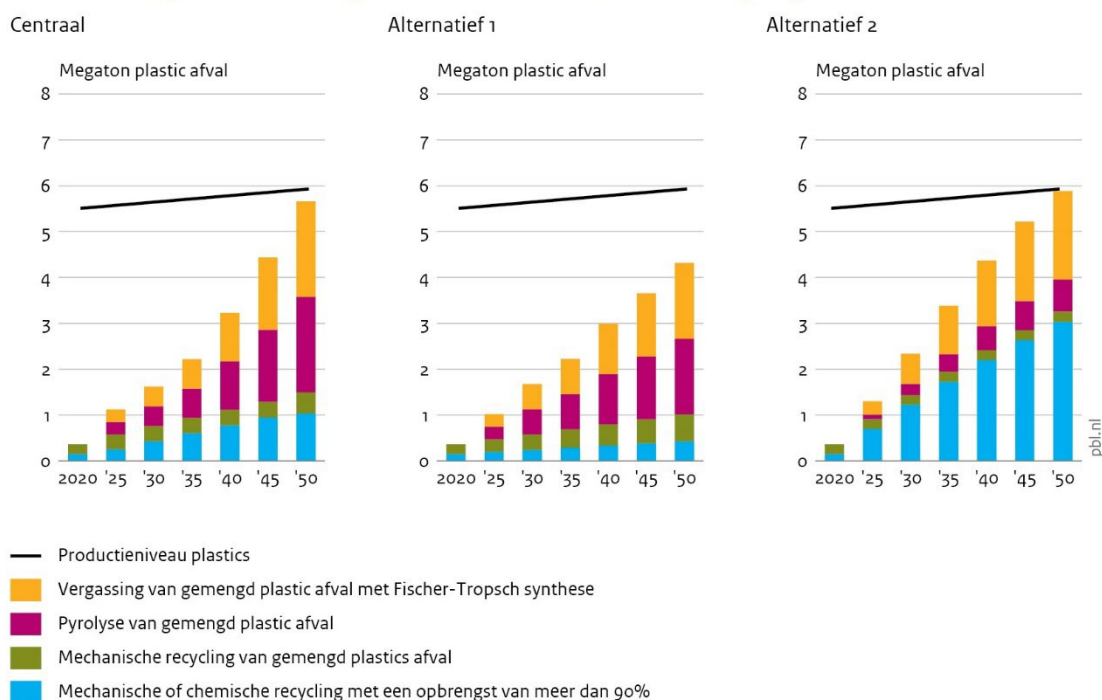
Bron: PBL

In het centrale traject neemt recycling sterk toe, tot 2035 de verschillende routes in relatief gelijke mate. Daarna groeit chemische recycling sneller doordat ook meer laagwaardige afvalstromen als grondstof dienen. In het eerste alternatieve traject blijft recycling iets achter en wordt fossiele grondstof minder snel en in mindere mate afgebouwd. In het tweede alternatieve traject wordt sterk ingezet op zuivere afvalstromen, waardoor recyclingprocessen met hoge opbrengst in sterke mate wordt toegepast, terwijl de meeste onzuivere plasticsreststromen worden gerecycled door middel van vergassing.

Dat levert de hoeveelheden plastic afvalinput op die worden weergegeven in Figuur 18. De verliezen van de recyclingprocessen zijn deel van de aangegeven hoeveelheden. Om een beeld te geven van de ordegrootte wordt de hoeveelheid plastic afval die wordt gebruikt in deze trajecten vergeleken het productieniveau van plastics in Nederland, aangegeven door de zwarte lijn. In het tweede alternatieve traject benadert hoeveelheid plastic afval het productieniveau. Uiteraard is er in de realiteit sprake van grootschalige import en export, zoals we in de volgende alinea bespreken. Op internationale schaal begrenst de productie uiteraard de hoeveelheid beschikbaar recyclebaar, mits de voorraad in de samenleving op peil blijft (in de praktijk is deze groeiend). Zoals gezegd kennen de recyclingprocessen procesverliezen en naast plastics worden ook andere producten gemaakt in de organische basischemie, zoals oplosmiddelen. Daarom zijn naast recyclebaar ook grote hoeveelheden biograndstof, niet-fossiele CO₂ en/of fossiele grondstof in combinatie met CCS nodig om op klimaatneutrale wijze de beschreven productievolumes aan chemicaliën en plastics te maken.

Figuur 18

Hoeveelheden plastic afval nodig voor mechanische en chemische recycling



Bron: PBL

Volgens deze aannames zijn grote hoeveelheden plastic afval nodig, tot meerdere megatonnen input per jaar (in 2050 4 tot 6 megaton). De hoeveelheid plastic afval die nu wordt verbrand in de Nederlandse afvalverbrandingsinstallaties is minder dan 1 Mt per jaar, terwijl de hoeveelheid beschikbaar plastic afval niet meer is dan 1,1 Mt per jaar (Plastics Europe, 2022). Dat betekent dat er op termijn een vraag ontstaat waarvoor niet alleen al het Nederlands plastic afval nodig is, maar waarvoor plastic afval geïmporteerd zal moeten worden tenzij de productie drastisch afneemt. Dat er import van plastic afval nodig is, is niet verrassend aangezien de Nederlandse productiecapaciteit van plastics veel groter is dan de Nederlandse consumptie (CE Delft, 2021a; VNCI, 2021). Grootschalige import van halffabricaten of basischemicaliën op basis van plastic afval is daarbij een alternatief voor de import van het plastic afval zelf (VNCI, 2021). Dit kan bijvoorbeeld in de vorm van wax,

pyrolyse-olie of BHET (grondstof voor PET) verkregen door depolymerisatie van PET-afval. Tegelijk maakt betere scheiding van plastic afval, waar ook bij het ontwerp van plastic producten op kan worden ingespeeld, een hoogwaardiger inzet met een hoger rendement mogelijk. Dit vermindert de afhankelijkheid van geïmporteerde grondstof. Tegelijk betekent dit wel een verandering van de industrie, omdat er minder vraag ontstaat naar primaire plastics en minder afval beschikbaar is voor de organische basischemie.

Bij deze trajecten benadrukken we dat zowel afval, grondstoffen en producten zoals plastics worden verhandeld op internationale markten. De verhoudingen tussen de grondstoftrajecten zijn bedoeld om representatief zijn voor de internationale situatie. In de realiteit kan de onderlinge verhouding per land sterk verschillen, afhankelijk van bevolkingsdichtheid, type aanwezige industrie en beschikbaarheid van energie en grondstoffen. Voor Nederland is het denkbaar dat er relatief lang aan fossiele grondstof wordt vastgehouden vanwege de aanwezigheid van veel fossiele raffinage en chemische industrie. Het is echter ook mogelijk dat door specifiek beleid en de aanwezige kennis juist innovatieve routes in Nederland eerder tot wasdom kunnen komen.

Vraag naar biograndstoffen

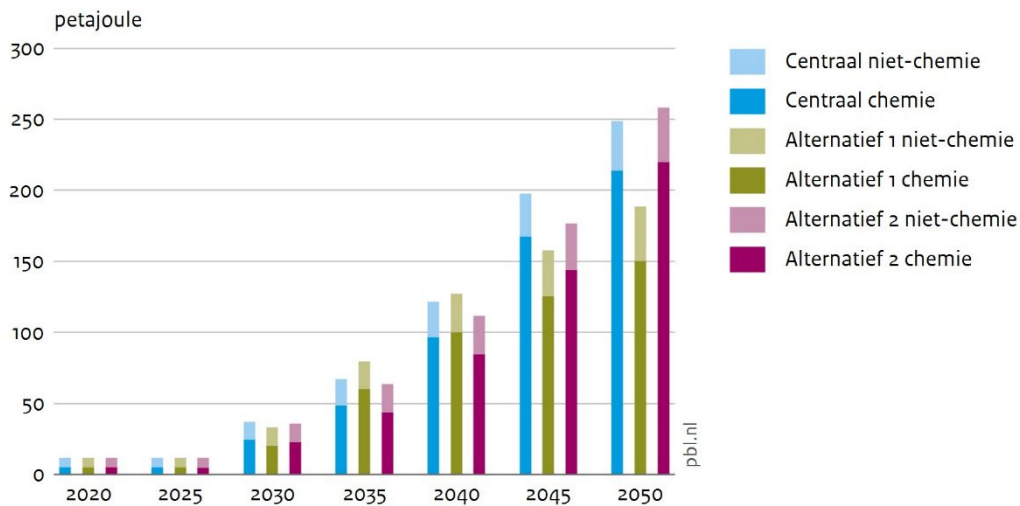
Op basis van de ingroeitrajecten op basis van de genoemde bronnen kunnen we een ruwe inschatting maken van de totale hoeveelheid biograndstoffen die nodig is in de organische chemie. We veronderstellen dat er zo'n 1-1,5 Mt (50-60 PJ) biogene krakergrondstof (pyrolyse-olie, bionafta) nodig is in 2035 en 4-5 Mt (170-230 PJ) in 2050 (voor zowel plastics als andere kraakproducten). Bij een thermische pyrolyse-efficiëntie van 50% betekent dat de dubbele hoeveelheid aan ruwe biograndstoffen-input. Ook via andere routes kunnen biograndstoffen worden omgezet naar plastics; wanneer de omzetting ongeveer hetzelfde rendement heeft maakt dit niet uit voor de hoeveelheid ruwe biograndstoffen-input die nodig is. Voor bijvoorbeeld PE is gebruik van biograndstof een goede optie (CE Delft, 2023). Aan de biograndstoffenvraag kan bijvoorbeeld voldaan worden door houtachtige biograndstoffen (ligno-cellulose) of door andere biogene koolwaterstoffen (suikers, oliën, vetten). Het is mogelijk om biograndstoffen niet volledig naar zuurstofvrije koolwaterstoffen om te zetten, bijvoorbeeld voor de productie van polyesters of andere zuurstofhoudende polymeren. Ook voor biobrandstoffen voor de scheepvaart kan dit een optie zijn. Over de herkomst en het potentieel van biograndstoffen is meer beschreven in de achtergrondstudie daarover (Van Minnen et al., 2024) en in het hoofdrapport van TVKN waarin ook vraag naar biograndstoffen voor andere sectoren (mobiliteit, gebouwde omgeving) integraal wordt beschouwd.

Naast de vraag voor plastics veronderstellen we een vraag naar biogene koolwaterstoffen voor ureum-kunstmest (waar CO₂ voor nodig is), van in totaal zo'n 6-7 PJ in 2035 en 15-35 PJ in 2050. Dit is in de vorm van biogas, uit bijvoorbeeld vergassing van getorreficeerde biograndstoffen. De geschatte totale vraag aan biogene koolwaterstoffen als grondstof in de chemie is getoond in Figuur 19 en is zo'n 65-85 PJ in 2035 en 225-290 PJ in 2050 (zie Figuur 19). Deze hoeveelheden komen qua ordegrrootte overeen met schattingen in de routekaart van de VNCI (VNCI, 2018). Dit is overigens niet de hoeveelheid ruwe biograndstoffen, maar de energetische waarde van de koolwaterstoffen die nodig is voor de input van de processen; de hoeveelheid ruwe biograndstoffen kan, afhankelijk van het productieproces, ongeveer twee keer zo groot zijn.

Figuur 19

Vraag naar biogene koolwaterstoffen in de industrie

Exclusief biobrandstoffenproductie



Bron: PBL

De staven zijn de directe vraag naar biograndstoffen in de verschillende trajecten, exclusief de alternatieve transportbrandstoffen (die volgen in Figuur 22). Het gearceerde gedeelte is de vraag voor de productie van biogene koolwaterstoffen voor niet-energetische inzet.

Overigens worden biogene koolwaterstoffen ook gebruikt in andere industrieën dan de chemie, bijvoorbeeld de papier- en kartonindustrie en de voedingsmiddelenindustrie. Voor deze industrieën wordt geen grote veranderingen qua grondstoffen voorzien in de trajecten. De verwachting is dat biogene reststromen in deze industrietakken ook als brandstof worden ingezet, zoals momenteel ook al gebeurt. In de bouw kan meer hout worden toegepast, maar de vraag naar biograndstof hiervoor is niet opgenomen in deze cijfers.

Het gebruik van biograndstoffen biedt ook mogelijkheden voor de realisatie van negatieve emissies, wanneer CCS wordt toegepast bij verwerking of verbranding van reststromen. Hier ontstaat een trade-off tussen beschikbaarheid voor producten of voor negatieve emissies.

Vraag naar elektriciteit en waterstof voor niet-fossiele koolwaterstoffen

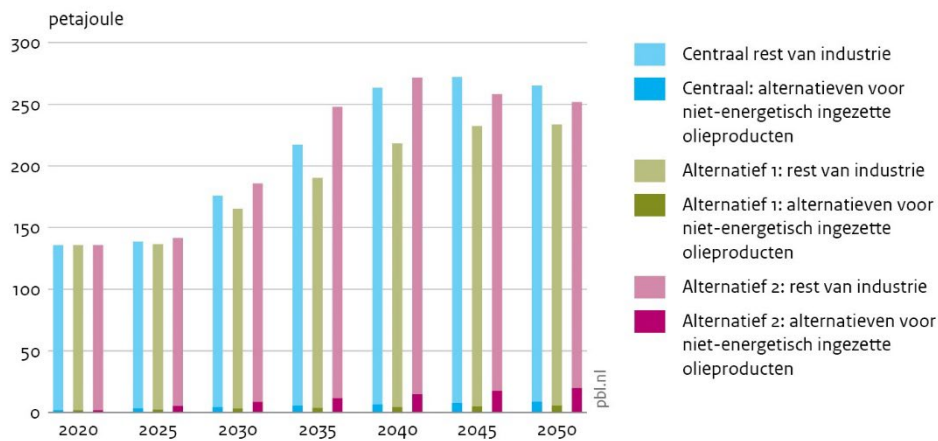
De productie van alternatieven voor fossiele koolwaterstoffen voor niet-energetisch gebruik volgens de in deze paragraaf beschreven trajecten betekent ook een grotere vraag aan elektriciteit en waterstof. De extra elektriciteitsvraag komt vooral door mechanische recyclingprocessen en door de productie van synthetische koolwaterstoffen. De extra waterstofvraag komt door de productie van synthetische koolwaterstoffen. We gaan er hierbij vanuit dat de toegepaste pyrolyse en vergassing van plastics netto energieneutraal zijn, dus dat de benodigde energie ongeveer in balans is met de geproduceerde energie door de verbranding van reststromen uit de processen zelf (in combinatie met CCS). Of dit reëel is hangt ook af van beleid: wanneer beleid in sterke mate aanstuurt op een zo groot mogelijke productie van plastics uit afval, dan ligt het voor de hand om extern energie en waterstof te betrekken en zo maximale hoeveelheden nieuwe plastics uit afval te maken. In

systemperspectief kan het beter zijn om reststromen niet om te zetten in plastics, maar energietisch in te zetten in combinatie met CCS.

De toegenomen recycling leidt tot een toename in elektriciteitsvraag zoals te zien is in de gearceerde balken in Figuur 20; niet verrassend is dat dit vooral het geval is bij de trajecten die het snelst olie uitfaseren. Het gaat hierbij om hooguit enkele tientallen PJ's in 2050.

Figuur 20

Additional elektrischeitsvraag voor de productie van alternatieven voor niet-energetisch oliegebruik



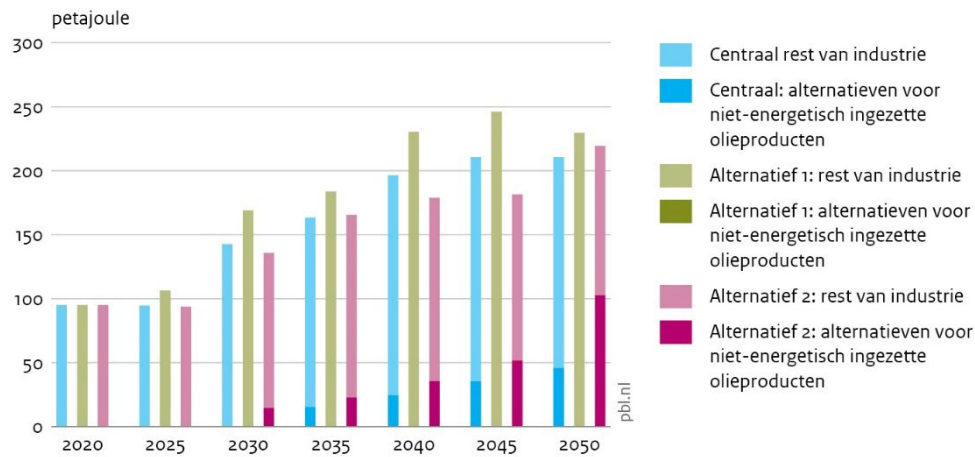
Bron: PBL

De staven zijn de directe vraag naar elektriciteit in de verschillende trajecten, exclusief de alternatieve transportbrandstoffen (die volgen in Figuur 22) en elektrolyzers. Het donkere gedeelte is de vraag voor recycling en de productie van synthetische koolwaterstoffen voor niet-energetische inzet.

De productie van synthetische grondstoffen vereist veel waterstof (zie Figuur 21). Zelfs een klein aandeel aan synthetische koolwaterstoffen heeft een enorme waterstofvraag tot gevolg. Dit is met name zichtbaar in het tweede alternatieve traject; daarbij wordt zo'n 15% van de koolwaterstoffen die niet-energetisch worden verbruikt, gemaakt middels synthese van CO₂ en waterstof. Dit vraagt ruim 100 PJ aan waterstof per jaar. In het eerste alternatieve traject worden geen synthetische koolwaterstoffen gemaakt voor niet-energetisch gebruik en daarom is geen extra waterstof nodig ten opzichte van de vraag van de rest van de industrie.

Figuur 21

Additionele waterstofvraag voor de productie van alternatieven voor niet-energetisch oliegebruik



Bron: PBL

De staven zijn de totale vraag naar waterstof in de verschillende trajecten, exclusief de alternatieve transportbrandstoffen (die volgen in Figuur 22). Het donkere gedeelte is de vraag voor de productie van synthetische koolwaterstoffen voor niet-energetische inzet.

4.2.3 Productie van brandstoffen

De grootschalige productie van brandstoffen die fossiele brandstoffen voor met name scheepvaart, luchtvaart en wegverkeer kunnen vervangen is nu nog relatief klein (ongeveer 70 PJ per jaar aan biodiesel). Het is nog onduidelijk wat op termijn de belangrijkste brandstof voor lucht- en scheepvaart wordt. Dat kan betekenen dat de productie van deze energiedragers mogelijk elders gaat plaatsvinden en dat mogelijk ook de vraag verandert.

De productie van biogene en synthetische alternatieven voor fossiele energiedragers betreft de omzetting van de oorspronkelijke hernieuwbare energievorm (biograndstoffen, elektriciteit, waterstof) naar een vorm die geschikt is voor mobiliteit, dus die toepasbaar is bij de bestaande infrastructuur, een hoge energiedichtheid heeft en/of die makkelijk getransporteerd kan worden. Dure, technisch minder eenvoudige en minder snel te implementeren aanpassingen aan eindgebruikstoepassingen (bijvoorbeeld elektrificatie van luchtvaart en scheepvaart) en infrastructuur kunnen hiermee voorkomen of uitgesteld worden, maar de prijs daarvoor is meestal extra energieverlies bij de omzetting naar de gewenste vorm, en een lagere efficiëntie bij de toepassing.

De kwantitatieve invulling van de brandstoffenproductie kan nog veranderen op basis van berekeningen met het optimalisatiemodel OPERA. Deze invulling is namelijk zeer sterk afhankelijk van de trajectkeuze in andere eindgebruikssectoren (met name mobiliteit) en van de aannames ten aanzien van de beschikbaarheid en kosten/prijzen van biograndstoffen, elektriciteit en waterstof.

Volumes voor de brandstoffenproductie

Nederland is momenteel een exportland voor fossiele scheeps- en vliegtuigbrandstoffen; de productie van deze brandstoffen is respectievelijk anderhalf keer (voor stookolie), twee keer (voor kerosine) en drie keer (voor scheepsdiesel) zo veel als de bunkering en het finaal verbruik van de mobiliteitssector in Nederland (CBS Statline, 2021).

Voor de berekeningen van de volumes sluiten we aan bij het TVKN-hoofdrapport (Daniëls en Strenegers, 2024) en gaan we er dus ook vanuit dat het wegverkeer in 2050 volledig is geëlektrificeerd. Dat betekent dat er op de lange termijn alleen hernieuwbare brandstoffen voor scheeps- en vliegtuigbrandstoffen nodig zullen zijn.

Om een beeld te krijgen van hoe veel elektriciteit, waterstof en biograndstoffen nodig zijn voor de productie van de genoemde brandstoffen gaan we er hier vanuit dat de hernieuwbare brandstoffen die in Nederland worden toegepast of gebunkerd ook in Nederland worden gemaakt, maar dat er daarnaast geen netto export van hernieuwbare brandstoffen plaatsvindt. Dit is de referentie voor de verdere analyse van technologie en vraag.

De toekomstige productie is immers afhankelijk van diverse factoren, zoals de kostprijzen van grondstoffen en producten in verschillende delen van de wereld en de technische invulling van de brandstoffenproductie. Wanneer biograndstoffen goedkoop en breed inzetbaar blijken, zijn bijkomende negatieve emissies goed denkbaar bij voldoende CO₂-opslagcapaciteit, wat ook langer gebruik van fossiele brandstoffen mogelijk maakt. Dit sluit aan bij de bestaande activiteiten in deze sector. Het is echter ook mogelijk dat beperkte beschikbaarheid van biograndstoffen en/of een maatschappelijke aversie tegen de inzet van biograndstoffen ertoe leidt dat de brandstoffenvraag vooral wordt ingevuld door synthetische brandstoffen, bij voorkeur zonder koolstof, zoals waterstof en ammoniak. Waar mogelijk zal ook direct gebruik van elektriciteit in sterkere mate worden toegepast. Deze dynamiek wordt verder besproken in het TVKN-hoofdrapport (Daniëls en Strenegers, 2024).

Onderdeel van de industrietrajecten is ook de chemische recycling van (plastic) afval tot grondstoffen voor de chemie. Die zijn technisch ook geschikt zijn voor verdere verwerking tot brandstof. Net als in de huidige situatie zijn de productieketens voor grondstoffen en brandstoffen onderling met elkaar verweven. Beleid voor de circulariteit van chemische grondstoffen en afval, bijvoorbeeld zoals vastgelegd het Europese Waste Framework Directive, kan deze route uiteraard beïnvloeden. Het gebruik van brandstoffen op basis van afval telt daarin momenteel niet mee als recycling.

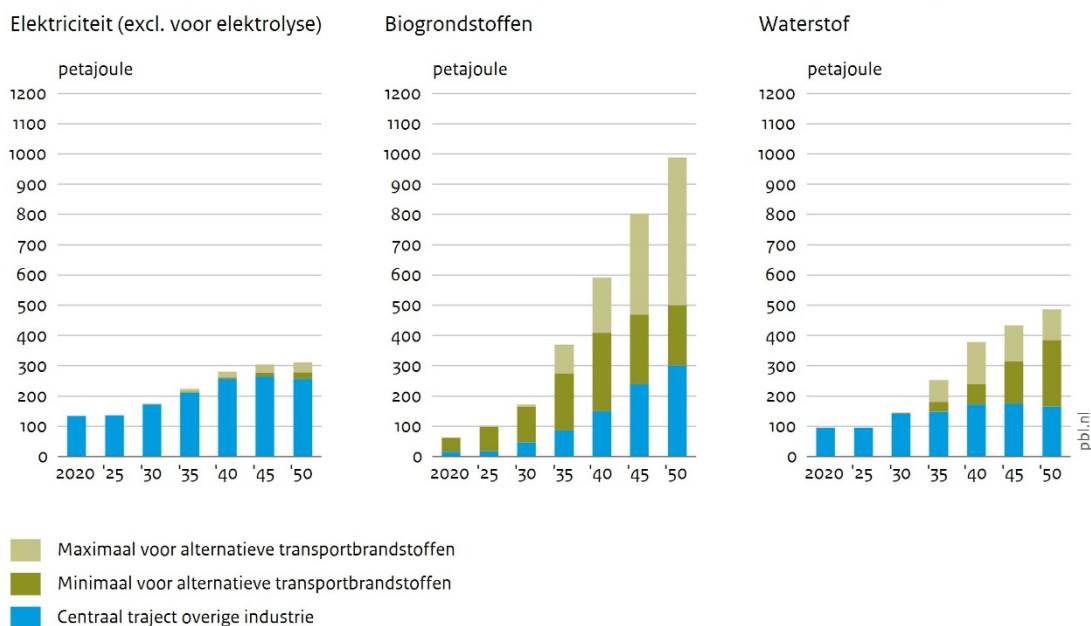
Grondstofvraag voor hernieuwbare brandstoffen

In het TVKN-hoofdrapport en in Geilenkirchen et al. (2024) worden twee verschillende trajecten van de mobiliteitssector richting 2050 beschreven. Deze trajecten omvatten het verbruik van de sector mobiliteit in Nederland inclusief de brandstof in Nederland die wordt getankt voor de internationale lucht- en scheepvaart. Die leiden tot 100-340 PJ biobrandstoffen, 180-360 PJ synthetische brandstoffen en 0-40 PJ waterstof in 2050 (zie Daniëls en Strenegers., 2024). Figuur 22 toont de bijbehorende vraag naar energiedragers (bestaande uit elektriciteit, waterstof en biograndstoffen) tot 2050, conform de genoemde trajecten. De waarden zijn gebaseerd op standaardprocessen die zijn gedefinieerd in de appendix. Aangenomen is dat de e-fuels voor de scheepvaart bestaan uit voor de helft e-methanol en de helft e-ammoniak. Zoals eerder genoemd is de huidige productie een stuk hoger dan het verbruik en de bunkering in Nederland; in deze cijfers is dus al een relatief kleinere bijdrage aan de scheeps- en vliegtuigbrandstoffen verondersteld dan nu het geval is. De

maxima en minima in deze figuur hangen samen met de verschillende trajecten voor de mobiliteitsvraag. De herkomst voor de koolstof die wordt gebruikt voor de synthetische kerosine en methanol is niet gespecificeerd; het kan een bijproduct zijn van de productie van biobrandstoffen of ingevuld door directe afvang van CO₂ uit de lucht (DAC), maar hier is geen rekening mee gehouden bij de elektriciteitsvraag.

Figuur 22

Vraag naar energiedragers voor alternatieve transportbrandstoffen vs. vraag van overige industrie



Bron: PBL

De blauwe staven zijn de totale vraag naar energie/grondstof van de industrie in het centrale traject inclusief niet-energetisch inzet, maar exclusief de alternatieve transportbrandstoffen. In groen is de vraag voor de productie van alternatieve transportbrandstoffen weergegeven, uitgaande van de volumescenario's beschreven in het TVKN-hoofdrapport. De elektriciteitsvraag in deze figuur is exclusief de benodigde elektriciteitsvraag voor groene-waterstofproductie ten behoeve van de transportbrandstofproductie. Zie Appendix voor onderliggende aannames, waaronder over de veronderstelde productieprocessen.

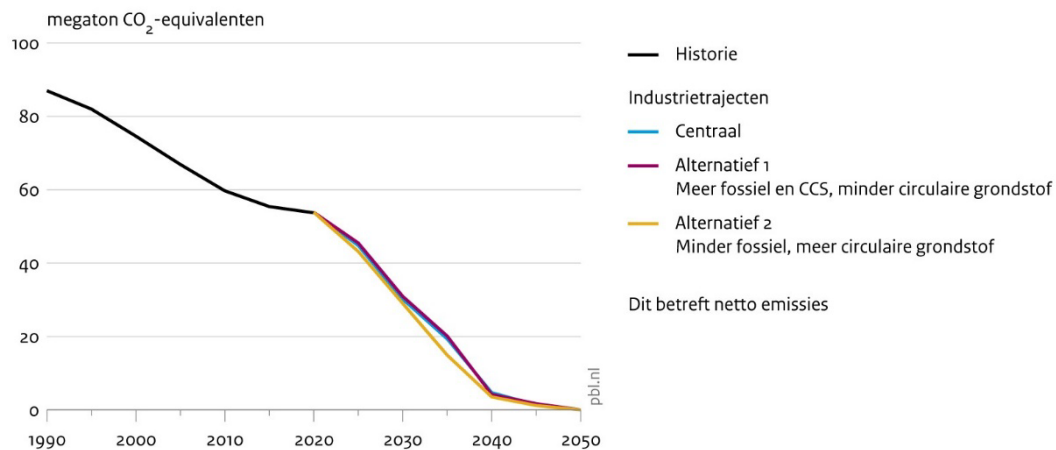
In de figuur hierboven zijn de blauwe staven de verwachte vraag naar elektriciteit, groene waterstof en biograndstoffen in het centrale traject voor de overige industrie, zoals eerder toegelicht. De directe elektriciteitsvraag voor de productie van hernieuwbare brandstoffen blijft nog relatief beperkt (linkerzijde van de figuur). De vraag naar biograndstoffen in 2050 wordt echter gedomineerd door de brandstoffenproductie. Ook de vraag naar waterstof is in potentie vergelijkbaar of zelfs groter dan de waterstofvraag van de rest van de industrie. Een vergelijkbaar beeld (met zo'n 100 TWh of 360 PJ waterstof in 2050) blijkt uit een recente studie naar een Europees waterstofnetwerk (Guidehouse, 2021). De potentiële omvang en aard van deze activiteit maakt dat het een zeer belangrijk en centraal onderdeel kan worden van de toekomstige industrie.

4.3 Uitstoot van broeikasgassen

De directe uitstoot van broeikasgassen van de industriesector in de drie trajecten is weergegeven in Figuur 23. De trajecten lopen qua uitstoot niet ver uiteen. In alle trajecten ligt de uitstoot in 2030 aan de onderkant van de bandbreedte van de raming in de Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022, waar de resterende uitstoot in 2030, volgens vastgesteld en voorgenomen beleid, tussen de 32 en 47 Mt CO₂-eq ligt. De totale uitstootreductie tussen 2021 en 2030 komt grosso modo overeen met de maximale reductie berekend in de Reflectie op Cluster Energiestrategieën (26 Mt in de industriesector; PBL, TNO en RVO, 2022). In de Voorjaarsbesluitvorming Klimaat van april 2023 werd uitgegaan van een indicatief doel in 2030 van 29,6 Mt CO₂-equivalenten (EZK, 2023). De trajecten zijn hiermee redelijk in lijn.

Figuur 23

Directe broeikasgasemissie in industrie



Bron: PBL

In alle trajecten wordt de uitstoot in 2050 gereduceerd tot ongeveer 0. In 2023 is het EU ETS aangescherpt met als gevolg dat er vanaf 2040 geen emissierechten worden verstrekt (Europees Parlement, 2022). We veronderstellen desondanks in alle drie de trajecten nog wat uitstoot na 2040. Dit is onder andere het deel van de industrie buiten het EU ETS, onder andere overige broeikasgassen en kleinere industrie. Daarnaast zijn er nog enkele megatonnen aan resterende emissies bij ETS-installaties. Dat zijn bijvoorbeeld meer verspreide emissies uit kleine bronnen en resterende uitstoot bij CO₂-afvang en -opslag, die zal moeten worden gecompenseerd door negatieve emissies.

Negatieve uitstoot bij nieuwe productieprocessen voor biobrandstoffen of biograndstoffen zijn in deze cijfers nog niet meegerekend vanwege de grote onzekerheid die het beeld op de bestaande industrie kan vertroebelen.

Negatieve uitstoot in de industrie

Er zijn verschillende mogelijkheden om in de industrie negatieve uitstoot te realiseren, allemaal op basis van inzet van biograndstoffen of biogas in combinatie met CCS (BECCS) (zie ook CE Delft, 2023a). Deze zijn:

1. Bij verbranding van afval (deels biogeen) en waterzuivering: 2 tot 6 Mt biogene CO₂ per jaar kan worden afgevangen en opgeslagen in 2050. Waterzuiveringen kunnen hierin een beperkte bijdrage leveren.
2. Bij stoomkrakers: in de trajecten wordt een deel van de grondstof vervangen door biograndstoffen. Er wordt tevens waterstof geproduceerd uit de restgassen, met toepassing van CCS. Dit kan leiden tot ongeveer 1 Mt biogene CO₂/jaar die in 2050 kan worden afgevangen en opgeslagen. Hierbij is nog niet meegerekend dat er mogelijk grote hoeveelheden CO₂ (meerdere megatonnen bij de huidige doorzet van de krakers) kunnen worden afgevangen bij de conversie van ruwe biograndstoffen tot krakergrondstof.
3. Fischer-Tropsch biobrandstoffen voor transport. Hierbij wordt vaste biograndstof vergast tot syngas, een mengsel van waterstof en koolmonoxide. Uit het syngas wordt middels een katalysator een mix aan vloeibare koolwaterstoffen geproduceerd, waaruit onder meer diesel en kerosine kan worden gedestilleerd. Bij dit proces komt zuivere biogene CO₂ vrij die permanent kan worden opgeslagen. Dit kan zorgen voor 100-120 kt negatieve emissie per PJ brandstofoutput (EBTP, 2012). Dat betekent dat er een zuivere stroom van CO₂ beschikbaar is van 13-23 Mt biogene CO₂/jaar in 2040 en 10-36 MtCO₂/jaar in 2050 (uitgaande van 130-220 PJ geavanceerde biobrandstofproductie in 2040 en 100-340 PJ in 2050, en 50% conversierendement). De biogene CO₂ kan worden ingezet voor CCS of als grondstof, bijvoorbeeld voor synthetische brandstoffen. Volgens de aannames in deze achtergrondstudie hebben synthetische koolwaterstoffen 1-7 MtCO₂/jaar nodig in 2040 en 5-12 MtCO₂/jaar in 2050. Dat zou dus slechts een deel van de vrijkomende CO₂ uit de biobrandstofproductie zijn.
Er lijkt dus een potentieel te zijn voor een tot enkele tientallen megatonnen CO₂ per jaar aan negatieve emissies bij biobrandstofproductie. Het potentieel is sterk afhankelijk van de omvang van de productie van biobrandstoffen en synthetische brandstoffen op internationale schaal, omdat ook internationale CO₂-stromen tot de mogelijkheden behoren (JRC, 2024).
4. Overige industrie: biograndstoffen of biogas als grondstof of energiedrager, in combinatie met CO₂-afvang. Negatieve uitstoot is bijvoorbeeld mogelijk bij de productie van staal, methanol, siliciumcarbide, carbon black (grondstof voor autobanden) en actieve kool. Ook vergistingsinstallaties kunnen biogene CO₂-stromen opleveren die kunnen worden afgevangen. We schatten het potentieel op de lange termijn op zo'n 1 tot 3 Mt biogene CO₂/jaar.

Alleen de eerste twee manieren zijn op dit moment opgenomen in de kwantitatieve trajecten in deze achtergrondstudie, omdat zij samenhangen met bestaande processen en er concrete plannen voor zijn, terwijl de anderen meer onzekerheden in zich hebben. Het derde punt wordt besproken in hoofdstuk 4.2.3.

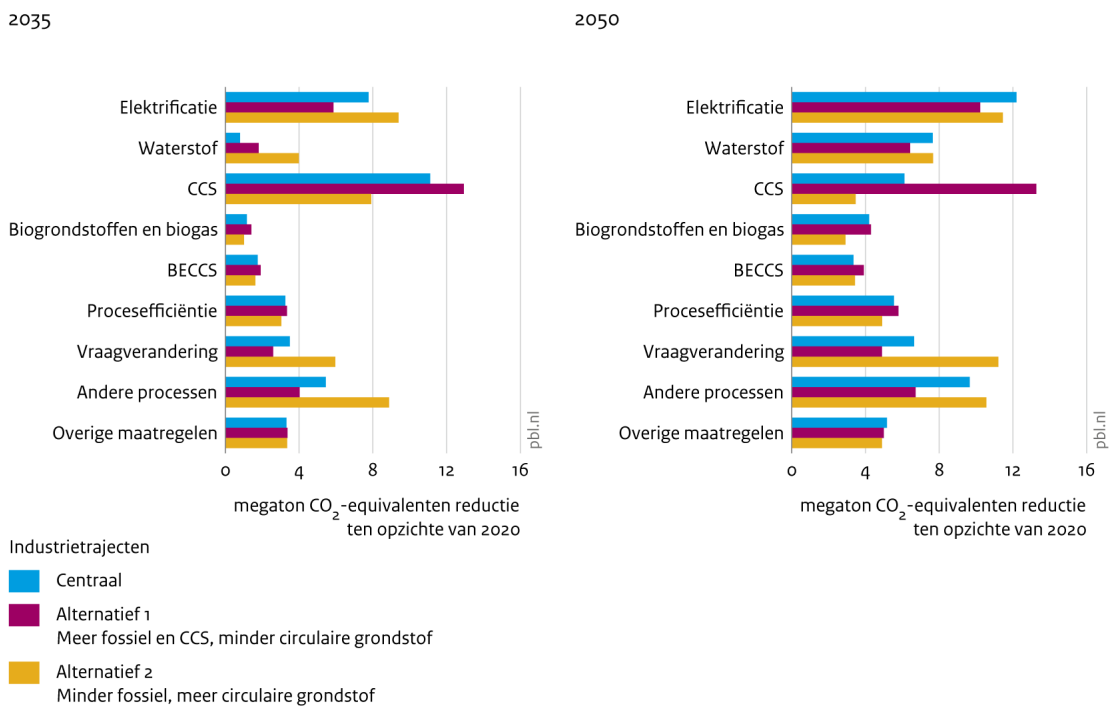
Tot slot: de opslagcapaciteit onder het Nederlandse deel van de Noordzee is begrensd. Deze wordt geschat op 1700 Mt (EBN, 2018); bij een tijdsduur van 100 jaar afvangen en opslaan van CO₂ zou dat dus gemiddeld 17 Mt per jaar zijn. Bij maximale inzet van CCS bij biobrandstofproductie en beperkte synthetische brandstofproductie komt deze jaarlijkse hoeveelheid (in combinatie met de hoeveelheid CCS in Figuur 24) al rond 2035 in beeld en wordt deze in 2050 ruim overschreden (zie ook het

TVKN-hoofdrapport, Daniëls en Strengers (2024)). Export van CO₂ naar opslagcapaciteit buiten Nederland is daarnaast ook een mogelijkheid die momenteel al wordt ontwikkeld.

Figuur 24 toont de maatregelen die per traject bijdragen aan de uitstootreductie, in zowel 2035 en 2050. Reductie die plaatsvindt doordat, in plaats van fossiel restgas, waterstof wordt verbrand is geclassificeerd als emissiereductie door waterstof als het groene waterstof betreft, en als CCS wanneer het waterstof betreft die is geproduceerd uit restgassen (bij toepassing van CCS). Per Mt CO₂ uitstootreductie door inzet van waterstof geproduceerd uit restgassen wordt ongeveer 0,9 Mt CO₂ afgevangen bij de waterstoffabriek (H-Vision, 2019).

Figuur 24

Reductiemaatregelen voor directe broeikasgasemissie in industrie



Bron: PBL

‘Andere processen’ is afschakelen van o.a. WKK’s, elektriciteitsproductie op basis van hoogovengas en het afschakelen van waterstoffabrieken uit aardgas.

‘Overige maatregelen’ betekent vermindering van de uitstoot bij gaswinning en afname van de hoeveelheid verbrand afval, en daarnaast maatregelen om de uitstoot van overige broeikasgassen te verminderen.

‘Vraagverandering’ betreft voor het overgrote deel de afbouw van de raffinagecapaciteit. Daarnaast is er een wat kleinere bijdrage van de organische basischemie en een kleine toename door groei van een aantal industriesectoren. Die groei is identiek in de drie industrietrajecten.

4.4 Investeringsen

Investeringsen voor nieuwe installaties bij industriële bedrijven – elektrische boilers en fornuizen, CO₂-afvanginstallaties, warmtepompen, waterstofbranders – lopen in de tientallen miljarden euro’s, uitgesmeerd over een periode van meer dan 25 jaar. Er zijn geen nauwkeurige schattingen bekend van meerkosten voor de inpassing van de installaties op het terrein (interne

elektriciteitsinfrastructuur, leidingen voor warmte en energiedragers, opslagtanks voor waterstof en CO₂). Deze inpassingskosten zijn daarom in deze schattingen niet meegenomen, maar kunnen zeer substantieel zijn. Het noemen van alleen de investeringen voor de installaties zelf is dus een onderschatting van de werkelijke kosten. Veel van de investeringen zijn echter niet een-op-een te verbinden aan verduurzaming; over een periode van meer dan 25 jaar zullen alle industriële bedrijven hoe dan ook forse bedragen investeren op eigen terrein, bijvoorbeeld voor onderhoud, vernieuwing of vervanging van bestaande installaties. Ter vergelijking: de investeringen in machines en installaties in de hele industriële sector (inclusief afvalverwerking) was tussen 2015 en 2019 volgens CBS zo'n 6,6 miljard euro per jaar, waarvan de voedingsmiddelenindustrie en de chemische industrie ieder zo'n 20% voor hun rekening namen (CBS, 2022).

Er is dan nog geen aandacht besteed aan investeringen buiten het hek van de bedrijven. Investerings in nieuwe en verzwaarde elektriciteitsnetten lopen in de tientallen miljarden euro's, hoewel deze ook voor andere sectoren dan de industrie nodig zijn (TIKI, 2020). Voor de waterstofinfrastructuur (inclusief opslag en regionale aftakkingen in clusters) wordt een investering van enkele miljarden euro's voorzien en voor CO₂-transportinfrastructuur zo'n een tot twee miljard euro (PBL, TNO en RVO, 2021). Onzekerder is de aanleg van warmtenetten op basis van industriële restwarmte. Ook zijn er investeringen nodig die te maken hebben met vraagverandering, bijvoorbeeld door geavanceerde recycling, aangepast design of hogere kwaliteitseisen voor langduriger productgebruik.

Kosten van decarbonisatie van de industrie in producten

Doorberekening van de kosten van decarbonisatie van de industrie in producten heeft slechts een beperkt effect. Klimaatneutrale materialenproductie betekent in 2050 meerkosten van 0,4% per huis, 0,5% per auto, 1% per flesje frisdrank door hogere productiekosten van de materialen, volgens Material Economics (2019) en IPCC (2022), maar voor sommige individuele bedrijven is de verhoging van de productiekosten wel aanzienlijk, tot meer dan een verdubbeling.

Dit komt doordat de meest emissie-intensieve productiestappen in de keten vaak niet de (productie)stappen zijn die de meeste toegevoegde waarde met zich meebrengen. Bij basisproducten als ruwijzer, ammoniak of ethyleen zijn de meerkosten voor verduurzaming relatief hoog, met name vanwege initiële investeringen.

Wanneer (buitenlandse) concurrenten die deze basisproducten produceren te maken hebben met minder kosten voor verduurzaming én er geen sprake is van compensatie van deze kosten in Nederland of de EU (een 'ongelijk speelveld', zie uitgangspunten in TVKN-hoofdrapport), is doorberekenen van de hogere kosten lastig. Het niet kunnen doorberekenen van deze meerkosten naar de directe afnemers brengt risico op weglek van activiteit en daarmee een beperkter effect op de mondiale uitstoot met zich mee.

4.5 Robuuste elementen in de trajecten

De trajecten zijn opgesteld met als uitgangspunt dat de broeikasgasuitstoot in 2050 nagenoeg nul is. Alle industriële sectoren reduceren op basis van dit uitgangspunt hun uitstoot in sterke mate in de periode tussen 2025 en 2040. Daarbij hoort een forse afname van het verbruik van aardgas en andere fossiele energiedragers.

In alle trajecten vindt op grote schaal elektrificatie plaats, voornamelijk door middel van warmtepompen en e-boilers bij lage- en middentemperatuurwarmte. Dat is vooral het geval bij de productie van papier, voedingsmiddelen en chemische producten. Op langere termijn vindt elektrificatie in alle trajecten ook plaats bij hoge-temperatuurfornuizen, in zowel de chemie en de raffinage als in de metaal- en bouwmaterialenindustrie.

Eveneens wordt in alle trajecten waterstof geproduceerd uit restgassen van raffinage en chemie (met afvang en opslag van CO₂), die wordt ingezet in fornuizen. Dit kan langdurig (tot na 2050) zijn, of slechts een overgangsfase naar ander gebruik van restgassen. We gaan er daarbij vanuit dat er restgassen beschikbaar blijven, ook na de overgang naar niet-fossiele grondstoffen.

Afvang en opslag van CO₂ (CCS) in Rotterdam (raffinage, chemie), Zeeland (raffinage, kunstmest en stikstofverbindingen) en Chemelot (kunstmest en stikstofverbindingen) is ook een robuust element. Het gaat bij deze activiteiten met name om ammoniakproductie uit aardgas en waterstofproductie uit zowel nieuwe productie op basis van restgassen als bestaande installaties op basis van aardgas, maar ook bij kleinere bedrijven met moeilijk vermijdbare procesemissies. Ook bij afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) is het afvangen en opslaan van CO₂ een waarschijnlijke route. Daarbij is ook sprake van negatieve uitstoot, door afgevangen CO₂ uit het biogene deel van het afval op te slaan.

Groene waterstof kan in de waterstof vervangen die als grondstof in de chemie (o.a. kunstmest, methanol) en bij de brandstoffenproductie wordt gebruikt. Het is minder zeker in hoeverre groene waterstof ook voor ondervuring gebruikt zal worden; dit hangt sterk af van de haalbaarheid van de elektrificatie van fornuizen en de kosten en beschikbaarheid van groene waterstof ten opzichte van elektriciteit. Zie meer hierover in de achtergrondstudie over waterstof (Elzenga en Strengers, 2024) en de TVKN-hoofdrapportage (Daniëls en Strengers, 2024) waarin het integrale beeld wordt geschetst van het gehele energiesysteem.

Een toename van mechanische recycling en korte-keten chemische recycling van plastics is ook robuust, vanwege (Europees) beleid en efficiënte omgang met koolstof. Dit zal leiden tot een relatieve afname van de productie van basischemicaliën voor plastics. De productie van alternatieve, niet-fossiele brandstoffen en grondstoffen (uit duurzame biograndstoffen, koolstofhoudende reststromen en groene waterstof) kan een grote en centrale rol gaan spelen in de industrie. Het is echter nog onzeker in welke vorm en tot welke omvang deze industrietak zich zal ontwikkelen, en in hoeverre dit in Nederland of elders zal plaatsvinden.

5 Huidig en aanvullend beleid

In dit hoofdstuk onderzoeken we wat de belangrijkste aandachtspunten zijn om de industrietransitie voorbij 2030 te stimuleren en te helpen middels beleidsinstrumenten. Daartoe beginnen we met een korte beschrijving van industriebeleid in het algemeen en de ontwikkeling van klimaatbeleid voor de industrie. Daarna benoemen we een aantal knelpunten die opkomen wanneer we het beleid vergelijken met de hiervoor beschreven trajecten naar een klimaatneutrale industrie, en beschrijven we hoe deze knelpunten zouden kunnen worden geadresseerd.

5.1 Industriebeleid in het algemeen

Van oudsher is industriebeleid erop gericht om de industrie concurrentievoordelen of in ieder geval geen concurrentienadelen te laten ondervinden ten opzichte van het buitenland. Al decennia lang worden er uiteenlopende strategieën gebruikt, zowel op Nederlands als Europees grondgebied, om betere randvoorwaarden voor de industrie te scheppen. De opkomst van milieu-, klimaat- en energiebeleid heeft ervoor gezorgd dat er additionele randvoorwaarden worden geformuleerd waarbinnen de industrie mag opereren (Europees Parlement, 2022a). Industriebeleid in het kader van de energietransitie kan daarom worden gezien als een combinatie van traditioneel industriebeleid met klimaat- en milieubeleid. Het beleid dat onder deze combinatie geformuleerd wordt heeft als doel de innovatiecapaciteit van de economie te vergroten, economische ontwikkeling en werkgelegenheid te genereren, en dit binnen acceptabele en eerlijke maatschappelijke kaders uit te voeren. Industriebeleid wordt toegepast om comparatieve voordelen te benutten en situaties met ongelijke marktwerking te corrigeren (Hallegatte et al., 2013).

Over het algemeen is er een voorkeur om de aanbodkant te reguleren via industriebeleid, en is er minder focus op de vraagkant (Chang and Andeoni, 2016). Wereldwijd zijn vooral financiële handelsbeleidsinstrumenten en subsidies de meest beeldbepalend instrumenten geweest om de industriële sector te sturen. Daarnaast is overheidsingrijpen meer gebruikelijk geweest binnen de sectoren met een gevestigde internationale markt (met name de zware industrie en de hightech) (Juhász et al., 2022). Ook in Nederland is dit het geval geweest, waarbij nadruk gelegen heeft op het ondersteunen van de gevestigde partijen (Truijens et al., 2021).

5.2 Klimaatbeleid voor de industrie

Klimaatbeleid voor de industrie in Nederland vindt zijn oorsprong in het energiebeleid. In 1995 werd door de regering voor het eerst als taak gesteld om broeikasgasemissies te reduceren (Boot, 2020).

5.2.1 Beprijzing van uitstoot

Beprijzing van broeikasgasuitstoot wordt gezien als effectief klimaatbeleid (OECD, 2021; CPB & PBL, 2023), en vanwege internationale concurrentie-aspecten ligt hierbij een internationale aanpak voor de hand. Het is daarom niet verrassend dat beprijzing van broeikasgasuitstoot op Europees niveau is begonnen met het emissiehandelssysteem EU-ETS in 2003. Het EU-ETS zet een maximum op de

CO₂-uitstoot van grotere installaties in de industrie en elektriciteitsproductie, door het verstrekken van verhandelbare rechten. Ook sommige installaties met uitstoot van broeikasgassen anders dan CO₂ zijn later onder het ETS gebracht. Een voorbeeld hiervan is de uitstoot van distikstofoxide bij salpeterzuurfabrieken in 2008. Ook delen van de lucht- en scheepvaart zijn of worden ondergebracht bij het ETS.

De prijs van emissierechten in het ETS was na invoering lange tijd laag, met 5 tot 15 euro per ton CO₂ tussen 2009 en 2018 maar mede door een aantal systeemaanpassingen liep deze op tot zo'n 25 euro in 2019 en gemiddeld 80 euro in 2022. Sindsdien bleef de prijs enkele jaren op dat niveau, al zakte hij begin 2024 terug naar ongeveer 60 euro. In 2023 is het ETS aangepast om de jaarlijkse reductie van het aantal emissierechten te versnellen, met als gevolg dat het aantal rechten in het ETS rond 2040 op nul zou uitkomen. In aanvulling hierop is voor een aantal emissie-intensieve producten een 'koolstofcorrectie aan de grens' (*Carbon Border Adjustment Mechanism*, CBAM) ingesteld, om te voorkomen dat de concurrentiepositie van Europese emissie-intensieve bedrijven zou verslechteren ten opzichte van concurrenten in landen met minder emissiebegroting. Het aantal gratis verstrekte rechten zal begin jaren '30 naar 0 gaan.

Nationaal emissiebegrotingsbeleid voor de industrie kwam pas bij het Klimaatakkoord in 2019, toen een oplopende CO₂-heffing boven op het ETS werd ingesteld, in combinatie met de uitbreiding van SDE++-subsidie voor industriële emissiereductietechnieken. De heffing geldt alleen voor industriële ETS-bedrijven en afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) en loopt op tot bijna 129 euro per ton in 2030. Voor de bedrijven die onder het ETS vallen wordt de ETS-prijs hiervan afgetrokken. De heffing is alleen van toepassing over het deel van de emissies dat boven het reductiedoel ligt. In combinatie met het ETS is er voor dit deel van de uitstoot van de industrie, dat is ongeveer 84% van de directe industriële emissies, dus sprake van begroting (PBL, 2021a). Voor een beperkt deel van de industrie, met name de kleinere ETS-installaties en niet-ETS-bedrijven leidt ook de belasting op aardgas, waarin per 2023 ook de Opslag Duurzame Energie is opgenomen, tot substantiële emissiebegroting, omdat verbruik van aardgas direct samenhangt met CO₂-emissie. Voor de AVI's worden de emissies tot slot begrotd via de belasting op afvalverbranding en afvalstort, omdat verbranding van afval (zonder CCS) leidt tot CO₂-emissies (1,04 kg CO₂ per kg afval). Met dit alles wordt een groot deel van de directe emissies van de industrie – weliswaar in verschillende mate – begrotd. Overigens leiden de energiebelasting en de afvalstoffenbelasting niet tot stimulering van alle emissiereducerende maatregelen (met name CCS wordt daarmee niet gestimuleerd).

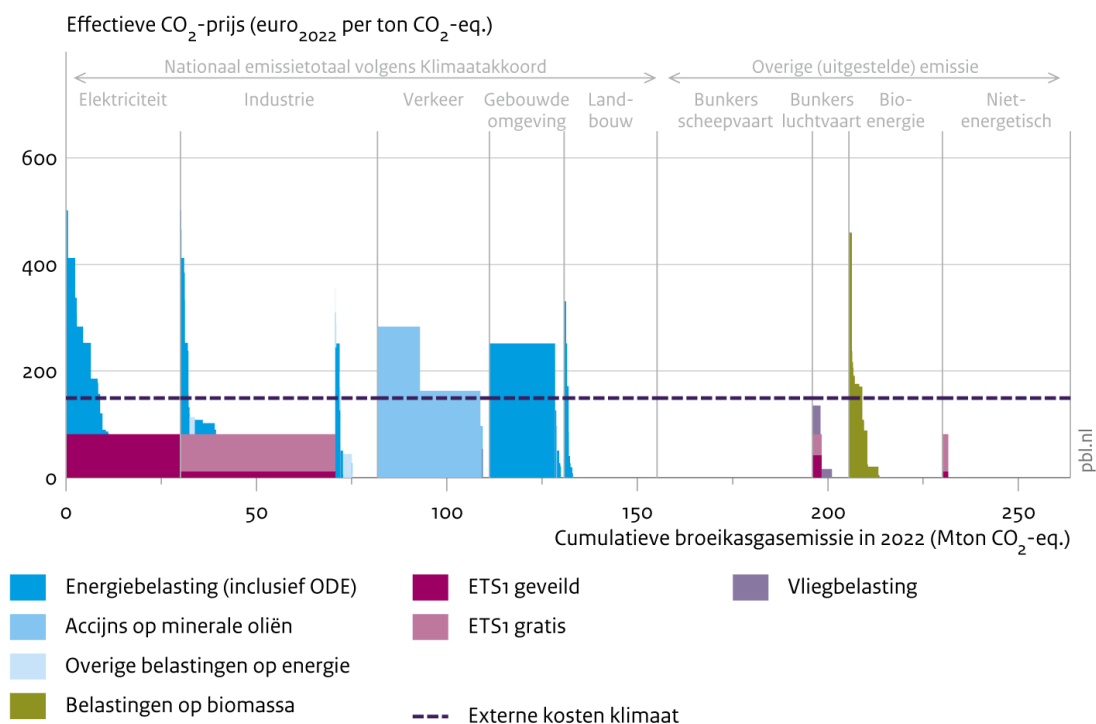
Figuur 25 (overgenomen uit PBL, 2024) toont de begroting met de verschillende genoemde instrumenten per sector. We kijken hier alleen naar het deel dat betrekking heeft op de industrie. Voor de energiebelasting op aardgas zijn de vier verschillende aardgasverbruiksschijven getoond, die van toepassing zijn op bedrijven die onder het ETS vallen. Grootverbruikers, waaronder de meeste ETS-bedrijven, hebben een aardgasverbruik dat alle schijven bestrijkt. Voor sommige kleine industriële bedrijven is voor al het aardgasverbruik de eerste schijf van toepassing. De schijven hebben een aflopend belastingtarief, dat voor de figuur is omgerekend naar euro's per ton uitgestoten CO₂. Voor het ETS wordt het grootste deel van de rechten gratis verstrekt aan bedrijven, terwijl een klein deel wordt geveild. Omdat er een liquide markt is in emissierechten blijft de beleidsprikkel van het ETS om emissies te reduceren gelijk aan de ETS-prijs. Deels wordt de ETS-prijs echter wel doorberekend in de producten, ongeacht of ze worden betaald, waardoor het verstrekken van gratis rechten een economische overdracht van publieke middelen naar het bedrijfsleven vormt. De nationale CO₂-heffing is op alle industriële ETS-bedrijven van toepassing, maar zolang deze lager is dan de ETS-prijs is deze effectief nul. Dit was het geval in 2022 en 2023. Deze heffing is ook van toepassing op

de AVI's, die geen deel uitmaken van het ETS. De afvalstoffenbelasting heeft betrekking op de hoeveelheid afval en is omgerekend naar uitstoot op basis van de gemiddelde emissiefactor van afval.

De eerste schijf van de energiebelasting op aardgas (dat zijn de hoogste pieken in Figuur 25) komt overeen met de hoogste effectieve prijs per ton CO₂, van ruim 300 euro per ton. Op slechts een klein deel van de emissies van de industrie is deze van toepassing, omdat verreweg het meeste aardgasverbruik van grootverbruikers in de vierde verbruiksschijf valt, die overeen komt met een effectieve CO₂-prijs van zo'n 20 euro per ton CO₂. Een aanzienlijk deel van de emissies van de industrie komt door verbranding van restgassen uit olie in de raffinage en chemie of kolen bij staalproductie, waarover geen energiebelasting wordt geheven en dus slechts het ETS van toepassing is. Een klein deel van de industriële emissies wordt helemaal niet betaald. Dit zijn met name emissies van overige broeikasgassen, bijvoorbeeld methaan uit stortplaatsen of bij aardgaswinning of -transport.

Figuur 25

CO₂-beprijzing van broeikasgasemissie op basis van tarieven 2022



Bron: PBL

Alleen de directe emissies (scope 1) zijn getoond. De prijzen zijn gestapeld. De verschillende niveaus van de energiebelasting vertegenwoordigen de aardgasverbruiksschijven. Voor de energiebelasting is het aardgasverbruik per belastingsschijf uit 2020 gebruikt.

Een gebrek aan beprijzing, zoals fiscale vrijstellingen voor fossiele energie, wordt doorgaans aangeduid als fossiele (energie)subsidie. De transitie naar klimaatneutraliteit wordt in beginsel bevorderd door afschaffing van dergelijke fossiele-energiesubsidies. De vraag is echter per regeling in hoeverre afschaffing van dergelijke regelingen al dan niet bijdraagt aan de energietransitie (CPB & PBL, 2023).

5.2.2 Subsidies

CO₂-emissiereductie wordt gestimuleerd door SDE++-subsidies voor industriële processen. Deze worden verstrekt voor technisch marktrijpe technologieën met een onrendabele top. De SDE++ is opgedeeld in categorieën, zoals CCS en elektrificatie. Voor een aanzienlijk deel van de industrie zijn alleen technische oplossingen toepasbaar waarvoor geen SDE++-subsidie beschikbaar of bereikbaar is. Door de hogere ETS-prijs is de omvang van de benodigde SDE++-subsidie kleiner geworden dan deze in het verleden begroot was, maar de SDE-systematiek biedt nog altijd een financiële garantie die voor bedrijven het risico's van de investeringen beperkt. Naast de SDE++-exploitatie subsidie voor marktrijpe technologie zijn er ook diverse innovatieregelingen bedoeld voor onder andere de verduurzaming van industriële processen (VEKI, MOOI, DEI¹). Begin 2024 werd gewerkt aan de Nationale Investeringsregeling Klimaatprojecten Industrie (NIKI), waarin een breder palet aan technieken wordt ondersteund dan de technieken die kans maken in de SDE++. Ook faciliteert de overheid door middel van het Programma Infrastructuur voor een Duurzame Industrie (PIDI) de aanleg van energie-infrastructureur via het Meerjarenprogramma Infrastructuur Energie en Klimaat (MIEK). Het kabinet werkt aanvullend aan bindende maatwerkafspraken met grote industriële uitstoters, om additionele emissiereductie te bewerkstelligen in samenhang met andere factoren zoals reductie van stikstofemissies. De maatwerkafspraken en verschillende regelingen zoals NIKI en VEKI worden gefinancierd vanuit het Klimaatfonds, waar een perceel van circa 3 miljard euro is gereserveerd voor de verduurzaming van de industrie en innovatie in het mkb (PBL, 2023c).

5.2.3 Overig beleid

Beleid voor energiebesparing bij de energie-intensieve industrie kwam op in de jaren '90, zowel op Europees als op nationaal niveau. De Europese Unie (destijds Europese Gemeenschap) verplichtte in de SAVE-richtlijn energie-audits van bedrijven. In Nederland zorgden vanaf 1992 meerjarenafspraken met energie-intensieve bedrijven voor energiebesparing, die later werden ingebed in het Energieakkoord uit 2013. De meerjarenafspraken liepen af in 2020 toen de CO₂-heffing werd geïntroduceerd. De bestaande energiebesparingsplicht uit de Wet Milieubeheer, die bedrijven verplicht energiebesparingen met een terugverdientijd van 5 jaar uit te voeren, is per 2023 uitgebreid zodat ook de ETS-bedrijven eronder vallen. Verder is er ook een Europese energiebesparingsrichtlijn die op een aantal punten nadere eisen stelt aan efficiency, absoluut verbruik en procedurele zaken.

Relatief nieuw is technologie-specifiek klimaatbeleid voor de industrie. Waterstof is een grondstof en energiedrager met een grote potentie in de industrie, en vrijwel alle studies veronderstellen een toename van de waterstofvraag in de industrie. Zowel de Europese Commissie als de Nederlandse overheid zetten specifiek in op opschaling van het groene-waterstofgebruik en elektrolysecapaciteit. Zo stelt de Europese Commissie in de herziene hernieuwbare energierichtlijn (RED) de verplichting voor dat in 2030 tenminste 42% van de gebruikte waterstof in de industrie hernieuwbaar en van niet-biogene oorsprong is. De raffinagesector is hiervan uitgezonderd, al is daar een vergelijkbare eis uit de RED van toepassing, die samenhangt met de mobiliteitssector. Productie van waterstof uit restgassen zal geen deel uitmaken van de berekening van dit percentage en mogelijk wordt er ook voor specifieke ammoniakfabrieken een uitzondering gemaakt (Reuters, 2023; Europese

¹ VEKI = Versnelde Klimaatinvesteringen Industrie, MOOI = Missiegedreven Onderzoek, Ontwikkeling en Innovatie, DEI = Demonstratie Energie-Innovatie.

Commissie, 2023a). In de beschreven trajecten in deze achtergrondstudie is nog geen rekening gehouden met deze eis. Afhankelijk van de precieze scope van de eis is het mogelijk dat de inzet van groene waterstof als grondstof en mogelijk ook als brandstof in de industrie zal toenemen.

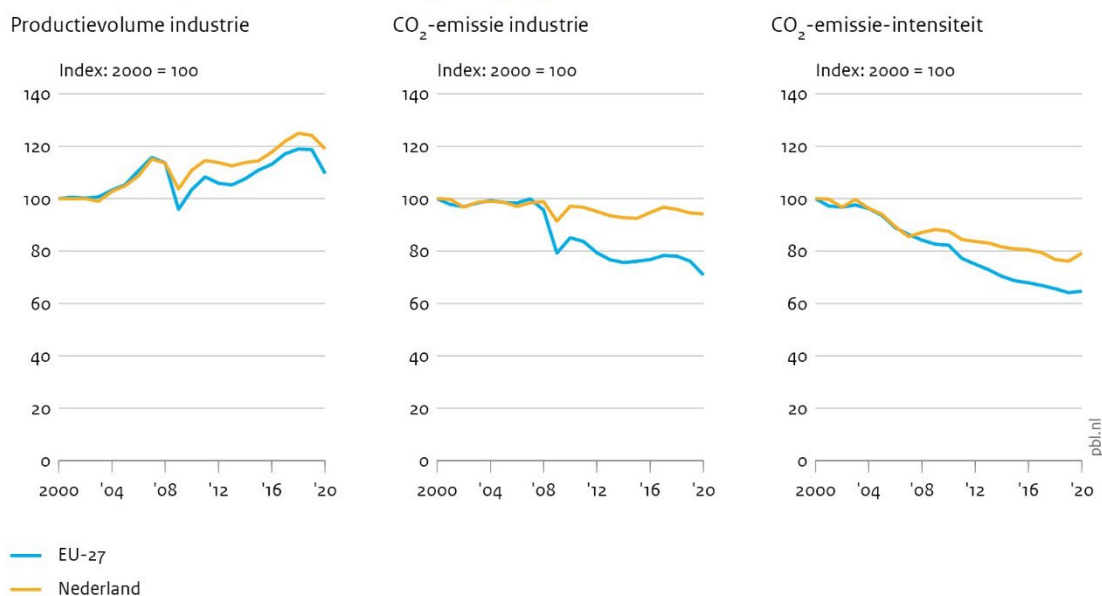
Voor sommige sectoren of materiaalstromen bestaan al beleidsmaatregelen om de transitie naar circulair materiaalgebruik te bevorderen, bijvoorbeeld voor de recycling van plastics. Op EU-niveau zijn er al verschillende producteisen, met name voor verpakkingen (zie ook hoofdstuk 2). In Nederland heeft het kabinet in april 2023 een voorstel gedaan voor een gebruikseis van ten minste 25-30% recyclelaat en biograndstof bij de productie van plastics voor Nederlands gebruik voor 2030. Breder gezien is er de laatste jaren weinig ontwikkeling in circulair materiaalgebruik, waaronder de samenstelling van grondstoffen in de industrie (zie ook PBL (2023)).

5.2.4 Ontwikkeling industrie-uitstoot

Mede door het klimaatbeleid voor de industrie is de broeikasgasuitstoot van de Europese en Nederlandse industrie in de laatste decennia gedaald, terwijl productievolumes zijn toegenomen (zie Figuur 26 voor alleen de CO₂-emissies, die beter verband houden met de industriële processen). De afname van emissie-intensiteit is niet of nauwelijks samengegaan met (verdere) verplaatsing van activiteit naar andere landen (zie bijvoorbeeld PBL (2021b) en Global Carbon Project (2021)).

Figuur 26

De emissie-intensiteit in de industrie is gestaag afgenomen



Bron: Eurostat

Bron: UNFCCC

Bron: UNFCCC/Eurostat

De geproduceerde volumes van de industrie zijn afgelopen decennia iets toegenomen, terwijl de CO₂-emissies afnamen. De emissie-intensiteit nam dus af, in de EU meer dan in Nederland, al is deze door een andere structuur niet volledig vergelijkbaar (CBS, 2018). Alleen CO₂-emissies zijn hier getoond omdat deze meestal direct verband houden met de energievoorziening van de productieprocessen; overige broeikasgassen zijn buiten beschouwing gelaten. Scope is (maak)industrie, inclusief raffinage, exclusief afval.

De Klimaat- en Energieverkenning 2023 (KEV; PBL, 2023b) geeft een raming van de broeikasgasemissies voor 2030, op basis van het vastgestelde, voorgenomen en geagendeerde beleid. De KEV 2023 schat in dat de emissies van de industrie dalen van ongeveer 50 megaton CO₂-equivalenten in 2022 naar zo'n 27-42 megaton CO₂-equivalenten in 2030, ofwel een afname van ongeveer 1 tot 2,9 megaton CO₂-equivalenten per jaar tussen 2022 en 2030. Bij het behalen van de onderkant van de bandbreedte van de emissies in 2030 en voortzetting van dit tempo komt klimaatneutraliteit in 2040 al binnen bereik, terwijl het midden van de bandbreedte resulteert in klimaatneutraliteit net voor 2050. Klimaatbeleid voor de industrie voor na 2030 is nog zeer beperkt, afgezien van de werking van de ETS-prijs.

Voor veel sectoren moet de technologie en energie-infrastructuur nog verder worden ontwikkeld. Het is dan ook mogelijk dat veel laaghangend fruit al is geplukt of komende jaren wordt geplukt, en de lastigere emissiebronnen zullen overblijven die verdere emissiereductie bemoeilijken. Daarnaast is specifieke aandacht nodig voor de emissiebronnen waarvoor geen alternatieven op korte termijn beschikbaar zijn, omdat het voor deze bronnen lastig kan worden om op tijd volwassen alternatieven te hebben op voldoende grote schaal die de bestaande productie kan vervangen of broeikasgasemissievrij kan maken. Ook compensatie van deze restemissies door middel van negatieve emissies kan deel uitmaken van het pad naar klimaatneutraliteit.

5.3 Mogelijke knelpunten en denkrichtingen voor oplossingen

In dit document zijn drie trajecten beschreven. Dat doet wellicht vermoeden dat er expliciete keuzes te maken zijn die bepalen volgens welke de transitie van de industrie verloopt. Dit is echter slechts in beperkte mate het geval. De toekomst van de industrie zal sterk afhangen van ontwikkelingen in de technologie, beschikbaarheid en kosten van energiedragers en specifieke voorkeuren van de internationaal georiënteerde marktpartijen. Desondanks zijn er aanvullingen denkbaar die mogelijke knelpunten van huidig beleid kunnen oplossen en daarmee de transitie in de industrie versnellen of verder vormgeven.

Beprijzing middels het Europese emissiehandelssysteem ETS is de basis van het industriebeleid, maar niet per se voldoende voor het bereiken van klimaatneutraliteit. Het systeem kan worden uitgebreid en aangevuld met ander beleid om de kans op het halen van klimaatneutraliteit te vergroten.

Enkele voorbeelden zijn:

- Afvalverbrandingsinstallaties kunnen worden toegevoegd aan het ETS om een bestendige prikkel te geven ook hun emissies te verlagen. In 2022 is door het Europees Parlement voorgesteld om de afvalverbranding per 2028 onder het ETS te brengen en de Commissie zal hiervoor een voorstel doen (Afvalonline, 2022). Er moet wel worden ondervangen dat afvalstort of -export niet als uitwijkmogelijkheid wordt gebruikt.
- Negatieve emissies kunnen worden beloond, al dan niet via het ETS. Dit maakt de uitstoot van biogene CO₂ minder aantrekkelijk en maakt de productie van biobrandstoffen en biograndstoffen – die sowieso nodig zijn vanwege de bijmengverplichtingen in bijvoorbeeld de transportsector – meer en sneller rendabel (Van Geest et al., 2021).

- Voor de verschillende bronnen van overige broeikasgassen (methaan, lachgas, F-gassen) kan normering worden ingevoerd, liefst in Europees verband. Voor F-gassen gebeurt dit al (Europese Commissie, 2023).
- Voor niet-ETS-bedrijven kan elektrificatie worden gestimuleerd door de belasting op elektriciteit te verlagen, in lijn met de dalende emissie van elektriciteitsproductie (CPB & PBL, 2023).

Beprijzing via het ETS heeft wel enkele risico's in zich:

- Het zorg ervoor dat het eerst wordt geïnvesteerd in de goedkoopste emissiereductie. Dit leidt tot uitstel van moeilijke en dure emissiereductieopties. Dit vergroot het al bestaande risico op het afzakken van het beleid wanneer het afnemende ETS-plafond te veel gaat knellen, waardoor de moeilijke opties nog verder worden uitgesteld (Acworth et al., 2017).
- Het ETS geeft producenten weinig prikkel tot verduurzaming en hergebruik van grondstoffen, wanneer de koolstof in de producten wordt opgenomen. Daardoor is het niet of nauwelijks lonend om de impact van de fossiele productieketen te beperken.

Enkele specifieke aanvullingen op het ETS noemen we hieronder.

Stimuleer materiaalefficiëntie en gebruik van afval als grondstof middels normering. Dit vermindert het beslag op grondstoffen en (fossiele of CO₂-arme) energie vermindert. Ook het verlengen van de levensduur van producten en het op andere wijze invullen van dezelfde behoeften met minder materiaal moet worden gestimuleerd. Het huidige systeem van volumedoelen voor afval en instrumenten, zoals de Uitgebreide Producentenverantwoordelijkheid (UPV), geeft nog onvoldoende prikkels om in het ontwerp, de productie en het gebruik van producten minder grondstoffen te gebruiken of om een langere levensduur van producten te bevorderen (PBL, 2023). Belangrijke kanttekening hierbij is het internationale karakter van de productieketens, waardoor de nationale consumptie en nationale productie voor de meeste ketens niet direct met elkaar verbonden zijn. Een lagere nationale materiaalconsumptie heeft echter op mondiale schaal hoe dan ook een kleiner beslag op hulpbronnen en een kleinere milieudruk tot gevolg.

De stimulering van afval als grondstof kan op de volgende manieren:

- Zorg voor juiste prikkels (middels normering) bij de maakindustrie om producten modulair en recyclebaar te maken en de levensduur te verlengen (PBL, 2023).
- Hanteer recycleatseisen in de vorm van oplopende 'bijmengpercentages' voor plastics en andere niet-energetisch ingezette koolwaterstoffen. Dit zorgt voor een stabiele markt voor het toepassen van afval als grondstof (CE Delft, 2022) Het kabinet Rutte-IV heeft hier in 2023 al een voorstel voor heeft gedaan (EZK, 2023). Dit kan worden uitgebreid naar de langere termijn en naar meer productgroepen, liefst op Europees niveau.
- Stimuleer zo hoogwaardig mogelijke recycling door aangrijppunt van de recycleatseisen op een punt in de keten te leggen, zodat ook mechanische recycling in aanmerking komt (CE Delft, 2022). Investeer ook in het verbeteren van sorteertechnologie om zo zuiver mogelijke afvalstromen te bereiken.
- Behandel koolwaterstoffen als grondstof niet anders dan als brandstof (zoals 'recycled carbon fuels' in de RED), conform het advies van de SER (2022).
- Geef ruimte (zowel fysiek als in regelgeving) aan het gebruik van (geïmporteerd) recycleaat (bijvoorbeeld in de vorm van pellets of pyrolyse-olie) in de industrie.
- Ook het voorkomen van emissies gerelateerd aan fossiele grondstof kunnen worden geadresseerd. Overweeg de invoering van een instrument dat ervoor zorgt dat de productie of import van fossiele brandstoffen samengaat met de verplichting om de vrijkomende CO₂ bij toepassing ervan op te slaan. Dit kan bijvoorbeeld middels een *carbon takeback*

obligation (Kuijper et al., 2021). Een dergelijk instrument zorgt voor een gelijk spelveld van circulaire grondstoffen en brandstoffen met fossiele alternatieven. Verder kan het aanvulling zijn op het EU ETS, met name daar waar de CO₂ niet direct vrijkomt. Wanneer de opschaling van alternatieven voor fossiele grondstoffen tegenvalt, kan het er ook voor zorgen dat emissiereductie toch doorgaat.

Elektrificatie heeft diverse voordelen boven CCS, verbranding van waterstof en biograndstof: het is efficiënter en leidt doorgaans tot minder uitstoot van NO_x en fijnstof, en minder landgebruik. Normering van elektrificatie voor bepaalde toepassingen (bijvoorbeeld bij lage-temperatuurwarmte) in combinatie met lage nettarieven en voortvarende infrastructuur aanleg kan opschaling bevorderen. Daarnaast kan het ook helpen om middels de structuur van aansluittarieven industriële bedrijven te stimuleren om flexibel gebruik te gaan maken van het elektriciteitsnet. Dit kan financieel voordeel opleveren voor bedrijven, investeringen in energieopslag stimuleren en zorgen dat netten efficiënter worden gebruikt.

Actievere rol van de overheid bij innovatie en technologie-ontwikkeling helpt bij de nodige emissiereducties en kan daarnaast zorgen voor toekomstig verdienvermogen.

- Initieer of haak aan bij onderzoek en internationale initiatieven voor pilots en demonstraties, bijvoorbeeld als het technieken betreft die opschaling vereisen, zoals elektrolyzers, elektrische verwarming, warmtepompen en CO₂-afvangtechnologie betreft. Andere landen staan voor dezelfde uitdaging. Het kan lonen om innovatietrajecten samen met andere landen te ondersteunen om versnelling te bewerkstelligen.
- Ook door normering of standaardisering kan innovatie op effectieve wijze worden versneld (Rosendaal en Vollebergh, 2022), omdat dit zorgt dat innovaties worden afgedwongen. Dit is met name relevant voor de breder toepasbare technologieën, bij bedrijven die kosten relatief makkelijk kunnen doorberekenen. Dit geldt bijvoorbeeld voor energie- en materiaalbesparingstechnieken en, in sommige situaties, elektrisch verwarmen. Ook voor grondstoffen (zoals de eerder genoemde plastics) kan dit bijdragen aan innovatie.
- Voor specifieke technieken of projecten die op lange termijn als wenselijk worden beschouwd maar commercieel moeilijk van de grond komen, bijvoorbeeld door lange doorlooptijden of grote complexiteit, kunnen specifiek door de overheid worden gestimuleerd. Voorbeelden hiervan zijn hernieuwbare technologieën zoals geothermie, of complexe restwarmteprojecten met veel partijen. Het kan ook lonen wanneer de overheid voor dergelijke projecten de coördinatie op zich neemt, bijvoorbeeld via een staatsbedrijf of tender.

De kans op verplaatsing van industriële activiteit naar buiten Nederland is aanwezig maar is niet bevorderlijk voor reductie van de mondiale uitstoot. Fabrieken buiten de EU zijn vaak vervuilender dan die binnen de EU (JRC, 2023) en de uitstoot is daar meestal ook minder gereguleerd. CBAM speelt een belangrijke rol bij het beperken van weglek van emissies, maar werkt slechts ter voorkoming van ETS-gerelateerde weglek uit de EU, en geeft geen bescherming voor bijvoorbeeld prijs- of belastingverschillen tussen landen. ‘Climate clubs’ van (groepen) landen met vergelijkbare beprijzing waar onderling geen aanvullende drempels worden opgeworpen kunnen voor CBAM een aanvulling zijn (Umwelt Bundesamt, 2022).

Enkele andere aspecten die de verplaatsing van industriële activiteiten kunnen beperken zijn:

- Normering van emissie-arm geproduceerde materialen (zoals de eerder genoemde normering voor plastics, maar dit kan ook voor bijvoorbeeld staal, kunstmest, etc.) kunnen zorgen voor concurrentievoordelen voor voorlopers in de transitie naar klimaatneutrale

industrie. De kans op dumping door vervuilende industrie van buiten Europa (bij niet-CBAM-productgroepen) wordt daarmee ook kleiner.

- Het versnellen van de aanleg van energie-infrastructuur op een pro-actieve wijze is nodig. Immers, álle bedrijven met een nul-emissieplan hebben een duidelijk uitzicht nodig op beschikbaarheid van de benodigde energie-infrastructuur, ruim voor 2040. Deze opgave kan moeilijk worden onderschat (Netbeheer Nederland, 2023; SER, 2024);
- Specifieke prioriteit (ruimte/arbeid/geld/infrastructuur) is nodig voor nieuwe technologie (hernieuwbare brandstoffen, recyclaat, elektriciteitsproductie en -opslag). Dit kan ook helpen om investeringen in nieuwe industrie aan te trekken (SER, 2024).

De overheid doet er goed aan om in de mix van beleidsinstrumenten ook **andere maatschappelijke opgaven** dan de klimaatopgave mee te wegen. Voor de industrie gaat het hierbij om onder meer strategische onafhankelijkheid en invloed op kwaliteit van natuur, water, bodem en gezondheidseffecten. Strategische onafhankelijkheid kan worden gewaarborgd wanneer de overheid een visie ontwikkelt welke industrie strategisch belangrijk en is en specifieke aandacht verdient. Behoud van natuurkwaliteit kan worden gewaarborgd door strikte normering en/of beprijzing en handhaving van milieu-emissies en duurzaamheidsvoorwaarden van biograndstoffen die steeds meer zullen worden gebruikt. Daarnaast is het voor maatschappelijk draagvlak én investeringszekerheid belangrijk om te verkennen onder welke voorwaarden industriële bedrijven op lange termijn een functie hebben binnen de duurzame maatschappij. Het gaat daarbij niet alleen om fabrikanten van productgroepen die in omvang zullen afnemen (zoals aardolieproducten), maar juist ook om productgroepen die in de toekomst zullen groeien (zoals biobrandstoffen en recyclaat). Op basis van deze voorwaarden is het mogelijk om langjarig en voorspelbaar overheidsbeleid te voeren.

Referenties

- Acworth, W. et al. (2017). Emissions Trading and the Role of a Long-run Carbon Price Signal. Achieving Cost-effective Emission Reductions under an Emissions Trading System. ICAP, Resources for the Future & MCC.
- Afvalonline (2022). EP: afvalverbranding vanaf 2026 onder ETS. <https://afvalonline.nl/bericht/36511/ep-afvalverbranding-vanaf-2026-onder-ets>
- Bazzanella, A., Ausfelder, F. (2017). Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Berenschot (2021). Analysis and comparison of Dutch industry transition scenarios for 2030 and 2050 to OECD 'reference 2050 scenario'.
- BP (2020). Bp Energy Outlook.
- Boot, P. (2020). De vijftiende jaar klimaatbeleid in Nederland: 'Ambitieuw, maar verstandig'. TPEdigitaal 14(3) 1-23.
- Boot, P. (2022). Scenario's voor netto-nul emissies: lessen uit omringende landen.
- Bulkeley, H., et al. (2022). Decarbonising Economies. Cambridge: Cambridge University Press. Doi:10.1017/9781108934039.
- Bruhèze, A.A.A. de la, Lintsen, H.W., Rip, A. en Schot, J.W. (2003). *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw. Deel 6. Stad, bouw, industriële productie.*
- CBS (2018). Emissie-intensiteit broeikasgassen Nederlandse industrie.
- CBS Statline (2021). Energiebalans; aanbod en verbruik, sector.
- CBS Statline (2021a). Aardolieproductenbalans; aanbod, verbruik en voorraad.
- CBS Statline (2022). Investering in materiële vaste activa; bedrijfstak.
- CBS Statline (2023). Emissies naar lucht door de Nederlandse economie; nationale rekeningen.
- CE Delft (2021). CO₂-reductie met circulaire kunststoffen in Nederland.
- CE Delft (2021a). Nationale heffing op virgin plastics.
- CE Delft (2021b). Groeiprojecties energie-intensieve industrie.
- CE Delft (2022). Mandatory percentage of recycled or biobased plastic in the European Union.
- CE Delft (2022a). Monitoring chemical recycling.
- CE Delft (2023). Sustainability of biobased plastics.
- CE Delft (2023a). Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. Analyse van behoefte, aanbod en beleid voor negatieve emissies in Nederland.
- Chang, H.J. en Andeoni, A. (2016). Industrial policy in a changing world: basic principles, neglected issues and new challenges. Cambridge Journal of Economics 40Years Conference.
- CIEP (2022). Recarbonising the chemical industry. Why northwest European hydrogen strategies should be complemented by integrated carbon plans.
- Coalitieakkoord (2021). Omzien naar elkaar, vooruitkijken naar de toekomst. Coalitieakkoord 2021-2025.
- Concawe (2019). Refinery 2050: Conceptual Assessment. Exploring opportunities and challenges for the EU refining industry to transition towards a low-CO₂ intensive economy. Report no. 9/19.
- Concawe (2019a). The role of e-fuels in the transport system in Europe.

Daniëls, B., en Strengers, B. (2024). Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

DNVGL (2018). VNPI CO₂-reductie roadmap van de Nederlandse raffinaderijen.

DNVGL (2020). De mogelijke bijdrage van industriële vraagresponse aan leveringszekerheid.

EBN (2018). Transport en opslag van CO₂ in Nederland.

EBTP (2012). Biomass with CO₂ Capture and Storage (Bio-CCS). The way forward for Europe.

Ecorys (2022). Afhankelijkheid toekomstige concurrentiepositie van de industrie van energieprijzen.

Elzenga, H. en Strengers, B. (2024). Beschikbaarheid, import en opslag van waterstof in Nederland. Achtergrondstudie in het kader van Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.

Energy Transitions Commission (2018). Mission Possible. Sectoral focus: plastics.

Energy Transitions Commission (2020). Making Mission Possible.

ETES (2022). Discussiepaper Economie. Werkgroep Expertteam Energiesysteem 2050.

European Bioplastics (2022). Bioplastics market data.

Europees Parlement (2022). Climate change: Deal on a more ambitious Emissions Trading System (ETS).

Europees Parlement (2022a). Algemene beginselen van het industriebeleid van de EU.

Europese Commissie (2015). First Circular Economy Action Plan (CEAP).

Europese Commissie (2021). Sustainable Carbon Cycles. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council.

Europese Commissie (2022). Proposal for a Regulation on Packaging and Packaging Waste.

Europese Commissie (2022a). Proposal for Ecodesign for sustainable products Regulation.

Europese Commissie (2023). Fluorinated gases and ozone-depleting substances: Council and Parliament reach agreement.

Europese Commissie (2023a). Statement by the Commission on Article 22a and Article 22b (p. 6-7). <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-13188-2023-ADD-1-REV-3/en/pdf>

Eurostat (2022). Circular material use rate by material type.

EZK (2023). Kamerbrief over voorjaarsbesluitvorming Klimaat. DGKE / 27070798.

FEVE (2022). Europe's glass value chain reaches a major milestone at 79% glass collection for recycling.

Geest, L. van, et al. (2021). Bestemming Parijs. Wegwijzer voor klimaatkeuzes 2030, 2050. Eindrapportage studiegroep Invulling klimaatopgave Green Deal.

Geilenkirchen, G. et al. (2024). Klimaatneutrale mobiliteit 2050. Een verkenning van beelden en paden daarnaartoe. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving en TNO.

Global Carbon Project. (2021). Supplemental data of Global Carbon Budget 2021 (Version 1.0) [Data set]. Global Carbon Project. <https://doi.org/10.18160/gcp-2021>

Guidehouse (2021). European Hydrogen Backbone. Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen.

Hallegatte, S., Fay, S., Vogt-Schilb, A., 2013. Green Industrial Policies: When and How. The World Bank Sustainable Development Network.

H-Vision (2019). Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry.

IEA (2019). Material efficiency in clean energy transitions.

IEA (2021). Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector.

IEA (2021a). World Energy Outlook 2021.

IPCC (2019). Global warming of 1.5°C.

IPCC (2022). Climate Change 2022; Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR6-WGIII).

IRENA (2021). Renewable Methanol 2021.

IRENA (2022). The Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor.

IRP (2020). Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future.

JRC (2023). Greenhouse gas emission intensities of the steel, fertilisers, aluminium and cement industries in the EU and its main trading partners.

JRC (2024). Shaping the future CO₂ transport network for Europe.

Juhász, R., Lane, N., Oehlsen, E. en Pérez, V.C. (2022). The Who, What, When, and How of Industrial Policy: A Text-Based Approach

Kaiser & Bringezu (2020). Use of carbon dioxide as raw material to close the carbon cycle for the German chemical and polymer industries. *Journal of Cleaner Production* 271, 122775.

Klimaatakkoord (2019). Klimaatakkoord.

KNB (2020). Technology Roadmap Bouwkeramiek 2030.

KPMG (2023). Plastic feedstock for recycling in the Netherlands.

Kramer, G.J. (2023). Ambities voor de Nederlandse Basisindustrie in relatie tot een Systeemtransitie Klimaat. Input voor discussie met vaste Kamercommissie EZK op 19 januari 2023.

Kuijper, M., et al. (2021). Carbon Takeback Obligation - A Producer Responsibility Scheme on the Way to a Climate Neutral Energy System.

Lange et al. (2024). Plastic recycling stripped naked – from circular product to circular industry with recycling cascade. *ChemSusChem* 2024, e202301320. doi.org/10.1002/cssc.202301320

Lase et al. (2023). How much can chemical recycling contribute to plastic waste recycling in Europe? An assessment using material flow analysis modeling. *Resources, Conservation & Recycling* 192, 106916.

LDES Council & McKinsey & Company (2022). Net-zero heat. Long Duration Energy Storage to accelerate energy system decarbonization.

Leeuw, M. de, en Koelemeijer, R. (2022). Decarbonisation options for the Dutch waste incineration industry. A MIDDEN report. Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving en TNO.

Material Economics (2018). The circular economy.

Material Economics (2019). Industrial Transformation 2050 – Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.

McKinsey (2018). No time to waste: What plastics recycling could offer.

Minnen, J. van, Strengers, B. en Daniëls, B. (2024). Beschikbaarheid biograndstoffen in Nederland en de EU.

NEa (2021). Emissiecijfers 2013-2020.

Netbeheer Nederland (2023). Het energiesysteem van de toekomst: de H3050-scenario's.

Net Zero Tracker (2024). Data Explorer. [ZeroTracker.net](https://zerotracker.net).

OECD (2019). Global Materials Outlook to 2060.

OECD (2021). Policies for a climate-neutral industry. Lessons from The Netherlands.

OECD (2022). Global Plastics Outlook. Policy Scenarios to 2060.

PBL (2018). Negatieve emissies: technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland.

PBL (2019). Doelstelling circulaire economie 2030.

PBL (2020). Beschikbaarheid en toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa.

PBL (2021). Mogelijke doelen voor een circulaire economie.

PBL (2021a). Klimaatverandering in de prijzen.

PBL (2021b). Trends in Nederlandse voetafdrukken: een update.

PBL (2022). Eindadvies basisbedragen SDE++ 2022.

PBL (2022a). Klimaat- en Energieverkenning 2022.

PBL (2022b). Mitigating greenhouse gas emissions in hard-to-abate sectors.

PBL (2023). Integrale Circulaire Economie Rapportage 2023.

PBL (2023a). Klimaatverandering in prijzen: actualisatie.

PBL (2023b). Klimaat- en Energieverkenning 2023.

PBL (2023c). Reflectie op voorstellen voor de inzet van middelen uit het klimaatfonds. Een quickscan.

PBL (2024). Klimaatverandering in de prijzen in 2022 met een doorkijk naar 2030.

PBL en Maastricht University (2019). Fictie op de arbeidsmarkt door de energietransitie: Een modelverkenning.

PBL en TNO (2021). MIDDEN database – middenweb.nl.

PBL, TNO en RVO (2021). Reflectie op Cluster Energiestrategieën (CES 1.0).

PBL, TNO en RVO (2022). Reflectie op Cluster Energiestrategieën (CES 2.0).

PlasticsEurope (2021). European plastics manufacturers plan over 7 billion euros investment chemical recycling.

PlasticsEurope (2022). Plastics, The Facts.

PRN (2022). Papierrecycling. <https://prn.nl/papierrecycling/>

Rebel (2021). Actualisatie toekomstscenario's voor afvalverbranding in Nederland.

ReInvent (2017). Existing vision and scenarios.

ReInvent (2018). EU decarbonisation scenarios for industry.

Renewable Carbon Initiative (2022). Renewable carbon as a guiding principle for sustainable carbon cycles.

Reuters (2023). EU countries strike deal on renewable energy law with ammonia caveat.

RIVM (2019). Plastic Pact Nederland.

Rijksoverheid (2023). Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030.

Roland Berger (2021). Haalbaarheidsstudie klimaatneutrale paden TSN IJmuiden.

Rosendaal, R. en Vollebergh, H. (2022). Stringente standaarden stimuleren innovatie in doorbraaktechnologieën. ESB 107 (4814).

RVO (2021). Analyse koplopersprogramma's Klimaatakkoord Industrie.

RVO (2021a). Resultatenbrochure convenanten Meerjarenafspraken energie-efficiëntie.

- Sánchez Diéguez, M., Taminiau, F., West, K., Sijm, J. en Faaij, A. (2022). High technical and temporal resolution integrated energy system modelling of industrial decarbonisation. *Advances in Applied Energy* 7, 100105.
- Schot, J.W., Lintsen, H.W., Rip, A., en Bruhèze, A.A.A. de la (2003). *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw. Deel 2. Delfstoffen, energie, chemie.*
- SER (2022). *Evenwichtig sturen op de grondstoffentransitie en de energietransitie voor brede welvaart.*
- SER (2024). *Verduurzaming maakindustrie.*
- TNO (2024). *Verkenning van toekomstige ontwikkelingen en uitdagingen voor een klimaatneutraal elektriciteitssysteem in Nederland, 2030-2050. Achtergrondrapport bij de PBL-studie Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050.* TNO.
- Sluisveld, M. van, et al. (2021). A race to zero - assessing the position of heavy industry in a global net-zero CO₂ emissions context, *Energy and Climate Change.*
- Stegmann, P., Daioglou, V., Londo, M., van Vuuren, D.P., Junginger, M. (2022). Plastic futures and their CO₂ emissions. *Nature*, 612, 272–276.
- Sustainable Industry Lab (2023). *Groene keuzes voor de Nederlandse basisindustrie.*
- Systemiq (2022). *ReShaping Plastics. Pathways to a circular, climate neutral plastics system in Europe.*
- TIKI (2020). *Adviesrapport Taskforce Infrastructuur Klimaatakkoord Industrie.*
- TKI Energie en Industrie (2021). *Elektrificatie: cruciaal voor een duurzame industrie. Routekaart Elektrificatie in de Industrie.*
- TNO (2019). *Technology factsheet Methanol from CO₂.*
- TNO (2019a). *Verkenning werkgelegenheidseffecten van klimaatmaatregelen.*
- TNO (2020). *Don't waste it! Solving the dark side of today's plastic.*
- TNO (2021). *Transition to e-fuels: a strategy for the Harbour Industrial Cluster Rotterdam.*
- TNO (2022). *Een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland.*
- Truijens, D., Klöster, M., Hanegraaff, M., Van Tilburg, X., van der Deijl, T., van Dalen, S., Klarenbeek, W., 2021. *Akkoord van belang: Over belangenvertegenwoordiging aan de klimaattafels en de totstandkoming van het Klimaatakkoord, TNO 2021 P12357.*
- Velde, O. van der, Leeuwen, M. van (2019). *Potentie biobased materialen in de bouw.*
- Verbong, G. (2022). *Historische beslissingen in het energiedomein met een grote impact. Expertteam Energiesysteem 2050.*
- VNCI (2018). *Chemistry for climate - acting on the need for speed. Roadmap for the Dutch chemical industry towards 2050.*
- VNCI (2021). *Van Routekaart naar Realiteit.*
- VNG (2012). *Routekaart glasindustrie.*
- VNP (2018). *Roadmap VNP. 95 procent CO₂ besparing Nederland.*
- Umwelt Bundesamt (2022). *The EU CBAM and a climate club: Synergies and potential obstacles for full integration.*
- Weeda, M. en Segers, R. (2020). *The Dutch hydrogen balance, and the current and future representation of hydrogen in the energy statistics. CBS en TNO.*

Westhoek, H. et al. (2024). Mogelijke trajecten naar klimaatneutrale landbouw, landgebruik en voedsel in 2050. Achtergrondstudie in het kader van Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050.

Wetzels, W. et al. (2024). Vier trajecten naar een klimaatneutrale gebouwde omgeving. Achtergrondstudie in het kader van Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050.

Zesde cluster (2020). Klimaattransitie door de Nederlandse industrie - Het zesde cluster.

Appendix

Algemeen

De basis van de kwantitatieve trajecten is de MIDDEN-database versie 0.3 van november 2021 (PBL en TNO, 2021). Processen per bedrijf zijn iets bij- of afgeschaald om uitstoot in 2020 (volgens NEa, 2021) te reproduceren. Daarnaast zijn enkele generieke processen toegevoegd om ervoor te zorgen dat het totale aardgas- en elektriciteitsvraag overeenkomt met cijfers van CBS Statline (2021).

De uitstoot van de overige broeikasgassen zijn bepaald op basis van de KEV (PBL, 2022a). Voor de kwantitatieve trajecten zijn aannames gemaakt ten aanzien van procesefficiëntie, productieverandering en technische maatregelen.

Procesefficiëntie

Tabel A1

	Centraal traject	Alternatief 1	Alternatief 2
Aangenomen verbetering per jaar	0,5%	0,5%	0,5%

Productieverandering

De productieverandering verschilt per sector.

Aardolieraffinage

Tabel A2

Volumeverandering productie aardolieraffinage

Aangenomen volumeverandering aardolieraffinage (genormaliseerd in 2020)	Centraal traject	Alternatief 1	Alternatief 2
2020	1	1	1
2025	0,95	1	0,9
2030	0,75	0,8	0,7
2035	0,6	0,65	0,5
2040	0,4	0,45	0,25
2045	0,32	0,4	0,1
2050	0,25	0,35	0,05
Bronnen	IEA (2021), BP (2020)	IPCC (2019)	Energy Transitions Commission (2020)

Alternatieve (hernieuwbare en synthetische) brandstoffen

Zie hoofdstuk 4.2.3.

Afvalverbranding

Tabel A3

Volumeverandering afvalverbranding

Geschatte volumeverandering afvalverbranding (genormaliseerd in 2020)	Centraal traject	Alternatief 1	Alternatief 2
2020	1	1	1
2025	0,9	1	0,9
2030	0,71	0,7	0,58
2035	0,61	0,61	0,40
2040	0,44	0,48	0,23
2045	0,24	0,37	0,10
2050	0,04	0,27	0
Bronnen	O.a. Rebel (2021), KEV (PBL, 2022a)		

Deze trajecten sluiten aan bij de ontwikkeling van grondstoffen voor plastics.

Overige sectoren

Tabel A4

Vraagverandering

Aangenomen vraagverandering overige sectoren (percentage per jaar tussen 2020-2050)	Centraal traject	Alternatief 1	Alternatief 2	Bron
Voedingsmiddelen en dranken	0,5	0,5	0,5	REINVENT (2017, 2018)
Organische basischemie	-0,2	0	-1,1	Zie hieronder
Primaire kunststoffen	-0,5	0,1	-2,2	Zie hieronder
Overig	0,2	0,2	0,2	Zie Tabel A4

In Tabel A4 staat een uitgebreid overzicht van vraagontwikkelingen (en bijbehorende productieverandering) van belangrijke productgroepen voor verschillende netto-nul-emissie-studies. De ontwikkelingen in organische basischemie en kunststoffen hangen samen met toenemende recycling in de verschillende trajecten, die onder de in deze studie aangenomen percentages liggen.

Tabel A5

Vraagontwikkeling van belangrijke productgroepen volgens diverse netto-nul-emissie-studies

Sector	Hoe internationaal (EU/wereld)? ¹⁾	Vraagontwikkeling tot 2050 [scope] ²⁾	Bron ³⁾	Scenario ⁴⁾
Staal	+++/ ¹⁾	Stabiel tot afname van -28% ²⁰ [EU] Recycleert van 32% (2020): • naar 47-56% [EU] • naar 46% [wereld]	ME19 IEA21	NZ50 (circ) NZ50 NZ50
Transportbrandstoffen en andere olieproducten (met name aardolieraffinage)	++/ ¹⁾	Olievraag: -80% ²⁰ [wereld] -75% ²⁰ [wereld], naar ~44 EJ Primaire energievraag uit olie: -66% ²⁰ [wereld] -94% ¹⁸ [wereld]	bp20 IEA21 IPCC19 ETC20	NZ / 1.5°C NZ50 1.5°C NZ50

		Biobrandstoffen voor transportsector: van 5 EJ (<3% van totaal) naar ongeveer 13 EJ (16%) in 2050 [wereld].	IEA21	NZ50
		Synthetische brandstof voor transport (lucht- en scheepvaart): Van 0 naar ongeveer 22 EJ (28%) in 2050 [wereld].	IEA21	NZ50
Petrochemie (voor plastics e.a.)	+++/ ¹⁾	+15% tot -15% [EU] +8% ¹⁵ [EU]	ME19 R18	NZ50 (circ) 1.5-2°C
Chemie: kunstmest	++/ ¹⁾	-25% tot -45% [EU] -2,3% tot +0,6% per jaar [NL]	ME19 Be21	NZ50 (circ) NZ50
Overig chemie	++/ ¹⁾	Afhankelijk van andere sectoren (voornamelijk raffinage, petrochemie).		
Voedingsmiddelen	+/ ¹⁾	+1,0% per jaar [NL] +0,5% per jaar [EU] ⁵⁾ +1-2% per jaar [wereld] ⁵⁾	Be21 R18 R18	NZ50 1.5-2°C 1.5-2°C
Papier en bouwmaterialen	+/ ¹⁾	Papier: +~10% ¹⁴ [wereld] Glas: grotendeels afhankelijk van drank/voedsel Keramik: grotendeels afhankelijk van bouwsector Cement (geen klinkerproductie in Nederland): -10% tot -50%.	R17 ME19	≤2°C NZ50 (circ)
Overig metaal	++/ ¹⁾	Aluminium: Totaal: +0% [EU], +~50% ¹⁵ [wereld]. Primair: -38% ¹⁵ [EU] Secundair: +~50% ¹⁵ [EU]	ME18	circ

- 1) Gekarakteriseerd door percentage export naar EU/buiten EU. Sommige industrieën leveren voornamelijk aan andere Nederlandse bedrijven die wel heel internationaal actief zijn. Bron: CE Delft (2021b).
- 2) Het getal in superscript geeft het jaartal weer ten opzichte waarvan het percentage is berekend (*20 = 2020).
- 3) ME18 = Material Economics (2018). ME19 = Material Economics (2019). IEA21 = IEA NZE 2021 (2021). IEA21a = IEA WEO 2021 (2021a). bp20 = bp Energy Outlook (2020). IPCC19 = IPCC 1.5°C Report (2019). Be21 = Berenschot (2021). R17 = Re-Invent Existing visions and scenarios (2017). R18 = ReInvent EU decarbonisation scenarios for industry (2018). ETC20 = Energy Transition Commission (2020).
- 4) NZ50 = netto nul-emissie in 2050. Circ = circulair
- 5) Alleen zuivel.

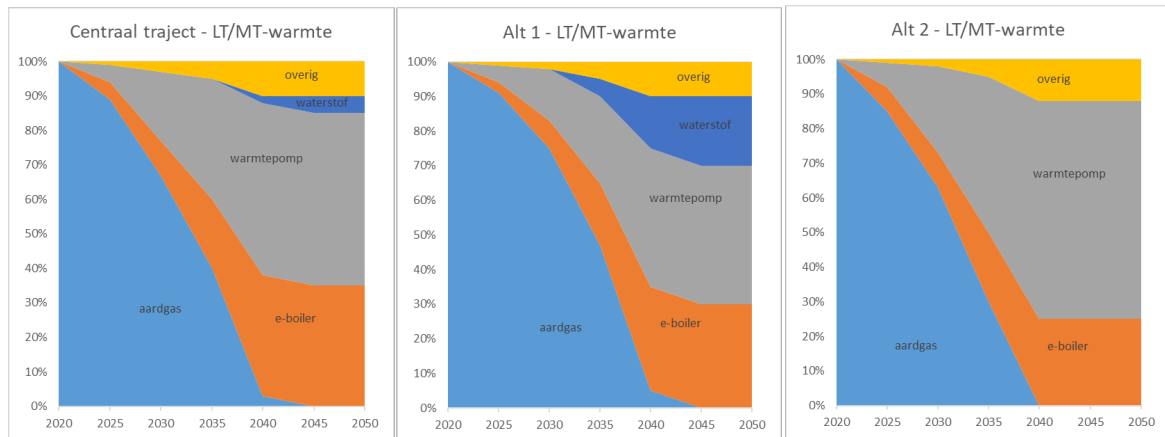
Technische trajecten

Deze worden hieronder per sector of bedrijf beschreven. De productie van lage-, midden- en hogetemperatuurwarmte worden eerst apart behandeld.

Lage- en middentemperatuurwarmte (boilers, WKK)

Figuur A1

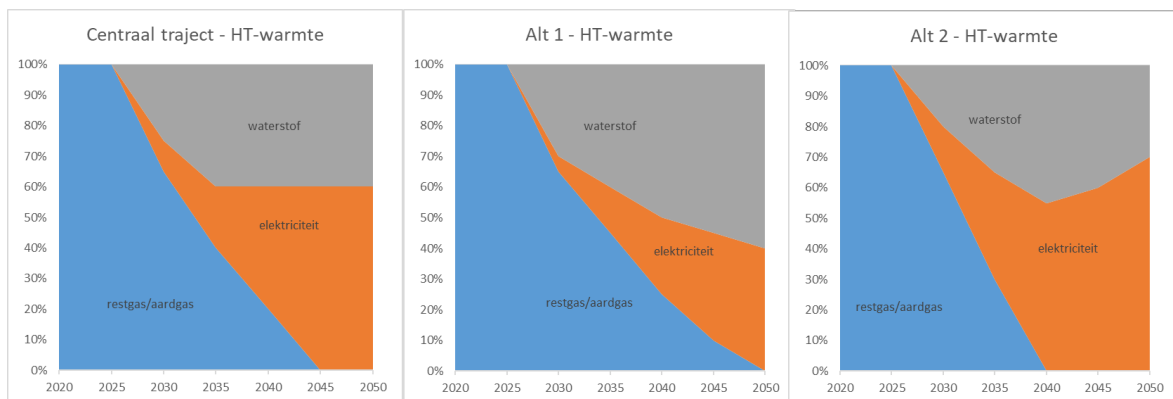
Trajecten lage- en middentemperatuurwarmte (boilers, WKK)



Hogetemperatuur-proceswarmte (fornuizen)

Figuur A2

Trajecten hogetemperatuur-proceswarmte (fornuizen)



Staal

De cijfers in de tabel zijn fracties van productiecapaciteit, genormaliseerd op huidige processen in 2020. Alternatieven hebben dezelfde capaciteit als huidige processen.

Tabel A6
Decarbonisatie staal

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cen- traal	Hoogovens en kooksfabrieken	1	1	0,5	0,5	0	0	0
	DRI op aardgas (met CCS) + elektrische oven	0	0	0,5	0,5	0,5	0,2	0
	DRI op waterstof + elektrische oven	0	0	0	0	0,5	0,8	1
	Velsencentrales, WKK's	1	1	0,5	0,5	0	0	0
	Basic oxygen furnace	1	1	1	1	1	1	1
	Overige processen op restgas	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
	Overige processen op aardgas	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
	Overige processen op waterstof	0	0	0	0	0,5	1	1
Alter- natief 1	Hoogovens en kooksfabrieken	1	1	0,5	0,5	0	0	0
	DRI op aardgas (met CCS) + elektrische oven	0	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	DRI op waterstof + elektrische oven	0	0	0	0	0,5	0,5	0,5
	Velsencentrales, WKK's	1	1	0,5	0,5	0	0	0
	Basic oxygen furnace	1	1	1	1	1	1	1
	Overige processen op restgas	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
	Overige processen op aardgas	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
	Overige processen op waterstof	0	0	0	0	0,5	1	1
Alter- natief 2	Hoogovens en kooksfabrieken	1	1	0,5	0	0	0	0
	DRI op aardgas (met CCS) + elektrische oven	0	0	0,5	0,5	0,2	0	0
	DRI op waterstof + elektrische oven	0	0	0	0,5	0,8	1	1
	Velsencentrales, WKK's	1	1	0,5	0	0	0	0
	Basic oxygen furnace	1	1	1	1	1	1	1
	Overige processen op restgas	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
	Overige processen op aardgas	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
	Overige processen op waterstof	0	0	0	0,5	1	1	1

Raffinage/transportbrandstoffen

De afname van de omvang, vooral na 2035, komt door de transformatie van fossiele transportbrandstoffen naar alternatieve transportbrandstoffen.

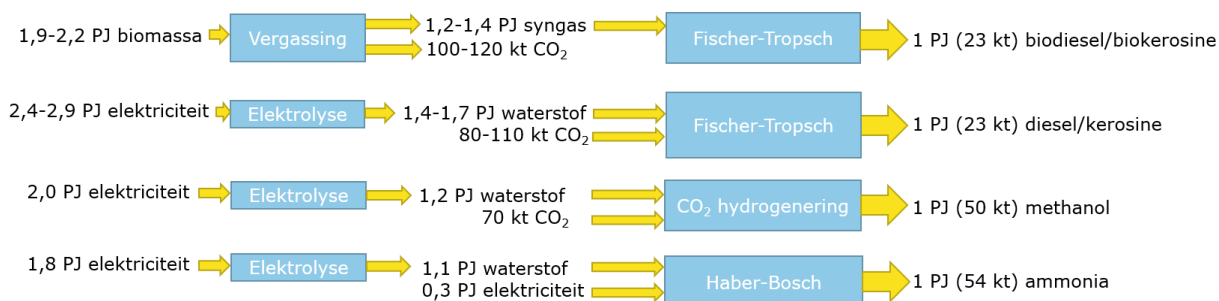
De cijfers in de tabel zijn fracties van productiecapaciteit, genormaliseerd op huidige processen in 2020. Alternatieven hebben dezelfde capaciteit als huidige processen.

Tabel A7
Decarbonisatie raffinage

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Alternatieve transportbrandstoffen: zie kader op pagina 48.							
Centraal	H-Vision (Rotterdam): waterstofproductie op basis van restgas. Omvang in PJ H ₂ /jr.	0	0	31	26	21	16	12
	Fornuizen: waterstof als brandstof	0	0	0,25	0,4	0,4	0,4	0,4
	Fornuizen: elektrificatie	0	0	0,1	0,2	0,4	0,6	0,6
	CCS bij o.a. waterstofproductie (Mt CO ₂ /jr)	0	1,4	2,8	3,7	2,6	2,0	1,5
Alternatief 1	H-Vision (Rotterdam): waterstofproductie op basis van restgas. Omvang in PJ H ₂ /jr.	0	0	43	36	30	26	21
	Fornuizen: waterstof als brandstof	0	0	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6
	Fornuizen: elektrificatie	0	0	0,05	0,15	0,25	0,35	0,4
	CCS bij o.a. waterstofproductie (Mt CO ₂ /jr)	0	1,5	3,6	4,5	3,3	3,0	2,3
Alternatief 2	H-Vision (Rotterdam): waterstofproductie op basis van restgas. Omvang in PJ H ₂ /jr.	0	0	16	21	17	7	3
	Fornuizen: waterstof als brandstof	0	0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2
	Fornuizen: elektrificatie	0	0	0,15	0,35	0,5	0,6	0,8
	CCS bij o.a. waterstofproductie (Mt CO ₂ /jr)	0	1,3	1,9	1,9	1,3	0,5	0,2

De opbouw van niet-fossiele transportbrandstoffen worden apart behandeld in hoofdstuk 4.2.3. De cijfers in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op standaardprocessen die hieronder schematisch zijn weergegeven:

Figuur A3
Processen niet-fossiele transportbrandstoffen



Deze cijfers zijn gebaseerd op

- Vergassing: PBL (2022), EBTP (2012)
- Fischer-Tropsch: Concawe (2019a)
- Elektrolyse: 60% rendement aangenomen

- Methanolproductie: IRENA (2021) en TNO (2019)
- Ammoniakproductie: Bazzanella en Ausfelder (2017)

In de getoonde cijfers gaan we voor synthetische brandstoffen uit van synthetische kerosine als het voor luchtvaart is, en voor scheepvaart gaan we uit van methanol en ammoniak in gelijke delen.

Organische basischemie

De cijfers in de tabel zijn fracties van productiecapaciteit, genormaliseerd op huidige processen in 2020. Alternatieven hebben dezelfde capaciteit als huidige processen.

Tabel A8
Decarbonisatie organische basischemie

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Fornuizen, WKK en boilers: zie hoge-temperatuurproceswarmte (Tabel A2)							
Centraal	Stoomkrakers:							
	Waterstof uit restgas met CCS	0	0	0,25	0,42	0,42	0,42	0,42
	Elektrisch kraken	0	0	0,13	0,37	0,52	0,58	0,58
	Overige organische basischemie:							
	Ethyleenoxide: CCS	0	0	1	1	1	1	1
Alternatief 1	Stoomkrakers:							
	Waterstof uit restgas met CCS	0	0	0,32	0,52	0,8	0,83	0,83
	Elektrisch kraken	0	0	0,07	0,1	0,13	0,17	0,17
	Overige organische basischemie							
	Ethyleenoxide: CCS	0	0	1	1	1	1	1
Alternatief 2	Stoomkrakers:							
	Waterstof uit restgas met CCS	0	0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
	Elektrisch kraken	0	0	0,17	0,5	0,75	0,75	0,75
	Overige organische basischemie							
	Ethyleenoxide: CCS	0	0	1	1	1	1	1

Grondstoffen organische basischemie: zie paragraaf 4.2.2. Gebaseerd op o.a. VNCI (2018), Renewable Carbon Initiative (2022), Material Economics (2019), TNO (2022). Zie het overzicht hieronder voor de verdeling van grondstoffen in 2050.

Tabel A9
Grondstoffen organische basischemie

Studie	Scope	Scenario	Mech. rec.	Chem. rec. ¹¹⁾	Biobased	Fossiel	CO ₂ -based
VNCI (2018)	EU plastics	Niet gespecificeerd ²⁾	~40-50%	~30%			
ETC (2018)	Global, plastics	Niet gespecificeerd ³⁾	16%	20%	n.a. ³⁾	64% ³⁾	n.a. ³⁾
Mat. Ec. (2019)	EU plastics	New processes ⁴⁾	15%	47% (helft v, helft p)	38%		
Mat. Ec. (2019)	EU plastics	Circular economy ⁴⁾	25%	38% (helft v, helft p)	37%		
Mat. Ec. (2019)	EU plastics	Carbon capture ⁴⁾	15%	14% (helft v, helft p)	33%	37%	
RCI (2022)	Global, plastics		n.a. ⁵⁾	70% ⁵⁾	10%	0%	20%
RCI (2022)	Global, chemicals		n.a. ⁵⁾	55% ⁵⁾	20%	0%	25%
TNO (2022)	NL, HVC's ¹⁾	Adapt ⁶⁾		~2-10% (p)	~8-10%	~80-86%	~0%
TNO (2022)	NL, HVC's ¹⁾	Transform ⁶⁾		~2-10% (p)	~12-30%	~6-8%	~50-80%
OECD (2022)	Global, plastics	Regional Action ⁷⁾	n.a. ⁵⁾	29% ⁵⁾	n.a. ⁸⁾	71% ⁸⁾	n.a. ⁸⁾
OECD (2022)	Global, plastics	Global Ambition ⁷⁾	n.a. ⁵⁾	41% ⁵⁾	n.a. ⁸⁾	59% ⁸⁾	n.a. ⁸⁾
McKinsey (2018)	Global, polymer	Recycling scenario	30%	29% (1/4 d, rest p)	n.a. ⁸⁾	41% ⁸⁾	n.a. ⁸⁾
TNO (2020)	NL, plastic afval	Circular Economy	11% ⁹⁾	74% ⁹⁾ (helft v, 1/3 s/d, rest p)	3% ⁹⁾	12% ⁹⁾	
Lase et al. (2023)	EU, plastic afval	Mech. Recycling ¹⁰⁾	49% ⁹⁾		n.a. ⁸⁾	51% ^{8,9)}	n.a. ⁸⁾
Lase et al. (2023)	EU, plastic afval	Chem. Recycling ¹⁰⁾		73% ⁹⁾ (v 42%, p 37%, rest d)	n.a. ⁸⁾	27% ^{8,9)}	n.a. ⁸⁾
Lase et al. (2023)	EU, plastic afval	Different scenarios ¹⁰⁾	41-46% ⁹⁾	34-37% ⁹⁾	n.a. ⁸⁾	20-22% ^{8,9)}	n.a. ⁸⁾
Systemiq (2022)	EU, plastic afval		39% ⁹⁾	29% ⁹⁾	n.a. ⁸⁾	32% ^{8,9)}	n.a. ⁸⁾
Deze studie	NL, plastics	Centraal traject	13%	21%	39%	20%	7%
Deze studie	NL, plastics	Alternatief 1	8%	17%	27%	47%	0%
Deze studie	NL, plastics	Alternatief 2	27%	18%	40%	0%	15%

- 1) HVC's = High Value Chemicals.
- 2) Waarden geven potentieel aan en tellen niet op tot 100%.
- 3) De waarden getoond in de bron bevatten ook circulair gebruik, leidend tot 30% volumereductie, dat is hier weggelaten om te vergelijken met de andere bronnen. In de bron wordt 'virgin demand' genoemd, dat is hier gezien als een totaal van fossiel, biobased en CO₂-based.
- 4) De waarden getoond in de bron bevatten ook circulair gebruik, leidend tot 14% volumereductie in de 'New processes' en 'Carbon capture' scenario's en 27% volumereductie in het 'Circular economy' scenario, dat is hier weggelaten om te vergelijken met de andere bronnen.
- 5) Gezamenlijke waarde mechanische en chemische recycling.
- 6) De bandbreedte houdt rekening met import zoals in de bron. Chemische recycling verwijst naar plastic-pyrolyse en CO₂-based naar synthetische methanol.
- 7) Waarde voor 2060.
- 8) Totaal virgin/primary plastics: hier geïnterpreteerd als gezamenlijke waarde fossiel, biobased en CO₂-based.
- 9) Berekend onder de aanname dat er geen groei van export of voorraad is.
- 10) Percentages zijn modelresultaat voor 2030.
- 11) Tussen haakjes verdeling tussen vergassing (v), pyrolyse (p), solution-based recycling (s) en depolymerisatie (d).

Kunstmest

De cijfers in deze tabel zijn fracties van de huidige ammoniakproductiecapaciteit.

Tabel A10
Decarbonisatie kunstmest

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cen- traal	Ammoniakfabrieken: pre-combustion CCS	0	0,66	0,64	0,58	0,41	0,2	0
	Ammoniakfabrieken: post-combustion CCS	0	0	0	0	0	0	0
	Ammoniakproductie uit waterstof geproduceerd d.m.v. elektrolyse (on-site en off-site)	0	0	0,02	0,07	0,25	0,45	0,56
	Ammoniakproductie uit biogas	0	0	0,04	0,09	0,17	0,26	0,44
Alter- natief 1	Ammoniakfabrieken: pre-combustion CCS	0	0,66	0,64	0,64	0,58	0,41	0,41
	Ammoniakfabrieken: post-combustion CCS	0	0	0	0,18	0,37	0,37	0,37
	Ammoniakproductie uit waterstof geproduceerd d.m.v. elektrolyse (on-site en off-site)	0	0	0,02	0,02	0,07	0,15	0,15
	Ammoniakproductie uit biogas	0	0	0,04	0,09	0,17	0,26	0,44
Alter- natief 2	Ammoniakfabrieken: pre-combustion CCS	0	0,66	0,58	0,41	0,09	0,07	0
	Ammoniakfabrieken: post-combustion CCS	0	0	0	0	0	0	0
	Ammoniakproductie uit waterstof geproduceerd d.m.v. elektrolyse (on-site en off-site)	0	0	0,07	0,25	0,56	0,56	0,56
	Ammoniakproductie uit biogas	0	0	0,07	0,11	0,15	0,18	0,22

Industriële gassen

De uitstoot in deze sector komt voornamelijk door waterstofproductie. In dit onderdeel gaat het om *merchant* waterstofproductie, dus niet om waterstofproductie bij o.a. aardolieraffinage en organische chemie.

Tabel A11
Decarbonisatie industriële gassen.

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Fornuizen, WKK en boilers: zie hoge-temperatuurproceswarmte (Tabel A2)							
Cen- traal	Bestaande SMR (vervangen door elektrolyse)	1	1	1	0,8	0,6	0,2	0
	Pre-combustion CCS (deel van productie)	0,9	0,9	1	1	1	1	-
	Post-combustion CCS (deel van productie)	0	0	0	0	0	0	0
Alter- natief 1	Bestaande SMR	1	1	1	1	1	1	1
	Pre-combustion CCS (deel van productie)	0,9	0,9	1	1	1	1	1
	Post-combustion CCS (deel van productie)	0	0	0	0,4	0,85	0,85	0,85
Alter- natief 2	Bestaande SMR (vervangen door elektrolyse)	1	1	1	0,5	0	0	0
	Pre-combustion CCS (deel van productie)	0,9	0,9	1	1	-	-	-
	Post-combustion CCS (deel van productie)	0	0	0	0	0	0	0

Overig chemie

Tabel A12

Decarbonisatie overig chemie

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Fornuizen, WKK en boilers: zie lage- en hoge-temperatuurproceswarmte (Tabel A1 n A2)							
Cen- traal	Siliciumcarbide: CCU	0	0	0	0,5	0,75	1	1
	Siliciumcarbide: CCS	0	0	0	0	0	0	0
	Carbon black: CCS (Mt CO ₂ /j)	0	0	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Fluoropolymeren: F-gases destruction	0	0	1	1	1	1	1
	Methanol: biogas	0,15	0,16	0,2	0,43	0,58	0,9	0,88
	Methanol: CO ₂ hydrogenering	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12
Alter- natief 1	Siliciumcarbide: CCU	0	0	0	0	0	0,5	1
	Siliciumcarbide: CCS	0	0	1	1	1	0,5	0
	Carbon black: CCS (Mt CO ₂ /j)	0	0	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Fluoropolymeren: F-gases destruction	0	0	1	1	1	1	1
	Methanol: biogas	0,15	0,16	0,2	0,43	0,58	0,9	0,88
	Methanol: CO ₂ hydrogenering	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12
Alter- natief 2	Siliciumcarbide: CCU	0	0	0,35	0,65	0,8	1	1
	Siliciumcarbide: CCS	0	0	0	0	0	0	0
	Carbon black: CCS (Mt CO ₂ /j)	0	0	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Fluoropolymeren: F-gases destruction	0	0	1	1	1	1	1
	Methanol: biogas	0,15	0,16	0,2	0,43	0,58	0,9	0,88
	Methanol: CO ₂ hydrogenering	0	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12

Voedingsmiddelen en papier

Tabel A13

Decarbonisatie voedingsmiddelen en papier

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Proceswarmte: zie lage- en middentemperatuurproceswarmte (Tabel A1) Alle trajecten: innovatieve droogmethoden voor o.a. melkproducten.							

Non-ferrometaal

Tabel A14

Decarbonisatie non-ferrometaal

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Fornuizen: zie hoge-temperatuurproceswarmte (Tabel A2) Productie van primair aluminium is verondersteld vanaf 2025 nihil te zijn.							

Bouwmaterialen (glas, keramiek, overig)

Tabel A15

Decarbonisatie bouwmaterialen (glas, keramiek, overig)

Traject	Onderdeel	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	Fornuizen, WKK en boilers: zie lage- en hoge-temperatuurproceswarmte (Tabel A1 en A2)							
Cen- traal	Glas: elektrificatie ²	0	0	0,25	0,5	0,75	1	1
	Keramiek: groen gas ³	0	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,34
Alter- natief 1	Glas: elektrificatie	0	0	0	0,25	0,5	0,75	1
	Keramiek: groen gas	0	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,34
	Keramiek: CCS bij ovens	0	0	0	0	0,2	0,4	0,66
Alter- natief 2	Glas: elektrificatie	0	0,25	0,5	0,75	1	1	1
	Keramiek: groen gas	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Overige sectoren

Proceswarmte: zie lage- en middentemperatuurproceswarmte.

Berekening energiedragers

De MIDDEN-database bevat van de inputs en outputs (zowel energiedragers als materialen) van de bestaande en toekomstige processen. De ontwikkelingen per traject (zoals hierboven toegelicht) leiden tot nieuwe processen en uitfasering van sommige bestaande processen, waardoor de vraag naar en het aanbod van energiedragers verandert. In formulevorm:

$$E_{input}(d, t, j) = \sum_p e_{input}(p, d) * T(p, t, j) * V(p, t, j) * F(j) * C(p)$$

$$E_{output}(d, t, j) = \sum_p e_{output}(p, d) * T(p, t, j) * V(p, t, j) * F(j) * C(p)$$

waarbij E_{input} (E_{output}) de totale energie-input (-output) is in PJ voor een bepaalde energiedrager d (elektriciteit, waterstof, aardgas etc.), in een traject t (centraal traject, alternatief 1, alternatief 2, en in een jaartal j (2020, 2025, ..., 2050). De sommatie sommeert over alle processen p bij alle bedrijven. $e_{input}(p, d)$ ($e_{output}(p, d)$) is de energie-input (-output) per proces p per energiedrager d in PJ, voor de huidige productie. Om te zorgen dat ook de processen die niet in de MIDDEN-database voorkomen zijn opgenomen in de cijfers (en zodat die stroken met de huidige energievraag en -aanbod), zijn enkele generieke processen opgenomen in de berekening van energiedragers, bijvoorbeeld als het gaat om de afvalsector en overige industrie. $T(p, t, j)$ is een factor die bepaalt in hoeverre een bepaald proces p in een bepaald traject t in een jaar j wordt ingezet (doorgaans tussen 0 en 1, zie de tabellen in de voorgaande paragrafen). $V(p, t, j)$ is de vraagverandering voor een bepaald proces p in een bepaald traject t in een bepaald jaar j (doorgaans tussen 0,2 en 2). $F(j)$ is een factor die corrigeert voor

² Waterstof kan hier ook een rol spelen, maar daarvoor waren geen betrouwbare procesgegevens beschikbaar. De totale aardgasvraag van deze sector bedraagt zo'n 6 PJ (CBS Statline, 2021).

³ Waterstof kan hier ook een rol spelen, maar daarvoor waren geen betrouwbare procesgegevens beschikbaar. De totale aardgasvraag van deze sector bedraagt zo'n 6-7 PJ (CBS Statline, 2021).

verbetering in procesefficiëntie voor een bepaald jaar j (doorgaans tussen 0,8 en 1). $C(p)$ is een correctiefactor per proces p die wordt toegepast om de cijfers te schalen zodat de uitstoot in 2020 rijmt met de uitstoot zoals gerapporteerd in de emissiecijfers (NEa, 2021) (doorgaans tussen 0,8 en 1,2).

Berekening uitstoot

De MIDDEN-database bevat de uitstoot per proces. De ontwikkelingen per traject (zoals hierboven toegelicht) leiden tot nieuwe processen en uitfasering van sommige bestaande processen, waardoor de uitstoot per jaar afneemt. In formule:

$$U(t, j) = \sum_p u(p) * T(p, t, j) * V(p, t, j) * F(j) * C(p)$$

waarbij $U(t, j)$ de totale broeikasgasuitstoot is (in Mt CO₂-equivalenten) in een traject t (centraal traject, alternatief 1, alternatief 2, en in een jaartal j (2020, 2025, ..., 2050). De sommatie sommeert over alle uitstotende processen p bij alle bedrijven. $u(p)$ is de uitstoot per proces p , in Mt CO₂-equivalenten, voor de huidige productie. Om te zorgen dat ook de processen die niet in de MIDDEN-database voorkomen zijn opgenomen in de cijfers (en zodat die stroken met de huidige uitstoot), zijn enkele generieke processen opgenomen in de uitstootberekening, bijvoorbeeld als het gaat om de afvalsector en overige industrie. $T(p, t, j)$ is een factor die bepaalt in hoeverre een bepaald proces p in een bepaald traject t in een jaar j wordt ingezet (doorgaans tussen 0 en 1). $V(p, t, j)$ is de vraagverandering voor een bepaald proces p in een bepaald traject t in een bepaald jaar j (doorgaans tussen 0,2 en 2). $F(j)$ is een factor die corrigeert voor verbetering in procesefficiëntie voor een bepaald jaar j (doorgaans tussen 0,8 en 1). $C(p)$ is een correctiefactor per proces p die wordt toegepast om de cijfers te schalen zodat de uitstoot in 2020 rijmt met de uitstoot zoals gerapporteerd in de emissiecijfers (NEa, 2021) (doorgaans tussen 0,8 en 1,2).