



Afbouw fossiele brand- en grondstoffen in de industrie

Wat betekent het CO₂-plafond van het
Europese emissiehandelssysteem voor de
Nederlandse industrie?



Committed to the Environment

Afbouw fossiele brand- en grondstoffen in de industrie

Wat betekent het CO₂-plafond van het Europese emissiehandelssysteem voor de Nederlandse industrie?

Dit rapport is geschreven door:
Bettina Kampman, Koen van Dam, Emiel van den Toorn, Kris Manna

Delft, CE Delft, augustus 2025

Publicatienummer: 24.240216.166

Opdrachtgever: Natuur & Milieu

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Bettina Kampman (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al sinds 1978 werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	10
	1.1 Aanleiding	10
	1.2 Klimaatneutraal of fossielvrij?	10
	1.3 Doel van deze studie	11
	1.4 Afbakening	12
	1.5 Leeswijzer	12
2	ETS-plafond op CO ₂ -emissies in de industrie	13
	2.1 Nederlandse emissies binnen ETS 1 - huidige stand van zaken	13
	2.2 Europees reductiepad ETS 1 richting 2030 en 2040	17
	2.3 Nederlands reductiepad binnen het EU ETS 1	18
	2.4 Conclusie	20
3	Ontwikkeling toekomstscenario's voor de industrie	21
	3.1 De belangrijkste aannames in de scenario's	21
	3.2 Toelichting van de methodiek	23
4	Effecten op de CO ₂ -uitstoot van de scenario's	26
	4.1 Scenario 1 'Huidige trends'	26
	4.2 Scenario 2 'Regie en innovatie'	27
	4.3 Waarom blijven er restemissies over?	28
	4.4 Conclusie	29
5	Afbouwpaden fossiele brandstoffen	31
	5.1 Aardgas	31
	5.2 Kolen	32
	5.3 Aardolie	33
	5.4 Conclusie	34
6	Opbouwpad duurzame energiedragers en CCS	36
	6.1 Elektriciteit	36
	6.2 Groengas	38
	6.3 Waterstof	39
	6.4 CCS	40
	6.5 Conclusie opbouwpaden voor de ETS 1-industrie	40
7	Conclusies	45
	7.1 CO ₂ -reductiepad voor de ETS 1-sectoren	45
	7.2 Afbouw van fossiele brandstoffen	48
	7.3 Reflectie op de haalbaarheid van deze scenario's	50

	Literatuurlijst	52
A	Achtergrond bij de scenario's - overzichtstabellen	54
B	Factsheets	59
	Factsheet Non ferrometaal (aluminium, zink)	60
	Factsheet Staal	63
	Factsheet Voedselindustrie	65
	Factsheet Papier	67
	Factsheet Glas	69
	Factsheet Keramiek	71
	Factsheet Kunstmest	73
	Factsheet Industriële gassen	77
	Factsheet Raffinage	79
	Factsheet Organische basischemie	82

Samenvatting

Inleiding

De Nederlandse industrie onder het Europese emissiehandelssysteem zal haar CO₂-uitstoot de komende 15 jaar fors moeten verminderen, tot (vrijwel) nul vanaf 2040. Het Europese emissiehandelssysteem (EU ETS 1) vormt hiervoor een belangrijk sturingsinstrument. In deze studie verkennen we op welke manier de Nederlandse industrie aan deze doelstelling kan voldoen en brengen we in kaart wat dit betekent voor de afbouw van het gebruik van kolen, aardolie en aardgas.

In het rapport *Verkenning van een fossielvrije industrie* liet CE Delft in 2023 zien hoe een transitie naar een fossielvrije industrie in Nederland eruit zou kunnen zien. Natuur & Milieu heeft CE Delft gevraagd om hierop voort te bouwen door de transitie van fossiele brand- en grondstoffen naar hernieuwbare alternatieven verder uit te werken. De centrale vraag is *hoe* de industrie de benodigde CO₂-reductie in de komende 15 jaar kan realiseren binnen het kader van het EU ETS 1. Welk afbouwpad van fossiele brandstoffen - kolen, olie en aardgas - volgt hieruit? En hoe ziet de opbouw van de duurzame energiebronnen er vervolgens uit?

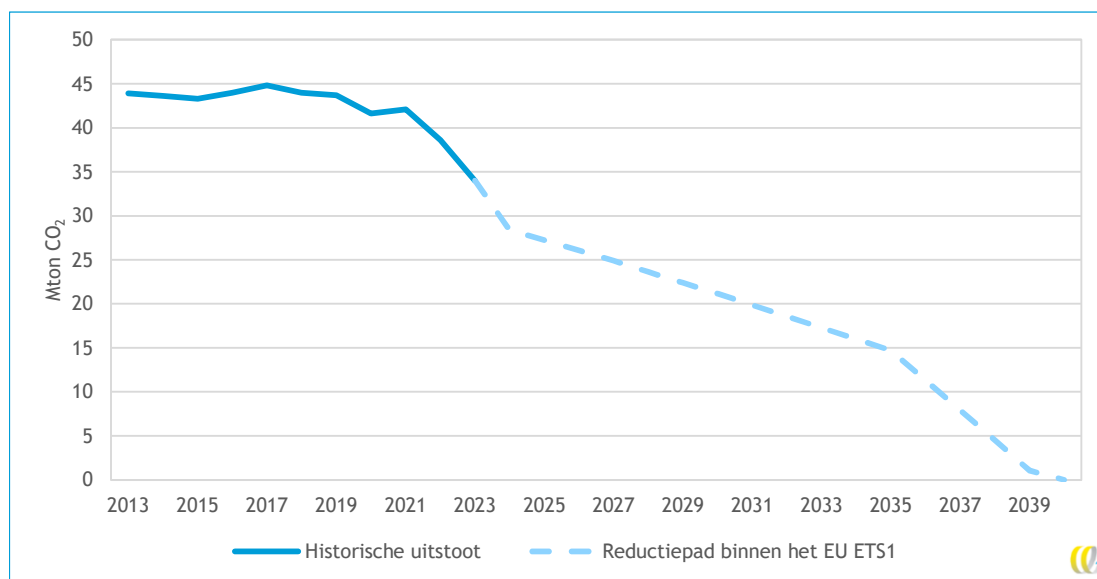
CO₂-reductiepad voor de industrie onder het EU-emissiehandelssysteem

Het EU ETS 1 stelt een jaarlijks dalend plafond aan de totale CO₂-uitstoot van de Europese industrie en energieproductie. Bedrijven die onder dit systeem vallen, moeten emissierechten aankopen en indienen voor elke ton CO₂ die zij uitstoten. Omdat het aantal beschikbare rechten elk jaar afneemt, daalt ook de totale uitstoot. Als de huidige daling na 2030 wordt voortgezet, zijn er in 2040 geen emissierechten meer beschikbaar en zal de uitstoot van de onder ETS 1 vallende Europese industrie dus op nul uitkomen¹.

Nederland verbruikt op dit moment 6% van het totale aantal EU ETS 1-rechten. Als dit aandeel constant blijft, betekent dit dat de CO₂-uitstoot van de Nederlandse industrie moet dalen van 35,7 Mton CO₂ in 2023 naar 21 Mton in 2030, 15 Mton in 2035 en uiteindelijk 0 Mton in 2040. Volgens het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) komt de uitstoot van de ETS 1-industrie in 2030 naar verwachting nog rond de 31,1 Mton uit (PBL, 2024a). Dit betekent dat de emissiereductie fors versneld moet worden om binnen dit ETS-reductiepad te blijven.

¹ Dit geldt ook voor de meeste andere sectoren onder het ETS 1, zoals grootschalige elektriciteitscentrales. In dit rapport ligt de focus echter op de industrie.

Figuur 1 - Historische uitstoot Nederlandse industrie in ETS 1 en het CO₂-reductiepad dat volgt uit de in dit rapport gemaakte keuzes



CO₂-reductie kan op verschillende manieren worden bereikt

In deze studie is gekeken naar tien industriële sectoren, die samen 97% van de industriële ETS 1-emissies in Nederland omvatten. Voor deze sectoren zijn twee scenario's ontwikkeld, die zich onderscheiden door andere aannames over bijvoorbeeld de technologie en snelheid waarmee productieprocessen worden verduurzaamd, en de mate waarin bepaalde processtappen wellicht naar het buitenland worden verplaatst. Hiermee is onderzocht hoe de CO₂-uitstoot in de praktijk kan worden afgebouwd om binnen het ETS 1-reductiepad uit Figuur 1 te blijven, met als doel om in 2040 zoveel mogelijk op nul uit te komen.

Het eerste scenario, '**Huidige trends**', sluit aan bij bestaande plannen van de industrie, maar versnelt deze om binnen het ETS 1-reductiepad te blijven. Het richt daarmee zich op een versnelde implementatie van duurzame productieroutes die relatief weinig technologische ontwikkeling meer nodig hebben. Zo wordt elektrificatie ingezet waar dat met de huidige technologie al goed mogelijk is, en er wordt relatief veel gebruikgemaakt van CO₂-afvang en -opslag (CCS). Voor staalproductie is uitgegaan van het huidige Groen Staal Plan van Tata Steel (begin 2025). De ammoniakproductie verdwijnt uit Nederland, omdat productie elders goedkoper is. De hernieuwbare waterstof voor andere industrieën wordt geïmporteerd. De raffinagesector krimpt volgens het 'behoudende' scenario voor fossielvrije mobiliteit dat is ontwikkeld door PBL.

Het tweede scenario, '**Regie en innovatie**', zet meer in op innovatie en nationale sturing van de transitie. Hier wordt breder ingezet op elektrificatie met warmtepompen, en elektrificatie van verschillende hogetemperatuurprocessen. Hernieuwbare waterstof en ammoniak worden nationaal geproduceerd. Staalproductie krimpt, en energie-intensieve processtappen verplaatsen naar het buitenland, vanwege de relatief hoge energiekosten in Nederland. De raffinagesector krimpt volgens het scenario 'innovatief' voor fossielvrije mobiliteit van PBL.

Tabel 1 - De belangrijkste kenmerken van de twee scenario's

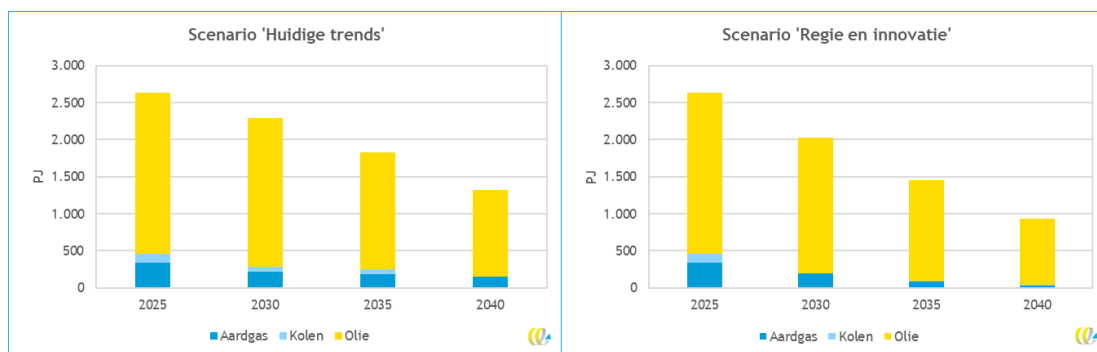
	Scenario 'Huidige trends'	Scenario 'Regie en innovatie'
CCS	– Hoog	– Alleen voor de transitie
Elektrificatie	– Voor laagtemperatuurprocessen, via e-boiler	– Voor laagtemperatuurprocessen via warmtepomp – Voor een aantal hogetemperatuurprocessen na innovatie (glas, aluminiumrecycling) – Voor staalproductie
Groene waterstof	– Import	– Lokale productie – Voor overige hogetemperatuurprocessen
Krimp van productie	– Ammoniak naar 0 in 2050 – Raffinage volgens PBL 'behoudend' – Non-ferro	– Ammoniak wordt alleen nog geproduceerd voor kunststofproductie – Staal van 7 Mton naar 4 Mton per jaar in 2030 – Raffinage volgens PBL 'innovatief' – Non-ferro – Kunststoffen
Groengas	– Hogetemperatuurprocessen	– Hogetemperatuurprocessen
Resterende CO ₂ -emissie in 2040, in Mton en als % ten opzichte van 2025	– 6,4 Mton – 17%	– 2,2 Mton – 6%
Gebruik fossiele brand- en grondstoffen in 2040, ten opzichte van 2025	– 50%	– 35%

Beide scenario's leiden de komende 15 jaar tot een forse CO₂-reductie door de geleidelijke afbouw van het gebruik van fossiele brand- en grondstoffen, de groeiende inzet van hernieuwbare energiebronnen en CCS, en gedeeltelijke verplaatsing van productie naar landen met goedkopere hernieuwbare energie. Omdat echter niet alle resterende CO₂-uitstoot kan worden afgevangen en opgeslagen (CCS), komt geen van beide scenario's uit op nul CO₂-emissie, zoals het reductiepad van het EU ETS 1 voorschrijft. Scenario 'Regie en innovatie' laat wel een aanzienlijk snellere en diepere reductie zien dan scenario 'Huidige trends', zowel in CO₂-uitstoot als in gebruik van fossiele grondstoffen. Doordat er zeer waarschijnlijk in 2040 nog veel vraag is naar producten op basis van fossiele grondstoffen, bijvoorbeeld vliegtuigbrandstoffen en plastics, blijft met name het aardoliegebruik in de industrie nog aanzienlijk.

Afbouwpaden voor aardolie, gas en kolen

In beide scenario's daalt het gebruik van fossiele brand- en grondstoffen fors, zoals weergegeven in Figuur 2.

Figuur 2 - De afbouwpaden voor gebruik van aardgas, kolen en aardolie in de Nederlandse ETS 1-industrie, in de twee scenario's

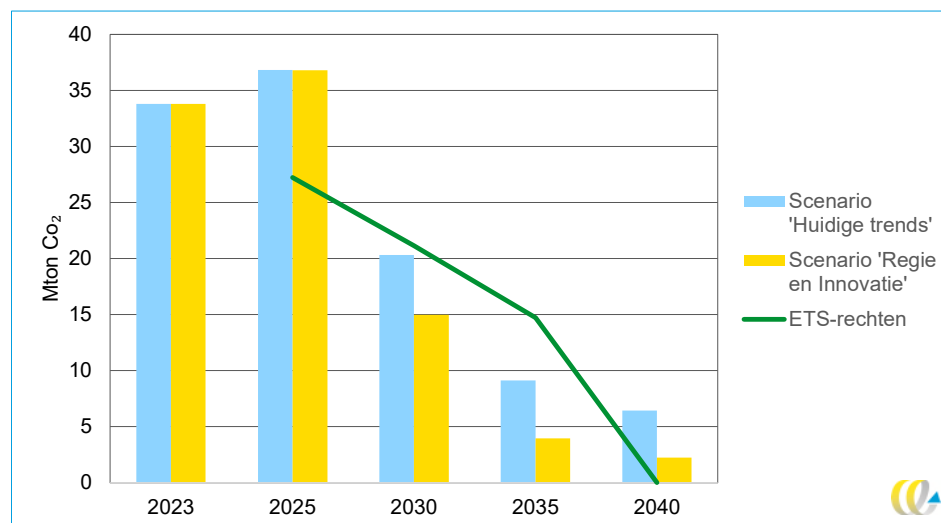


- **Kolen:** verbruik daalt in beide scenario's naar (bijna) nul. Kolen worden nu gebruikt bij de productie van staal. Door staal met aardgas, waterstof of in het buitenland te maken, kan het gebruik van kolen in het scenario 'Huidige trends' in 2037 en in scenario 'Regie en innovatie' in 2030 verdwijnen.
- **Aardgas:** verbruik daalt sterk, maar gaat in geen van beide scenario's naar nul. Aardgas kan in veel sectoren vervangen worden door elektriciteit, groengas en waterstof. In het scenario 'Huidige trends' blijft het aardgasgebruik ook in 2040 nog significant in de sectoren organische chemie, raffinage en staal. Om toch CO₂-reductie te bereiken, wordt gebruikgemaakt van CCS. In het scenario 'Regie en innovatie' zal de productie van staal in 2030 geen aardgas gebruiken, terwijl de sectoren van organische chemie en raffinage sneller zullen afnemen. Hierdoor neemt het gebruik van aardgas sneller af.
- **Aardolie:** verbruik kan in de Nederlandse industrie significant afnemen tot 2040, maar blijft aanzienlijk. Aardolie wordt gebruikt voor de productie van brandstoffen voor mobiliteit en als grondstof voor de chemie. Zonder vergaande aanscherping van het klimaatbeleid voor mobiliteit, blijft er in beide scenario's in 2040 een aanzienlijke vraag naar fossiele raffinageproducten, en daarmee ook naar aardolie. Deze vraag zal wel verder afnemen in de periode na 2040.

De CO₂-uitstoot kan fors dalen, maar niet tot nul in 2040

In beide scenario's daalt de CO₂-uitstoot fors, maar er blijven in 2040 restemissies over, zoals Figuur 3 laat zien. Scenario 'Regie en innovatie' laat wel een veel grotere reductie zien dan scenario 'Huidige trends', maar het ETS 1-doel van nul uitstoot in 2040 wordt in geen van beide scenario's gehaald.

Figuur 3 - Ontwikkeling van de CO₂-uitstoot in de afbouwpaden, ten opzichte van het ETS 1 CO₂-reductiepad



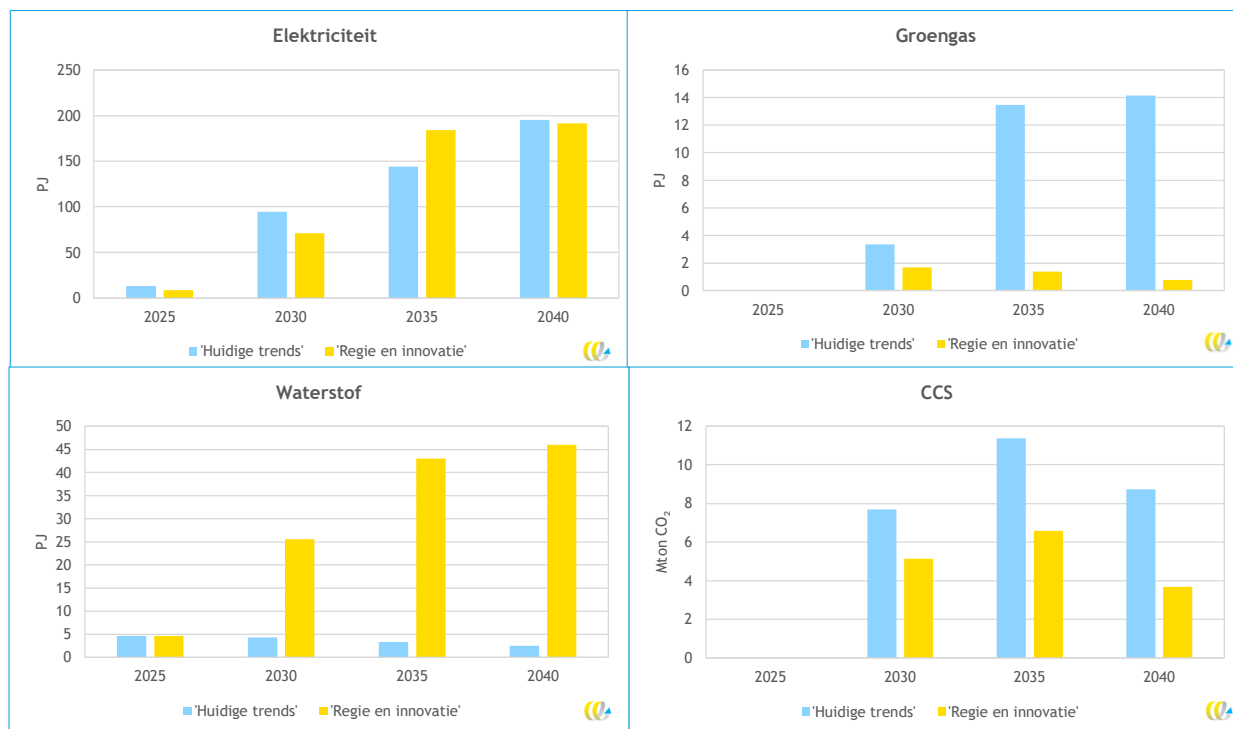
De CO₂-uitstoot blijft in beide scenario's in 2030 en 2035 onder het EU ETS 1-reductiepad.² Het reductiedoel voor 2040 wordt echter niet behaald. In scenario 'Huidige trends' blijft er 6,3 Mton CO₂ over, scenario 'Regie en innovatie' komt uit op 2,2 Mton CO₂. Op dit moment zien we geen technisch haalbare mogelijkheden om de uitstoot in 2040 volledig naar nul te reduceren, zoals het EU ETS 1 voorschrijft, zonder grootschalige verplaatsing van productie naar het buitenland. De sectoren waar restemissies overblijven zijn in beide scenario's Staal, Kunstmest, Raffinage, Keramiek en Glas. De hoeveelheid restemissies per sector verschilt echter tussen de scenario's. Om deze restemissies verder te reduceren (zonder productie te verplaatsen naar elders) zal er aanzienlijk meer gestuurd moeten worden op vraagvermindering naar producten uit deze sectoren dan nu wordt gedaan.

De vraag naar duurzame alternatieven neemt sterk toe

Om de afbouw van fossiele brandstoffen mogelijk te maken, zal het gebruik van duurzame alternatieven sterk moeten groeien. Vanwege het aanhoudende gebruik van fossiele brandstoffen (zie Figuur 4) is in beide scenario's ook CCS nodig om zoveel mogelijk CO₂-reductie te realiseren. De toename in vraag naar duurzame elektriciteit, groengas, groene waterstof en CCS in beide scenario's is weergegeven in onderstaande figuren.

² De resterende ETS 1-emissierechten kunnen worden ingezet door industrie in andere EU-landen, of op een later moment worden benut (rond 2040). Daarmee ontstaat enige ruimte om eventuele tegenvallers in het tempo van de verduurzaming op te vangen. Die ruimte is in het scenario 'Regie en innovatie' overigens aanzienlijk groter dan in 'Huidige trends'.

Figuur 4 - Ontwikkeling van de vraag naar elektriciteit, groengas, groene waterstof en CCS in de scenario's



De bestaande overheidsplannen lijken in eerste instantie voldoende om aan de groeiende vraag naar hernieuwbare energiedragers vanuit de industrie te voldoen. Daarbij is het wel belangrijk om op te merken dat plannen nog geen garantie bieden voor daadwerkelijke realisatie. Er zijn duidelijke signalen dat netcongestie, groengasproductie, waterstofproductie, -transport en -import, en de realisatie van CCS-capaciteit vertraging oplopen. Bovendien doen ook andere sectoren een beroep op deze hernieuwbare energiedragers. Dit kan grote gevolgen hebben voor de haalbaarheid van de hier beschreven scenario's.

Afsluitende conclusies

Dit onderzoek laat zien dat een zeer forse CO₂-reductie van de Nederlandse industrie nodig is om onder het emissieplafond van het EU ETS 1 te blijven.

Verduurzaming langs de lijn van het scenario 'Regie en innovatie' brengt ons aanzienlijk dichterbij de ETS-doelen dan het meer behoudende scenario 'Huidige trends'. De maatregelen in dat scenario zijn op de langere termijn onvoldoende om de ETS 1-doelen te halen. Met meer regie en inzet op opschaling van duurzame energiebronnen en technologieën kan er aanzienlijk meer worden bereikt. Een industrie die in 2040 volledig CO₂-uitstootvrij is in 2040, lijkt alleen haalbaar wanneer consumptie en productie van fossiele brandstoffen en producten sneller worden afgeschaald dan nu wordt voorzien. Hierbij is het belangrijk om te monitoren dat de afbouw van productie in Nederland niet leidt tot verplaatsing zonder verduurzaming elders.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De CO₂-uitstoot van de Nederlandse industrie is ongeveer een derde (32%) van de totale Nederlandse uitstoot³. Die uitstoot moet de komende jaren fors worden verminderd en uiteindelijk, uiterlijk in 2050, zelfs tot vrijwel nul worden gereduceerd om de nationale en Europese klimaatdoelen te halen en te voldoen aan het Klimaatakkoord van Parijs.

Een van de belangrijkste beleidsmaatregelen om de uitstoot van de industrie te verminderen is het Europese emissiehandelssysteem ETS 1. Hierin worden jaarlijkse rechten voor de uitstoot van CO₂ uitgegeven en geveild. Het totaal aantal rechten dat wordt uitgegeven neemt elk jaar af, de rechten kunnen onderling verhandeld worden. Op deze CO₂-markt ontstaat een prijs voor uitstoot, die door krimpemde aanbod zal stijgen. Als de huidige ETS 1-regelgeving van kracht blijft en het aantal rechten blijft afnemen zoals dat op dit moment is afgesproken worden er rond 2040 geen CO₂-uitstootrechten meer vergeven voor de Europese industrie en elektriciteitsproductie. Dit komt er op neer dat de CO₂-uitstoot van deze sectoren dan tot nul moet zijn gereduceerd, tenzij het ETS 1 in de periode tot 2040 fundamenteel wordt aangepast⁴.

Dit ETS 1 is hiermee een belangrijke drijvende kracht binnen het Europese klimaatbeleid en daarmee ook voor de transitie van de Europese industrie en elektriciteitsvoorziening naar een duurzame toekomst. Daarnaast is er nog veel aanpalend en aanvullend beleid, zoals verplichte sluiting van kolencentrales, beleid voor groei van hernieuwbare energieproductie en energiebesparing, uitbreiding van energie-infrastructuur en Europese en nationale subsidieregelingen.

Het eindbeeld dat er in 2040 geen rechten meer zullen worden uitgegeven binnen het ETS 1, heeft grote gevolgen voor de Nederlandse industrie, en de bijbehorende energie- en grondstoffenvoorziening. Om die transitie zo goed mogelijk te faciliteren en vorm te geven is het belangrijk om inzicht te hebben in de veranderingen die er gaan komen, zodat de bedrijven zelf, de relevante beleidsmakers en andere stakeholders hier goed op in kunnen spelen.

In dit rapport onderzoeken wij hoe zo'n transitie naar een industrie zonder CO₂-uitstoot in 2040 in grote lijnen eruit kan zien voor Nederland. We brengen in kaart op welke manier de productieprocessen en energievoorziening van de Nederlandse ETS-industrie zou kunnen veranderen. We laten ook zien wat dit betekent voor de afbouw van de vraag naar fossiele olie, kolen en aardgas vanuit de industrie, en de gevolgen voor de vraag naar alternatieve energiebronnen.

1.2 Klimaatneutraal of fossielvrij?

Met deze studie bouwen we voort op het onderzoek 'Verkenning van een fossielvrije industrie' dat CE Delft heeft gepubliceerd in 2023, ook in opdracht van Natuur & Milieu. Hierin is voor verschillende sectoren in Nederland uitgezocht wat de mogelijkheden zijn om

³ Bron: [Welke sectoren stoten broeikasgassen uit? | CBS](#)

⁴ In de praktijk kunnen er in 2040 nog wel (ongebruikte) uitstootrechten in omloop zijn van eerdere jaren. Uiteindelijk zullen die rechten ook worden opgebruikt, en worden geen nieuwe rechten meer uitgegeven.

fossielvrij te produceren in Nederland. Het resultaat geeft een toekomstbeeld van een fossielvrije industrie in Nederland, dat technisch haalbaar en ook economisch logisch is - het past bij een wereld waarin fossiele energie- en grondstoffen zijn vervangen door hernieuwbare bronnen. Bovendien geeft het rapport inzicht in de mechanismen die optreden door de transitie van een fossiele naar een fossielvrije energie- en grondstoffen-voorziening.

Het huidige rapport maakt gebruik van de inzichten uit dat rapport, maar gaat uit van een minder ingrijpende doelstelling: de CO₂-uitstoot van de industrie neemt steeds meer af, tot er in 2040 geen CO₂ meer wordt uitgestoten. Die CO₂-reductie kan worden bereikt door fossielvrij te produceren, en over te stappen naar hernieuwbare energie en grondstoffen, maar een deel van de industrie heeft daarnaast ook de mogelijkheid om fors CO₂ te reduceren door gebruik te maken van CO₂-afvang en opslag (carbon capture and storage, CCS) op fossiele processen.

Een ander verschil met het rapport uit 2023 is dat we hier alleen kijken naar de *directe* emissies van de industrie, oftewel de focus ligt op het reduceren van de CO₂-uitstoot die binnen het EU ETS 1 valt. Indirecte emissies, bijvoorbeeld de uitstoot van door de raffinaderijen geproduceerde transportbrandstoffen of uitstoot die plaats vindt bij de winning van fossiele brandstoffen, vallen hier buiten beschouwing. We nemen in de analyse wel mee dat de vraag naar fossiele producten (zoals benzine, diesel, plastics) zal dalen, maar we gaan er niet vanuit dat die vraag naar nul gaat in 2040. Er zijn ook nog geen concrete doelen die voorschrijven dat die producten klimaatneutraal of fossielvrij moeten worden geproduceerd in 2040.

1.3 Doel van deze studie

Het doel van dit onderzoek is om concrete afbouwpaden te ontwikkelen voor fossiele brand- en grondstoffen, waarmee de Nederlandse industrie onder het ETS 1 uiterlijk in 2040 geen CO₂ meer uitstoot.

De achterliggende onderzoeksvragen zijn de volgende:

1. Ervan uitgaande dat elk Europees land haar eerlijke bijdrage levert aan het ETS 1, hoeveel megaton CO₂ wordt dan in Nederland gereduceerd in 2030 en 2040?
2. Wat betekent het ETS 1 voor het gebruik en de afbouw van olie, kolen en gas in de Nederlandse industrie?
3. Wat betekent dit voor de opbouw van hernieuwbare brand- en grondstoffen? Hoe verhoudt zich dit tot de huidige trends en plannen (in hoeveelheden en tempo)?

Vanwege de onzekerheden in de ontwikkelingen hebben we voor de beantwoording van vragen 2 en 3, twee scenario's opgesteld die verschillende mogelijke ontwikkelpaden van de industrie laten zien richting 2040. Voor beide scenario's brengen we vervolgens in kaart hoe het gebruik van fossiele olie, kolen en gas dan afneemt tot 2040, hoe snel de CO₂-uitstoot zal reduceren, en hoe de vraag naar hernieuwbare brand- en grondstoffen zich zal ontwikkelen.

Deze studie benadert vragen 2 en 3 vanuit technisch-economisch perspectief: met welke technische maatregelen kan de Nederlandse industrie inspelen op het steeds lager wordende uitstootplafond, binnen de context van de veranderende mondiale energiemarkt, en rekening houdend met de op dit moment verwachte ontwikkelingen in de vraag naar producten en materialen? Dit is dan ook geen beleidsanalyse, we brengen niet in kaart of en hoe de overheid deze ontwikkelingen verder zou kunnen steunen of bijsturen. Het enige



beleid dat we concreet meenemen in deze studie is het EU ETS 1, zoals dat op dit moment is afgesproken.

1.4 Afbakening

De scope van deze studie is de industrie in Nederland die onder het EU ETS 1 valt. Wij houden in de analyse van de afbouwpaden rekening met een vijfjaarlijks interval, van 2025 t/m 2040.

Grootschalige energieopwekking en lucht- en zeevaart vallen buiten de scope van deze studie, ook al vallen die (deels) ook onder het ETS 1.

We gaan er verder van uit dat de uitstoot niet kan worden gecompenseerd met negatieve emissies. Op dit moment biedt het ETS 1 daar geen ruimte voor, en het is ook nog niet duidelijk of er mogelijkheden hiervoor zullen komen.

1.5 Leeswijzer

- Hoofdstuk 2 beschrijft de emissies van Nederland binnen het ETS 1, het beschikbare budget tot 2040 en de tien industriële sectoren die wij in dit onderzoek beschouwen.
- Hoofdstuk 3 beschrijft twee scenario's die zijn ontwikkeld in deze studie die laten zien hoe de industriële emissies kunnen worden gereduceerd.
- Hoofdstuk 4 beschrijft de CO₂-emissies van deze scenario's en vergelijkt ze met het ETS 1 CO₂-afbouwpad.
- Hoofdstuk 5 beschrijft de effecten van deze afbouwpaden voor het gebruik van de fossiele brandstoffen: aardgas (Paragraaf 5.1), kolen (Paragraaf 5.2) en aardolie (Paragraaf 5.3).
- In Hoofdstuk 6 beschrijven wij de benodigde opbouwpaden die nodig zijn om deze fossiele brandstoffen te vervangen: elektriciteit (Paragraaf 6.1), groengas (Paragraaf 6.2) en waterstof (Paragraaf 6.3), daarnaast beschrijven wij nog de benodigde hoeveelheid CCS (Paragraaf 6.4) en de opbouwpaden voor vervangers van olie.
- In Hoofdstuk 7 volgen de conclusies, en reflecteren we op de haalbaarheid van de hier ontwikkelde scenario's.

2 ETS-plafond op CO₂-emissies in de industrie

In dit hoofdstuk wordt geschetst hoe de CO₂-emissies van de industrie in Nederland die onder het ETS 1 valt moet afnemen richting 2040 om in lijn te blijven met de reductie van het CO₂-plafond van het EU ETS 1.

Het EU ETS 1 is op dit moment het belangrijkste instrument voor klimaatbeleid voor de Europese industrie, het legt een almaar lager wordend plafond op de totale uitstoot van de Europese grootschalige industrie en energievoorziening. Door een systeem van handelbare CO₂-uitstootrechten ontstaat er een prijs voor CO₂-uitstoot. Als de huidige ETS-richtlijn wordt doorgezet richting 2040 mag er vanaf dat jaar geen CO₂ meer worden uitgestoten in de industrie en energieproductie die onder het ETS 1 valt⁵. De regelgeving kan in de toekomst nog worden aangepast, maar in dit rapport gaan we uit van de huidige wetgeving.

De deelvragen die in dit hoofdstuk beantwoord worden zijn:

- Als Nederland de huidige reductiepercentages van het emissieplafond in het EU ETS 1 volgt, hoeveel megaton CO₂ moet er dan in de Nederlandse ETS-industrie worden gereduceerd in 2030 en 2040?
- Wat betekent dit voor de reductie van de CO₂-uitstoot van de Nederlandse industrie in 2030 en 2040?
- Hoe verhoudt die reductie zich tot het nationaal geformuleerde klimaatdoel van de industrie?

Het resultaat van dit hoofdstuk is een CO₂-afbouwpad voor de Nederlandse ETS-industrie, dat de basis vormt voor de volgende hoofdstukken van dit rapport.

2.1 Nederlandse emissies binnen ETS 1 - huidige stand van zaken

Vanaf de introductie in 2005 is het EU ETS geleidelijk aan de hoeksteen van het Europese klimaatbeleid geworden. De grote industriële uitstoters van CO₂ in de EU moeten rechten kopen voor hun jaarlijkse uitstoot. Deze rechten zijn handelbaar en dwingen zo de bedrijven met de hoogste CO₂-intensiteit tot CO₂-reductie. Hoewel het systeem begon met gratis toewijzing van rechten en een hele lage prijs, worden de gratis rechten steeds verder afgebouwd, en door toenemende krapte op de markt stijgt de prijs. Hiernaast worden er langzamerhand meer sectoren toegevoegd aan het ETS, zoals zee- en luchtvaart. Vanaf 2025 is er ook een ETS 2, dat emissiehandel opzet voor brandstofleveranciers in sectoren die niet binnen het ETS 1 vallen (transport, gebouwde omgeving, kleine industrie).

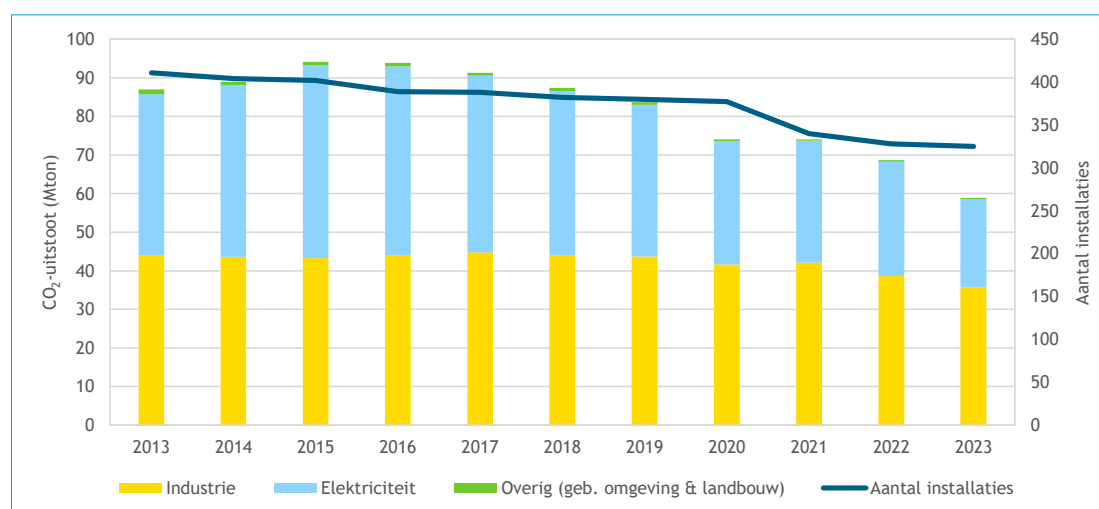
In Nederland valt ongeveer 43% van de gehele CO₂-uitstoot binnen het ETS 1 (in 2022). Het gaat voornamelijk om de elektriciteitscentrales en de zware industrie. Van de totale CO₂-uitstoot in de industrie (41,4 Mton in 2023) valt 86% (35,7 Mton in 2023) binnen het ETS 1. In totaal gaat het om ongeveer 325 installaties. De gebouwde omgeving die binnen het ETS 1 valt (zoals enkele grote ziekenhuizen) stoot minder dan 0,5 Mton uit. De landbouw die

⁵ In de praktijk kunnen er in 2040 nog wel (ongebruikte) uitstootrechten in omloop zijn van eerdere jaren. Uiteindelijk zullen die rechten ook worden opgebruikt, en worden geen nieuwe rechten meer uitgegeven.

binnen het ETS 1 valt (sommige glastuinbouwbedrijven) kende al een sterk dalende trend en zat in 2022 op nul emissies.

De ontwikkeling van de Nederlandse uitstoot binnen het ETS 1 tussen 2013 en 2023 is uitgezet in onderstaande figuur. Na een lichte stijging rond 2014 is de uitstoot gestaag afgenomen, voornamelijk door reductie van uitstoot in de elektriciteitssector. De uitstoot van de industrie is sinds 2014 slechts beperkt afgenomen⁶. Door sluitingen of verplaatsing van activiteiten naar het buitenland, is het aantal installaties dat onder het ETS valt sinds 2013 langzaam afgenomen, van 411 naar 325 in 2023.

Figuur 5 - Nederlandse uitstoot binnen ETS 1 per sector en aantal installaties binnen ETS 1 (beiden exclusief luchtvaart)



Bron: (NEa, 2024; PBL, 2023).

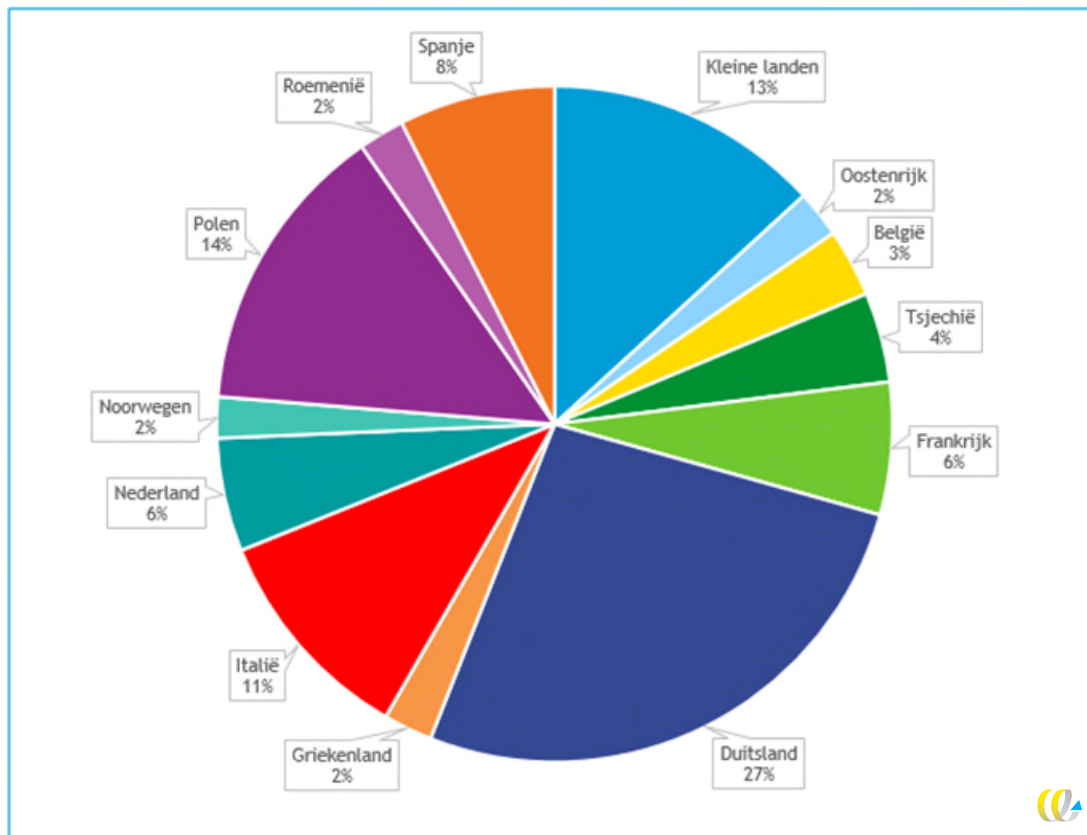
2.1.1 Nederlands aandeel binnen het ETS 1

Het huidige aandeel van Nederland in de totale CO₂-uitstoot binnen het EU ETS 1 is 6%. Door de langdurige aanwezigheid van goedkoop aardgas (met name vanwege het Slochteren gasveld in Groningen) en een goede logistieke positie (onder andere zeehavens) heeft Nederland relatief veel zware industrie. Dat zorgt ervoor dat Nederland een relatief groot deel van de ETS 1-rechten gebruikt, vergeleken met bijvoorbeeld aandeel van de bevolking (4% van het totaal in de EU) of oppervlakte (0,8% van het totaal)⁷.

⁶ In vergelijking met 1990 is er wel een sterke daling van de totale broeikasgasuitstoot waar te nemen. In 1990 stootte de (ETS en niet-ETS) industrie bijna 90 Mton CO₂-eq. per jaar uit, inmiddels ligt dat onder de 50 Mton CO₂-eq. (Dashboard Klimaatbeleid, 2024). Dit effect werd voor een groot deel veroorzaakt door reductie van uitstoot van andere broeikasgassen dan CO₂.

⁷ Bron: [Nederland - profiel van een EU-land | Europese Unie](#)

Figuur 6 - CO₂-uitstoot binnen ETS 1 per land, inclusief luchtvaart voor het boekjaar 2023

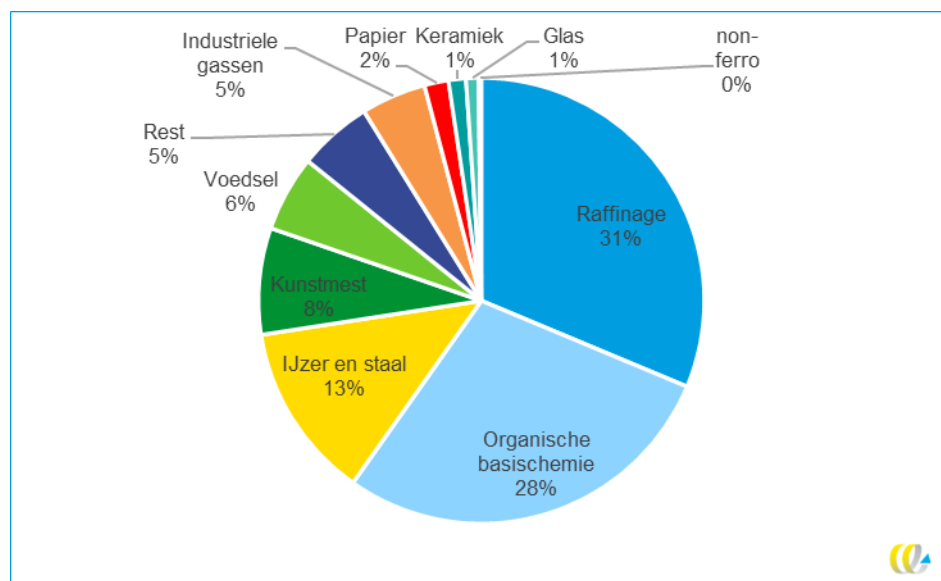


Doordat de CO₂-rechten kunnen worden verhandeld binnen het ETS, wordt de bijdrage van de verschillende installaties aan CO₂-reductie binnen het ETS bepaald op basis van kosteneffectiviteit. De kosteneffectiviteit verschilt per land, per sector en zelfs per bedrijf en per periode. Dit is het basisprincipe van het ETS, al spelen in de praktijk ook veel andere factoren een rol in de CO₂-reductie per installatie: overheidssubsidies (zoals in Nederland SDE++, maatwerkafspraken en andere subsidieregelingen voor de industrie), verplichtingen (zoals de sluiting van kolencentrales), energiebesparingsbeleid, groei van hernieuwbare energie, ontwikkeling van energie- en CCS-infrastructuur, etc.

2.1.2 Bijdrage van de verschillende industriële sectoren aan de Nederlandse ETS 1-emissies

De bijdrage van de verschillende industriële sectoren aan deze emissies is voor 2023 weergegeven in Figuur 7. Het gros van de industriële ETS 1-emissies, circa 31%, is toe te kennen aan raffinaderijen. De organische basischemie en de ijzer- en staalindustrie volgen met respectievelijk 26% en 13% van de industriële ETS-emissies in 2023. De figuur laat ook zien dat tien sectoren verantwoordelijk zijn voor 97% van de huidige industriële emissie in Nederland binnen het ETS 1. In de volgende hoofdstukken beperken we dan ook tot deze sectoren.

Figuur 7 - Bijdrage van de verschillende sectoren aan de totale emissies van de Nederlandse industrie onder het ETS 1 in 2023



Bron: (NEa, 2024).

Meer gedetailleerde data zijn te vinden in Tabel 2.

Tabel 2 -Bijdrage van de verschillende sectoren aan de ETS 1-uitstoot in Nederland, in 2023

Industriële sector	CO ₂ -uitstoot in 2023 (ton CO ₂)	CO ₂ -uitstoot, relatief aan industriële ETS-uitstoot
Raffinage	11.175.026	31%
Organische basischemie	10.168.921	28%
IJzer en staal	4.559.983	13%
Kunstmest	2.759.055	8%
Voedsel	1.968.050	6%
Industriële gassen	1.680.948	5%
Papier	626.153	2%
Keramiek	449.275	1%
Glas	325.710	1%
Non-ferro	69.189	0%
Rest	1.921.440	5%
Totaal Industrie	35.703.750	100%
Gebouwde omgeving	220.828	
Elektriciteit	22.954.520	
Totaal ETS 1	58.879.098	

Bron: (NEa, 2024).

Bij deze data zijn twee belangrijke kanttekeningen te maken:

1. De emissies die horen bij staalproductie zijn in 2023 8,6 Mton (NEa, 2024). Hiervan wordt de helft toegerekend aan elektriciteitsproductie en de helft aan de staalproductie. Bij twee elektriciteitscentrales in Velsen-Noord worden gassen die vrijkomen bij de staalproductie verbrand om elektriciteit op te wekken. In de rest van deze analyse wordt de helft van de emissies van de conventionele staalproductie toegekend

aan de staalproductie. De emissies in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** laten deze fractie zien, de rest zit verwerkt onder de noemer 'elektriciteit'.

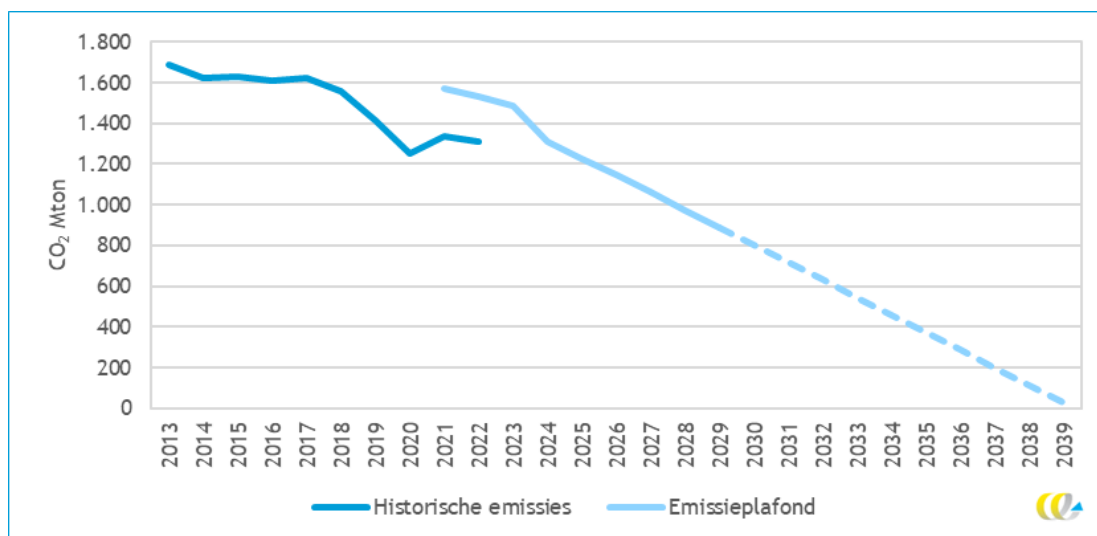
2. Onder de kunstmestindustrie vallen Yara in Sluiskil en Rosier. De belangrijkste emissie van de kunstmestindustrie komt van de productie van ammoniak uit aardgas. Een andere grote partij die dit doet, is OCI in Geleen. Dit valt qua emissierechten echter onder Chemelot. Hier en in de rest van de analyse wordt een kwart van de emissie van Chemelot toegewezen aan de sector 'kunstmest', omdat ammoniakproductie de emissieveroorzakende stap is.

2.2 Europees reductiepad ETS 1 richting 2030 en 2040

In Figuur 8 zijn de historische Europese emissies binnen het EU ETS 1 weergegeven, samen met het huidige reductiepad van beschikbare uitstootrechten voor het ETS 1 tot 2030, en de verdere ontwikkeling tot 2040 als de reductiefactor die tot 2030 is afgesproken ook na 2030 wordt doorgetrokken. Het ETS 1 loopt dan ergens tussen 2039 en 2040 af. De te vergeven emissierechten komen dan uit op nul.

Voor de inrichting van de volgende handelsperiode (na 2030) moet nog een besluit worden genomen. In het wetsvoorstel om het ETS 1 te hervormen naar aanleiding van de Green Deal, werd het voornemen opgenomen het ETS ook in lijn te brengen met het EU-brede klimaatdoel voor 2040. Dit doel zal waarschijnlijk in 2026 worden vastgesteld, waarbij de huidige Commissie een voorstel voor een 90%-reductiedoel in 2040 heeft gedaan (Commissie, 2025).

Figuur 8 - Historische Europese emissies en ontwikkeling van het aantal beschikbare rechten in ETS 1, op basis van de huidige inrichting van het handelssysteem



Bron: (EC, 2020; EEA, 2023; Europese Commissie, 2024).

De CO₂-reductiefactor in het ETS 1 zou in de toekomst dus nog kunnen worden aangepast (zie bijvoorbeeld de analyse in (Pahle et al., 2023)). Daarnaast bestaat er de mogelijkheid om CO₂-rechten eerder in te kopen om in latere jaren pas in te zetten, ook dat komt niet uit de figuur naar voren (ETS-rechten zijn in principe 10 jaar geldig (Pahle et al., 2023)).

Verder gaan we er hier ook vanuit dat er voor de opname van de luchtvaartsector (intra-EEA) in het ETS 1 een oplossing wordt gevonden. Op basis van de huidige regels binnen het ETS 1 zal de luchtvaart vanaf 2035 het overgrote deel van de emissierechten binnen ETS 1 nodig hebben. Bovendien is het niet realistisch dat deze sector in 2040 volledig uitstootvrij is (CE Delft, 2021a).

2.3 Nederlands reductiepad binnen het EU ETS 1

Zoals eerder toegelicht is het EU ETS 1 een Europees systeem, het bevat geen nationale reductiedoelen. Om toch iets te kunnen zeggen over de ontwikkeling van de emissieruimte binnen het ETS 1 voor de Nederlandse industrie gaan we er in dit rapport van uit dat het **aandeel van Nederland binnen het ETS 1 stabiel blijft rond de huidige 6% van de ETS 1-uitstootrechten**. Dit lijkt een redelijk uitgangspunt, al zijn er natuurlijk ook hele andere ontwikkeling mogelijk.

Deze uitstootrechten kunnen we vervolgens verdelen over de twee grootste sectoren binnen het ETS 1 op dit moment: de elektriciteitsproductie en de industrie. Zoals naar voren kwam in

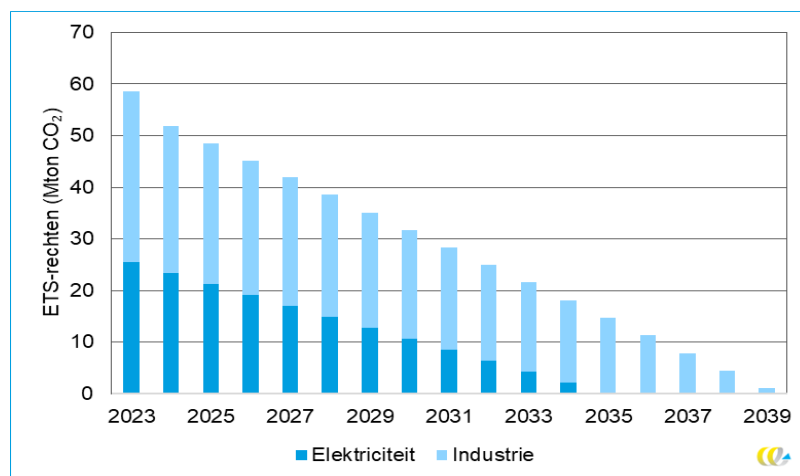
Figuur 1 is de elektriciteitssector in de afgelopen tien jaar sneller verduurzaamd dan de industrie. Hierdoor is het mogelijk dat de gehele (theoretische) nationale emissieruimte tot 2040 eveneens ongelijk verdeeld zal zijn tussen deze twee sectoren. *NB. Dit betreft alleen de rechten voor stationaire installaties: rechten voor lucht- en zeevaart vallen hierbuiten.*

Voor het vervolg van dit rapport is gekozen voor de volgende set aannames:

- de uitstoot van elektriciteitsproductie gaat naar nul in 2035, in lijn met het doel dat is opgenomen in de Klimaatnota 2023 (Ministerie van EZK, 2023);
- de uitstoot van overige sectoren onder het ETS 1 (gebouwde omgeving, landbouw) gaat naar 0 in 2030, in lijn met de huidige trend (de ETS 1-emissies van deze sector zijn ook nu al vrijwel nihil);
- het resterende deel binnen de nationale emissieruimte is voor de industrie.

Dit resulteert in het reductiepad dat is weergegeven in Figuur 9. Voor de industrie die onder het ETS 1 valt betekent dit concreet dat de uitstoot moet dalen van de 35,7 Mton in 2023 naar 21 Mton in 2030, 15 Mton in 2035 en nihil in 2040. In reducties uitgedrukt: de industrie onder ETS 1 moet in 2030 36% minder CO₂ uitstoten dan in 2023.

Figuur 9 - Reductiepad voor de CO₂-emissies voor de Nederlandse ETS 1-sectoren, in lijn met de verlaging emissieplafond in het EU ETS 1, met gedifferentieerde bijdrage per sector



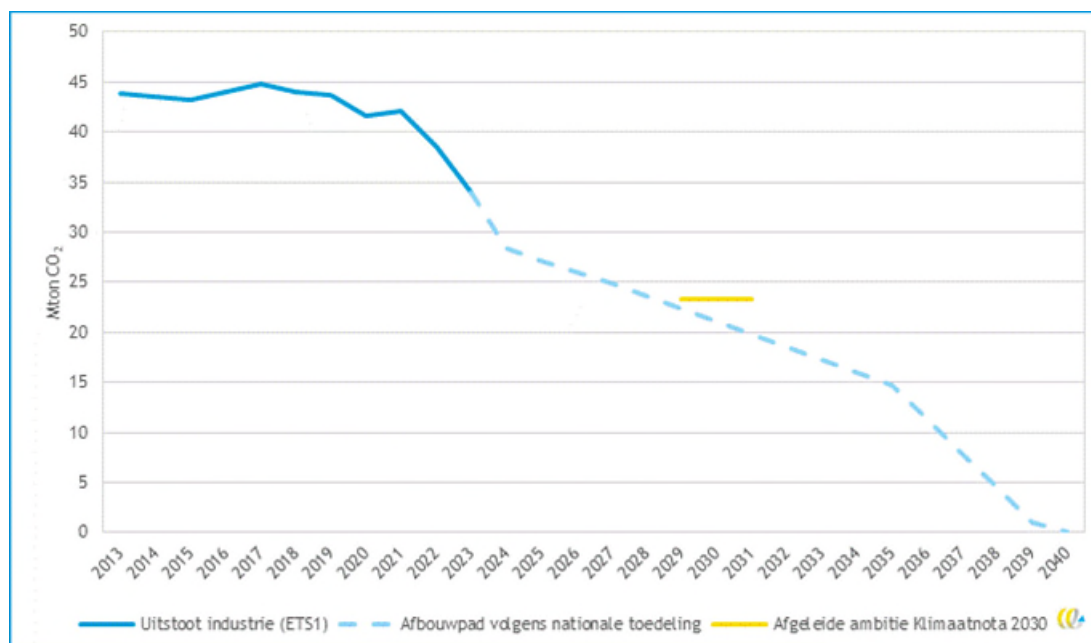
2.3.1 Vergelijking reductiepad CO₂-uitstoot industrie en Nederlandse doelen

Om dit reductiepad voor de Nederlandse ETS 1-industrie in de Nederlandse beleidscontext te plaatsen kunnen we dit pad vergelijken met de huidige Nederlandse klimaatdoelen voor de sector. In de Nederlandse Klimaatwet wordt geen doel gesteld voor de industrie apart, maar alleen voor de elektriciteitsproductie (CO₂-neutraal in 2050) en voor heel Nederland (netto nul uitstoot in 2050) (Ministerie van EZK, 2019). In de Klimaatnota 2023 staat het streven om in 2035 een CO₂-vrije elektriciteitsvoorziening te hebben (Ministerie van EZK, 2023).

In het Klimaatakkoord is de ambitie neergelegd dat de industrie 14,3 Mton CO₂ reduceert ten opzichte van het basispad, oftewel de ontwikkeling van emissies bij ongewijzigd beleid zoals destijds was ingeschat. Het basispad voor 2030 was voor de industrie vastgesteld op 54,2 Mton (PBL, 2019c). Voor de industrie zou het restemissiedoel vanuit het Klimaatakkoord in 2030 op 39,9 Mton liggen. Later is dit bijgesteld naar (een indicatieve) 29,1 Mton restemissie in 2030 (Ministerie van EZK, 2023).

Deze (indicatieve) doelen hebben echter betrekking op zowel de ETS als niet-ETS-industriële sectoren. Uit de Klimaat- en Energieverkenning uit 2023 blijkt dat de industrie die binnen ETS valt ongeveer 80% van het totaal uitmaakt, dus ongeveer 43 Mton uitstoot in 2030 volgens het basispad. Indien aangenomen wordt dat de ETS-industrie en de niet-ETS-industrie een evenredig aandeel krijgen in de reductie-ambitie, dan volgt dat de ETS 1-industrie een doel heeft van 23,3 Mton rest-CO₂-emissie in 2030. In het ETS 1-reductiepad uit de vorige paragraaf stoot de ETS 1-industrie nog maximaal 21 Mton uit in 2030. Indien de Nederlandse industrie zich aan dat reductiepad houdt, wordt de ambitie uit het Klimaatakkoord en Klimaatnota 2023 gehaald. Dit is weergegeven in Figuur 10.

Figuur 10 - Historische uitstoot Nederlandse industrie in ETS 1 en het CO₂-emissie reductiepad dat volgt uit de hier gemaakte keuzes. In geel het indicatieve doel dat we hebben afgeleid uit de Klimaatnota 2023



2.4 Conclusie

In dit hoofdstuk is een reductiepad geschetst voor de CO₂-uitstoot van de Nederlandse industrie die onder het EU ETS 1 valt. Die industrie is op dit moment verantwoordelijk voor ongeveer een derde van de totale Nederlandse uitstoot, en voor 60% van de uitstoot binnen de Nederlandse ETS 1. In 2040 zal deze uitstoot naar nul moeten worden gereduceerd, tenzij de huidige regelgeving van het EU ETS 1 nog wordt aangepast.

Het ETS 1 is een Europees mechanisme zonder nationale doelen. Om toch inzicht te verschaffen in wat het ETS 1 concreet voor Nederland betekent is er in dit rapport gekozen om een reductiepad te ontwikkelen op basis van de aanname dat Nederland het huidige aandeel van 6% in de totale Europese uitstoot onder het EU ETS 1 blijft houden, tot 2040.

Volgens dit reductiepad moet de Nederlandse industrie onder het ETS 1 in 2030 ongeveer 10 Mton CO₂ minder uitstoten dan in 2023. De resterende uitstoot, ongeveer 21 Mton CO₂/jaar, zal vervolgens tussen 2030 en 2040 verder gereduceerd moeten worden tot nul. Dit reductiepad is in lijn met het indicatieve doel uit het Klimaatakkoord/Klimaatnota 2023. Op dit moment verwacht het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) echter dat de Nederlandse ETS 1-industrie in 2030 rond de 31,1 Mton CO₂ uitkomt (PBL, 2024b)

3 Ontwikkeling toekomstscenario's voor de industrie

Met de huidige situatie als startpunt kunnen we nu scenario's ontwikkelen voor de technische maatregelen die nodig zijn in de Nederlandse ETS 1-industrie zodat kan worden voldaan aan de afbouw van ETS 1-uitstootrechten zoals in het vorige hoofdstuk is beschreven. Het doel is om te kijken hoeveel het gebruik van olie, kolen en gas afgeschaald moeten worden om aan deze eisen te voldoen.

Er zijn verschillende routes mogelijk om de CO₂-uitstoot van de industrie te verlagen. Om dit speelveld te verkennen hebben we twee scenario's gekozen:

- **Scenario 'Huidige trends'**: Zoveel mogelijk gebaseerd op de huidige bestaande verduurzamingsplannen van de industrie, vaak wel met een versnelde implementatie zodat het ETS 1 CO₂-reductiepad kan worden gevolgd. Het gaat vooral uit van duurzame productieroutes die relatief weinig technologische ontwikkeling meer nodig hebben.
- **Scenario 'Regie en innovatie'**: Een ingrijpendere transitie van de industrie die is gericht op afbouw van fossiele energie en grondstoffen en opbouw van duurzame productiecapaciteit. In dit scenario wordt ingezet op innovatie en nationale sturing van de transitie.

3.1 De belangrijkste aannames in de scenario's

Een kwalitatieve beschrijving van de belangrijkste aannames in uitgangspunten bij deze twee scenario's is opgenomen in Tabel 3. Een gedetailleerde uitleg van de gebruikte aannames en gehanteerde redeneringen is te vinden in de bijlagen van dit rapport.

Omdat de CO₂-reductie in de industrie binnen relatief korte tijd moet worden gehaald is een belangrijke aanname in beide scenario's dat omzettingen zeer snel gaan. Zo wordt in beide scenario's een volledige elektrificatie van enkele sectoren in 2030 aangenomen. Dit neemt dus bijvoorbeeld aan dat netcongestie dan vrijwel geheel is opgelost. Ook wordt de ontwikkeling en snelle uitrol van enkele technologieën optimistisch ingeschat.

Tabel 3 - Overzicht van de belangrijkste uitgangspunten per sector voor de twee scenario's die in deze studie worden doorgerekend

Product	Scenario 1 'Huidige trends'	Scenario 2 'Regie en innovatie'
Non-ferro: aluminium (primaire)	Er is geen productie van aluminium in Nederland, de energieprijzen zijn te hoog. Deze zal in de loop van de tijd ook niet terugkomen.	Er is geen productie van aluminium in Nederland, de energieprijzen zijn te hoog. Deze zal in de loop van de tijd ook niet terugkomen.
Non-ferro: Aluminium (recycling)	De recycling van aluminium blijft in Nederland en zal toenemen. Om deze sector te verduurzamen, stappen zij over van aardgas op groengas.	De recycling van aluminium blijft in Nederland en zal toenemen. Om deze sector te verduurzamen, wordt eerst een deel van het aardgas vervangen door groengas, daarna stapt de sector over op een nieuwe technologie: inductie.
Non-ferro: Zink	De zinkproductie in Nederland blijft bestaan. Om te verduurzamen stappen zij over op groengas en groene waterstof.	Met de huidige energieprijzen kan de zinkindustrie in Nederland niet blijven bestaan. Deze sector verdwijnt uit Nederland.
Staal	In dit scenario wordt het verduurzamingsplan van Tata Steel gevolgd. In 2030 wordt de eerste DRP opgeleverd, rond 2037 is de hele fabriek omgebouwd. De energiebron is grotendeels aardgas, waarbij de CO ₂ wordt afgevangen. Tegen 2040 zal het ontbreken van ETS-rechten de hele productie in gevaar brengen en is sluiting waarschijnlijk.	Het alternatief voor het verduurzamingsplan komt van Gezondheidsultimatum. Hierbij wordt de productiecapaciteit van Tata kleiner door sluiting hoogoven-deel en worden elektrische ovens geïnstalleerd in 2030. Hierbij moeten halffabricaten (ruw ijzer) worden ingekocht.
Voedsel	Het gasverbruik bij de voedselverwerkende industrie wordt in 2030 volledig geëlektrificeerd met e-boilers.	Het gasverbruik bij de voedselverwerkende industrie wordt in 2030 volledig geëlektrificeerd met warmtepompen.
Papier	Het gasverbruik in de papierindustrie wordt in 2030 volledig geëlektrificeerd met e-boilers.	Het gasverbruik in de papierindustrie wordt in 2030 volledig geëlektrificeerd met warmtepompen.
Glas	De glasproductie in Nederland blijft op peil. Om deze sector te verduurzamen wordt er volledig ingezet op groengas. Deze loopt eerst op tot 24% groengas in 2030, daarna tot 100% in 2035 en verder.	De glasproductie blijft in Nederland op peil. De glassector wordt verduurzaamd door de ombouw naar elektrische glassmeltinstallaties. Eerst loopt de verduurzaming naar 24% in 2030, daarna wordt volledig overgeschakeld naar elektriciteit in 2035.
Keramiek	De productie van keramiek wordt verduurzaamd door het gebruik van groengas. Deze loopt eerst op tot 24% groengas in 2030, daarna volledig in 2035 en verder.	De productie van keramiek wordt verduurzaamd door het gebruik van groene waterstof. Eerst wordt er in 2030 voor 24% groengas bijgemengd, daarna in 2035 volledig op groene waterstof.
Kunstmest (Ammoniak)	In dit scenario zal de productie van ammoniak voor kunstmest verdwijnen. De ammoniak die nodig is voor kunstmestproductie, zal worden geïmporteerd. De ammoniak die gebruikt wordt voor kunststofproductie valt onder organische basischemie en blijft in Nederland, met CCS.	De productie van kunstmest in Nederland loopt lineair af tot 0% in 2050. De productie van ammoniak voor kunststoffen blijft bestaan. De productie wordt omgebouwd tot groene ammoniak uit waterstof.

Product	Scenario 1 'Huidige trends'	Scenario 2 'Regie en innovatie'
Industriële gassen (waterstof)	De waterstof wordt geïmporteerd met een waterstofdragend molecuul. Er is elektriciteit nodig om deze te kraken tot waterstof.	Verschillende industrieën hebben waterstof nodig. Deze wordt tijdelijk gemaakt met aardgas en CCS, om in 2035 volledig met groene elektriciteit gemaakt te worden.
Organische chemie	Productie blijft in Nederland, met grote inzet op CCS en elektrificatie van de processen.	Ambitieuze recyclingsagenda, waarbij door recycling de productie van nieuwe plastics daalt en voor een deel vervangen wordt door chemische recycling en bioplastics.
Raffinage	Wij volgen het afbouwpad 'behoudend' van het PBL (PBL, 2024a). Deze loopt naar fossielvrij in 2050, met een sterke groei van biobrandstoffen.	Wij volgen het afbouwpad 'innovatief' van het PBL (PBL, 2024a). Deze loopt naar fossielvrij in 2050, met meer inzet van synfuels en waterstof.

Een uitgebreide toelichting van de uitgangspunten en aannames per sector is te vinden in Bijlage B. De kwantitatieve aannames zijn opgenomen in Bijlage A, in de bijlagen erna is de toelichting gegeven per sector.

De informatie is daar gepresenteerd in de vorm van tien factsheets, waarin we voor elk van deze sectoren de volgende informatie in kaart brengen:

- Producten, Proces, Energie, Grondstoffen en Emissies.
- Welke techniek is beschikbaar om richting klimaatneutraal en eventueel ook fossielvrij te komen, en hoe snel kan fossielvrij?
- Internationale positie.
- Keuzes in de twee scenario's.
- Scenario's: kwalitatieve beschrijving en kwantificering.

Hiermee bouwen we zoveel mogelijk voort op de factsheets uit ons eerdere rapport (CE Delft, 2023). Waar nodig hebben we de informatie uit 2023 geactualiseerd, deels hebben we de tekst ingekort vanwege het andere doel en focus van deze studie.

3.2 Toelichting van de methodiek

Om van de algemene uitgangspunten voor de scenario's te komen tot een concrete doorrekening van de scenario's hebben we volgende methodiek toegepast. De resultaten van de doorrekening zijn te vinden in de volgende hoofdstukken.

Stap 1: Ontwikkeling van de hoofdlijnen van de scenario's

Vanwege de grote onzekerheden in de toekomstige ontwikkelingen van de Nederlandse industrie en de brede scope van dit onderzoek hebben we de scenario's in dit rapport in eerste instantie kwalitatief opgezet. Dat biedt ruimte om meer conceptueel na te denken over de mogelijke ontwikkelingen, en de 'randen van het speelveld' te bepalen voor de manier waarop de Nederlandse ETS 1-industrie binnen het CO₂-plafond uit het vorige hoofdstuk kan blijven.

In overleg met de opdrachtgever Natuur & Milieu zijn twee verschillende, maar in principe technisch haalbare, scenario's gekozen die we hieronder kort beschrijven.

Scenario 1: Huidige trends

Het startpunt van dit scenario zijn de verduurzamingsplannen van de industrie zoals die op moment van schrijven bekend zijn. De meeste sectoren hebben nog geen concrete plannen tot 2040 en/of om volledig fossielvrij te worden, het scenario is daarom vervolgens aangevuld met de CO₂-reductietechnieken en -maatregelen die in lijn liggen met de ontwikkelingen en het beleid op dit moment. Hierbij ligt relatief veel nadruk op CCS en elektrificatie van processen. Er wordt nog weinig ingezet op verduurzaming van de grondstoffen, de focus ligt op reductie van de directe CO₂-emissies die onder het ETS 1 vallen.

Bovendien nemen we mee dat verduurzaming van de energie en grondstoffen gevolgen zal hebben op de internationale concurrentiepositie van een deel van de bedrijven. Als een (deel van een) productieproces elders veel goedkoper kan plaatsvinden dan in Nederland is te verwachten dat de productie hier fors zal krimpen, en dat gericht beleid om dat effect tegen te gaan beperkt is. Dit leidt tot forse krimp van een aantal sectoren.

Scenario 2: Regie en innovatie

Voor de komende jaren gaat dit scenario ook uit van de huidige verduurzamingsplannen van de industrie, maar vervolgens gaan we ervan uit dat een snellere en ingrijpende verduurzamingsslag in de Nederlandse industrie zal plaatsvinden, tussen 2030 en 2040. De drijvende kracht hierachter is dat de industrie in dit scenario beweegt richting de fossielvrije toekomstvisie voor de sectoren zoals beschreven in (CE Delft, 2023).

Dat houdt onder andere in dat er ook actief wordt gewerkt aan vermindering van het gebruik van fossiele energie en grondstoffen, niet alleen aan CO₂-reductie bij de industrie zelf. We gaan hier tot op zekere hoogte ook uit van regie door de overheid, die gericht is op het behoud en de verduurzaming van de huidige industrie in Nederland, en opwek van het grootste deel van haar energieverbruik in eigen land. Ook als Nederland economisch gezien niet de meest logische vestigingsplaats is, bijvoorbeeld omdat energie- en productiekosten elders aanzienlijk goedkoper zijn (CE Delft, 2023).

Stap 2: Doorrekening van de scenario's

De precieze aannames voor de berekeningen en de gebruikte bronnen zijn te vinden in de bijlagen. Om vervolgens het energiegebruik en de CO₂-emissies per sector te berekenen hebben we een rekenmodel ontwikkeld, CENIT-NL, waarin we de volgende stappen doorlopen.

Startpunt is het huidige energie- en grondstoffengebruik van de Nederlandse industrie, en de CO₂-emissies die de ETS-industrie rapporteert. Hiervoor gebruiken we data van met name het CBS en NEA.

Om de kwalitatieve beschrijving van de scenario's te kunnen kwantificeren hebben we gebruik gemaakt van de MIDDEN-database die is ontwikkeld door PBL en TNO (PBL & TNO, 2021). Hierbij zijn voor de verschillende sectoren het energieverbruik en de CO₂-emissies bepaald, per product dat wordt gemaakt, voor de verschillende verduurzamingsopties.

In andere rapportages is gezocht naar productievolumes en toekomstprognoses of mogelijke scenario's voor de ontwikkeling van productievolumes in Nederland (zie de factsheets in de bijlagen voor meer informatie over de gebruikte bronnen). Dit is vervolgens omgerekend

naar een energieverbruik en emissies. Ter controle is deze vergeleken met de emissies uit 2023.

Als laatste is per scenario vastgesteld welk deel van het productievolume in een bepaald jaar is omgezet naar een andere (duurzame) productieroute. Dit is ingeschat voor de verschillende zichtjaren, in lijn met de storyline van het betreffende scenario en de verwachte technologische en maatschappelijke ontwikkelingen. Zo kunnen we de transitie modelleren van de huidige productiemethoden en energiedragers naar de duurzame technologie. Vervolgens geven we voor beide scenario's aan welk deel van de fossiele uitstoot wordt vermeden via CCS, per zichtjaar, per sector en productieproces.

Hiermee kan de toekomstige verwachte hoeveelheid van elke energiedrager en emissie worden berekend. Door de resultaten van alle tien sectoren bij elkaar op te tellen worden het energie- en grondstoffengebruik en de CO₂-uitstoot van de tien sectoren berekend, voor 2025, 2030, 2035 en 2040. De totale CO₂-emissies kunnen vervolgens worden vergeleken met de ontwikkeling van het CO₂-uitstootplafond dat in het vorige hoofdstuk is berekend voor de Nederlandse ETS 1-industrie. Bij de resultaten voor het energie- en grondstoffen-gebruik onderscheiden we de fossiele stromen aardgas, kolen en olie, en de overige energiedragers elektriciteit, groengas en waterstof. De behoefte aan fossiele CO₂-afvang en opslag (CCS) is ook berekend.

Geen verdere aanpassingen aan de scenario's na de doorrekening

De resultaten in het volgende hoofdstuk laten zien dat beide scenario's in 2025 en 2040 boven het in Hoofdstuk 2 ontwikkelde ETS 1 CO₂-reductiepad uitkomen, en in 2030 en 2035 daaronder blijven. We hebben ervoor gekozen om dit zo te laten, en de scenario's niet verder aan te passen om precies op het plafond uit te komen, om een aantal redenen:

- 2025 is al grotendeels achter de rug, daar kan niet veel meer aan veranderd worden.
- De emissieruimte die in 2030 en 2035 wordt gecreëerd zien wij niet als nadelig. De resterende ETS 1-emissierechten kunnen worden ingezet door industrie in andere EU-landen, of op een later moment (rond 2040) alsnog worden gebruikt. Bovendien zijn de scenario's op sommige punten zeer ambitieus, en biedt dit wat ruimte voor tegenvallers in het tempo van de verduurzaming. Die ruimte is overigens aanzienlijk groter in scenario 'Regie en innovatie' dan in 'Huidige trends'.
- Het is niet gelukt om uit te komen bij nul uitstoot in 2040 zonder de industrie die dan nog CO₂-uitstoot te verplaatsen naar het buitenland. Dit soort 'carbon leakage' zou het klimaat ook niet te goede komen. Verdere reductie van de uitstoot is mogelijk als de consumptie van fossiele brandstoffen en producten sneller daalt. Hiermee is in de analyse echter geen rekening gehouden, aangezien daar op dit moment nog geen concreet beleid voor bestaat. Welke industrie in 2040 nog restemissies veroorzaakt, en waarom, wordt verder toegelicht in Paragraaf 4.3.

4 Effecten op de CO₂-uitstoot van de scenario's

In dit en volgende twee hoofdstukken laten we de resultaten zien van de doorrekening voor beide scenario's. We beginnen in dit hoofdstuk met de CO₂-uitstoot: hoe ontwikkelt de uitstoot van de Nederlandse ETS-industrie zich in de scenario's, tussen nu en 2040? Deze resultaten kunnen we toetsen aan het CO₂-afbouwpad van het ETS dat in Hoofdstuk 2 is beschreven.

4.1 Scenario 1 'Huidige trends'

De ontwikkeling van de CO₂-uitstoot in dit scenario is weergegeven in Figuur 11.

Het eerste jaar dat we modelleren, 2025, komt uit op een toename van de uitstoot van de Nederlandse industrie. Dit wordt vooral veroorzaakt door een verwachte toename van de productie, voornamelijk van staal en kunstmest, die (nog) niet wordt gecompenseerd door CO₂-reductiemaatregelen. Het basisjaar is 2023, met hoge energieprijzen door de oorlog in Oekraïne. Daardoor was de industriële output toen relatief lager. We verwachten daardoor dat de uitstoot hoger zal uitkomen dan het in Hoofdstuk 2 ontwikkelde ETS 1-reductiepad voor 2025.

In 2030 zijn de emissies al wel aanzienlijk lager. In het scenario is dan een aantal sectoren 'verdwenen' uit de industriële ETS-emissies door elektrificatie. Dit geldt voor zowel het papier als ook de voedingsindustrie. Bij de staalindustrie dalen de emissies met ongeveer 40% door de ombouw van de hoogovens. Ook bij de raffinagesector en organische basischemie wordt de emissie flink lager, dit komt voornamelijk door de inzet van CCS. De CO₂-uitstoot komt in 2030 net onder het ETS 1-reductiepad uit.

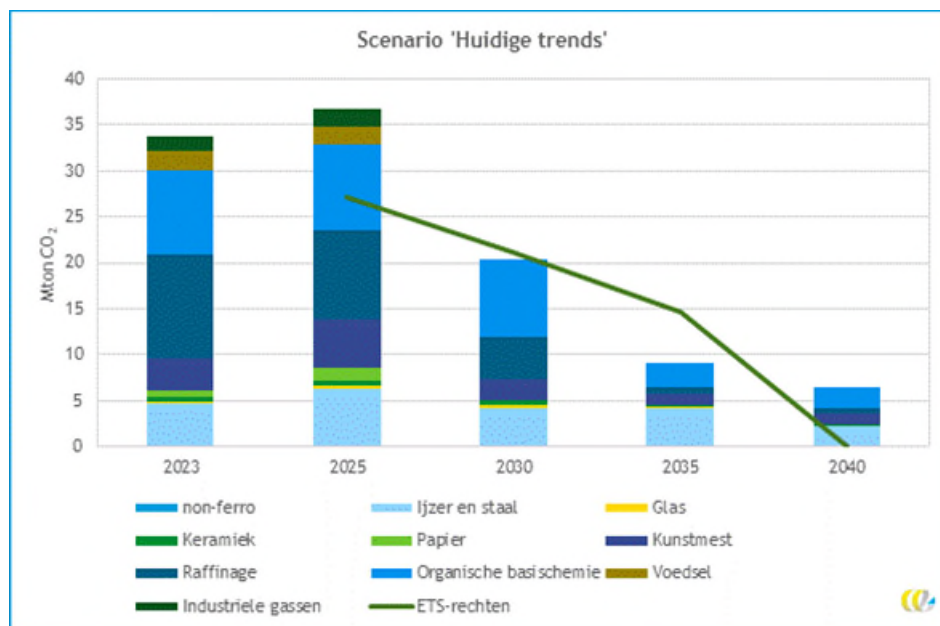
In 2035 dalen de emissies verder onder het ETS 1-reductiepad. In dat jaar worden in veel sectoren grote emissiereducties behaald. De Non-ferro, Glas en Keramieksectoren zijn dan overgegaan op groengas (als vervanger van aardgas), dit zal zorgen voor 0,5 Mton reductie. Er wordt in Nederland geen ammoniak meer geproduceerd voor kunstmest, alleen nog voor de organische basischemie. Bij de organische basischemie worden in 2035 veel emissies afgevangen (CCS), in combinatie met elektrificatie. Hierdoor dalen de emissies met 5,7 Mton. Bij de raffinage ontstaan negatieve emissies, maar deze laten wij buiten beschouwing omdat deze niet als negatieve emissies meetellen in de (huidige) ETS-systematiek. We gaan er in dit scenario vanuit dat op alle fossiele raffinage CCS wordt toegepast. Hierdoor zijn de emissies gedaald met 3,9 Mton.

In 2040 blijven in dit scenario ca. 6,4 Mton restemissies over, de industrie wordt niet compleet klimaatneutraal. Ruim de helft van de restemissies in dit scenario komen vrij bij de organische basischemie en raffinage. De restemissie vanuit de raffinage blijft wel dalen na 2040, en zou ook in dit scenario rond 2050 op nul uit kunnen komen. Ook de emissie van de organische basischemie zou op de langere termijn kunnen verdwijnen door nog meer fossiele grondstoffen te vervangen door biograndstoffen.

Kleinere hoeveelheden restemissies komen uit de sectoren Glas, Keramiek, Ammoniak, Staal en Non-ferro. De restemissies uit deze sectoren zijn lastig te voorkomen. Voorbeelden zijn

CO₂ dat vrijkomt bij het smelten van staalschroot, of de emissies uit de grondstoffen van keramiek. Deze emissies komen uit de grondstoffen en hebben een lage concentratie. Of deze (kosteneffectief) afgevangen kunnen worden is nog niet bekend, mogelijk moeten deze dus elders gecompenseerd worden.

Figuur 11 - Ontwikkeling van de CO₂-emissies van de ETS 1-industrie in scenario 'Huidige trends'



4.2 Scenario 2 'Regie en innovatie'

De ontwikkelingen van de CO₂-uitstoot in dit scenario is weergegeven in Figuur 12.

Ook in dit scenario is een initiële toename van industriële emissies te zien in 2025. Dit deel van het scenario is niet anders dan in scenario 'Huidige trends'.

In 2030 zijn de emissies al fors gedaald, en komen ruim onder het ETS 1-reductiepad uit. De zinkproductie is verdwenen. De emissies voor voedsel en papier zijn verdwenen, omdat hier alleen nog met warmtepompen wordt gewerkt. De emissies vanuit de staalindustrie dalen snel en veel, omdat zij in 2030 volledig overstappen op het importeren van halffabricaten, het gebruik van elektrische boogovens en productievermindering.

De productie van ammoniak wordt voor een groot deel geëlektrificeerd, voor een emissie-reductie van 2,6 Mton. Bij de productie van waterstof wordt deels elektrolyse en deels CCS toegepast, dit levert een reductie van 1,3 Mton op. De CO₂-reductie bij de raffinage en de organische basischemie is het grootst. Bij de organische basischemie wordt veel gerecycled en op biograndstoffen ingezet, waardoor de emissies met 5 Mton dalen. Bij de raffinage dalen de emissies met 4,9 Mton, door een combinatie van vraagvermindering en CCS bij een deel van de raffinage.

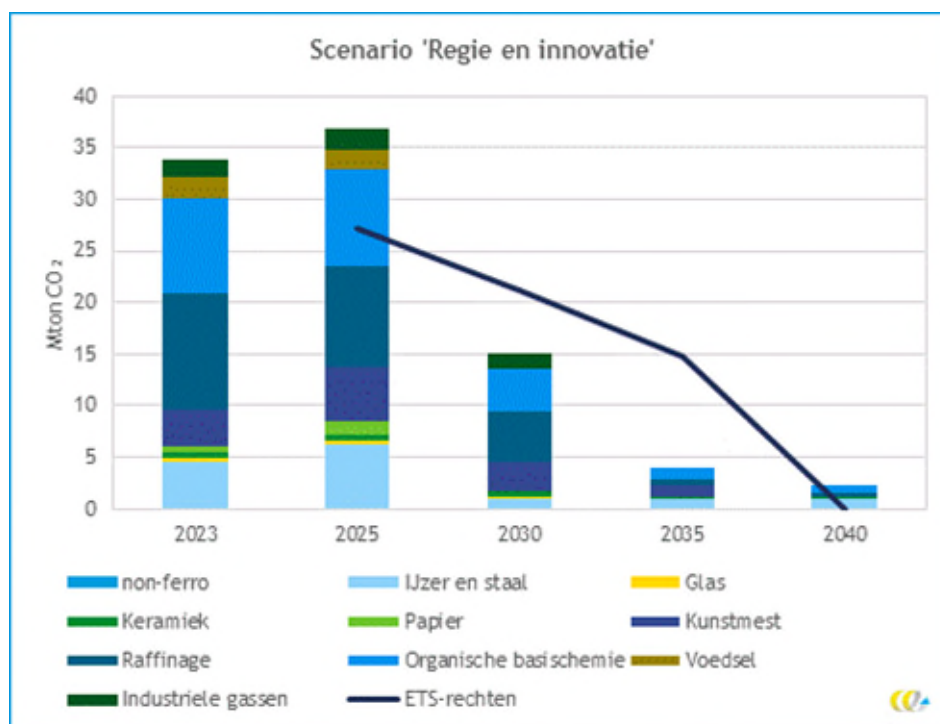
In 2035 zijn de emissies verder afgenomen, tot ruim onder het ETS 1-reductiepad. Hier zijn enkele technologieën zodanig ontwikkeld en uitgerold dat alleen restemissies overblijven.

De productie van keramiek gebruikt waterstof als brandstof. Bij de glasproductie wordt ingezet op elektrische fornuizen. Bovendien is de waterstofproductie volledig geëlektrificeerd, en de kunstmestproductie voor 75%.

De vraag naar fossiele raffinageproducten en producten uit de organische basischemie is verder gedaald en de emissies die vrijkomen bij de productie worden afgevangen. Hierdoor wordt in totaal nog eens 7,5 Mton minder CO₂ uitgestoten.

In 2040 zijn er nog ca. 2,2 Mton restemissies over, met name vanuit de sectoren ijzer en staal, organische basischemie en raffinage. De emissies van de raffinage en organische basischemie dalen verder door vraagreductie tot bijna nul in 2050. Van de overige sectoren, Keramiek, Glas en Non-ferro zijn alleen nog restemissies over die moeilijk afgevangen kunnen worden.

Figuur 12 - Ontwikkeling van de CO₂-emissies van de ETS 1-industrie volgens scenario 'Regie en innovatie'



4.3 Waarom blijven er restemissies over?

In beide afbouwpaden blijven restemissies over in 2040. Scenario 'Huidige trends' komt uit op 6,4 Mton CO₂-restemissies, scenario 'Regie en innovatie' op 2,2 Mton.

Hier is een aantal oorzaken voor. In de recycling van metalen komen emissies vrij, omdat kunststoffen die vastzitten aan het schroot worden verbrand. Bij de productie van staal is het niet mogelijk om geen koolstof te gebruiken en is een zekere emissie voorlopig onoverkomelijk. Deze zou eventueel op termijn nog kunnen worden voorkomen door biokoolstof te gebruiken.

Ook bij de productie van glas en keramiek zijn sommige emissies voorlopig onvermijdelijk. Deze worden gemaakt met natuurlijke grondstoffen waar een vorm van koolstof in zit. Bij

de verwerking komen deze vrij. Een duurzamer proces kan deze niet vermijden, hooguit afvangen. Omdat de concentraties van deze uitstoot laag zijn zullen de kosten van afvang echter relatief hoog zijn. Deze uitstoot wordt daarom als restemissies gezien.

Bij raffinage en de chemie komen nog emissies vrij, in scenario 'Huidige trends' geldt dit ook voor de productie van blauwe ammoniak voor kunststofproductie. Door het gebruik van CCS worden niet alle emissies afgevangen, typisch wordt uitgegaan van 90% capture rate. Om deze emissies volledig te vermijden, moeten deze industrieën volledig worden omgebouwd. Hierbij moet de productie van kunststoffen en brandstoffen volledig uit biobased en synfuels bestaan om volledig koolstofneutraal te worden. Dit heeft uiteraard ook bredere voordelen, er komt dan ook geen fossiele CO₂ meer vrij bij gebruik van de transportbrandstof of bij verbranding van het kunststof eindproduct. In beide scenario's gaan we uit van een geleidelijke verduurzaming van deze ketens, maar het huidige klimaatbeleid is gericht op volledig duurzame transportbrandstoffen in 2050, niet al in 2040.

In het scenario 'Regie en innovatie' blijven er minder restemissies over. Dit heeft voornamelijk te maken met een snellere en grotere krimp van de sectoren staal, raffinage en organische basischemie.

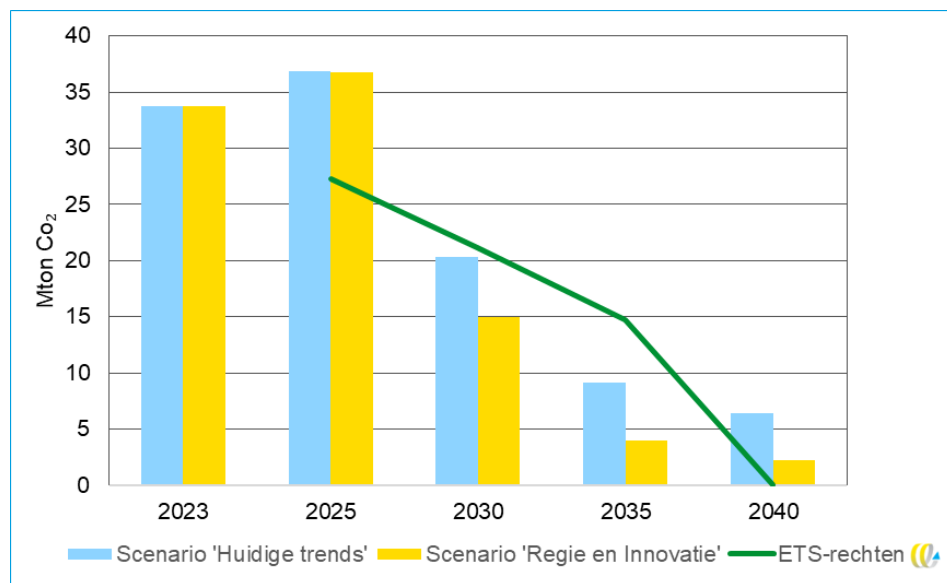
4.4 Conclusie

Het overzicht in Figuur 13 laat zien dat beide scenario's resulteren in een forse reductie van CO₂-uitstoot vanaf 2030. De emissies dalen in scenario 'Regie en innovatie' aanzienlijk sneller dan in 'Huidige trends'. Geen van de scenario's komen echter op nul CO₂-emissies uit in 2040.

In 2025 komt de CO₂-uitstoot van de ETS-industrie nog ruim boven het reductiepad van CO₂-emissierechten uit, dat in Hoofdstuk 2 was ontwikkeld. In 2030 en 2035 blijft de uitstoot in beide scenario's echter wel ruim onder het ETS 1-reductiepad voor de Nederlandse ETS 1-industrie.

In 2040 blijven in beide scenario's restemissies over, van 6,4 Mton CO₂ in scenario 'Huidige trends' en 2,2 Mton in Scenario 'Regie en innovatie'. Die zijn technisch gezien zeer lastig te vermijden.

Figuur 13 - Ontwikkeling van de CO₂-emissies van de ETS-industrie in beide scenario's



5 Afbouwpaden fossiele brandstoffen

In dit hoofdstuk beschrijven we de effecten van de twee scenario's op de vraag van de Nederlandse ETS 1-industrie naar aardgas, kolen en olie. Deze drie fossiele brand- en grondstoffen zijn ten slotte de belangrijkste oorzaak van de CO₂-uitstoot onder het ETS 1. In beide scenario's neemt het gebruik van deze fossiele producten dan ook af tussen nu en 2040, maar het tempo waarmee dit gebeurt verschilt sterk.

5.1 Aardgas

Het afbouwpad voor aardgas is weergegeven in Figuur 14.

Aardgas is op dit moment een belangrijke brandstof voor veel ETS 1-sectoren. Dit aardgas wordt zowel voor de productie van hoge temperatuur warmte gebruikt als ook voor de opwekking van elektriciteit. In de productie van kunstmest (ammoniak) en waterstof wordt aardgas daarnaast ook gebruikt als grondstof voor de processen.

Het gebruik van aardgas kan tussen 2025 en 2040 met 57-90% worden verminderd. Belangrijk hierin zijn industrieën met een grote vraag naar lagetemperatuurwarmte. Hierdoor kunnen sectoren als papier en voedsel door elektrificatie stoppen met het gebruik van aardgas. Dit levert in deze sectoren een gezamenlijke verlaging van het gasverbruik op van 73,6 PJ/jr, in beide scenario's. Als elektrificatie ook wordt ontwikkeld voor hogere temperaturen, neemt deze vraag nog verder af. Voor de sectoren glas en keramiek daalt het aardgasverbruik al in 2035 naar nul in beide scenario's.

Afbouw van de aardgasvraag naar nul in 2040 is met de huidige plannen in geen van de twee scenario's mogelijk. Er is een aantal sectoren waar het erg moeilijk is om het aardgasverbruik volledig te vermijden, zoals in de Staalindustrie, Raffinage, Organische basischemie.

In scenario 'Huidige trends' daalt de vraag naar aardgas voor de sector industriële gassen snel, de benodigde hernieuwbare waterstof zal geïmporteerd worden. In scenario 'Regie en innovatie' stijgt de vraag naar waterstof flink, maar wordt die geproduceerd met groene elektriciteit waardoor het aardgasgebruik in deze sector uiteindelijk toch verdwijnt.

In de raffinage blijft een flinke aardgasvraag bestaan, ondanks vermindering van de vraag naar raffinageproducten, waardoor het aardgasverbruik afneemt van 52,9 PJ naar 28,6 PJ in scenario 'Huidige trends' en 21,8 PJ in scenario 'Regie en innovatie'.

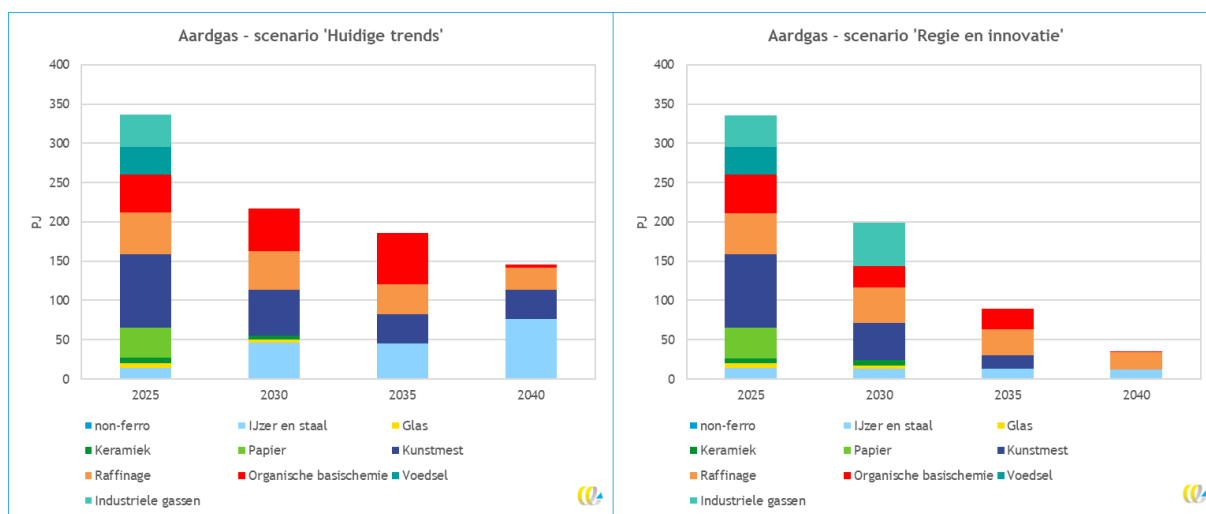
In scenario 'Huidige trends' stijgt de vraag naar aardgas initieel voor de organische basischemie, omdat er voor CCS meer energie nodig is. Later daalt dit, als de installaties geëlektrificeerd worden. Scenario 'Regie en innovatie' zet meer in op kunststofrecycling, wat zorgt voor vraagreductie in de chemie. Hierdoor neemt de aardgasvraag sneller af.

In scenario 'Huidige trends' stijgt de aardgasvraag ook vanuit de staalsector, omdat dit gebruikt zal worden voor de nieuwe installaties voor staalproductie. De vraag vanuit deze

sector stijgt van 12,9 naar 96,2 PJ/jr. In scenario 'Regie en Innovatie' daalt het aardgasgebruik in de staalsector tussen 2025 en 2040 met 8%, van 12,9 naar 11,9 PJ/jr.

De productie van ammoniak op basis van aardgas verdwijnt uiteindelijk in scenario 'Regie en innovatie', maar niet in scenario 'Huidige trends'. In scenario 'Huidige trends' blijft ammoniakproductie in Nederland, maar krimpt met 60% om alleen voor de organische basischemie te produceren. Ook in Scenario 'Regie en innovatie' blijft de kunstmest-productie in Nederland, maar stapt die over naar groene waterstof, en zien we daarnaast een flinke krimp van de vraag naar kunstmest tot 40% van de huidige productie. Ook hier blijft de ammoniakproductie voor organische basischemie op peil.

Figuur 14 - Het afbouwpad voor het aardgasverbruik in de Nederlandse ETS 1-industrie, in de twee scenario's



5.2 Kolen

Het afbouwpad voor kolen is weergegeven in Figuur 15.

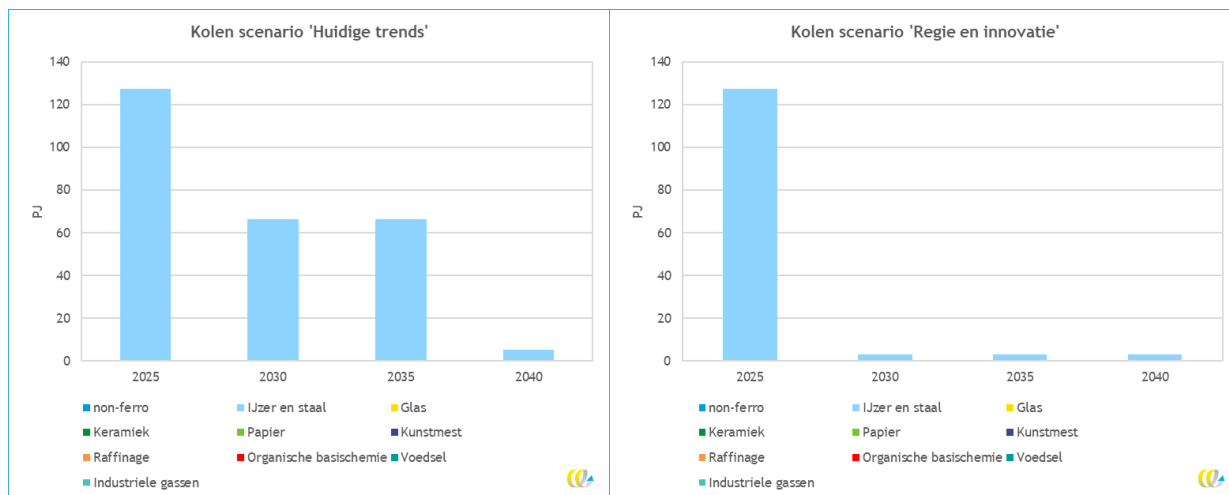
Er is maar één industrie (en bedrijf) in Nederland die kolen in zijn productieproces gebruikt, dat is de productie van staal bij Tata Steel. Kolen worden hier zowel gebruikt voor productie van de hoge temperatuur die nodig is in de productie van ruwijzer, als voor de reductie van de ijzererts tot ruwijzer.

In scenario 'Huidige trends' gaat de afname van het kolengebruik in twee stappen. Het productieproces van Tata Steel bestaat uit twee losse productielijnen. Eerst wordt (in 2030) de eerste lijn vervangen door een nieuw productieproces, dan (rond 2037) de andere. Hierdoor halveert in 2030 het kolengebruik, om in 2040 nog een keer significant te dalen. Er blijft altijd een resthoeveelheid kolen nodig.

In Scenario 'Regie en innovatie' daalt het gebruik van kolen zeer snel. Het productieproces wordt in één keer (in 2030) omgebouwd tot elektrische boogovens (EAF). Hierbij daalt ook het productievolume en verplaatsen productiestappen om ruwijzer te maken naar het buitenland. Het kolenverbruik is in 2030 gedaald van 127 PJ naar 3 PJ, en blijft vervolgens op dat niveau.

Bij de productie van staal zal altijd koolstof nodig zijn. De resterende hoeveelheid (5,3 of 3 PJ per jaar) kan eventueel uit biologische reststromen komen. Dat laten we hier buiten beschouwing.

Figuur 15 - Het afbouwpad voor kolengebruik in de Nederlandse ETS 1-industrie, in de twee scenario's



5.3 Aardolie

Het afbouwpad voor aardolie is weergegeven in Figuur 16.

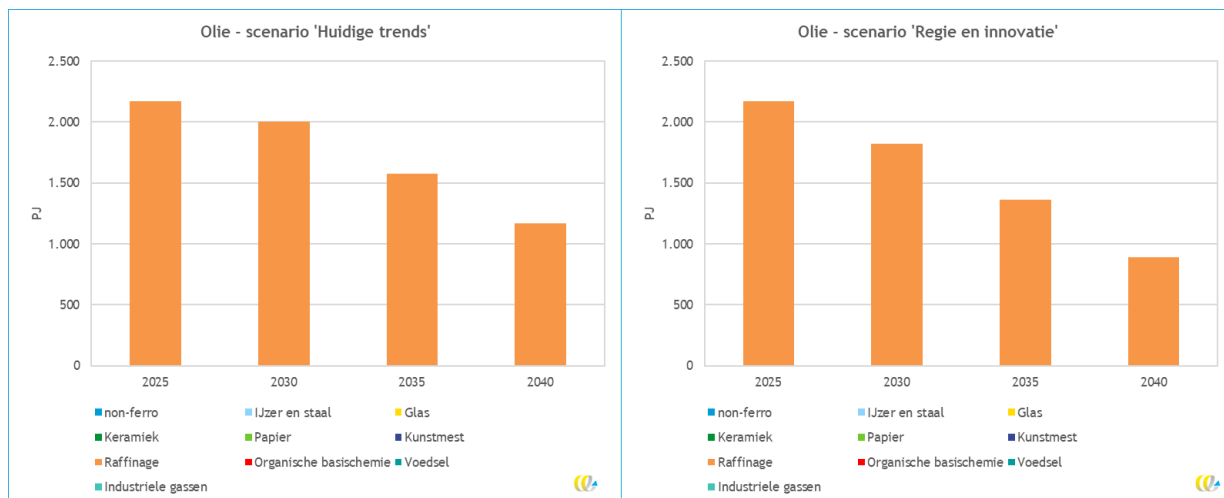
De raffinagesector is de enige ETS 1-industrie in Nederland die aardolie gebruikt als brand- en grondstof. De producten die de raffinaderijen maken worden vervolgens gebruikt in andere sectoren, waaronder de (basis)chemie en mobiliteit.

In beide scenario's zet er in de periode tot 2040 een daling in van het aardoliegebruik, maar blijft er in 2040 nog een fors verbruik over. De vraag daalt wel meer in scenario 'Regie en innovatie' dan in 'Huidige trends', tot respectievelijk 41% en 54% van het verbruik in 2025. De reductie wordt vooral veroorzaakt door een flinke vraagvermindering van transport-brandstoffen in beide scenario's (in lijn met PBL-prognoses). Daarnaast zien we in scenario 'Regie en innovatie' ook een extra vraagvermindering in de organische basischemie.

Het verschil tussen de snelheid van afbouw van oliegebruik en de veel sterkere reductie van de CO₂-uitstoot uit het vorige hoofdstuk wordt verklaard door de toepassing van CCS in raffinaderijen, in beide scenario's (en in lijn met de huidige plannen en ontwikkelingen). We gaan in deze studie ervan uit dat er een steeds groter deel van de fossiele CO₂-emissies in de sector zal worden afgevangen: 55% in 2030 en 100% vanaf 2035.

Zoals toegelicht in Paragraaf 3.2 hebben wij ervoor gekozen om hier niet uit te gaan van verdere afschaling van de raffinaderijproductie (naast de vraagvermindering uit de PBL-afbouwpaden). In het volgende hoofdstuk (6) gaan wij verder in op de consequenties om een vergelijkbare hoeveelheid duurzame vervangers van de huidige raffinageproducten te maken.

Figuur 16 - Het afbouwpad voor gebruik van olie in de Nederlandse ETS 1-industrie, in de twee scenario's



5.4 Conclusie

In beide scenario's neemt de vraag naar fossiele energie en grondstoffen af tussen nu en 2040. Er blijft nog wel een aanzienlijk gebruik over, met name van aardolie. Zie Figuur 17 voor een overzicht van de afbouwpaden voor het totale gebruik van aardgas, kolen en aardolie in de Nederlandse ETS 1-industrie.

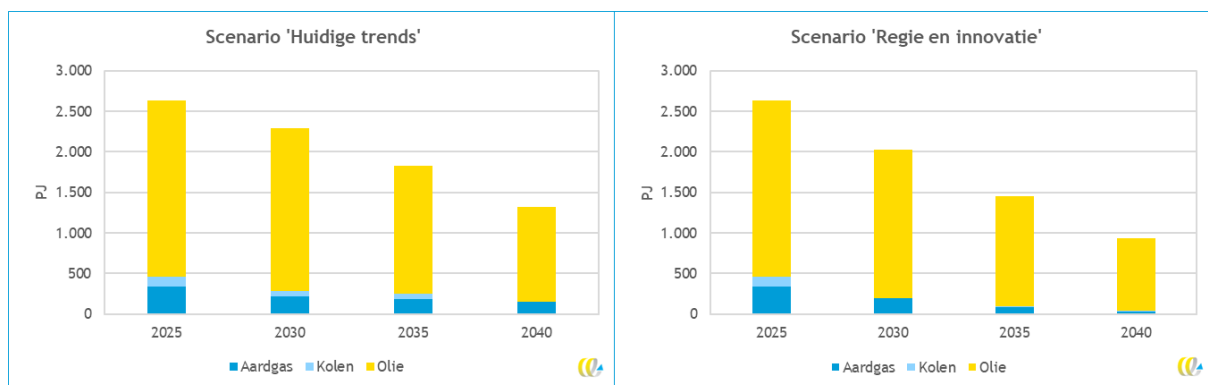
Het aardgasgebruik daalt in beide scenario's in 2040. De daling gaat echter aanzienlijk sneller in scenario 'Regie en innovatie' dan in scenario 'Huidige trends': in 'Huidige trends' daalt het aardgasverbruik naar ca. 43% van het verbruik in 2025, in 'Regie en innovatie' daalt het aardgasverbruik naar 10% van het verbruik in 2025.

De vraag naar kolen daalt met ruim 95%, in beide scenario's. De afbouw gaat in scenario 'Huidige trends' trager dan in scenario 'Regie en innovatie', omdat de staalproductie in Nederland in scenario 'Regie en innovatie' snel krimpt en deels verplaatst.

De vraag naar olie daalt over de jaren gestaag, maar blijft nog wel groot in beide scenario's. De vraag komt in 2040 uit op 54% en 41% van de vraag in 2025, voor resp. scenario's 'Huidige trends' en 'Regie en innovatie'.

Deze resultaten laten ook zien dat olie verreweg het grootste aandeel heeft in het totaal aan fossiele brandstoffen die de Nederlandse industrie gebruikt voor energie of grondstoffen: in 2025 is dit aandeel 82% (gemeten in energie-inhoud, PJ). Omdat het gebruik van kolen en gas sterker dalen in deze scenario's dan olie neemt dit aandeel in beide scenario's toe, naar circa 90% van het totaal in 2040.

Figuur 17 -Het afbouwpad voor de vraag naar fossiele energie en grondstoffen van de Nederlandse ETS 1-industrie, in de twee scenario's



6 Opbouwpad duurzame energiedragers en CCS

De afname van de fossiele energiedragers moet gepaard gaan met de opbouw van andere, hernieuwbare energiedragers. Deze hoeven niet noodzakelijkerwijs 1-op-1 vervangen te worden, in de verduurzaming van het energieverbruik kunnen grote efficiëntiewinsten behaald worden.

In dit hoofdstuk behandelen wij de benodigde opbouw van hernieuwbare energiedragers voor de scenario's. Hierin behandelen wij elektriciteit, waterstof en groengas. Ook bespreken we de hoeveelheid CCS die nodig is om (rest)emissies op te vangen. In hoeverre deze opbouw van duurzame energiedragers en CCS daadwerkelijk haalbaar is bespreken we (kort) in Paragraaf 6.5. De transitie van fossiel naar hernieuwbaar is duidelijk een grote opgave, die we hier niet detail in beeld kunnen brengen. Deze resultaten kunnen echter wel inzicht verschaffen in de groei van duurzame alternatieven die nodig is voor de drastische CO₂-reductie die de komende 15 jaar moet plaatsvinden in de Nederlandse ETS 1-industrie.

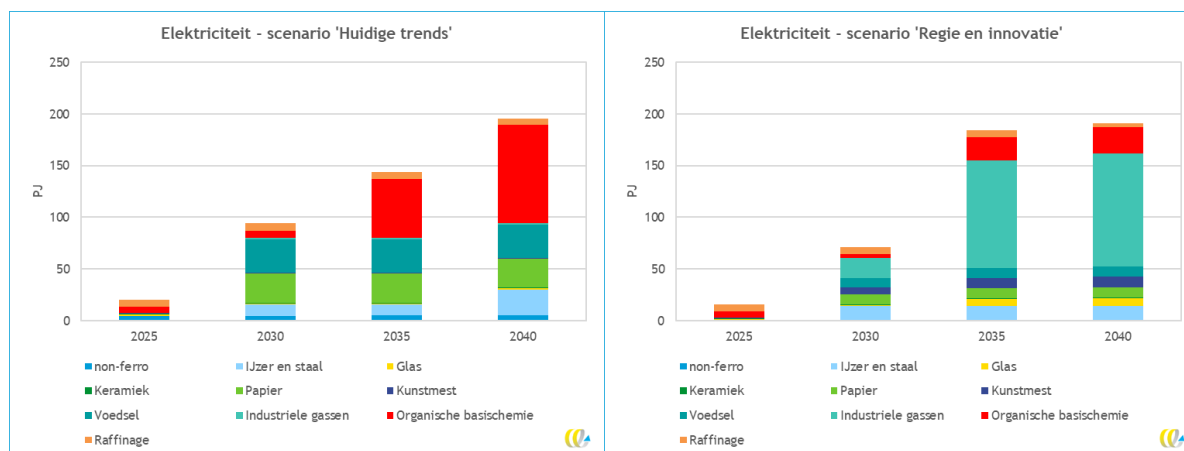
We merken daarnaast ook op dat de resultaten in deze studie geen compleet beeld geven van de gevolgen van deze transitie op de vraag naar duurzame brand- en grondstoffen. Zo zal er bijvoorbeeld nieuwe productiecapaciteit bij moeten komen om aan een groeiende vraag naar biobrandstoffen te voldoen. Omdat we ons in deze studie richten op reductie van de CO₂-uistoot van de huidige ETS-industrie in Nederland is ook dit verder niet in detail onderzocht.

6.1 Elektriciteit

Elektrificatie van processen is een van de belangrijkste CO₂-reductiemaatregelen in de industrie. Het elektriciteitsgebruik in de ETS 1-industrie neemt in beide scenario's dan ook snel toe, in alle sectoren, zo blijkt uit Figuur 18.

De uiteindelijke elektriciteitsvraag in 2040 is vergelijkbaar in beide scenario's: 195 PJ in 'Huidige trends' versus 191 PJ in 'Regie en innovatie'. De grootste groei vindt al in de periode 2025-2030 plaats, als gevolg van aannames over snelle elektrificatie van een aantal sectoren in beide scenario's.

Figuur 18 - Het elektriciteitsverbruik in de Nederlandse ETS 1-industrie in de twee scenario's. Let op dat hier via de sector 'industriële gassen' het waterstofgebruik dubbel geteld wordt, zowel hier als elektriciteit als in Figuur 20



Als we naar de detailresultaten van de scenario's kijken vallen een aantal grote verschillen op.

De papier- en voedselindustrie kunnen met e-boilers (scenario 'Huidige trends') of warmtepompen (scenario 'Regie en innovatie') geëlektrificeerd worden. Dit heeft een groot effect op de toekomstige elektriciteitsvraag. Warmtepompen hebben een 2,5 keer zo hoge efficiëntie als e-boilers, waardoor de elektriciteitsvraag aanzienlijk kleiner is. De vraag komt uit op 19 PJ bij warmtepompen en 60 PJ bij e-boilers.

In beide scenario's zal de staalindustrie elektrificeren. In scenario 'Huidige trends' gaat dit trager dan in scenario 'Regie en innovatie' en blijft de vraag ook hoger, doordat er geen krimp van productie voorzien wordt.

In scenario 'Regie en innovatie' worden ook de sectoren Non-ferro en Glas geëlektrificeerd. Deze technologie is nog niet ontwikkeld en daarom niet meegenomen in scenario 'Huidige trends'. De elektriciteitsvraag neemt hierdoor in deze sectoren samen toe met 6,6 PJ, in scenario 'Regie en innovatie'.

De productie van industriële gassen zorgt voor een grote elektriciteitsvraag in scenario 'Regie en innovatie'. Hier wordt de groene waterstof nationaal geproduceerd. In scenario 'Huidige trends' is de vraag lager en wordt deze waterstof geïmporteerd. *NB. In scenario 'Regie en innovatie' wordt de vraag voor waterstof twee keer geteld in de resultaten in dit hoofdstuk: als waterstof en als elektriciteit.*

Een zeer grote vraag naar elektriciteit ligt bij de productie van kunstmest. Ammoniakproductie is zeer energie-intensief. In scenario 'Huidige trends' gaan wij ervan uit dat het niet mogelijk is om dit kosteneffectief in Nederland te doen, waardoor de energie-intensieve stap verdwijnt. Het deel dat nodig is voor organische chemie zal niet elektrificeren, maar de CO₂ wordt afvangen. In scenario 'Regie en innovatie' is sprake van vraagvermindering en elektrificatie van ammoniakproductie. Het behoud van deze sector in Nederland zorgt voor een vraag van 70 PJ per jaar aan elektriciteit in 2040.

De organische basischemie zal haar naftakrakers moeten elektrificeren om de CO₂-emissies te verminderen. Omdat deze sector groter blijft in scenario 'Huidige trends', zal de elektriciteitsvraag hier ook veel groter zijn dan in scenario 'Regie en innovatie'.

De raffinaderijen zullen niet elektrificeren. Hierdoor zal de elektriciteitsvraag van deze sector niet toenemen, maar afnemen in lijn met de vraagreductie.

6.2 Groengas

Groengas is hetzelfde als aardgas, maar van biologische oorsprong. Het kan een belangrijke rol spelen in de transitie naar een fossielvrije toekomst, in de industrie met name als energiedrager voor hogetemperatuurwarmte. Daarom speelt groengas in onze scenario's een belangrijke rol in industrieën met een hogetemperatuurwarmtevraag: Non-ferro, Glas en Keramiek, zie Figuur 19. Omdat groengas duur en schaars is, moet het slim worden ingezet. Voor de sectoren met een grote vraag naar lagetemperatuurwarmte (papier en voedsel) hebben we daarom niet gekozen voor groengas, die processen kunnen ook worden geëlektrificeerd.

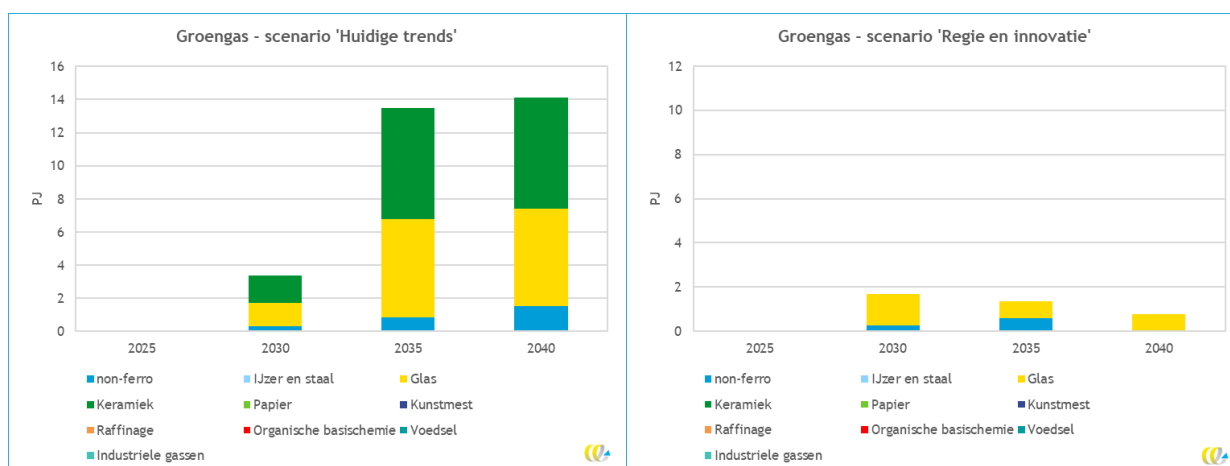
In 2030 komt er een bijmengverplichting van groengas in het gasstelsel. De bijmengverplichting is een totaal volume van groengas. Wij gaan uit van een bijmenging van 24% in 2030.

In scenario 'Huidige trends' wordt er nog sterker ingezet op groengas. Voor de non-ferro industrie, die in Nederland blijft, wordt het aardgas vervangen door groengas. In scenario 'Regie en innovatie' verdwijnt deze sector (zinkproductie) waardoor ook de gasvraag verdwijnt. De aluminiumrecycling kan wel in Nederland blijven, we gaan ervan uit dat hier groengas wordt gebruikt in de transitie naar inductiesmeltovens.

In de productie van keramiek kan het aardgas ook worden vervangen door groengas. Deze wordt in scenario 'Huidige trends' 1-op-1 vervangen.

In de productie van glas kan het aardgas worden vervangen door groengas. In scenario 'Huidige trends' wordt de hele aardgasvraag uiteindelijk vervangen door groengas. In scenario 'Regie en innovatie' zet de sector in op elektrificatie. Om deze ontwikkeling tijd te geven is er groengas nodig voor de transitie.

Figuur 19 - Het gebruik van groengas in de Nederlandse ETS 1-industrie in de twee scenario's



6.3 Waterstof

Het waterstofgebruik in de twee scenario's is te zien in Figuur 20. De huidige waterstofvraag van de Nederlandse ETS-1 industrie is beperkt tot de raffinagesector.

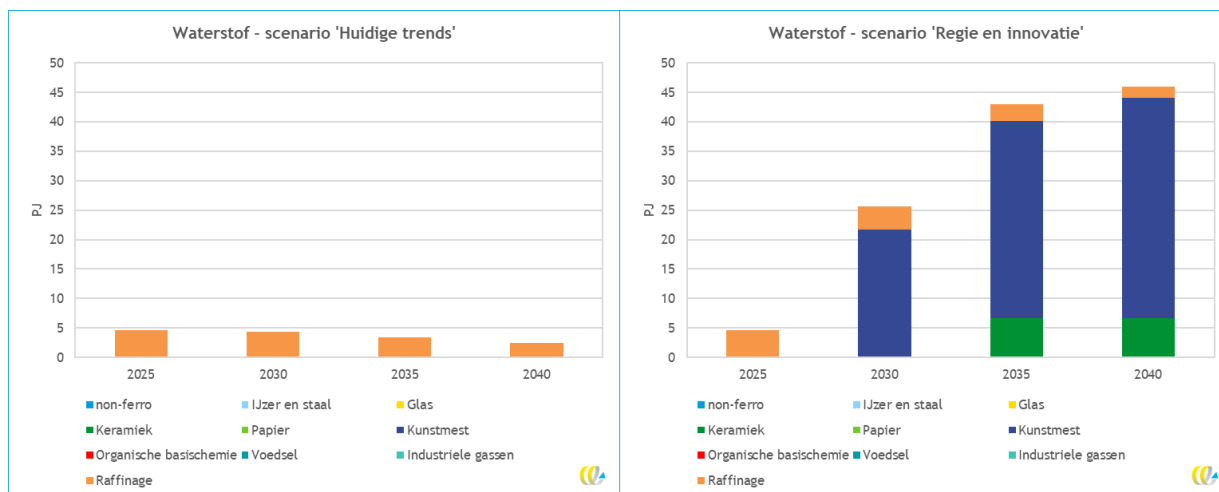
In deze figuur maken we geen expliciet onderscheid tussen verschillende vormen van waterstofproductie. De huidige waterstofproductie is op basis van aardgas (grijze waterstof). Hier kan CCS op worden toegepast (zie de volgende paragraaf). In de studie zijn we er vanuit gegaan dat groei in de waterstofvraag groene waterstof is.

In scenario 'Huidige trends' ontstaat er in geen enkele andere sector vraag naar waterstof, alleen de raffinagesector blijft het gebruiken. Er zijn verschillende sectoren die waterstof onderzoeken als alternatief voor fossiele brandstoffen. Doordat op het moment de waterstofeconomie niet snel ontwikkeld, nemen we het niet mee als brandstof en zien wij het voornamelijk als alternatieve grondstof.

In scenario 'Regie en innovatie' ontstaat er wel een sterk groeiende vraag naar waterstof. Voor kunstmestproductie (tot 37 PJ in 2040) en als brandstof vanuit de keramieksector (tot 6,7 PJ in 2040). De vraag naar waterstof voor raffinage neemt geleidelijk af tot ca. 2 PJ in 2040, in lijn met de geleidelijk dalende vraag naar fossiele transportbrandstoffen. Een eventuele vraag naar waterstof voor staalproductie is hier niet in opgekomen. In de plannen van Tata Steel geven zij aan dat zij pas na de tijdlijn van deze studie overstappen op waterstof. Hiermee zou nog een flinke extra waterstofvraag ontstaan van 33 PJ (CE Delft, 2024a).

Overigens komt de waterstofvraag voor de kunstmestsector in scenario 'Regie en innovatie' twee keer terug in dit hoofdstuk; als waterstof (in Figuur 20) en als elektriciteit (in Figuur 18): de waterstof die in dit scenario gebruikt wordt is lokaal geproduceerde groene waterstof.

Figuur 20 - De waterstofvraag in de Nederlandse ETS 1-industrie in de twee scenario's. In scenario 'Regie en innovatie' wordt de waterstofvraag in Nederland ingevuld. Hierdoor wordt dit terecht 'dubbel geteld' als zowel waterstof als elektriciteit



6.4 CCS

In Figuur 21 zijn de resultaten weergegeven van de behoefte aan carbon capture and storage (CCS), in beide scenario's. CCS kan gebruikt worden om CO₂-emissies permanent onder de grond te stoppen, en zo uitstoot naar de atmosfeer te voorkomen.

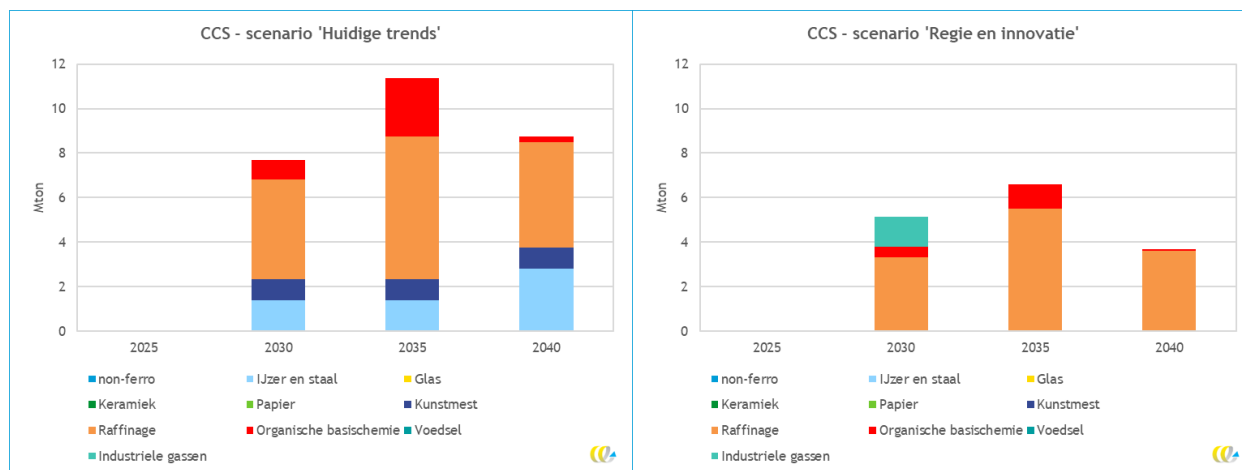
Voor de raffinage en organische basischemie is CCS in de huidige klimaatplannen de belangrijkste maatregel om de CO₂-uitstoot te reduceren. Deze sectoren hebben respectievelijk een CCS-behoefte van 6,4 en 2,6 Mton in 2035 in scenario 'Huidige trends' en 5,5 en 1,1 Mton in scenario 'Regie en innovatie'. Deze behoefte is hoger in scenario 'Huidige trends' omdat de organische basischemie hierin amper krimpt. Na 2035 neemt de behoefte aan CCS weer af.

Ook de kunstmestsector geeft aan dat zij in wil zetten op CCS. In scenario 'Huidige trends' blijft een deel van de ammoniakproductie in Nederland. Dit is het deel dat gebruikt wordt voor de productie van kunststoffen. Deze productie zal volgens de huidige methode met aardgas gaan, hierbij wordt de koolstof afgevangen.

In scenario 'Huidige trends' zet de staalsector in op aardgas met CCS, met een efficiëntie van 90% afvang. Hierdoor zal er uiteindelijk in 2040 een capaciteit van 2,8 Mton per jaar nodig zijn.

De productie van industriële gassen heeft in scenario 'Regie en innovatie' tijdelijk CCS nodig. Omdat deze sector in Nederland blijft, kunnen huidige installaties worden uitgerust met afvanginstallaties. Uiteindelijk zal deze sector volledig overgaan op waterstofproductie via elektrolyse.

Figuur 21 - De benodigde CCS-capaciteit in de verschillende scenario's



6.5 Conclusie opbouwpaden voor de ETS 1-industrie

De afbouw van fossiele brandstoffen die we hebben gezien in het vorige hoofdstuk leidt in veel ETS 1-sectoren tot een sterke toename van de vraag naar elektriciteit, groene waterstof, groengas én CCS.

De mate waarin de vraag naar deze energiedragers en CCS groeit hangt uiteraard van de manier waarop de verschillende sectoren verduurzamen, en de mate van krimp van de Nederlandse productie die wordt verondersteld. Dit leidt tot aanzienlijke verschillen tussen de scenario's. Dit is weergegeven in onderstaande figuren.

De elektriciteitsvraag neemt in beide scenario's sterk toe, in 2040 tot 195 PJ in scenario 'Huidige trends' en 191 PJ in scenario 'Regie en innovatie':

- Om dit in de Nederlandse context te zetten kunnen we dit afzetten tegen de verwachtingen van PBL in de KEV '24 (PBL, 2024a). Deze bevat onder andere inschattingen voor de elektriciteitsproductie tot 2035. In 2024 wordt 432 PJ (120 TWh) opgewekt. De KEV verwacht een productie van 504 PJ (140 TWh) in 2025, 558 PJ (155 TWh) in 2030 en 575 PJ (160 TWh) in 2035. De opwek lijkt dus snel genoeg te groeien om in de groeiende vraag vanuit de industrie te voorzien. Daarbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat de industrie over deze periode telkens een groter deel van de elektriciteitsvraag op zich zal nemen, waarbij dit uiteindelijk uitkomt op ongeveer 25% van de totale opgewekte elektriciteit. Overigens is uitbreiding van productie van hernieuwbare elektriciteit niet het enige dat nodig is, ook de elektriciteitsnetten moeten worden aangepast om die elektriciteit naar de industrie te kunnen transporteren. Wat daarvoor nodig is, is in deze studie niet nader onderzocht.

Voor groengas zijn de verschillen tussen de scenario's groot, de vraag stijgt tot 14 PJ per jaar in scenario 'Huidige trends' of tot minder dan 2 PJ in scenario 'Regie en innovatie':

- In het Klimaatakkoord is afgesproken om in Nederland in 2030 2 miljard m³ groengas te produceren, dat komt neer op ca. 70 PJ. De verwachte maximale productie is 1,45 miljard m³ (51 PJ groengas). De huidige productie is veel lager, 280 miljoen m³ (10 PJ) (CE Delft, 2024b). Zeker in scenario 'Huidige trends' verbruikt de industrie een flinke hoeveelheid van dit groengas, terwijl de productie hiervan nog flink moet worden uitgebreid.

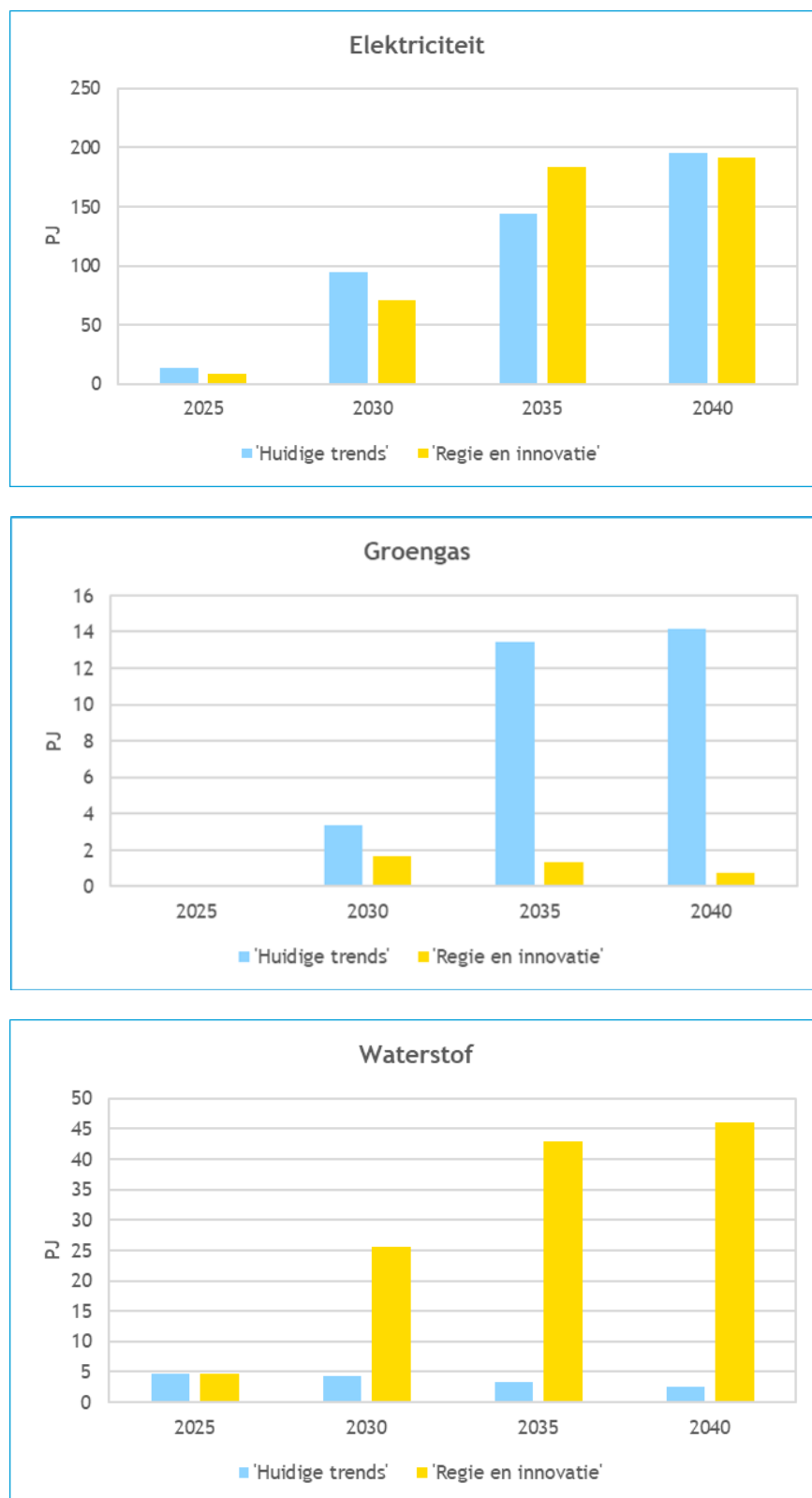
De vraag naar waterstof vanuit de Nederlandse ETS 1-industrie blijft in dit rapport relatief laag: in 2040 komt scenario 'Huidige trends' uit op 3 PJ, en scenario 'Regie en innovatie' op 46 PJ. De belangrijkste vraag naar waterstof komt door de inzet van waterstof voor de productie van basischemicaliën, zoals ammoniak:

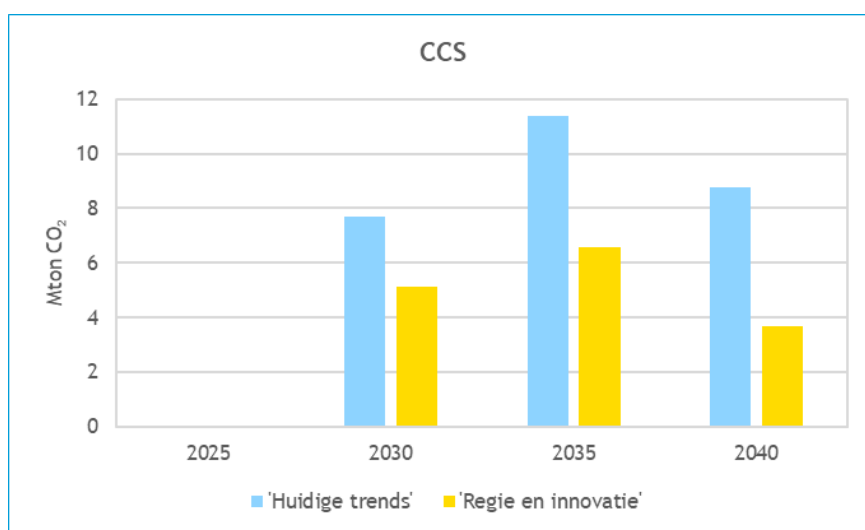
- In het Klimaatakkoord moet 3-4 GW gerealiseerd zijn in 2030, wat optelt tot 65 PJ (Delft & TNO, 2023). Momenteel verloopt de opbouw van groene waterstofcapaciteit nog onvoldoende snel om deze productie te kunnen halen.

De benodigde hoeveelheid CO₂-opslag wordt maximaal 11 Mton/jaar in scenario 'Huidige trends', en 7 Mton/jaar in scenario 'Regie en innovatie':

- Dit kan worden gerealiseerd door Porthos en Aramis. Porthos heeft een geplande capaciteit van 2,5 Mton CO₂/jaar (Porthos, 2021) en Aramis eerst 7,5 en later 22 Mton CO₂/jaar (TotalEnergies et al., 2023). Hierbij moet wel worden opgemerkt dat het Aramis project op dit moment vertraagd is, en er nog geen definitieve investeringsbeslissing is genomen.

Figuur 22 - Opbouwpaden van de duurzame energiedragers en CCS, vraag vanuit de Nederlandse ETS 1-industrie





6.5.1 Niet alle effecten zijn meegenomen in deze cijfers

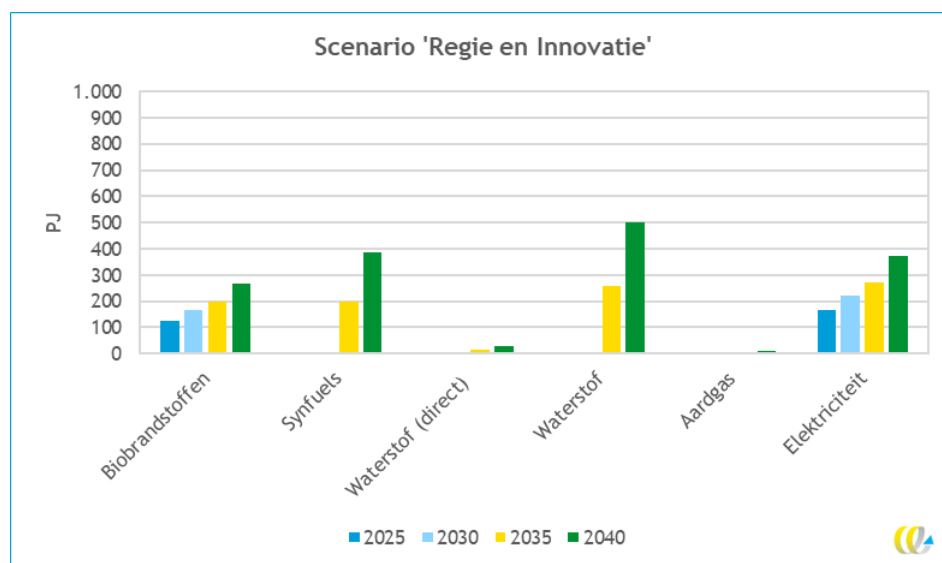
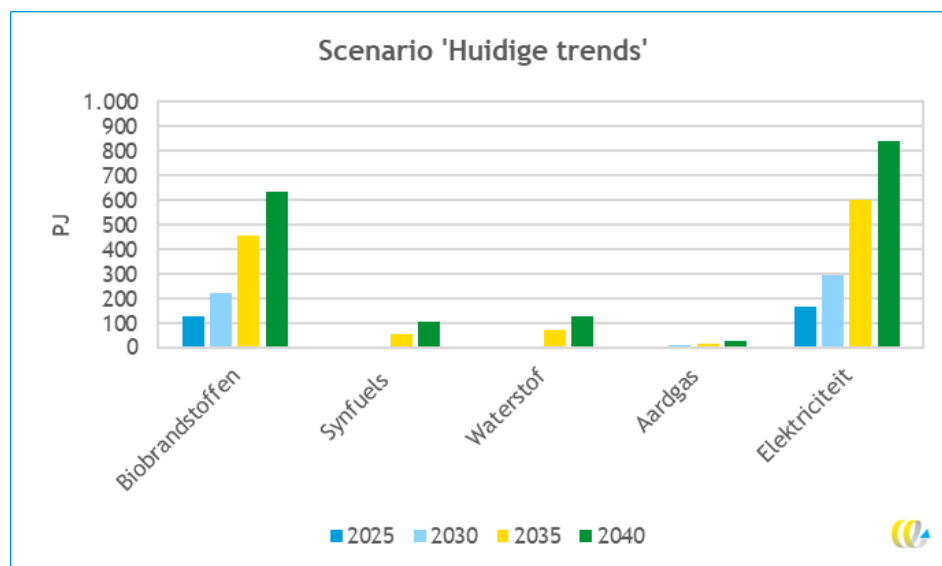
Zoals eerder opgemerkt ligt de focus van deze studie op de verduurzaming van de huidige ETS 1-industrie. Dat betekent wel dat een aantal effecten buiten beschouwing is gebleven.

In verschillende sectoren die wij hier hebben besproken, hebben wij vraagreductie meegenomen (zie de aannames in Bijlage A, en toelichting per sector in Bijlage B). In de praktijk kan dit betekenen dat een deel van de productie naar het buitenland verplaatst. De energie die daar wordt verbruikt nemen we hier niet mee.

Een ander gevolg van de afbakening van deze studie is dat de vervangers van aardolie als grondstof buiten beschouwing zijn gelaten. Zo is een reductie van de vraag naar benzine, diesel, kerosine, etc. wel meegenomen, maar niet de daaruit volgende groei van de vraag naar alternatieven. De productie van deze alternatieve brandstoffen heeft een zeer grote energievraag die hier niet is opgenomen in de cijfers. In de PBL-scenario's voor de afbouwpaden van fossiele brandstoffen voor de mobiliteit (PBL, 2024c), zitten ook opbouwpaden voor het gebruik van biobrandstoffen, synfuels en waterstof. In de figuur hieronder zijn deze paden vertaald naar onze scenario's. Een vergelijking met de resultaten van onze studie laat zien dat de aanvullende vraag vanuit mobiliteit aanzienlijk groter is dan de vraag voor verduurzaming van de ETS 1-industrie, voor elke energiedrager. Vooralsnog is niet bekend of deze energiedragers in Nederland zullen worden geproduceerd of niet.

Een soortgelijke analyse zou ook gedaan kunnen worden voor de chemische industrie, waar de afbouw van fossiele grondstoffen ook gevolgen zal hebben voor de vraag naar duurzame energiedragers. Daarbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan de vraag naar energiedragers voor het recyclen van kunststoffen, of een groeiende vraag naar biograndstoffen voor productie van bio-plastics. Zowel deze biograndstoffen als de energie die nodig is om hier plastics van te maken, zijn buiten beschouwing gelaten.

Figuur 23 - De energievraag in de afbouwpaden voor fossielvrije mobiliteit, deze energievraag komt bovenop de eerder getoonde energievraag



7 Conclusies

De aanleiding voor dit onderzoek is de constatering dat er in 2040 geen CO₂-uitstootrechten meer worden uitgegeven voor de Europese industrie en elektriciteitsproductie, als we uitgaan van de huidige ETS 1-regelgeving. Als het aantal uitstootrechten blijft afnemen zoals dat op dit moment is afgesproken mogen deze sectoren vanaf dat jaar geen CO₂ meer uitstoten⁸. In deze studie zijn daarom twee scenario's ontwikkeld die beschrijven op welke manier de Nederlandse ETS 1-industrie zodanig zou kunnen verduurzamen dat dit doel zo goed mogelijk wordt gehaald.

We hebben ons daarbij op de volgende onderzoeksvragen gericht:

1. Ervan uitgaande dat elk Europees land haar eerlijke bijdrage levert aan het ETS 1, hoeveel megaton CO₂ wordt dan in Nederland gereduceerd in 2030 en 2040?
2. Wat betekent het halen van het ETS 1 voor het gebruik en de afbouw van olie, kolen en gas in de Nederlandse industrie?
3. Wat betekent dit voor de opbouw van hernieuwbare brand- en grondstoffen? Hoe verhoudt zich dit tot de huidige trends en plannen (in hoeveelheden en tempo)?

7.1 CO₂-reductiepad voor de ETS 1-sectoren

De industrie is op dit moment verantwoordelijk voor ongeveer een derde van de Nederlandse uitstoot en voor 60% van de uitstoot binnen de Nederlandse ETS 1. Het ETS 1 kent geen nationale doelen, maar het totaal aantal emissierechten neemt wel elk jaar af. Als we uitgaan van behoud van het huidige aandeel van Nederland in de totale ETS 1 emissies (6%), kunnen we een indicatief CO₂-reductiepad voor de Nederlandse ETS industrie schetsen. Dit is de groene lijn in Figuur 24 op de volgende pagina.

Volgens dit reductiepad moet de Nederlandse ETS 1-industrie ongeveer 10 Mton CO₂ minder uitstoten in 2030 ten opzichte van 2023. De resterende uitstoot, 21 Mton CO₂/jaar, zal vervolgens tussen 2030 en 2040 verder gereduceerd moeten worden tot nul, tenzij de huidige regelgeving van het EU ETS 1 nog wordt aangepast. Dit reductiepad is in lijn met het indicatieve doel uit het Klimaatakkoord/Klimaatnota. Volgens het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) komt de uitstoot van de ETS 1-industrie in 2030 echter naar verwachting rond de 31,1 Mton uit (PBL, 2024a). Dit betekent dat de emissiereductie fors versneld moet worden om binnen dit ETS-reductiepad te blijven.

7.1.1 Twee CO₂-reductiescenario's ontwikkeld

De twee scenario's die we in deze studie hebben ontwikkeld leiden allebei tot sterke reductie van de CO₂-uitstoot, maar de uitgangspunten en aannames over getroffen verduurzamingsmaatregelen verschillen.

- **Scenario 'Huidige trends':** Zoveel mogelijk gebaseerd op de huidige bestaande verduurzamingsplannen voor de industrie, met een versnelling om binnen het ETS 1-reductiepad te blijven. Het gaat vooral uit van duurzame productieroutes die relatief weinig technologische ontwikkeling meer nodig hebben.
- **Scenario 'Regie en innovatie':** Een ingrijpendere transitie van de industrie die is gericht op afbouw van fossiele energie en grondstoffen en opbouw van duurzame

⁸ In de praktijk kunnen er in 2040 nog wel (ongebruikte) uitstootrechten in omloop zijn van eerdere jaren. Uiteindelijk zullen die rechten ook worden opgebruikt, en worden geen nieuwe rechten meer uitgegeven.

productiecapaciteit. In dit scenario wordt ingezet op innovatie en nationale sturing van de transitie.

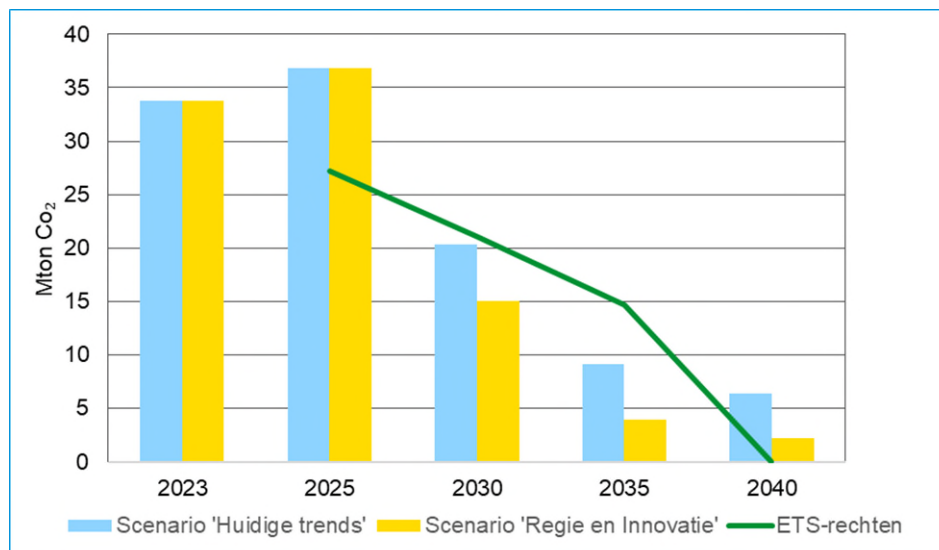
De scenario's omvatten tien industriële sectoren, samen goed voor 97% van de huidige industriële emissie in Nederland binnen het ETS 1. Een beknopt overzicht van de belangrijkste uitgangspunten in beide scenario's is gegeven in Tabel 4.

Tabel 4 - De belangrijkste kenmerken van de twee scenario's

	Scenario 'Huidige trends'	Scenario 'Regie en innovatie'
CCS	– Hoog	– Alleen voor de transitie
Elektrificatie	– Voor laagtemperatuurprocessen, via e-boiler	– Voor laagtemperatuurprocessen via warmtepomp – Voor een aantal hogetemperatuurprocessen na innovatie (glas, aluminiumrecycling) – Voor staalproductie
Groene waterstof	– Import	– Lokale productie – Voor overige hogetemperatuurprocessen
Krimp van productie	– Ammoniak naar 0 in 2050 – Raffinage volgens PBL 'behoudend' – Non-ferro	– Ammoniak wordt alleen nog geproduceerd voor kunststofproductie – Staal van 7 Mton naar 4 Mton per jaar in 2030 – Raffinage volgens PBL 'innovatief' – Non-ferro – Kunststoffen
Groengas	– Hogetemperatuurprocessen	– Hogetemperatuurprocessen
Resterende CO ₂ -emissie in 2040, in Mton en als % ten opzichte van 2025	– 6,4 Mton – 17%	– 2,2 Mton – 6%
Gebruik fossiele brand- en grondstoffen in 2040, ten opzichte van 2025	– 50%	– 35%

De ontwikkeling van de CO₂-uitstoot in beide scenario's is uitgezet in Figuur 24. In beide scenario's wordt het ETS-afbouwpad gehaald in 2030 en 2035, maar er blijven wel restemissies over in 2040. Scenario 'Regie en innovatie' laat wel een aanzienlijk snellere en diepere reductie van de uitstoot zien dan scenario 'Huidige trends'.

Figuur 24 - Ontwikkeling van de CO₂-emissies van de ETS 1-industrie in beide scenario's



In de analyse van de industriële emissies wordt duidelijk dat er een paar grote sectoren zijn met een zeer grote uitstoot. Dit zijn voornamelijk de Staalsector, Kunstmest, Olieraffinage en Organische basischemie. Deze vier sectoren zijn verantwoordelijk voor 80% van de in deze studie onderzochte emissies. We laten in deze studie zien dat deze uitstoot sterk kan worden teruggebracht door een mix van technologieën: in scenario 'Huidige trends' neemt de totale uitstoot van deze vier sectoren tussen 2040 en 2025 af met 80%, in 'Regie en innovatie' met 94%.

Voor de staalsector zijn verschillende concrete plannen om de emissies significant te verlagen. De tijdlijn is echter wel langer dan beschreven in deze studie, de uitstoot gaat niet naar nul in 2040. Ammoniak (nodig voor kunstmestproductie) kan gemaakt worden met groene elektriciteit, maar is het de vraag of dit kosteneffectief in Nederland kan. Ammoniak wordt ook besproken als mogelijke waterstofdrager. Nederland zou hier mogelijk veel van kunnen importeren, de productie zal dan elders plaatsvinden.

Ook de zes overige sectoren (Non-ferro, Glas, Keramiek, Papier, Voedsel en Industriële gassen) hebben verschillende routes om hun CO₂ te reduceren. Dit zal bestaan uit een combinatie van elektrificatie, groengas en waterstof. Voor enkele hiervan vergt elektrificatie nog wel verdere ontwikkeling van nieuwe technologieën, deze zijn nu nog niet marktrijp.

We concluderen ook dat zelfs bij verregaande verduurzaming restemissies overblijven. Een deel hiervan is inherent aan sommige producten en daardoor niet te voorkomen. Voorbeelden hiervan zijn emissies die vrijkomen bij de productie van glas of keramiek. Sommige van de restemissies in dit onderzoek kunnen nog wel verder verlaagd worden, bijvoorbeeld door het volledig uitfaseren van olieproducten in de mobiliteit. Ook het gebruik van biokoolstof en groene waterstof in de productie van staal zou dit proces volledig klimaatneutraal kunnen maken.

7.2 Afbouw van fossiele brandstoffen

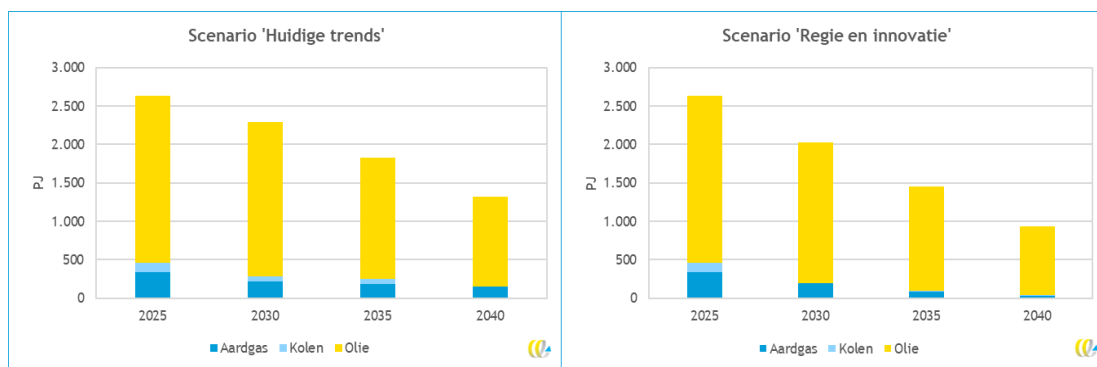
De ontwikkelde afbouwpaden voor fossiele brandstoffen zijn gegeven in Figuur 25. In beide scenario's neemt het gebruik van fossiel brandstoffen af, maar geen van de drie onderzochte fossiele brandstoffen kunnen volledig worden uitgefaseerd in 2040.

Kolen kunnen het snelste worden gereduceerd, waarbij nog een kleine restvraag voor staalproductie overblijft. Deze zou eventueel met biokoolstof kunnen worden vervangen.

Het gebruik van aardgas kan met 57-90% worden verminderd in de komende 15 jaar. Heel belangrijk hierin zijn industrieën met een grote vraag naar lagetemperatuurwarmte. Hierdoor kunnen sectoren als papier en voedsel door elektrificatie de aardgasvraag significant verminderen. Als elektrificatie ook wordt ontwikkeld voor hogere temperaturen, neemt deze vraag nog verder af. Voor staal neemt het aardgasverbruik tijdelijk toe. Ook het deels verdwijnen van de fossiele kunstmestproductie heeft een groot effect op het aardgasverbruik.

Het aardoliegebruik neemt in beide scenario's af. De vraag naar olie daalt wel meer in scenario 'Regie en innovatie' dan in 'Huidige trends', tot respectievelijk 41% en 54% van het verbruik in 2025. De reductie wordt in beide scenario's vooral veroorzaakt door vraagvermindering van transportbrandstoffen, daarnaast zien we in scenario 'Regie en innovatie' ook een extra vraagvermindering in de organische basischemie. Om aardolie verder uit te faseren moeten grote sectoren transformeren: alle vormen van mobiliteit en de gehele productie van kunststoffen. Het is niet waarschijnlijk dat dit mogelijk is voor 2040, het huidige beleid is daar ook nog niet op gericht.

Figuur 25 -De afbouwpaden voor de vraag naar fossiele energie en grondstoffen van de Nederlandse ETS 1-industrie



7.2.1 Groei van duurzame alternatieven

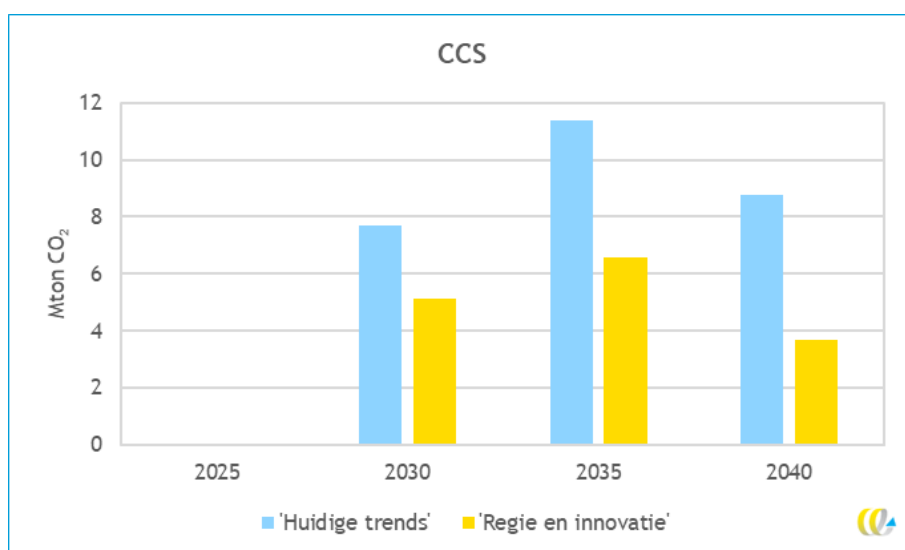
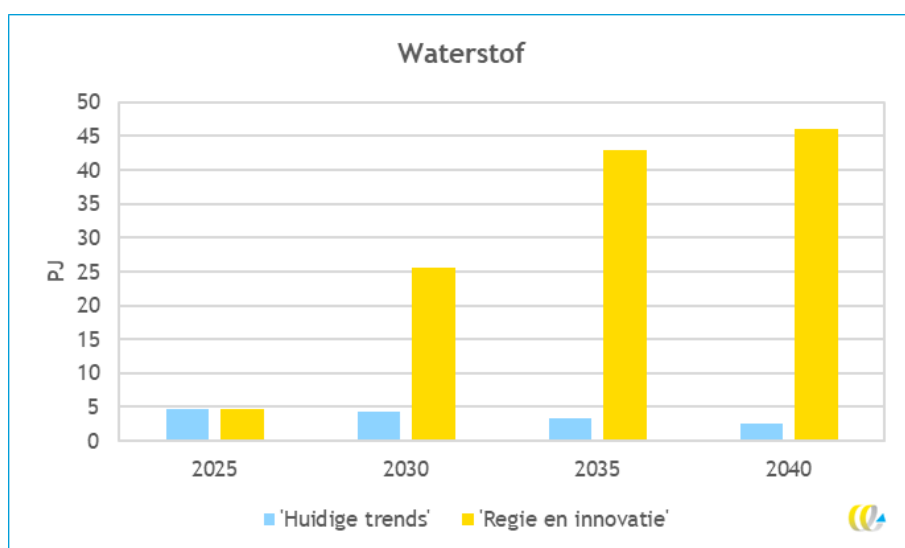
Terwijl het gebruik van fossiele energie en grondstoffen afneemt, zal de vraag naar duurzame energie en grondstoffen fors moeten toenemen. Dit leidt tot de opbouwpaden van de vraag naar alternatieve energiedragers (elektriciteit, groengas en waterstof) en CCS zoals weergegeven in Figuur 26.

Een ruwe vergelijking van deze resultaten met de huidige plannen voor groei van de productie van deze duurzame energie en grondstoffen, en de plannen voor CCS in Nederland, laat zien dat het in principe mogelijk moet zijn om aan de vraag vanuit de ETS 1-industrie te voldoen. Er lijken voldoende voornemens te zijn om deze capaciteit te realiseren. Hierbij geldt echter wel dat voor alle hernieuwbare energiedragers nog grote

stappen gezet moeten worden. Veel van de toekomstige capaciteit is nog in de planningsfase, en daadwerkelijke realisatie is nog onzeker. *N.B. hierbij kan wel worden opgemerkt dat onderstaande figuren exclusief de behoefte is aan energiedragers voor nieuwe industrieën die momenteel nog niet onder het ETS vallen (bijvoorbeeld productie van nieuwe brandstoffen). Die zal hier bovenop komen.*

Figuur 26 - Opbouwpaden van de duurzame energiedragers en CCS, vraag vanuit de Nederlandse ETS 1-industrie





7.3 Reflectie op de haalbaarheid van deze scenario's

De scenario's zijn zo opgesteld dat ze haalbaar zijn, maar ze zijn wel optimistisch. Alle besproken sectoren hebben grote uitdagingen en sommige zullen waarschijnlijk verdwijnen (zoals besproken in (CE Delft, 2023)). Ook hebben we minimale kostenanalyses gedaan rondom de scenario's, de insteek was om te redeneren vanuit wat er mogelijk is, en wat er nodig is om de forse CO₂-reductie te halen die wordt vereist door het ETS 1.

Hieronder benoemen we daarom graag nog enkele belangrijke risico's voor de haalbaarheid van de scenario's die we binnen deze studie niet verder konden onderzoeken:

- netcongestie;
- vertraagde uitrol van de opwek van duurzame elektriciteit;
- het achterblijven van de uitrol voor de opwek van groene waterstof;
- het achterblijven van de productie van groengas;
- het niet doorgaan van verschillende investeringen in duurzame processen, zoals bijvoorbeeld de uitrol van de verduurzamingsplannen van Tata Steel;

- raffinaderijen die in Nederland blijven produceren en alleen Scope 1-emissies verminderen;
- het niet ontwikkelen van duurzame technologieën die nodig zijn voor de verdere verduurzaming, zoals industriële warmtepompen, inductieovens en elektrische ovens voor glasproductie.

Aan de andere kant zijn er ook combinaties binnen de scenario's mogelijk, die de haalbaarheid vergroten. Zo kan een goede internationale handel van goedkope groene waterstof en hieruit afgeleide producten voor heel veel sectoren een uitkomst bieden om aan de sterk groeiende vraag naar groene waterstof in scenario 'Regie en innovatie' te kunnen voldoen.

Literatuurlijst

- CE Delft. (2021a). *The aviation and maritime sectors and the EU ets system: Challenges and impacts*.
- CE Delft. (2021b). *Groeiprojecties energie-intensieve industrie. Referentiescenario's voor impactanalyse klimaatbeleid*.
- CE Delft. (2023). *Verkenning van een fossielvrije industrie. Productie binnen het carbonbudget*.
- CE Delft. (2024a). *Analyse toekomstplannen tata steel*.
- CE Delft. (2024b). *Scenariostudie groengasproductie rond 2030*.
- Commissie, E. (2025). EU-klimaatwetgeving: Nieuwe manieren om doelen voor 2040 te halen. In: Europese commissie.
- Crippa, M., De Wilde, B., Koopmans, R., Leyssens, J., Muncke, J., Ritschkoff, A.-C., Van Doorselaer, K., Velis, C., & Wagner, M. (2019). *A circular economy for plastics - insights from research and innovation to inform policy and funding decisions*.
- Dashboard Klimaatbeleid. (2024). *Over de sector industrie*.
<https://dashboardklimaatbeleid.nl/mosaic/mosaic/industrie>
- Delft, C., & TNO. (2023). *Afnameverplichting groene waterstof*.
- EC. (2020). *Commission decision (EU) 2020/1722 of 16 november 2020 on the union-wide quantity of allowances to be issued under the EU emissions trading system for 2021*.
- EEA. (2023). *Greenhouse gas emissions under the EU emissions trading system*.
- Energy Monitor. (2021). *The paper industry's burning secret*.
<https://www.energymonitor.ai/sectors/industry/the-paper-industrys-burning-secret/>
- EURACTIV. (2021). *Glass packaging industry goes electric, adding to growing demand for renewable power*. <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/glass-packaging-industry-goes-electric-adding-to-growing-demand-for-renewable-power/>
- European Aluminium. (2022). *Circular aluminium action plan*.
- Europese Commissie. (2024). *Consolidated text: Directive 2003/87/EC of the european parliament and of the council of 13 october 2003 establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the union and amending council directive 96/61/EC*.
- Fertilizers Europe. (2019). *How fertilizers are made*.
<https://www.fertilizerseurope.com/fertilizers-in-europe/how-fertilizers-are-made/>
- Fertilizers Europe. (s.d.). *Energy cost*. <https://www.fertilizerseurope.com/industry-competitiveness/energy-cost/>
- Fu, Q., Mabilat, C., Zahid, M., Brisse, A., & Gautier, L. (2010). *Syngas production via high-temperature steam/co2 co-electrolysis: An economic assessment*. *Energy & Environmental Science*.
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/ee/c0ee00092b>
- Horiba. (s.d.). *Petrochemical industry*. <https://www.horiba.com/deu/process-and-environmental/industries/petrochemical-industry/>
- JRC. (2020). *Production costs form iron and steel industry in the EU and third countries*.
- Ministerie van EZK. (2019). *Klimaatwet: Wet van 2 juli 2019, houdende een kader voor het ontwikkelen van beleid gericht op onomkeerbaar en stapsgewijs terugdringen van de nederlandse emissies van broeikasgassen teneinde wereldwijde opwarming van de aarde en de verandering van het klimaat te beperken (klimaatwet)*.
- Ministerie van EZK. (2023). *Klimaatnota 2023*.



- NEa. (2024). *Emissiecijfers nederlandse bedrijven*.
- nova-Institute. (2019). *Bio-based building blocks and polymers - global capacities, production and trends 2018-2023*.
- NWGD. (2020). Drogen in de papier en karton industrie. In.
- Pahle, M., Günther, C., Osorio, S., & Quemin, S. (2023). The emerging endgame: The EU ets on the road towards climate neutrality. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4373443>
- PBL. (2019a). *Decarbonisation options for the dutch paper and board industry*.
- PBL. (2019b). *Decarbonisation options for the dutch steel industry*.
- PBL. (2019c). *Effecten ontwerp klimaatakkoord*.
- PBL. (2020). *Decarbonisation options for the dutch ceramic industry*.
- PBL. (2023). *Klimaat- en energieverkenning (kev) 2023: Ramingen van broeikasgasemissies, energiebesparing en hernieuwbare energie op hoofdlijnen*.
- PBL. (2024a). *Klimaat- en energieverkenning 2024*.
- PBL. (2024b). *Klimaat- en energieverkenning (kev) 2024*.
- PBL. (2024c). *Klimaatneutrale mobiliteit in 2050*.
- PBL, & TNO. (2019). *Decarbonisation options for the dutch fertiliser industry*.
- PBL, & TNO. (2021). *Publications manufacturing industry decarbonisation data exchange network (midden)*. Retrieved 2021 from
<https://www.pbl.nl/en/middenweb/publications>
- Porthos. (2021, mei 5). *Porthos co2 transport & storage : Project*. Porthos Development C.V. <https://www.porthosco2.nl/en/project/>
- Reuters. (2021). *Gas price surge pushes europe's ceramics industry to breaking point*.
<https://www.reuters.com/world/europe/gas-price-surge-pushes-europes-ceramics-industry-breaking-point-2021-10-27/>
- SteelOrbis. (2023). *Energy prices become key factor in european metallurgical market in 2022*. SteelOrbis. <https://www.steelorbis.com/steel-news/latest-news/energy-prices-become-key-factor-in-european-metallurgical-market-in-2022-1277503.htm>
- Tata Steel. (2022). *Groen staal in een schone omgeving*.
https://omgeving.tatasteel.nl/assets/user/Duurzaamheidsambities/Tweede%20kamer%20briefing_mrt2022.pdf
- TotalEnergies, EBN, Shell, & Gasunie. (2023, september 2023). *Aramis - een transportinfrastructuur voor grootschalige co2-reductie*. TotalEnergies, Shell, Energie Beheer Nederland (EBN) en Gasunie. https://www.aramis-ccs.com/files/Aramis-brochure_20230928_NL_digitaal.pdf



A Achtergrond bij de scenario's - overzichtstabellen

In de volgende bijlagen bespreken we de belangrijkste uitgangspunten, technische achtergrond en aannames bij de twee scenario's voor elk van de tien industrie sectoren waar we naar kijken. Hiermee bouwen we zoveel mogelijk voor bij de factsheets uit ons eerdere rapport (CE Delft, 2023). Aangezien het doel van de deze studie anders is dan van die uit 2023 hebben we de informatie uit die factsheets vooral aangevuld met de scenario-analyse. Waar nodig hebben we de informatie uit 2023 geactualiseerd.

Een gedetailleerd kwantitatief overzicht van onze aannames per sector geven we in de volgende tabellen.

Tabel 5 - De productievolumes voor de verschillende productiemethodes in de twee afbouwpaden

Categorie	Proces	Eenheid	'Huidige trends'				'Regie en innovatie'			
			2025	2030	2035	2040	2025	2030	2035	2040
Zink	Totaal	Kton	320	320	320	320	0	0	0	0
	Base	kton	320	243,2	0	0	0	0	0	0
	Groengas	kton	0	76,8	320	320	0	0	0	0
Aluminium secundair	Totaal	kton	138	174	187	200	138	174	187	200
	Base	kton	138	132	94	0	138	132	94	0
	Groengas	kton	0	42	94	200	0	42	94	0
	Inductie	kton	0	0	0	0	0	0	0	200
IJzer en staal	Totaal	kton	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	4.000	4.000	4.000
	BF-BOF	kton	7.000	3.500	3.500	0	7.000	0	0	0
	DRP-CH4-CCS	kton	0	3.500	3.500	7.000	0	0	0	0
	EAF	kton	0	0	0	0	0	4.000	4.000	4.000
Glas	Totaal	kton	1.291	1.291	1.291	1.291	1.291	1.291	1.291	1.291
	Base	kton	1.291	981	0	0	1.291	981	0	0
	Groengas	kton	0	310	1.291	1.291	0	310	0	0
	Efurnace	kton	0	0	0	0	0	0	1.291	1.291
Keramiek	Totaal	kton	2.900	2.900	2.900	2.900	2.900	2.900	2.900	2.900
	Base	kton	2.900	2.204	0	0	2.900	2.900	0	0
	Groengas	kton	0	696	2.900	2.900	0	0	0	0
	Waterstof	kton	0	0	0	0	0	0	2.900	2.900
Papier	Totaal	kton	2.630	2.630	2.630	2.630	2.630	2.630	2.630	2.630
	Base	kton	2.367	0	0	0	2.367	0	0	0
	E-boiler	kton	2.367	2.630	2.630	2630	2.367	0	0	0
	Warmtepomp	kton	263	0	0	0	263	2.630	2.630	2.630
Kunstmest/ammoniak	Totaal	kton	3.003	2.093,5	1.184	1.184	3.003	2.639	2.275	1.912
	Base	kton	3.003	691	0	0	3.003	1.531	569	0
	Import H ₂	kton	0	0	0	0	0	1.108	1.707	1.912
	CCS_groot_liq	kton	0	1.184	1.184	1.184	0	0	0	0
Raffinage	Totaal	PJ	2.296	2.225	2.085	1.908	2.295	1.988	1.762	1.556
	Brandstof Base	PJ	1.808	738	0	0	1.808	900	0	0
	Brandstof CCS	PJ	360	162	0	0	360	101	0	0

Categorie	Proces	Eenheid	'Huidige trends'				'Regie en innovatie'			
			2025	2030	2035	2040	2025	2030	2035	2040
	Nafta Base	PJ	0	902	1214	810	0	736	1216	795
	Nafta CCS	PJ	0	198	360	360	0	83	144	97
	Synmethanol	PJ	0	0	56	102	0	0	200	388
	Biodiesel uit plantolie, e-boiler	PJ	128	224	455	635	127	168	197	267
	Waterstof	PJ	0	0	0	0	0	0	4	8
Organische chemie	Totaal	kton	6.300	6.300	6.300	6.300	6.300	3.213	2.520	1.701
	Base	kton	6.300	4.200	0	0	6.300	2.142	0	0
	CCS	kton	0	2.100	0	0	0	1.071	0	0
	CCS + e-boiler	kton	0	0	6.300	0	0	0	2.520	0
	Max-elektrisch	kton	0	0	0	6.300	0	0	0	1.701
Voedsel	Totaal	PJ	32	32	32	32	32	32	32	32
	Stoom - Gasboiler	PJ	32	0	0	0	32	0	0	0
	Stoom - e-boiler	PJ	0	32	32	32	0	0	0	0
	Stoom - warmtepomp	PJ	0	0	0	0	0	32	32	32
Industriële gassen	Totaal	kton	222	219	211	204	222	396	541	566
	SMR	kton	222	0	0	0	222	0	0	0
	Elektrolyse AEL	kton	0	0	0	0	0	95	541	566
	CCS_klein	kton	0	0	0	0	0	301	0	0
	Ammoniak_kraken	kton	0	219	211	204	0	0	0	0

Tabel 6 - Energiebehoefte en uitstoot per eenheid product in verschillende productieprocessen

Categorie	Proces	Eenheid	Waterstof	Biomassa	Aardgas	Elektriciteit	Kolen	Olie	Groengas	Totaal	CO ₂	CCS
			MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	ton	ton
Zink	Base	ton	0	0	770	14.800	0	0	0	15.570	0,116	0
	Groengas	ton	0	0	0	14.800	0	0	770	15.570	0,072	0
Secundair aluminium	Base	ton	0	0	6.330	576	0	0	0	6.906	0,365	0
	Groengas	ton	0	0	0	576	0	0	6330	6.906	0,0295	0
	Inductie	ton	0	0	0	3.200	0	0	0	3.200	0,03	0
Staal	BF-BOF	ton	0	0	1.849	-517	18.200	29,5	0	19.562	0,886	0
	DRP-CH4-CCS	ton	0	0	10.888	3.582	758	0	0	15.228	0,304	0,4
	EAF	ton	0	0	2.979	3.438	758	0	0	7.175	0,224	0
Glas	Base	ton	0	0	4.586	941	0	0	0	5.527	0,27	0
	Groengas	ton	0	0	0	941	0	0	4.586	5.527	0,074	0
	Efurnace	ton	0	0	0	5.666	0	0	602	6.268	0,074	0
Keramiek	Base	ton	0	0	2.313	259	0	0	0	2.572	0,19	0
	Groengas	ton	0	0	0	259	0	0	2.313	2.572	0,08	0
	Waterstof	ton	2.313	0	0	259	0	0	0	2.572	0,08	0
Papier	Base	ton	0	0	16.172	-2.520	0	0	0	13.652	0,56	0
	E-boiler	ton	0	0	0	10.581	0	0	0	10.581	0	0
	Warmtepomp	ton	0	0	0	3.706	0	0	0	3.706	0	0
Kunstmest	Base	ton	0	0	31.133	265	0	0	0	31.398	1,762	0
	Import H ₂	ton	19.538	0	0	5.661	0	0	0	25.198	0	0
	CCS_groot_liq	ton	0	0	31.133	849	0	0	0	33.859,5	0,96769	0,7944
Raffinage	Brandstof - Base	MJ	0,00216	0	0,0244	0,00308	0	1	0	0,02964	4,5E-06	0
	Nafta - Base	MJ	0,00216	0	0,0244	0,00308	0	1	0	0,02964	4,5E-06	0
	Brandstof - CCS	MJ	0,00216	0	0,0244	0,00454	0	1	0	0,03965	4,5E-07	4,1E-06
	Nafta - CCS	MJ	0,00216	0	0,0244	0,00454	0	1	0	0,03965	4,5E-07	4,1E-06
	Synmethanol	MJ	1,22	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0
	Biodiesel uit plantolie, e-boiler	MJ		2,3E-05	0,03886	1,31757	0	0	0	1,35643	0	0
Organische basischemie	Base	ton			7.776	912	0	0	0	8.688	1,47	0
	CCS	ton			10.302	1.269	0	0	0	11.571	1,05	0,42
	CCS+e-boiler	ton			10.302	9.025				19.327	0,43	0,42
	Max-elektrisch	ton			614	15.149				15.763	0,36	0,04

Categorie	Proces	Eenheid	Waterstof	Biomassa	Aardgas	Elektriciteit	Kolen	Olie	Groengas	Totaal	CO ₂	CCS
			MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	ton	ton
Voedsel	Stoom - Gasboiler	MJ			1,11111	0				0	6,2E-05	0
	Stoom - e-boiler	MJ			0	1,01				0	0	0
	Stoom - warmtepomp	MJ			0	0,286				0	0	0
Industriële gassen	H ₂ - SMR	ton			182.000	480				182.480	9	0
	H ₂ - AEL	ton			0	193.000				193.000	0	0
	H ₂ - CCS	ton			182.000	3.630				191.280	4,5	4,5
	H ₂ - Ammoniak_kraken	ton			0	7.200				7.200	0	0

B Factsheets

- Factsheet - Non ferrometaal (aluminium, zink)
- Factsheet - Staal
- Factsheet - Voedselindustrie
- Factsheet - Papier
- Factsheet - Glas
- Factsheet - Keramiek
- Factsheet - Kunstmest
- Factsheet - Industriële gassen
- Factsheet - Raffinage
- Factsheet - Organische basischemie

Factsheet | Non ferrometaal (aluminium, zink)

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

Non-ferrometalen zijn alle metalen die geen ijzer bevatten. De meest gebruikte zijn aluminium, koper en zink, maar er zijn er nog veel meer, bijvoorbeeld: tin, lood, chroom, vanadium, mangaan, kobalt, lithium, nikkel en wolfram.

Het exacte productieproces verschilt per metaal. Aluminium en zink worden geproduceerd door (bewerkt) erts met grote hoeveelheden elektriciteit om te zetten in zuiver vloeibaar metaal (elektrolyse). De belangrijkste producent van non-ferrometalen in Nederland is zinkproducent Nyrstar in Budel. Er wordt geen primair aluminium meer gemaakt in Nederland, er wordt nog wel aluminium gerecycled.

WELKE TECHNIEK VOOR CO₂-REDUCTIE ONDER HET ETS?

De non-ferrometaalsector is al bijna klaar voor een fossielvrije toekomst, omdat zij nog nauwelijks fossiele brandstoffen gebruikt. Er wordt nog aardgas gebruikt om producten voor te verwarmen of te smelten, dit kan vervangen worden door elektrische (inductie)ovens. Daarnaast is elektrolyse van metalen goed flexibel te opereren.

HOE SNEL KAN DIT?

De vervanging van gasgestookte ovens door inductiefornuizen bij Nyrstar duurt vijf tot tien jaar. De belangrijkste belemmering daarbij is de netcapaciteit.

Voor de recycling van aluminium wordt nog op een groot deel van de warmte door aardgas geleverd. Dit kan worden vervangen door groengas of door inductieovens, deze zijn nog niet markt klaar.

INTERNATIONALE POSITIE

Non-ferrometalen hebben een hoge waarde en zijn eenvoudig en goedkoop te transporteren. Voor veel metalen geldt een wereldmarkt. Aluminium en zink worden bijvoorbeeld verhandeld op de London Metals Exchange. De Europese aluminiumindustrie krimpt al langer als gevolg van hoge elektriciteitsprijzen, waaronder het prijsverhogende effect van de CO₂-prijs op de elektriciteitsprijs. Het is te verwachten dat deze krimp doorzet en dat productie van metaal uit erts zich blijft verplaatsen naar regio's met lagere energiekosten. De recycling van metaal en de verwerking tot eindproducten is veel minder energie-intensief en kan goed in Europa blijven.

Zonder actief beleid is het goed mogelijk dat de primaire productie van non-ferrometalen verdwijnt uit Nederland.

VERDUURZAMING - SECUNDAIR ALUMINIUM

Een zekere optie om aluminium duurzaam te recyclen is door het aardgasverbruik te vervangen door eenzelfde hoeveelheid groengas. Een andere optie is om de sector te elektrificeren met inductieovens. Primair aluminium wordt en zal niet in Nederland worden geproduceerd.

Huidig Proces

Aluminium wordt in grote ovens met gas verhit en verwerkt tot nieuw aluminium. Vrijkomende vervuilingen worden met gasen als waterstof uit het gesmolten aluminium verwijderd.

Groengas

Door het aardgas te wisselen met groengas kan er, zonder aanpassingen, een duurzaam proces worden opgezet.

Inductieovens

Er wordt ook gesproken over de verwerking met inductieovens, waardoor het hele proces geëlektrificeerd zou kunnen worden. Dit proces is nog niet uitontwikkeld. Wij nemen aan dat er een grote sprong in efficiëntie zal zijn door inductie, waardoor de elektriciteitsvraag slechts 40% van de aardgasvraag zal zijn bij inductie.

De recycling van aluminium zal flink toenemen (European Aluminium, 2022). Wij nemen in beide scenario's aan dat de productie in Nederland proportioneel toeneemt met de toename van recycling in Europa. Dat is iets meer dan een verdubbeling in 2040 ten opzichte van 2019.

De bepalende stap is de beschikbare technologie of groengas. In 2030 is er een bijmengverplichting groengas die wij meenemen in de verduurzaming. Daarnaast nemen wij aan dat in de volgende 5 jaar er ofwel volledig wordt overgestapt naar groengas, ofwel naar inductieovens.

Scenario 1

In Scenario 1 stapt de sector geleidelijk over op groengas.

Scenario 2

In Scenario 2 stapt de sector eerste gedeeltelijk over op groengas (tot 50% in 2035), maar vanaf 2040 wordt dat vervangen door industrieovens.

VERDUURZAMINGS - ZINK

Zink wordt geproduceerd via elektrolyse, en heeft een grote elektriciteitsvraag. Hiernaast is er een kleine vraag naar aardgas. Hier is de enige noodzakelijke verduurzaming om het aardgas te vervangen door groengas. Omdat er een kleine hoeveelheid koolstof in de zink-concentraten zitten, is het voorlopig niet mogelijk om de emissies totaal te vermijden.

Huidig Proces

Zink wordt verhit met elektrische ovens en aardgas. Hierbij komt naast zink nog andere metalen vrij.

Groengas

Door het aardgas te wisselen met groengas kan er, zonder aanpassingen, een CO₂-armer proces worden opgezet. Dit vermijdt niet alle CO₂-emissies.

Scenario 1

In Scenario 1 blijft de zinksector in Nederland en stapt over op groengas en groene waterstof.

Scenario 2

In Scenario 2 verdwijnt de zinksector uit Nederland.

Factsheet | Staal

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

Nederland heeft één producent van staal: Tata Steel IJmuiden. Tata Steel produceert rollen staalplaat, die onder andere worden gebruikt in de auto-industrie en voor de productie van conservenblikken.

Staal wordt in twee stappen gemaakt: eerst wordt ijzererts met steenkool in een hoogoven gereduceerd tot ruwijzer en gesmolten, vervolgens wordt staal gemaakt uit vloeibaar ruwijzer. Het reduceren houdt in dat de zuurstof uit het ijzererts (Fe_3O_4) wordt verwijderd en aan een andere stof wordt gebonden, zodat er (ruw)ijzer ontstaat. Dit gebeurt nu in het hoogovenproces: steenkool en ijzererts worden bewerkt tot cokes, pellets en sinter zodat ze de hoogoven in kunnen. In de hoogoven wordt koolstof omgezet naar CO_2 en hitte, waardoor het ijzer smelt. Het vloeibare ruwijzer wordt in de oxystaalfabriek verder verwerkt tot staal, door overtollige koolstof te verwijderen, onzuiverheden te verwijderen en andere gewenste elementen toe te voegen.

Staalproductie is energie-intensief vanwege de benodigde energie voor de reductie en het smelten van het ijzererts. Meer dan 90% van het energieverbruik voor de productie van staal is afkomstig uit de productie van ruwijzer (PBL, 2019b).

Voor de verduurzaming van de staalindustrie in Nederland zijn twee plannen uitgewerkt. Dat is het plan van Tata Steel zelf: HeraCless en het plan van omwonenden om sneller gezondheidswinst te realiseren: Gezondheidsultimatum.

WELKE TECHNIEK VOOR CO_2 -REDUCTIE?

Een fossielvrije staalindustrie zal niet langer fossiele koolstof kunnen gebruiken voor de productie van ruwijzer. Een overstap naar reductie met waterstof (Hydrogen Direct Reduced Iron; H_2 -DRI) ligt voor de hand en wordt door alle grote staalfabrikanten actief ontwikkeld. Bij die techniek wordt ijzererts in vaste vorm, maar bij hoge temperatuur met (groene) waterstof omgezet naar ruwijzer. Het ruwijzer wordt gesmolten en verder gezuiverd in een elektrische vlamboogoven (Electric Arc Furnace; EAF). Zo kan staal gemaakt worden met alleen hernieuwbare elektriciteit. Daarbij is de meeste energie nodig voor de productie van waterstof om ijzererts te reduceren. Ruwijzer kan ook geïmporteerd worden en in Nederland gesmolten in de EAF en bewerkt tot staal.

HOE SNEL KAN DIT?

Tata Steel is voornemens om in 2029 de eerste DRI en EAF in bedrijf te hebben (Tata Steel, 2022). In deze eerste fase zou de DRI nog op aardgas werken en niet op waterstof, de CO_2 zou eventueel afgevangen kunnen worden. Daarnaast blijft er nog één hoogoven in bedrijf. De overstap naar waterstof vereist dat er voldoende betaalbare waterstof beschikbaar is. Daarvoor is extra hernieuwbare opwek en extra elektrolyse nodig. Om de laatste hoogoven te sluiten, is het nodig om een tweede DRI te bouwen en ook daarvoor voldoende waterstof te produceren. Dit is technisch mogelijk voor 2035.

INTERNATIONALE POSITIE

Voor de staalindustrie als geheel bedroeg het aandeel van energie in de productiekosten slechts 5% in 2014-2018 (CE Delft, 2021b). Voor de productie van staalplaat op rol (Hot Rolled Coil), is het kostenaandeel hoger: zo'n 17% in 2019 (JRC, 2020) en zelfs 40% aan het begin van 2023 (SteelOrbis, 2023). Daarmee heeft de Europese staalindustrie één van de hoogste energiekosten in de wereld. Ook de kosten voor grondstoffen (ijzererts, legeringselementen) en arbeid zijn hoger dan elders in de wereld (JRC, 2020). Daar staat tegenover dat Europese installaties veel kosten besparen door recycling van materiaal en de productie van energie.

De verschillen in de kostprijs van staal tussen verschillende wereldregio's zal in de toekomst toenemen, omdat er grote verschillen zitten in de kostprijs van de waterstof die nodig is om staal te maken en omdat waterstof niet goed te vervoeren is. Het is dan ook goed mogelijk dat landen die goede bronnen voor ijzererts hebben én goedkope hernieuwbare elektriciteit overstappen van de export van ijzererts naar de export van ruwijzer of staal. Denk bijvoorbeeld aan Zweden, Brazilië of Australië. Het energie-intensieve gedeelte van de productie vindt dan elders plaats, terwijl de verwerking tot stalen eindproducten in Europa plaats zou kunnen blijven vinden. Het is ook goed mogelijk dat bij verplaatsing van het energie-intensieve gedeelte ook de verwerking tot eindproducten verplaatst, omdat deze processen op elkaar aangesloten zijn in de praktijk.

VERDUURZAMING

Scenario 1 - plan Tata Steel (Heracless)

Tata Steel Nederland heeft een afbouwpad voorgesteld waar momenteel maatwerkafspraken voor worden gemaakt. In dit afbouwpad worden 1 voor 1 de hoogovens en bijbehorende installaties gesloopt en vervangen door de nieuwe DRP-EAF-installaties.

In 2030 zal de eerste hoogoven zijn vervangen door een DRP-EAF installatie. Hierbij kan de helft van de productiecapaciteit worden vervangen door productie over aardgas en elektriciteit. Vervolgens zal ook worden gewerkt aan de vervanging van de andere hoogoven door hetzelfde proces. Deze moet rond 2037 gereed zijn.

Beide installaties zullen eerst werken op aardgas voor de DRP en elektriciteit voor de EAF. Er wordt overgestapt op groene waterstof als dit beschikbaar en betaalbaar is. Tata zelf schat hiermee in dat zij in 2045 volledig zijn overgestapt op waterstof.

In de tussenperiode gaan wij ervan uit dat de CO₂ die wordt geproduceerd via de reductie over aardgas zal worden opgeslagen als CCS.

Scenario 2 - elektrificeren en krimp (Gezondheidsultimatum)

Omwonenden van Tata in IJmuiden hebben ook een verduurzamingsplan opgesteld. Hierin wordt ervan uitgegaan dat de productie van ruwijzer (het product van een DRP) te veel gezondheidsschade oplevert. Hierom wordt in deze situatie alleen de laatste stap van het staalproductieproces nog in IJmuiden uitgevoerd. Er zullen HBI's⁹ moeten worden geïmporteerd van een plek waar deze groen en goedkoop kunnen worden geproduceerd.

Hiervoor worden EAFs gerealiseerd op de plek van de staalfabriek, andere processen voor de productie van staal worden gesloopt.

De productiecapaciteit van dit plan daalt van 7 Mton naar 4 Mton staal per jaar.

In dit plan moet in 2025 de KGF2 worden stilgezet om gezondheidsschade te voorkomen, hiervoor moet dan de helft van de geproduceerde kooks worden ingekocht en niet meer ter plaatse vanuit steenkool geproduceerd. Voor deze studie is deze stap buiten beschouwing gelaten.

⁹ HBI's zijn de transporteerbare vorm van het halffabricaat dat uit een DRP komt.

Factsheet | Voedselindustrie

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

In de voedingsindustrie worden agrarische grondstoffen verwerkt tot tussen- en eindproducten. Belangrijke subsectoren zijn de zetmeel-, suiker-, zuivel-, aardappelproducten- en oliën en vettenindustrie. De meest energie-intensieve processen zijn koken, bakken en drogen. Het grootste gedeelte van het energieverbruik is voor proceswarmte, waarvan een groot gedeelte op lage (< 100°C) of middelhoge (< 200°C) temperaturen.

WELKE TECHNIEK VOOR CO₂-REDUCTIE?

Warmtevraag op lage temperatuur kan goed ingevuld worden met warmtepompen, die rest-warmte uit het proces opwaarderen en opnieuw inzetten. Warmte op hogere temperaturen kan goed ingevuld worden met elektrische boilers voor stoom en elektrische ovens om te bakken.

Een warmtepomp is echter een stuk efficiënter dan een elektrische boiler, omdat deze warmte terugwint uit de waterdamp van het droogproces. Deze warmte wordt opgewaardeerd tot de temperatuur die nodig is om te drogen. Als er dus gedroogd kan worden op lagere temperatuur, verbruikt de warmtepomp minder elektriciteit.

HOE SNEL KAN DIT?

Elektrische boilers zijn nu op industriële schaal verkrijgbaar. Elektrische ovens zijn nog niet altijd standaard verkrijgbaar, maar dat zou binnen enkele jaren wel kunnen. De inpassing van warmtepompen in het proces is maatwerk en de technologie om warmte op hogere temperaturen te leveren (> 100°C) is nog in ontwikkeling. Over zo'n vijf jaar zouden warmtepompen ruim verkrijgbaar moeten zijn. Daarna zouden de fabrieken in zo'n vijf jaar omgebouwd kunnen worden. Voor 2035 kan de voedingsindustrie fossielvrij zijn.

INTERNATIONALE POSITIE

Het gemiddelde aandeel van energie in de productiekosten bedroeg 1-5% in de periode 2014-2018 voor de voedselindustrie, afhankelijk van de subsector. Ook voor ogenschijnlijk energie-intensieve producten zoals meel of melkpoeder is het aandeel energie in de productiekosten beperkt, met name omdat de grondstoffen kostbaar zijn.

In de voedselindustrie wordt veel geïmporteerd en geëxporteerd, ook buiten de EU (CE Delft, 2021b). Toch betekent dit niet dat de productie van Nederlandse bedrijven eenvoudig te vervangen is door productie elders. Nederland heeft namelijk erg geschikte landbouwgrond voor sommige grondstoffen (bijvoorbeeld suikerbieten, melk), maar is ongeschikt voor de productie van andere grondstoffen (bijvoorbeeld palmolie, cacao). Nederland kan haar eigen grondstoffen dan ook blijven verwerken en hoogwaardige grondstoffen van elders blijven importeren. De resulterende producten kunnen weer geëxporteerd worden. Het lage aandeel energie in de productiekosten en de goede mogelijkheden voor verduurzaming met efficiënte warmtepompen zorgen ervoor dat de huidige industrie behouden kan blijven.

VERDUURZAMING

De twee belangrijke verduurzamingsopties zijn om te elektrificeren.

Verschillende voedselverwerkende industrie kan ook overstappen naar het zelf opwekken en gebruiken van groengas. Hoewel dat voor de fabrieken los een goede overstap kan zijn, is dat niet de maatschappelijk beste stap. Het groengas kan beter worden ingezet voor hogetemperatuurwarmte in moeilijk te verduurzamen industrieën, in plaats van de relatief eenvoudig te verduurzamen voedingsmiddelenindustrie. Wij nemen dit niet mee in dit scenario.

De huidige voedingsmiddelenindustrie is een mengsel van wkk's en gasboilers. Er zijn ook partijen die al op groengas werken. Wij nemen een mengsel aan van 75% wkk's en 25% gasboilers voor het aardgasverbruik.

In deze hele transitie zal een deel van de aardgasvraag automatisch ingewisseld worden met groengas / biogas. De procesemissies in de voedingsmiddelenindustrie komt van energiegebruik. Procesemissies zijn van biogene oorsprong en tellen niet mee.

Wij zullen in de verduurzamingsplannen twee scenario's meenemen.

Scenario 1: Conventionele elektrificatie

In het eerste scenario zal het aardgasverbruik van gasboilers en wkk's worden vervangen door e-boilers. Wkk's produceren naast warmte ook elektriciteit. Voor een fossielvrije industrie hoeft alleen het huidige gasverbruik te worden vervangen door (additioneel) elektriciteitsverbruik.

Scenario 2: Warmtepompen

In het tweede scenario nemen we aan dat een industriële warmtepomp kan zorgen voor een goede business-case.

Industriële warmtepompen zijn nog niet uitontwikkeld. Deze hebben echter een groot voordeel dat zij nog een stuk efficiënter zijn dan e-boilers. Een warmtepomp heeft een rendement van 350%.

De tijdlijn voor de oplossingen is verschillend. Voor warmtepompen kan de transitie pas starten als deze uitontwikkeld zijn, wij nemen aan dat dat in 2030 is, waarna deze snel in gebruik genomen worden.

Factsheet | Papier

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

De papierindustrie omvat de productie van papier en karton en de verwerking van papier in verpakkingsmateriaal. De Nederlandse papierindustrie gebruikt vrijwel uitsluitend gerecycled papier als grondstof, er worden maar weinig virgin houtvezels gebruikt (PBL, 2019a). De productie van papier en karton heeft meerdere processtappen: reinigen en zeven van het oud papier, water verwijderen door persen en drogen, nabehandelen en afwerking van het papier/karton. Het thermisch droogproces is goed voor meer dan 80% van het energiegebruik. Dit drogen gebeurt bij 150 à 180 graden (NWGD, 2020), door het papier over met stoom verhitte cilinders te leiden. Deze stoom wordt opgewekt met aardgas, in wkk's of stoomketels.

WELKE TECHNIEK VOOR CO₂-REDUCTIE?

Een fossielvrije papierindustrie is mogelijk door het aardgas door drogen te vervangen door elektriciteit. Een elektrische boiler kan eenvoudig stoom opwekken op de temperaturen die nodig zijn.

Een warmtepomp is echter een stuk efficiënter dan een elektrische boiler, omdat deze warmte terugwint uit de waterdamp van het droogproces. Deze warmte wordt opgewaardeerd tot de temperatuur die nodig is om te drogen. Als er dus gedroogd kan worden op lagere temperatuur, verbruikt de warmtepomp minder elektriciteit.

HOE SNEL KAN DIT?

Elektrische boilers zijn nu verkrijgbaar op industriële schaal en komen in aanmerking voor SDE++. Implementatie duurt vijf tot acht jaar, vanwege de benodigde netverzwaring.

Hogetemperatuurwarmtepompen zijn nog onvolledig ontwikkeld om op grote schaal toegepast te worden. Dit duurt waarschijnlijk nog vijf tot tien jaar.

Voor écht volledige verduurzaming van de papierindustrie is het ook nodig dat de elektriciteitssector volledig verduurzaamd is.

INTERNATIONALE POSITIE

Het gemiddelde aandeel energiekosten bedroeg 3% in de periode 2014-2018 voor de papier- en kartonindustrie als geheel (CE Delft, 2021b), waar niet alleen de productie van het ruwe papier en karton zelf onder valt, maar ook bijvoorbeeld de productie van kartonnen verpakkingen. Het gemiddelde aandeel energiekosten voor de productie van papier en karton zelf ligt dan ook hoger, rond de 15% (Energy Monitor, 2021).

Er is de nodige import en export van papier en karton binnen Europa, maar weinig van/naar buiten Europa (CE Delft, 2021b). Er is dus weinig wereldwijde concurrentie. Daarnaast kan de papier- en kartonindustrie nog veel energie besparen door in het droogproces over te stappen op warmtepompen. De economische gevolgen van een overstap naar fossielvrij zullen daarmee naar verwachting beperkt blijven en de industrie kan in Europa blijven.

VERDUURZAMING

Voor deze verduurzamingsopties kijken wij naar de verschillende mogelijkheden voor de papierindustrie. Wij nemen aan dat de energieverhoudingen niet ver uit elkaar liggen en hebben 'corrugated board' als standaard gebruikt.

De belangrijkste energievraag bij de productie van papier is de warmtevraag om het papier te drogen. Dit is relatief laagtemperatuurwarmte. Momenteel wordt hiervoor aardgas gebruikt via een wkk. Andere opties zijn een boiler op biogas, een e-boiler, een waterstofboiler of een warmtepomp. Recent is de eerste E-boiler bij een papierfabriek in gebruik genomen. Een warmtepomp kost minder energie, maar deze zijn nog niet volledig ontwikkeld.

Papierproductie heeft geen procesemissies. Een overstap van energiedragers zal zorgen voor volledige verduurzaming.

Er is al 1 papierfabriek overgestapt op een e-boiler, deze heeft een capaciteit van 260 kton papier per jaar. De totale productie in 2015 was 2.630 kton papier. Wij verwachten geen significante verandering in productievolumes richting 2040.

Wij zullen in de verduurzamingsplannen twee scenario's meenemen.

Scenario 1 - Conventionele elektrificatie

In het eerste scenario zal het aardgasverbruik van wkk's worden vervangen door e-boilers. Wkk's produceren naast warmte ook elektriciteit. Het rendement van dit systeem is 41% op stoom en 33% op elektriciteit. Een e-boiler produceert stoom met een rendement van 90%. Elke PJ aardgas die nu wordt verbruikt binnen de papierindustrie, kan worden vervangen door 0,77 PJ elektriciteit. Hiermee wordt ook de elektriciteit die nu in een WKK wordt geproduceerd, gecompenseerd. Het probleem met elektrificatie ligt met name in de beschikbaarheid van elektriciteit door netcongestie.

Scenario 2 - Warmtepompen

Industriële warmtepompen zijn nog niet uitontwikkeld. Deze hebben echter een groot voordeel dat zij nog een stuk efficiënter zijn dan e-boilers. In dat geval kan elke PJ aardgas worden vervangen door 0,43 PJ elektriciteit.

Ook hier wordt de elektriciteit die wordt geproduceerd in een wkk vervangen door elektriciteit.

Voor beide trajecten nemen wij aan dat deze fabrikanten vanaf 2030 volledig zijn overgestapt. Dat is zeer ambitieus maar lijkt technisch (net) haalbaar, onder de juiste omstandigheden.

Factsheet | Glas

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

De glasindustrie produceert glazen verpakkingen, tafelglas, glaswol en glasvezel.

De productie van glas is erg energie-intensief omdat de grondstoffen tot zo'n 1.200°C verhit moeten worden om ze te smelten. De grondstoffen zijn silicazand, natriumcarbonaat, kalksteen, dolomiet en een deel gerecyclede glasscherven. De grondstoffen worden eerst gemengd en vervolgens gesmolten in een gas-gestookte oven. Het gesmolten glas wordt vervolgens ontdaan van luchtbelletjes en in vorm gebracht, bijvoorbeeld door het machinaal in een vorm te blazen. Ten slotte wordt het glas uitgegloeid om interne spanningen te verwijderen.

Nederland kent vijf fabrieken voor verpakings- en tafelglas, één fabriek voor glaswol en één fabriek voor glasvezel.

WELKE TECHNIEK VOOR CO₂-REDUCTIE?

Een fossielvrije glasindustrie is mogelijk door het glas elektrisch te smelten. Er bestaan al hybride glasovens, waarbij een deel van de energie (maar niet alle) wordt toegevoerd als elektriciteit. Deze ovens zitten nu al in de SDE++. Een volledig elektrische glasoven lijkt mogelijk, maar bestaat nog niet.

Glas kan in theorie 100% gerecycled worden. Glasscherven smelten bovendien bij een lagere temperatuur dan de grondstoffen voor nieuw glas.

HOE SNEL KAN DIT?

De techniek van elektrische glasovens moet verder ontwikkeld worden, totdat dit gereed is voor toepassing op industriële schaal. Dit kost vijf tot acht jaar. Daarna moeten de fabrieken nog omgebouwd worden en het elektriciteitsnet verzwakt worden. Dit kost ook zo'n 5-8 jaar. Een klimaatneutrale en fossielvrije glasindustrie is dus mogelijk voor 2040.

INTERNATIONALE POSITIE

Het aandeel van energie in de totale productiekosten bedroeg gemiddeld 11% over de periode 2014-2018.

Net als de keramische industrie, heeft de glasindustrie een redelijk aandeel energiekosten in de productiekosten, maar produceert producten met een relatief lage waarde per kilogram gewicht. Ook glas wordt dan ook weinig geïmporteerd en geëxporteerd, en de import/export die wel plaatsvindt, is vooral binnen Europa (CE Delft, 2021b). Door een overstap op twee keer efficiëntere elektrische glasovens (EURACTIV, 2021) blijven de kosten van verduurzaming binnen de perken en zal de industrie in Europa kunnen blijven.

VERDUURZAMINGSOPTIES

De eenvoudigste manier van verduurzamen is om de gasvraag te vervangen door groengas. De warmtevraag bij glasproductie is tot 1.550°C.

Bij glasproductie komt altijd 0,045 ton CO₂/ton glas vrij als procesemissies, ongeacht de smelttechniek. De totale productiecapaciteit van glasproducten in Nederland is 1.291 kt/jr. Wij verwachten hier geen significante veranderingen in tot 2040. Wij voorzien ook geen significante veranderingen in het recyclingpercentage.

Elektrificatie

Het is mogelijk om de hogetemperatuurwarmte om glas te smelten met elektrische ovens te bereiden. Dit vergt een investering en laat de energiekosten ongeveer verdubbelen. Hoewel de belofte van elektrische ovens is dat deze efficiënter kunnen worden, lijkt het voorlopig ook nog een hogere energievraag te hebben dan de huidige smeltovens. De elektrische ovens zouden tot 35% efficiënter kunnen worden dan gasovens.

Groengas

De energievraag voor het smelten van glas kan vervangen worden door groengas.

Waterstof

Het is mogelijk om de benodigde hogetemperatuurwarmte voor het smelten van glas uit waterstof te halen. Hierbij wordt aardgas 1-op-1 vervangen.

CCS

CCS is technisch mogelijk bij de productie van glas. Wij nemen dit niet mee in de scenario's.

SCENARIO'S

Scenario 1 - Groengas

In Scenario 1 wordt het aardgas vervangen door groengas. Dit zal voorlopig meelopen met het Nederlandse opbouwpad van groengas bijmenging, 24% in 2030. Hierna zal het oplopen tot 100% in 2035 en verder.

Scenario 2 - Elektrisch

In Scenario 2 zal het opbouwpad met groengas worden gevolgd tot 24% in 2030. Hierna verwachten wij dat er elektrische ovens (e-furnace) beschikbaar komen. Deze zullen direct worden omgebouwd in de 5 jaar tussen 2030 en 2035. Dit is klimaattechnisch het beste scenario, maar zorgt ook voor duurder glas. De energiekosten verdubbelen en er moet een nieuwe, relatief dure, techniek worden geïnstalleerd. Hoewel er verwachtingen zijn dat elektrisch smelten efficiënter kan zijn, is hiervan nog te weinig bekend om dat hier mee te nemen.

Factsheet | Keramiek

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

De keramische industrie produceert bakstenen, dakpannen, vloer- en wandtegels en vuurvaste bekleding voor ovens en fornuizen.

Keramiek wordt geproduceerd door klei te drogen bij lage temperatuur en langere tijd te bakken bij hoge temperatuur ($> 1.000^{\circ}\text{C}$). Het bakken gebeurt nu in aardgasgestookte ovens. De klei wordt vaak gedroogd met restwarmte uit het bakproces (PBL, 2020). Het energieverbruik voor het bakken is ongeveer twee derde van het totale energieverbruik.

Nederland heeft 37 grote keramiekfabrieken, met name langs de grote rivieren. In totaal stoten deze fabrieken zo'n 0,5 Mton CO_2 per jaar uit (PBL, 2020). Het productievolume is ongeveer 2,9 Mton steen per jaar.

WELKE TECHNIEK VOOR CO_2 -REDUCTIE?

Een klimaatneutrale keramiekindustrie gebruikt geen fossiele brandstoffen meer. De hoge temperatuur die nodig is voor het bakproces kan zowel geleverd worden door groene waterstof als elektriciteit. Beide hebben dus hun voor- en nadelen: waterstof is iets minder efficiënt en de brandstof is duurder, maar de ombouwkosten zijn wel weer veel lager. Vanwege het relatief geringe gasgebruik van de keramische sector (circa 200 mln. m^3/j) en de hoge ombouwkosten is groengas wellicht ook een optie, indien voldoende beschikbaar.

HOE SNEL KAN DIT?

De techniek om keramiek te bakken op waterstof is nog niet beschikbaar, maar dit zou binnen vijf jaar wel zo kunnen zijn. Daarna moeten de fabrieken omgebouwd worden, wat binnen enkele jaren kan. De aanleg van een waterstofleiding naar de fabrieken duurt het langst en kan pas starten nadat de landelijke backbone in gereed is. Tussen 2030 en 2035 kan de keramische industrie zijn overgestapt op waterstof.

INTERNATIONALE POSITIE

Het aandeel van energie in de totale productiekosten bedroeg in 7% voor de gehele keramische bouwproductenindustrie in 2014-2018. Voor de productie van keramiek ligt het aandeel hoger, rond de 20% (Reuters, 2021).

De keramische industrie heeft een redelijk aandeel energiekosten in de productiekosten, maar produceert producten met een relatief lage waarde per kilogram gewicht. Er wordt dan ook weinig keramiek geïmporteerd en geëxporteerd, en de import/export die wel plaatsvindt, is vooral binnen Europa (CE Delft, 2021b). We verwachten dan ook dat de industrie de hogere kosten door verduurzaming kan doorbelasten aan haar eindklanten en in Europa kan blijven. De hogere kosten zullen wel meer concurrentie met zich meebrengen vanuit regio's net buiten de EU, zoals Turkije. Daarnaast zullen de hogere prijzen besparing en de toepassing van alternatieve materialen bevorderen.

VERDUURZAMINGSOPTIES

De huidige manier van het maken van keramiek is een oven waarin de stenen gebakken worden. Door de hoge temperaturen draait deze oven op aardgas.

Groengas

Het aardgas kan vervangen worden door groengas. Door de bijmengverplichting groengas zal een deel van het gasverbruik worden vervangen door groengas.

Waterstof

Het aardgas kan vervangen worden door waterstof. Dit is nog niet commercieel beschikbaar, maar in principe mogelijk. Wij nemen aan dat de warmtevraag bij waterstof gelijk is.

Elektrisch

Het is moeilijk om een oven heet genoeg te krijgen met elektriciteit. Deze oven moet nog ontwikkeld worden. Het rendement van een gasgestookte oven is 90%. Het rendement van een elektrische oven is 100%.

CCS

Het is ook mogelijk om de ontstane CO₂ af te vangen en op te slaan. Hier zijn geen plannen voor op dit moment, wij nemen hier geen scenario van mee.

SCENARIO'S

Wij nemen geen productiegroei of -krimp mee voor de keramieksector, productie blijft op 2,9 Mton per jaar. Bij de productie van bakstenen vindt altijd restemissie plaats van 0,085 ton CO₂/ton baksteen.

Scenario 1 - Groengas

In Scenario 1 wordt de aardgasvraag deels vervangen door groengas, 24% in 2030. Vanaf 2035 zal de sector volledig over moeten op groengas.

Scenario 2 - Waterstof

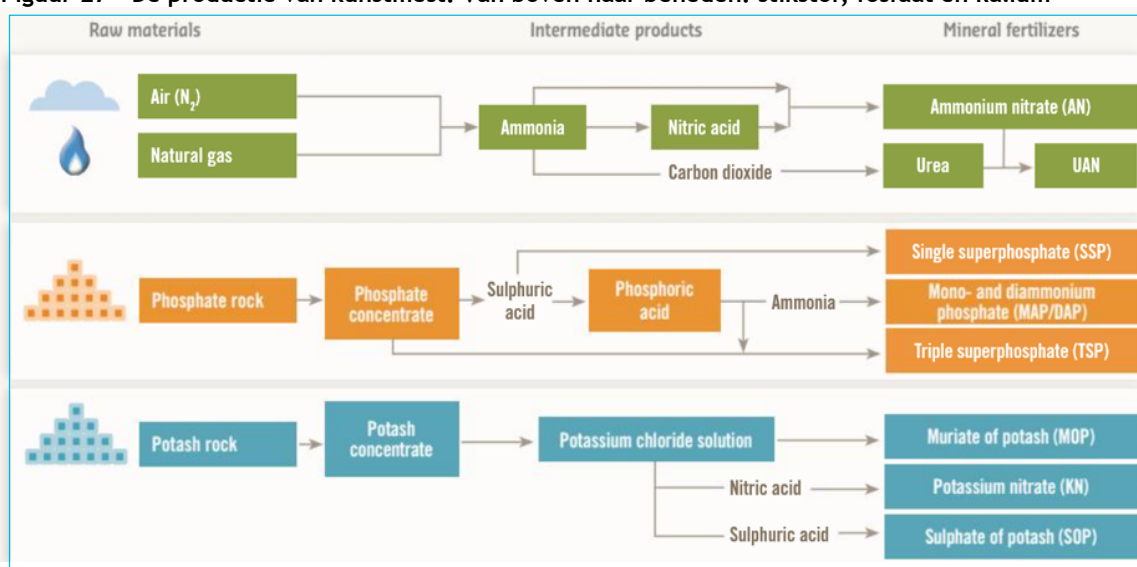
De sector zelf verwacht over te stappen op waterstof. Hiervan is bekend dat dit duur is en nog maar weinig commercieel beschikbaar. Om in 2040 klimaatneutraal (en fossielvrij) te zijn verwachten wij dat deze sector in 2035 over kan stappen naar waterstof, en dit dan direct doet.

Factsheet | Kunstmest

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

Kunstmest bestaat uit een mengsel van stikstof (N), fosfor (P) en kalium (K), in een vorm die goed opgenomen kan worden door planten. De kunstmestindustrie produceert de stikstofcomponent zelf in de vorm van ammoniak. Deze ammoniak wordt verder bewerkt tot andere vormen van stikstof die beter opgenomen kunnen worden door planten. De andere componenten worden aan deze stikstof toegevoegd om te komen tot kunstmest.

Figuur 27 - De productie van kunstmest. Van boven naar beneden: stikstof, fosfaat en kalium



Bron: (Fertilizers Europe, 2019).

De meest energie-intensieve stap in de productie van kunstmest is de productie van ammoniak, dat nu gebeurt door aardgas en stoom bij hoge temperatuur om te zetten naar waterstof (zie Figuur 27). Deze waterstof reageert vervolgens onder hoge druk met stikstof uit de lucht tot ammoniak in het Haber-Bosch-proces. De ammoniak wordt samen met andere grondstoffen verwerkt tot kunstmest. Meer dan 90% van het energiegebruik voor de productie van kunstmest is toe te wijzen aan de productie van ammoniak (PBL & TNO, 2019).

Nederland heeft twee kunstmestfabrieken met eigen ammoniakproductie: Yara Sluiskil en OCI Geleen. ICL Fertilisers en Rosier Nederland produceren wel kunstmest, maar geen ammoniak. Yara en OCI stootten in 2018 gezamenlijk 5,3 Mton CO_2 -eq. uit, waarvan een deel als lachgas (N_2O) (PBL & TNO, 2019).

OCI heeft 1.184 kton/jr aan productiecapaciteit. De OCI-productie van ammoniak rekenen wij volledig toe aan kunststoffen. Yara heeft 1.819 kton/jr productiecapaciteit. Als vereenvoudiging van dit systeem nemen wij aan dat alleen Yara kunstmest produceert.

WELKE TECHNIEK VOOR CO₂-REDUCTIE?

Ammoniak is het belangrijkste tussenproduct en zal niet meer uit fossiele brandstoffen gemaakt worden, maar uit groene waterstof en stikstof uit de lucht. Groene waterstof wordt gemaakt door elektrolyse van water met hernieuwbare elektriciteit. De productie van waterstof fluctueert met de productie van elektriciteit uit zon en wind.

Waterstof wordt dan ook opgeslagen en ingevoerd in het continu draaiende Haber-Boschproces.

Ammoniak is eenvoudiger te transporteren dan waterstof en kan ook goed geïmporteerd worden.

Er zijn ook elektrolysemethoden in ontwikkeling die in één keer ammoniak maken uit een mengsel van water en lucht, maar die staan nog in de beginfase.

Voor dit nieuwe productieproces zijn nieuwe elektrolyzers nodig. Voor de productie van zuivere stikstof is een nieuwe luchtscheider nodig, wat echter een bekend proces is. Het proces voor de productie van ammoniak moet ook beperkt worden aangepast.

HOE SNEL KAN DIT?

Productie van ammoniak in Nederland - Er is veel waterstof nodig voor de productie van ammoniak. Dit vraagt om extra hernieuwbare elektriciteit bovenop de bestaande plannen voor 2030. Tussen 2030 en 2035 kan dit gebouwd worden. Parallel kunnen elektrolyzers gebouwd worden en kan het ammoniakproces worden aangepast, zodat de sector rond 2035 fossielvrij kan zijn.

Import van ammoniak - De aanleg van import-terminals voor ammoniak duurt circa vijf jaar. In de tussentijd kan de productie van groene waterstof en ammoniak in het buitenland opgeschaald worden en kunnen transportschepen worden besteld. Voor transport van ammoniak naar OCI in Geleen is een nieuwe pijpleiding nodig. Deze kan aangelegd worden in de Delta Corridor, een project voor de aanleg van meerdere pijpleidingen, dat in 2026 in gebruik zou moeten komen. De sector kan met import vóór 2030 fossielvrij zijn, al is het de vraag of import voor 2030 al echt goedkoper is dan lokale fossiele productie.

INTERNATIONALE POSITIE

De kosten van kunstmest bestaan een groot deel uit de kosten voor aardgas. Europese branchevereniging Fertilizers Europe schat dat 60-80% van de kosten van stikstofkunstmest bestaan uit de kosten voor aardgas. Ze stellen dan ook *'the EU nitrogen fertilizer industry's competitiveness is predominantly driven by affordable and fair gas prices'* (Fertilizers Europe, s.d.).

De Nederlandse kunstmestsector zal op termijn stevige concurrentie krijgen van goedkope import van groene ammoniak, die elders ter wereld gemaakt wordt uit groene waterstof. Groene waterstof is relatief duur om te produceren in Noordwest-Europa en lastig te transporteren over lange afstanden, terwijl ammoniak wel uitstekend te transporteren is.

Zonder industriebeleid is het dan ook waarschijnlijk dat de productie van ammoniak op termijn uit Nederland zal verdwijnen en wordt vervangen door import. De verdere verwerking tot kunstmest is weinig energie-intensief en zal wel kunnen blijven bestaan.

VERDUURZAMINGSPROCESSEN

Er zijn verschillende processen voor de verduurzaming van de ammoniakproductie die hier worden besproken. Ammoniakfabrieken zijn vrij goed geïntegreerd, waarbij de geproduceerde ammoniak voor een deel weer wordt omgezet in nitraat en de ammoniak met een pure stroom CO₂ wordt omgezet naar ureum.

De basisproductie van ammoniak gebeurt over aardgas, mogelijke andere opties zijn de directe elektrificatie, productie met geïmporteerde waterstof, productie met biogas en met CCS.

In feite geldt dat Yara voornamelijk een kunstmestproducent is, terwijl OCI voor 90% haar ammoniak levert aan de chemische industrie. Het proces voor productie is vergelijkbaar, voor de toekomstplannen is dit mogelijk wel relevant.

Biogas

Met biogas in plaats van aardgas kan het belangrijkste ingrediënt, aardgas, worden vervangen door een grondstof op basis van biokoolstof. Hierom is de netto-uitstoot 0.

OCI is van plan om aardgas als grondstof voor SMR te vervangen door biogas.

Daarnaast onderzoekt OCI de mogelijkheid om groene ammoniak (en methanol) te importeren van buiten de EU.

Waterstof

Het aardgas wordt via SMR in de eerste stap van de reactie omgezet in CO₂ en waterstof. Deze stap kan worden overgeslagen door direct (groene) waterstof in te kopen. Er is een verlies van synergie omdat hier het gebruik van de pure CO₂ uit deze conversie niet kan worden gebruikt voor de productie van ureum. Dat is hier buiten beschouwing gelaten.

In Europa zal in 2030 een bijmengverplichting hebben van 42% groene waterstof. Deze loopt in 2035 op tot 60%.

Elektrificatie

Het is ook mogelijk om door elektrolyse ammoniak te maken. Dit is een totaal nieuw proces, waardoor er significante meerkosten aan zitten door de bouw van een nieuwe fabriek. Het grootste probleem van dit proces is dat er vergelijkbare hoeveelheden elektriciteit moeten worden gebruikt als aardgas, maar dat elektriciteit significant duurder (Factor 2-3) is per energie-eenheid, zowel nu als in de toekomst.

CCS

Voor het afvangen van de CO₂ zijn er verschillende opties. Hierbij kan de pure stroom CO₂ worden afgevangen, dit is relatief goedkoop en eenvoudig. Daarnaast is het nog mogelijk om ook de CO₂ uit het rookgas te vangen. Dit is duurder. De CO₂ kan ofwel als vloeistof, ofwel als gas worden getransporteerd.

SCENARIO'S

Scenario 1 - Import van ammoniak

Wij nemen hier aan dat de helft van de kunstmestproductie in NL in 2030 is verdwenen. Vervolgens is ook de andere helft verdwenen in 2035. Dan blijft nog OCI over, wij gaan ervan uit dat deze zullen investeren in CCS.

In de korte periode dat er nog wel kunstmestproductie is in Nederland in 2030, zullen zij groengas moeten bijmengen.

Scenario 2 - Waterstof

In dit scenario gaan wij ervan uit dat de kunstmestproductie flink afneemt. Het productievolume bij Yara neemt lineair af, tot 40% van de huidige capaciteit van Yara in 2040. Bij OCI zal de hele productie in stand blijven. Beide productieprocessen worden omgebouwd om volledig op lokaal geproduceerde waterstof te draaien.

Voor beide scenario's geldt dat dit zowel gelezen kan worden als een vermindering van het gebruik van kunstmest, als dat de nodige ammoniak geïmporteerd moet worden. Voor de scenario's geeft dit geen verschil, alleen voor de interpretatie.

Factsheet | Industriële gassen

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

De industriële gassenindustrie produceert luchtgasen (zuurstof, stikstof en argon), waterstof en koolmonoxide. Zuurstof en stikstof worden in veel industrieën gebruikt. Argon heeft meer specialistische toepassingen, bijvoorbeeld als schildgas bij lassen. Waterstof wordt met name in de raffinage gebruikt om brandstoffen te ontzwavelen. De meeste waterstof daarvan wordt geproduceerd door de raffinaderijen zelf, maar zij kopen ook extra waterstof in van aparte waterstoffabrieken. In de chemie wordt waterstof gebruikt en ook koolmonoxide, met name voor de productie van kunststoffen.

De productie van luchtgasen is niet erg energie-intensief en gebeurt door lucht te comprimeren en vervolgens cryogeen te scheiden. De productie van waterstof en koolmonoxide is daarentegen wel erg energie-intensief en gebeurt door aardgas en stoom op hoge temperatuur om te zetten. In het vervolg van deze infosheet bespreken we dan ook de productie van waterstof.

Luchtgasen worden op meerdere plekken in Nederland op grote schaal geproduceerd en in tal van kleinere installaties op het terrein van de bedrijven die het gebruiken. Nederland kent twee producenten van waterstof: Air Liquide (Rotterdam, Bergen op Zoom) en Air Products (Rotterdam). De productie van waterstof bij de raffinaderijen zelf valt onder de raffinagesector. De CO₂-uitstoot van de industriële gassensector bedroeg in 2019 zo'n 1,9 Mton.

De vraag naar waterstof zal toenemen als gevolg van verschillende scenario's. Wij nemen hier ten eerste de ontwikkeling mee voor de waterstofvraag in verschillende industrieën. Het gaat dan om de staalindustrie en raffinaderijen. Waterstof kan ook worden ingezet als hogetemperatuurbrandstof in andere industrieën. De waterstofvraag uit de kunstmestindustrie laten wij buiten beschouwing, omdat dit zou leiden tot dubbeltellingen.

De tweede ontwikkeling is dat deze waterstof verplicht vergroend moet worden. In 2030 moet er nationaal 42% groene waterstof bijgemengd zijn en in 2035 60%. Dit wordt een industriële verplichting van 24% in 2030 en 60% in 2035.

WELKE TECHNIEK VOOR CO₂-REDUCTIE?

Waterstof kan fossielvrij geproduceerd worden uit hernieuwbare elektriciteit door elektrolyse van water.

Bij de productie van koolmonoxide kan aardgas vervangen worden door biogas. Reforming of elektrolyse van CO₂ en stoom is ook mogelijk (Fu et al., 2010).

HOE SNEL KAN DIT?

De productie van groene waterstof vraagt om grote hoeveelheden hernieuwbare elektriciteit. In de huidige plannen voor de elektriciteitssector is al 4 GW aan elektrolysecapaciteit opgenomen voor 2030, maar dit zal onvoldoende zijn om de hele sector te verduurzamen. De productie van waterstof kan voor 2035 volledig hernieuwbaar zijn, als de capaciteit voor de productie van hernieuwbare elektriciteit en elektrolyse tussen 2030 en 2035 stevig doorgroeit.

INTERNATIONALE POSITIE

Voor de productie van waterstof geldt net als voor de productie van kunstmest dat meer dan de helft van de kosten bestaan uit de kosten voor aardgas (CE Delft, 2021b).

De vraag naar pure waterstof zal echter niet snel vervangen worden door import. Hoewel waterstof goedkoper elders gemaakt kan worden, is import van waterstof om de vraag naar pure waterstof te vervullen duur. Transport van vloeibare waterstof kost veel energie en bij transport van waterstof gebonden aan een drager, moet de waterstof op de importlocatie weer losgemaakt worden van de drager, wat ook veel energie kost. Ook de hele logistiek voor deze route moet nog worden opgebouwd.

Omdat de waterstofeconomie nog in de beginfase is en moeizaam van de grond lijkt te komen, nemen we twee extreme scenario's mee: volledige import of volledig lokale productie.

VERDUURZAMINGSOPTIES

Wij gaan in deze scenario's uit van een vraag die gestuurd wordt door de andere industriële scenario's. Wij nemen niets mee in de opbouw van waterstof voor transport of verwarming. Transport wordt indirect meegenomen in de scenario's voor synfuels voor luchtvaart en zeetransport.

Voor industriële gassen volgen wij twee scenario's:

Scenario 1: Import

In Scenario 1 volgen wij de eisen voor groene waterstof, maar gaan wij uit van een volledige import van groene waterstof. De energie die nodig is, is de energie om ammoniak (of een andere waterstofdrager) te kraken in stikstof en waterstof. Hiervoor nemen we een aanname van de elektriciteit die dit kost. Als de waterstofvraag toeneemt boven de huidige productievolumes, wordt ook dit deel geïmporteerd.

Scenario 2: Nationale productie

In Scenario 2 volgen wij de eisen voor groene waterstof: 24% in 2030¹⁰, dit zal stijgen tot 100% in 2035.

¹⁰ De nationale eis van 42% wordt overgeslagen op een verplichting voor de industrie van 24%.

Factsheet | Raffinage

BESCHRIJVING - PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

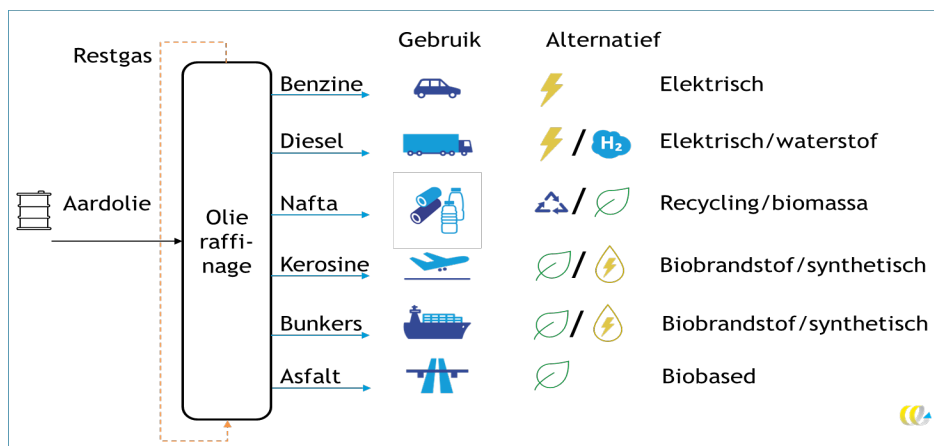
Raffinaderijen zetten aardolie om in fossiele brandstoffen en grondstoffen. Raffinage is energie-intensief, omdat er hoge temperaturen nodig zijn om de olie te scheiden (destilleren) en te bewerken. Brandstoffen worden gebruikt in wegvervoer, luchtvaart en scheepvaart. De grondstoffen zijn met name bestemd voor de organische basischemie (plastics en bulkchemicaliën).

Nederland telde de afgelopen jaren zes raffinaderijen: Shell Pernis, BP Rotterdam, ExxonMobil Rotterdam, Gunvor Rotterdam (in november '24 stilgelegd), Vitol Rotterdam en Zeeland Refinery Vlissingen. Zij gebruiken ongeveer 330 PJ/j aan energie, in de vorm van aardolie, aardgas en elektriciteit. De emissies van de raffinage zijn 11 Mton CO₂/j.

VERVANGING PRODUCTEN RICHTING FOSSIELVRIJ

Een raffinaderij produceert verschillende producten uit aardolie. Deze aardolie moet worden vervangen omdat de producten anders niet CO₂-neutraal zijn. Het vervangen van de aardolie als grondstof in het proces door een andere grondstof is niet mogelijk, omdat de raffinaderij specifiek is opgezet om aardolie te verwerken. We kijken hier daarom naar de vervanging van de producten zelf en welke installaties daarvoor nodig zijn. Figuur 28 geeft een overzicht van de alternatieven voor de producten uit een raffinaderij.

Figuur 28 - Overzicht alternatieve producten raffinaderij



- **Benzine en diesel** worden hoofdzakelijk gebruikt voor personenauto's respectievelijk bestelbussen, vrachtwagens en bussen. Elektrisch rijden zorgt voor een sterke afname in het gebruik van energie, omdat elektrisch rijden drie tot vier keer zo efficiënt is als de verbranding van benzine of diesel.
- **Nafta** wordt gebruikt als grondstof voor de productie van plastics, rubber en nylon. Plastic recycling kan hierin een grote rol spelen. De overgebleven vraag naar primaire grondstoffen voor deze producten kan ingevuld worden met biomassa of synthetische feedstocks.
- **Kerosine** wordt gebruikt voor de luchtvaart. Voor korte afstanden kan vliegen elektrisch of op waterstof, maar voor lange afstanden zal een vloeibare brandstof voorlopig nodig blijven. Deze brandstof kan

synthetisch gemaakt worden uit waterstof en CO₂. Dat zal gebeuren op plekken waar goedkope elektriciteit is voor de productie van waterstof. Een ander alternatief voor kerosine is biobrandstoffen.

- **Bunkers** zijn brandstoffen voor binnenvaart- en zeeschepen. Deze kunnen vervangen worden door synthetische brandstoffen of door biobrandstoffen. Het is nog onduidelijk welke dat worden: methanol, ammonia, waterstof, biodiesel, etc. Net als synthetische kerosine kunnen synthetische bunkers worden gemaakt van waterstof en koolstof. Waterstof heeft een te lage volumetrische energiedichtheid om goedkoop te kunnen vervoeren. We verwachten dat de meeste synbunkers buiten Nederland geproduceerd zullen worden en vervolgens geïmporteerd.
- **Asfalt en andere olieproducten** kunnen grotendeels gerecycled worden. De resterende vraag naar asfalt kan uit biomassa (lignine) gemaakt worden.

Resumerend is er in de toekomst geen vraag meer naar de fossiele producten die raffinaderijen nu produceren, terwijl de nieuwe producten om een fundamenteel ander proces vragen. De huidige installaties voor de verwerking van aardolie worden dan ook op den duur overbodig en moeten afgebroken worden.

WELKE TECHNIEK VOOR CO₂-REDUCTIE?

De vraag naar benzine zal afnemen door de elektrificatie van personenvervoer. Voor ander binnenlands vervoer is er voorlopig nog weinig ontwikkeling in elektrificatie. Dat betekent dat deze nog geproduceerd moeten worden.

CO₂-reductie voor ETS 1 kan enerzijds door de Scope 1-emissies af te vangen. Een andere mogelijkheid is dat de productie naar het buitenland verplaatst.

HOE SNEL KAN DIT?

Het gebruik van CCS voor de afvang wordt momenteel ontwikkeld in Porthos en Aramis. Porthos wordt verwacht in 2026, Aramis verwachtte de eerste operatie in 2028 te kunnen starten, maar dit planning is recent uitgesteld.

Geheel nieuwe brandstoffen zoals synfuels of ammoniak voor ter vervanging van bunkerbrandstof hebben nog een lage TRL.

INTERNATIONALE POSITIE

De markt voor raffinage is zeer internationaal. De kans dat een groot deel hiervan zal verdwijnen is zeker niet uit te sluiten. Dit is moeilijk te voorspellen en laten wij in deze studie buiten beschouwing. Nederland is een grotere producent dan gebruiker van fossiele brandstoffen. De totale huidige productie van raffinaderijen, inclusief naftaproductie voor organische chemie, is weergegeven in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** Tabel 7. Voor de afname van de olieproductie hebben wij aangenomen dat de productie proportioneel aan de huidige productie afneemt.

Tabel 7 - Productie van raffinaderijen in 2023 in PJ (CBS)

Olieproducten	2023
Restgassen uit olie	8
Lpg	54
Nafta	472
Totaal benzine, fossiele deel	191
Kerosine	360
Totaal gas- en dieselolie, fossiel deel	808
Zware stookolie	257
Overige aardolieproducten	123
Totaal	2.272

VERDUURZAMING

In het rapport klimaatneutrale mobiliteit in 2050 (PBL, 2024c) worden twee toekomstvisies geschetst van klimaatneutrale mobiliteit in 2050. Hierin schetsen zij een ‘behoudend’ en een ‘innovatief’ pad voor de energievraag uit mobiliteit. Uit deze twee paden, hebben wij de relevante energiedragers overgenomen: fossiel, biobrandstof, synfuels en waterstof. Wij nemen deze afbouwpaden over.

De afbouwpaden van PBL zijn uitgesplitst in vier mobiliteiten, weg, lucht, binnenvaart en luchtvaart. Wij hebben deze getallen geschaald om te zorgen dat de productie van fossiele, biofuels, synfuels en waterstof proportioneel verandert. Wij hebben dit gedaan afhankelijk van de belangrijkste brandstoffen. Dus de kerosineproductie is geschaald naar de luchtvaart. Voor diesel is een deel, 41 PJ voor binnenvaart en 138 PJ voor wegverkeer. De resterende stroom (820 PJ) is proportioneel aan de andere stromen op- en afgebouwd. De naftaproductie wordt bepaald in de afbouwpaden voor organische chemie. Deze wordt geheel gemaakt uit fossiele grondstoffen. Dit zorgt ervoor dat we in Nederland proportioneel met het gebruik benzine maken. Maar meer kerosine en diesel dan voor eigen gebruik. Nederland produceert minder stookolie dan voor eigen gebruik.

Dat levert de aannames op voor de productievolumes in de scenario's zoals opgenomen in Tabel 5 in Bijlage A.

Omdat de vraag naar fossiel in beide scenario's uiteindelijk zal afnemen naar 0 in 2050, nemen wij aan dat beide scenario's inzetten op CCS. Wij geven een doorkijk in de vraag naar energiedragers voor de Nederlandse productie van de biofuels, synfuels en waterstof. De afbouwpaden voor de huidige raffinage staan ook in Bijlage A.

Scenario 1: Behoudend

In dit scenario nemen wij de brandstofvraag uit het scenario ‘behoudend’ over van het PBL. Hierin schalen wij dit naar de huidige brandstofproductie in Nederland.

Scenario 2: Innovatief

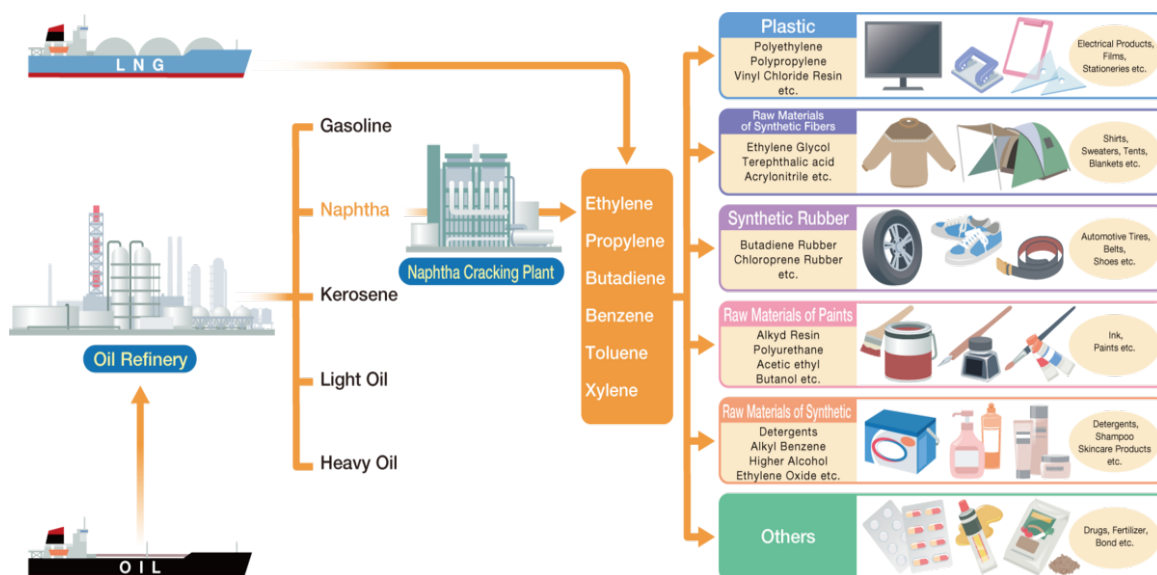
In dit scenario nemen wij de brandstofvraag uit het scenario ‘innovatief’ over van het PBL. Hierin schalen wij dit naar de huidige brandstofproductie in Nederland.

Factsheet | Organische basischemie

BESCHRIJVING - PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

De organische basischemie verwerkt aardoliestromen tot de grondstoffen waarmee plastics en rubbers worden gemaakt, zie Figuur 29. De grondstoffen zijn nafta en LPG, die worden aangevoerd vanuit een raffinaderij of geïmporteerd. Het meest energie-intensieve proces is het kraken, waarbij nafta en LPG in een groot fornuis samen met stoom tot 800 à 1.000°C verhit wordt. De moleculen 'breken in stukken' in een reeks kleinere moleculen, die na de reactor van elkaar gescheiden worden. Etheen en propaan zijn de belangrijkste producten en worden in de kunststofindustrie verder verwerkt tot *polyetheen* (PE) en *polypropaan* (PP), twee zeer breed toegepaste plastics. Verder worden er nog butadieen, en aromaten (benzeen, toluen, xylene) geproduceerd. Een deel van deze stromen wordt in de organische basischemie verder verwerkt tot veelgebruikte tussenproducten zoals glycol, acrylonitril en styreen.

Figuur 29 - De organische basischemie zet nafta om in een reeks tussenproducten, die door andere industrieën in tal van toepassingen verwerkt worden



Bron: (Horiba, s.d.).

Nederland heeft drie locaties waar nafta gekraakt wordt: Dow Terneuzen, Sabic Geleen en Shell Moerdijk. Verder worden er nog organische basischemicaliën gemaakt door LyondellBasell Rotterdam en Shell Pernis. Op deze locaties wordt in totaal 8,9 Mton CO₂ per jaar uitgestoten door de organische basischemie.

VERVANGING PRODUCTEN

Kunststoffen zullen ook in een fossielvrije toekomst gebruikt blijven worden, omdat ze vaak het beste materiaal voor de toepassing zijn. Voor de organische basisindustrie zal er dan ook geen grote verschuiving komen naar het maken van andere producten, maar meer een verschuiving om de huidige producten fossielvrij te maken.

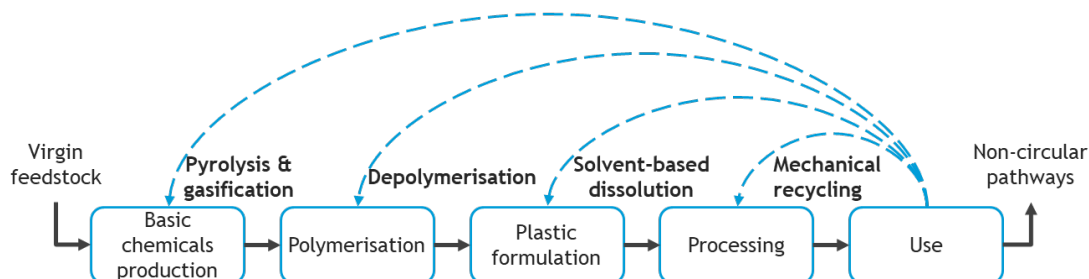
Het gebruik van biomassa kan wel in beperkte mate leiden tot andere producten. De huidige producten en processen zijn afgestemd op de samenstelling van aardolie. Biomassa heeft echter een hele andere samenstelling, waar andere moleculen en structuren in voorkomen. Bij de overstap naar kunststoffen op basis van biomassa, zullen er nieuwe kunststoffen uitgevonden worden die veel efficiënter uit biomassa gemaakt kunnen worden dan de huidige plastics, maar die verder dezelfde of betere eigenschappen hebben. Voorbeelden hiervan zijn de productie van PLA uit suikers of de productie van nieuwe bio-aromaten uit suikers. Deze nieuwe producten zullen een deel van de huidige producten vervangen. Het is nog onduidelijk in hoeverre we de huidige (van fossiel afstammende) producten zullen behouden of toch zullen vervangen door nieuwe varianten uit biomassa.

VERVANGENDE PROCESSEN

Er zijn vier belangrijke vervangende processen nodig voor een CO₂-reductie in de organische basisindustrie: 1) verbeterde recycling, productie van grondstoffen, 2) producten uit biomassa, 3) elektrificatie, 4) CCU en CCS.

Betere recycling - Een deel van de plastic verpakkingen wordt nu (mechanisch) gerecycled, maar een deel van de verpakkingen en bijna alle overige plasticstromen worden nog verbrand. Er zijn meer technieken nodig voor recycling dan alleen mechanische recycling. Mechanische recycling is het meest efficiënt, maar is ook gevoelig voor vervuiling. De andere vormen van recycling, weergegeven in Figuur 30, zijn steeds robuuster tegen vervuiling en kunnen meer verschillende soorten plastic verwerken, maar er gaat ook steeds meer materiaal verloren en/of er is steeds meer energie nodig. Kunststof moet dus met een zo efficiënt mogelijke techniek gerecycled worden, maar met behoud van kwaliteit van het gerecyclede in ogenschouw. Met alle technieken samen kan vrijwel alle kunststof gerecycled worden en hoeft er niks meer te worden verbrand.

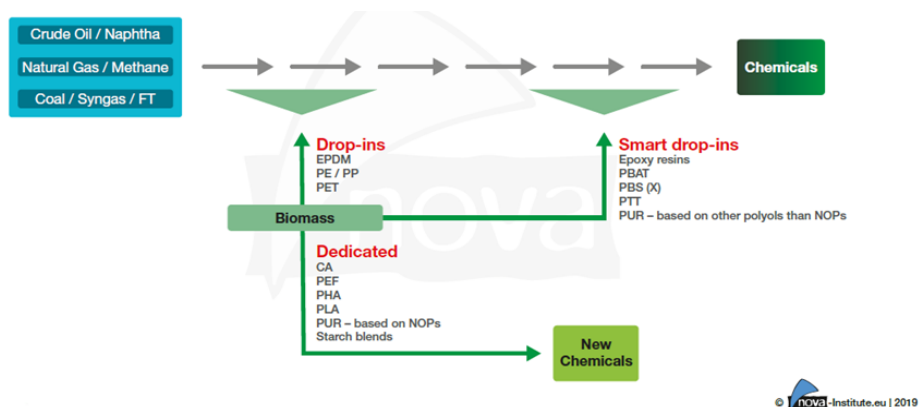
Figuur 30 - De verschillende vormen van recycling, variërend van energie-intensief en robuust aan de linkerkant, tot efficiënt maar nauw toepasbaar aan de rechterkant



Bron: (Crippa et al., 2019).

Biobased kunststoffen - Bij recycling gaat altijd materiaal verloren. Daarnaast zit veel materiaal opgeslagen in producten die pas aan het eind van hun levensduur gerecycled kunnen worden. Er is dus ook in een sterk circulaire keten nog (veel) nieuw materiaal nodig. Dit materiaal moet van hernieuwbare oorsprong zijn in een fossielvrije samenleving. We richten ons hier op biomassa, omdat biomassa veel goedkoper is dan synthetische grondstoffen. Er zijn verschillende manieren om biomassa in de kunststofketen te brengen, zie Figuur 31. Allereerst is het mogelijk om de bulkproducten aan het begin van de keten één-op-één te vervangen door hetzelfde molecuul als biomassa ('drop-in'). Dit is bijvoorbeeld de productie van biobased polyethyleen ter vervanging van fossiel polyethyleen. Daarnaast is het mogelijk om meer gespecialiseerde moleculen één-op-één te vervangen, bijvoorbeeld polyurethaan ('smart drop-in'). Ten slotte is het mogelijk om volledig nieuwe polymeren te ontwikkelen uit biomassa, die andere fossiele producten vervangen. Alle drie de strategieën zullen waarschijnlijk worden toegepast.

Figuur 31 - Verschillende manieren om biobased materiaal in de kunststofketen te brengen



Bron: (nova-Institute, 2019).

Elektrificatie - Naast de grondstoffen, moet ook de energie fossielvrij worden. Dit kan door het huidige kraakproces te vervangen door elektrische krakers, die nu nog in de ontwikkelingsfase zijn. De stoom die nodig is voor het kraken, kan geproduceerd worden met elektrische boilers.

CCU of CCS - Ten slotte kunnen de CO₂-emissies af worden gevangen en opgeslagen die vrijkomen bij de fossiele processen, de verwerking van biomassa en chemische recycling. Deze emissies zijn inherent aan het proces en niet te vermijden. Er is dus geen alternatief voor CO₂-afvang. Daarnaast zijn de emissies deels biogeen. Dit biedt kansen voor negatieve emissies, wat op termijn ook nodig is om de ergste effecten van klimaatverandering te dempen.

INTERNATIONALE POSITIE

De organische basischemie is een zeer internationale sector, waarbij een groot gedeelte van Nederlandse behoefte wordt geïmporteerd en er ook veel producten worden geëxporteerd. De import/export is voornamelijk binnen Europa (CE Delft, 2021b). De organische basischemie heeft stevige concurrentie van producenten buiten Europa, met name uit het Midden-Oosten en de Verenigde Staten. Er worden met name eindproducten geïmporteerd (plastics, rubbers) en niet zozeer de tussenproducten die krakers maken (etheen, propheen, etc.). Het kraken van nafta is zeer energie-intensief, maar de meeste energie van een traditionele kraker komt uit het opstoken van restgassen die in het proces zelf vrijkomen. Naast de toevoer van nafta als grondstof is er dus betrekkelijk weinig externe energie nodig. De overstap naar hoogwaardige toepassing van biomassa en geavanceerde recycling past goed bij de Nederlandse industrie, die innovatief is en goed verbonden met kennisinstellingen. We verwachten dan ook dat de organische basischemie in Nederland kan blijven in een klimaatneutrale en/of fossielvrije toekomst.

VERDUURZAMINGSPLANNEN

De verduurzamingsplannen van de sector organische basischemie zijn nog niet volledig ontwikkeld. De sector is zeer divers in producten en processen, waardoor een duidelijke lijn in de verduurzaming ontbreekt. De verwachting is dat er nog een groei in de vraag van producten uit deze sector zal zijn. Naast de klimaatproblematiek van de plasticproductie zelf, is nog een groot aandeel het verbranden (of storten) van plasticafval, waarbij significante hoeveelheden CO₂ vrijkomen. Bij de productieprocessen komt ook CO₂-vrij, niet door de verbranding van gassen, maar door de chemische reacties die plaatsvinden. Ook deze worden bij CCS afgevangen. Deze emissies veranderen niet door elektrificatie.

Scenario 1 - Voornamelijk CCS

Hierbij wordt voornamelijk uitgegaan van een scenario waarbij de productie blijft bestaan. De CO₂ die hierbij ontstaat, zal in verschillende stappen worden afgevangen. Shell Moerdijk heeft hiervoor de meest concrete plannen. DOW Terneuzen zou kunnen aansluiten bij de CO₂-aansluiting van Yara. Chemelot wil hierbij graag aansluiten op een CO₂-leiding in de Delta Rijn Corridor. Hierom stellen wij dat het voor Shell Moerdijk mogelijk is om CO₂ af te vangen per 2030, voor de andere twee partijen zal dit pas in 2035 mogelijk zijn.

In 2035 is het ook al mogelijk voor al deze partijen om een elektrische boiler te installeren, we gaan ervan uit dat dit dan ook wordt toegepast.

Daarnaast is een fundamentele oplossing om de productie te elektrificeren. Hier wordt onderzoek naar gedaan. Wij nemen in dit scenario aan dat deze bedrijven in 2040 hun kraker kunnen elektrificeren. Het productievolume zal in dit scenario niet veranderen.

Scenario 2 - Ambitieuze recycling

In de transitieagenda kunststoffen is de mogelijkheid tot recycling voor 2030 onderzocht, zie Tabel 8. In dit scenario sluiten we hierbij aan. Zo gaan we ervan uit dat in 2030 30% van de kunststoffen worden geproduceerd door mechanische recycling. Daarnaast wordt 15% van de primaire productie vervangen door biobased grondstoffen. Een klein deel (7%) zal via pyrolyse of vergassing worden gerecycled. Wij nemen aan dat dit wel via de huidige productieroute kan worden geproduceerd. Dit vervangt dus een deel van de nafta. Een heel klein deel (4%) zal worden vervangen door recycling via oplossing. Het is niet mogelijk om de vraag naar virgin kunststoffen helemaal te reduceren.

Tabel 8 - Productiecijfers in 2030 voor kunststoffen in transitieagenda kunststoffen

Productie	Aandeel in 2030
Primaire productie	44%
Mechanische recycling	30%
Oplossen	4%
Pyrolyse	7%
Biobased	15%
Totaal	100%

Hierdoor hoeft in 2030 nog maar 44% van de nafta gebruikt te worden. Dit wordt meegenomen in de scenario's voor raffinage.

De productiecapaciteit van de krakers zelf daalt met 34% (mechanische recycling en oplossen). Hiernaast spelen dezelfde processen als in scenario 1. CCS kan gerealiseerd worden in 2030 en 2035. Elektrificatie in 2040.

Een hoger aandeel recycling lijkt nog niet mogelijk, omdat de vraag naar plastics toeneemt en deze niet onmiddellijk beschikbaar zijn voor recycling. Hoewel de productie in de transitieagenda kunststoffen iets toeneemt (8% in 12 jaar), laten wij dat hier buiten beschouwing.