



Verkenning van een fossielvrije industrie

Productie binnen het carbonbudget



Committed to the Environment

Verkenning van een fossielvrije industrie

Productie binnen het carbonbudget

Dit rapport is geschreven door:
Martha Deen en Chris Jongsma

Delft, CE Delft, april 2023

Publicatienummer: 23.220351.065

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 Martha Deen (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 meer dan 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
	1.1 Aanleiding	7
	1.2 Doel en scope	7
	1.3 Het koolstofbudget	7
	1.4 Leeswijzer	8
2	Huidige industrie	9
	2.1 Methode	9
	2.2 De huidige Nederlandse industrie in vogelvlucht	9
	2.3 Gebruik van fossiele brand- en grondstoffen in de industrie	10
	2.4 Gebruik van fossiele energie	15
	2.5 Gebruik van fossiele grondstoffen	16
	2.6 Productie van de industrie	16
	2.7 Emissies van de energie-intensieve industrie	17
3	Welke energiebronnen, grondstoffen en technieken zijn nodig voor een fossielvrije industrie?	19
	3.1 Welke energiebronnen (en strategieën) zijn er in een fossielvrije toekomst?	20
	3.2 Welke energiedragers zijn er in een fossielvrije toekomst?	21
	3.3 De R-ladder en secundaire grondstoffen	21
	3.4 Welke grondstoffen zijn er in een fossielvrije toekomst?	23
	3.5 Is import een optie?	24
	3.6 Welke technieken zijn nodig voor een fossielvrije industrie?	25
4	Welk effect heeft hernieuwbare energie op de industrie?	29
	4.1 Grotere internationale verschillen in beschikbaarheid van betaalbare energie	29
	4.2 Noordwest-Europa zal netto importeur van energie blijven	30
	4.3 Gevolgen voor de industrie	31
5	Welk effect heeft de grondstoffentransitie op de industrie?	33
	5.1 Gevolgen internationale positie op huidige en nieuwe industrie	33
	5.2 Afname in consumptie	34
	5.3 Hergebruik van materialen en producten	34
	5.4 Secundaire grondstoffen	35
	5.5 CO ₂ en waterstof als grondstoffen	35
	5.6 Toename van biobased materialen	36
	5.7 Effecten van een eiwittransitie op de industrie	37
6	Toekomstbeeld	38
	6.1 Nieuwe fossielvrije industrie	38
	6.2 Aanpassingen in de huidige industrie	39



7	Transitiepad	41
	7.1 Technische voorwaarden voor een transitie naar fossielvrije productie	41
	7.2 Transitiepad toegelicht	41
	7.3 Benodigd beleid voor overgang naar fossielvrije industrie	43
	Referenties	46
A	Schets van toekomst per sector	49



Samenvatting

Aanleiding

In het jaar 2037 is het koolstofbudget voor Nederland op, als we uitgaan van de 1,5°C-klimaatdoelstelling en rekening houden met het Nederlandse aandeel in de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen (NewClimate Institute, 2022). Om binnen dat koolstofbudget te blijven, moet de uitstoot van broeikasgassen zo snel mogelijk worden gereduceerd.

De energie-intensieve industrie is op dit moment verantwoordelijk voor nagenoeg 25% van de broeikasgasemissies in Nederland. Deze emissies komen voort uit intensief gebruik van aardgas, aardolie en steenkool.

Natuur & Milieu heeft CE Delft gevraagd een toekomstbeeld op te stellen van een fossielvrije Nederlandse industrie in 2037, zodat die dan klimaatneutraal opereert. Dit toekomstbeeld geeft inzicht in welke industrie kansrijk is binnen een fossielvrije wereld, en welke aanpassingen daarvoor nodig zijn. De studie is nadrukkelijk een visiedocument, een verkenning van de transitie naar fossielvrij voor de energie-intensieve industrie in Nederland.

Disclaimer: De verkenning gaat niet in op de maatschappelijk gevolgen van de veranderingen. Die veranderingen kunnen groot zijn voor belanghebbenden en werknemers van de industrie, voor export en import, en voor de omgeving. Bovendien moeten ook de geïmporteerde producten fossielvrij geproduceerd zijn om binnen het mondiale koolstofbudget te blijven

Hernieuwbare energie en grondstoffen

Een fossielvrije industrie is een industrie op basis van hernieuwbare energie, die gebruik maakt van secundaire grondstoffen (uit recycling) en duurzame bio- en synthetische grondstoffen. Dit vereist allereerst een radicale transitie van de energievoorziening. Daarnaast vormen een beperkte wereldwijde beschikbaarheid aan biomassa en zeldzame metalen belangrijke randvoorwaarden. Vanwege schaarste is een afname van energie- en materialengebruik (minder consumptie) noodzakelijk.

Internationale concurrentie van energie en grondstoffen is leidend

De concurrentiepositie voor de Nederlandse industrie verandert wezenlijk door de transitie naar fossielvrij. De import van aardolie en de tot voor kort goedkope beschikbaarheid van Gronings aardgas vormden een belangrijke factor voor het succes van de Nederlandse industrie. In een wereld waarin alles hernieuwbaar is, is elektriciteit in Nederland kostbaar ten opzichte van landen met meer zon- en/of winduren en meer ruimte voor hernieuwbare energieopwekking. De transitie naar een fossielvrije industrie is als gevolg een vorm van creatieve destructie, waarbij sommige oude technieken en toepassingen verdwijnen door de opkomst van nieuwe.



Kansrijke industrieën

De industriële processen die kansrijk zijn in Nederland, zullen gericht moeten zijn op energiebesparing, circulariteit en directe elektrificatie. Welke productieprocessen in Nederland internationaal kunnen concurreren, hangt vervolgens af van:

- het aandeel van de energiekosten in het proces;
- de toegevoegde waarde van het te produceren materiaal/product voor de Nederlandse economie;
- de benodigde kennis voor de productie van het materiaal/product;
- de beschikbaarheid en kosten van transport van grondstoffen;
- de kosten van transport van het product.

Een fossielvrije industrie in Nederland in 2037

Het onderzoek laat zien dat een fossielvrije industrie mogelijk is. De industrie in Nederland ziet er dan wel anders uit: de focus verschuift van basisindustrie naar nieuwe industrie en hoogwaardige productie. Nederland beschikt over hoogwaardige kennis en infrastructuur, een gunstige ligging en institutionele en staatsrechtelijke stabiliteit. De toekomstige industrie maakt gebruik van deze en mogelijk nieuwe comparatieve voordelen.

Een groot deel van de industrie zal kunnen blijven bestaan in haar huidige vorm, mits de productie-installaties worden omgebouwd, zodat het proces fossielvrij wordt. We zien de volgende kansen:

- **groene waterstofproductie**, naast beperkte import;
- **verwerking van energie-intensieve halffabricaten naar eindproducten**;
- elektrificatie van **sectoren die relatief weinig energie-intensief zijn**, bijvoorbeeld de papier- en voedselindustrie, of midden- en kleinbedrijven, zoals drukkerijen, metaalbedrijven of producenten van plastic producten;
- elektrificatie van **sectoren die wél energie-intensief zijn, maar hoge transportkosten hebben**, zoals de keramische industrie (bakstenen, straatstenen, stoeptegels) en de glasindustrie (verpakkingen).

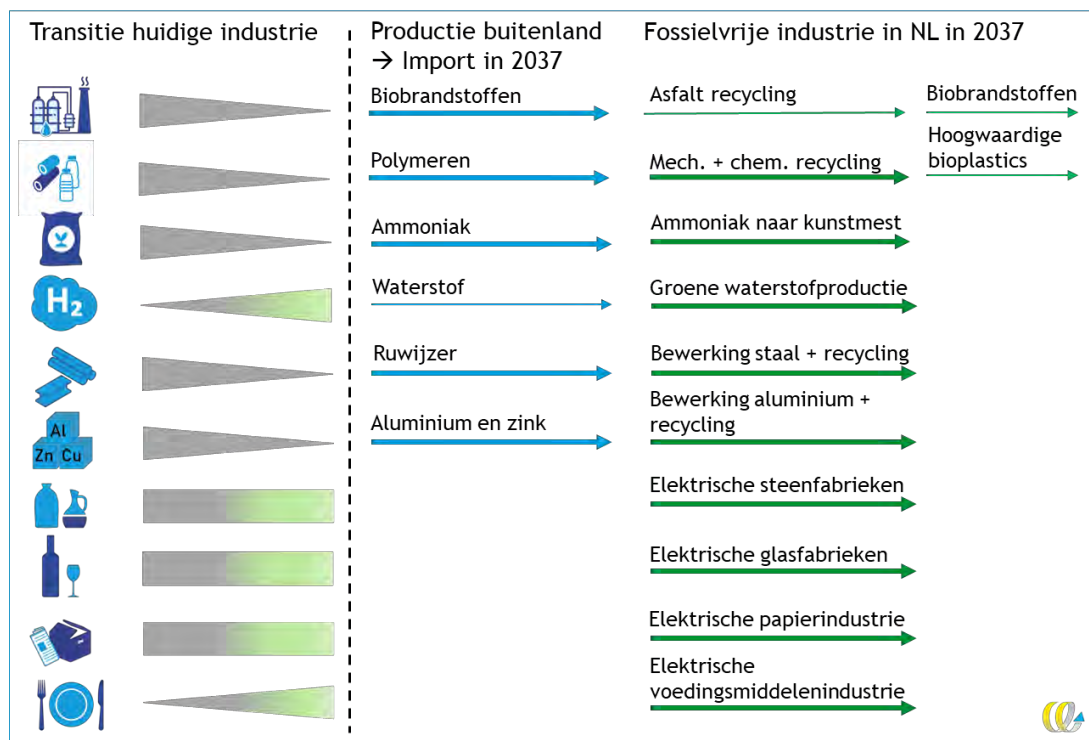
De nieuwe industrie waarvoor in de verkenning kansen naar voren komen, zijn:

- **industrie voor levensduurverlenging**, bijvoorbeeld reparatie- en service-industrie;
- **recycling industrie**, waaronder **mechanische en hoogwaardige chemische recycling van kunststoffen**;
- **voedingsmiddelenindustrie**, bijvoorbeeld de verwerking van plantaardig voedsel;
- **maakindustrie**, bijvoorbeeld machinebouw, toeleverancier auto-industrie, fabrieken voor zonnepanelen en batterijen;
- **biobased producten en -brandstoffen**, in beperkte mate.

De productie van bepaalde halffabricaten, zoals ruwijzer en aluminium, kan (gemiddeld over een jaar) te duur worden in Nederland. Het is dan economisch voordeliger om halffabricaten te importeren. De minder energie-intensieve verwerking van halffabricaat tot eindproduct kan wel competitief blijven in Noordwest-Europa. Het gaat om de volgende producten: **aluminium en zink, ruwijzer, ammoniak en methanol, synthetische brandstoffen en polymeren**.

Voor de **fossiele organische basischemie** veranderen de grondstoffen en processen zo, dat een groot deel van de productie naar het buitenland verplaatst. Nederland zal wel eigen secundaire grondstoffen en duurzame biomassa gebruiken voor de productie van hoogwaardige (biobased) materialen en daarnaast hernieuwbare grondstoffen importeren.

Fossiele raffinage verdwijnt uit Nederland, omdat de huidige installaties niet geschikt zijn om de nieuwe biobased producten te produceren. Bioraffinage komt op beperkte schaal in de plaats, en import van biobrandstoffen en synthetische brandstoffen.



Wat er nodig is voor een fossielvrije industrie in 2037

De transitie is technisch mogelijk voor 2037, maar er moet wel veel gebeuren, en snel: alternatieve technieken moeten opgeschaald worden, infrastructuur aangelegd, voldoende hernieuwbare energie en grondstoffen moeten beschikbaar worden gemaakt, installaties omgebouwd en fabrieken opgebouwd. Dit is niet haalbaar zonder passend beleid. In het onderzoek beschrijven we hoe dit tijdspad eruit kan zien en benoemen we een aantal beleidsopties waaraan gedacht kan worden.

Bij het verdwijnen van delen van de energie-intensieve industrie komen ruimte en arbeidskracht beschikbaar, die ingezet kunnen worden voor de ontwikkeling van nieuwe duurzame industrieën. Omdat het in veel gevallen gaat om andere processen, is het ontwikkelen van kennis en aanbieden van opleiding een randvoorwaarde voor de realisatie van deze transitie.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Natuur & Milieu heeft CE Delft gevraagd een toekomstbeeld op te stellen van hoe een Nederlandse industrie eruit kan zien, die in 2037 klimaatneutraal kan opereren, zonder fossiele brandstoffen. Dit rapport geeft een backcasting vanuit een volledig fossielvrij systeem in de toekomst.

In het jaar 2037 is het koolstofbudget voor Nederland op, volgens het Nederlandse aandeel in broeikasgassen in de globale emissies (NewClimate Institute, 2022). De industrie is op dit moment verantwoordelijk voor ongeveer 32%¹ van de broeikasgasemissies in Nederland. Een groot deel hiervan wordt veroorzaakt door de energie-intensieve industrie.

Nederland heeft een omvangrijke industrie, die jarenlang kon beschikken over goedkoop aardgas uit Groningen en daarnaast profiteerde van diverse belastingvoordelen. Deze fossiele industrie is echter niet langer houdbaar binnen het nog beschikbare koolstofbudget. Ook de Nederlandse duurzaamheidsdoelen vereisen dat de uitstoot van fossiele brandstoffen wordt afgebouwd. Een volledige afbouw zorgt ervoor dat er verduurzamingsopties moeten worden toegepast, die veel verder gaan dan 'kaasschaven aan fossiel'. Daarnaast is er in de maatschappij een toename in aandacht voor een stop op fossiele brandstoffen en de bijbehorende milieuvervuiling in Nederland (te zien in klimaatacties; oproepen tot fossielvrije investeringen bij pensioenfondsen of financiering voor universiteiten).

1.2 Doel en scope

De centrale vraag die we in dit rapport beantwoorden is:

'Hoe kan de Nederlandse industrie eruitzien in een duurzame fossielvrije toekomst?'

De scope van het onderzoek is de energie-intensieve industrie, waaronder de organische basischemie, raffinaderijen, basismetalenindustrie, kunstmest, industriële gassen, non-ferro, keramische-, glas-, en papierindustrie, en voedings- en genotmiddelenindustrie. We kiezen voor de energie-intensieve industrie, omdat veranderingen in het energiesysteem op deze industrieën het grootste effect hebben.

1.3 Het koolstofbudget

Het mondiale koolstofbudget is de hoeveelheid broeikasgassen die door de wereld als geheel nog uitgestoten mag worden om met een bepaalde zekerheid binnen 1,5 graden opwarming te blijven. Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) heeft het koolstofbudget in 2020 bepaald op 400.000 Mton CO₂-equivalenten (CO₂-eq.). Dat zou 67% zekerheid geven om binnen de 1,5 graden opwarming te blijven². Ter vergelijking: de wereldwijde uitstoot bedroeg in 2021 zo'n 36.300 Mton (IEA, 2022a) en de Nederlandse

¹ (CBS, 2021), inclusief emissies uit eigen opwek elektriciteit, exclusief emissies door afname van elektriciteit uit het net.

² Andere percentages leveren een ander budget op: in het Noordzeeakkoord is bijvoorbeeld 80% zekerheid afgesproken (CE Delft, 2022a).

uitstoot bedroeg zo'n 168 Mton CO₂-eq. (CBS, 2022). Het koolstofbudget voor een land kan op meerdere manieren berekend worden (NewClimate Institute, 2022):

- Vanuit het aandeel in **historische emissies**, zou Nederland in 2030 netto negatieve emissies moeten realiseren. Deze verdeling wordt het 'full fair share' genoemd en houdt rekening met de historische uitstoot van landen en hun economische mogelijkheden om emissies te reduceren.
- Vanuit **emissies per persoon** (aandeel in de wereldbevolking) zou Nederland in 2030 tot 94% reductie ten opzichte van 1990 moeten komen (NewClimate Institute, 2022). Nederland heeft per hoofd van de bevolking namelijk een groter dan gemiddeld aandeel in de mondiale emissies.
- Vanuit het aandeel in de **huidige mondiale uitstoot** zou Nederland een reductie van 64% moeten behalen in 2030, en richting de 100% in 2037.

We kiezen voor 100% reductie in 2037, omdat we de andere reductiepaden niet haalbaar achten. Dit reductiepad is voor Nederland overigens niet 'strenger' dan de afspraken uit het Parijsakkoord, waarin is afgesproken dat de wereld streeft naar 95% reductie in 2050. Er is namelijk ook afgesproken dat geïndustrialiseerde landen zich zullen inspannen om het doel sneller te bereiken. Een fossielvrije industrie in 2037 geeft een invulling aan die versnelling.

Het heeft grote implicaties voor de Nederlandse industrie om binnen het koolstofbudget te blijven. De uitstoot van de industrie vertegenwoordigt immers een groot deel van de Nederlandse emissies: in 2021 zo'n 53 Mton CO₂-eq, 32 % van de totale Nederlandse emissies (CBS, 2022).

1.4 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd: Hoofdstuk 2 geeft een omschrijving van de huidige industrie, energie- en grondstoffengebruik, productie en emissies. Hoofdstuk 0 geeft een overzicht van energie- en grondstoffen, en technologieën in een fossielvrije industrie. Hoofdstuk 4 geeft de effecten van hernieuwbare energie op de industrie weer, Hoofdstuk 5 van de grondstoffentransitie. Hoofdstuk 0 geeft het toekomstbeeld voor de huidige industrie in Nederland, en van nieuwe fossielvrije industrie. Als laatste geeft Hoofdstuk 7 het transitiepad naar een fossielvrije industrie. Een uitgebreide uitwerking van de analyse per industriesector is te vinden in de bijlagen.

2 Huidige industrie

In dit hoofdstuk beschrijven we achtereenvolgens de huidige energie- en grondstoffenvraag, de productie en CO₂-emissies van de energie-intensieve industrie.





2.1 Methode

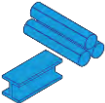





De Nederlandse industrie is divers in omvang, grondstoffen- en energieverbruik. In deze studie bekijken we de meest energie-intensieve Nederlandse industrie, waar de impact van een transitie naar fossielvrij het grootst is. We beschouwen de tien belangrijkste sectoren, die we in de volgende paragraaf (Paragraaf 2.2) toelichten.

We brengen de energie- en grondstoffenvraag in kaart voor 2019, nog vóór de verstoringen door COVID-19 en de sterk gestegen gasprijs door de oorlog in Oekraïne.

2.2 De huidige Nederlandse industrie in vogelvlucht

In deze paragraaf bespreken we kort de tien sectoren waar we ons in deze studie op richten. Meer informatie is te vinden in de infosheets in Bijlage A.

1. Raffinage 	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 telt zes raffinaderijen: Shell Pernis, BP Rotterdam, ExxonMobil Rotterdam, Gunvor Rotterdam, Vitol Rotterdam en Zeeland Refinery Vlissingen.
2. Organische basischemie 	De organische basischemie verwerkt aardoliestromen tot de grondstoffen waarmee plastics en rubbers worden gemaakt. Het meest energie-intensieve proces is het kraken van nafta tot ethyleen, propyleen en andere stoffen. Deze worden verder verwerkt tot polyethyleen, polypropyleen, etc., in de kunststoffenindustrie. Nederland heeft drie locaties waar nafta gekraakt wordt: Dow Terneuzen, Sabic Geleen en Shell Moerdijk.
3. Kunstmest 	De kunstmestindustrie produceert ammoniak en verwerkt deze tot kunstmest door andere voedingsstoffen toe te voegen. De meest energie-intensieve stap is de productie van ammoniak, dat nu gebeurt door aardgas en stoom bij hoge temperatuur om te zetten naar waterstof, de belangrijkste grondstof voor ammoniak. Nederland heeft twee ammoniakfabrieken: Yara Sluiskil en OCI Geleen.
4. Industriële gassen 	De industriële gassenindustrie produceert luchtgassen (zuurstof, stikstof en argon), waterstof en koolmonoxide. De productie van waterstof en koolmonoxide is erg energie-intensief en gebeurt door aardgas en stoom op hoge temperatuur om te zetten. Waterstof wordt met name in de raffinage gebruikt, de chemie gebruikt ook koolmonoxide. Nederland kent twee producenten van waterstof: Air Liquide (Rotterdam, Bergen op Zoom) en Air Products (Rotterdam). Daarnaast produceren veel raffinaderijen hun eigen waterstof, maar dat valt onder de raffinagesector.

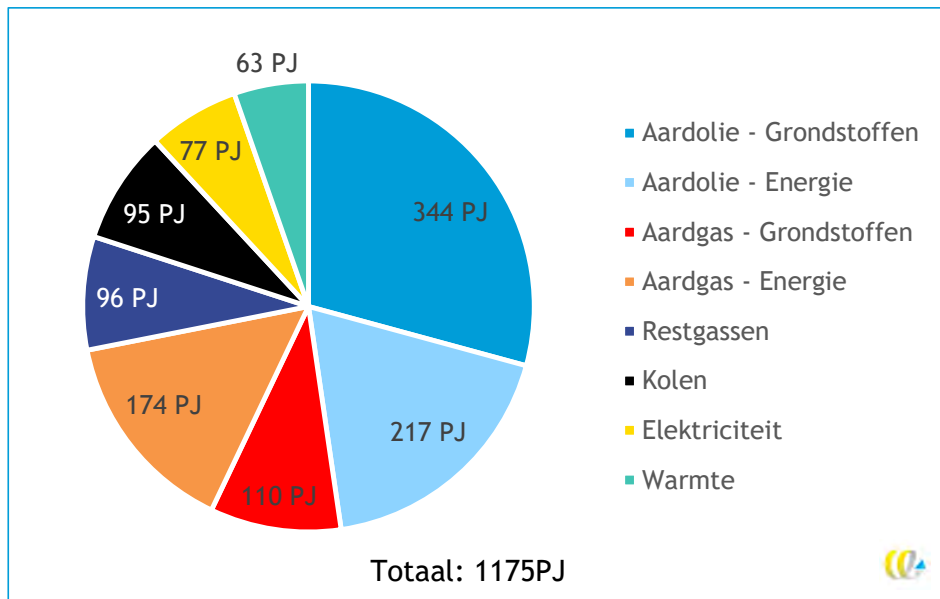
<p>5. Staalindustrie</p> 	<p>De Nederlandse staalindustrie bestaat uit één producent: Tata Steel IJmuiden. Tata Steel produceert rollen staalplaat. IJzererts wordt met steenkool gereduceerd en gesmolten tot ruwijzer in een hoogoven. In de oxystaalafabriek wordt het ruwijzer tot staal gemaakt door overtollige koolstof te verwijderen. Staalproductie is energie-intensief, vanwege de benodigde energie voor de reductie en het smelten van het ijzererts. In het staal is 15 tot 25% schroot verwerkt. IJzer en staal worden gebruikt voor de productie van onder andere auto's.</p>
<p>6. Non-ferrometalen</p> 	<p>Non-ferrometalen zijn alle metalen die geen ijzer bevatten. De belangrijkste zijn aluminium, koper en zink. Het exacte productieproces verschilt per metaal. Aluminium en zink worden geproduceerd door (bewerkt) erts met grote hoeveelheden elektriciteit om te zetten in zuiver metaal (elektrolyse). De belangrijkste producenten van non-ferrometalen in Nederland zijn voormalig Damco Aluminium Delfzijl (Aldel) en zink-producent Nyrstar in Budel.</p>
<p>7. Keramische industrie</p> 	<p>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°C). Het bakken is erg energie-intensief. Nederland heeft 37 grote keramiek-fabrieken, met name langs de grote rivieren, waar klei als grondstof wordt ingezet.</p>
<p>8. Glasindustrie</p> 	<p>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. Nederland kent vijf fabrieken voor verpakings- en tafelglas, één fabriek voor glaswol en één fabriek voor glasvezel.</p>
<p>9. Papierindustrie</p> 	<p>De papierindustrie produceert papier en karton, hoofdzakelijk uit gerecycled papier. De meest energie-intensieve stap is het drogen van papier, wat nu gebeurt met hitte uit aardgas. Nederland heeft 21 papier- en kartonfabrieken. De Nederlandse papier-industrie gebruikt vrijwel uitsluitend gerecycled papier als grondstof.</p>
<p>10. Voedingsindustrie</p> 	<p>In de voedingsindustrie worden agrarische grondstoffen verwerkt tot tussen- en eind-producten. Belangrijke subsectoren zijn de zetmeel-, suiker-, zuivel-, aardappel-producten- en oliën en vettenindustrie. De meest energie-intensieve processen zijn koken, bakken en drogen.</p>

2.3 Gebruik van fossiele brand- en grondstoffen in de industrie

2.3.1 Totaal fossiel verbruik van de industrie voor energie en grondstoffen

De Nederlandse energie-intensieve industrie verbruikte in 2019 in totaal 1.175 PJ aan energie en grondstoffen, zie Figuur 1. Daarvan was 940 PJ (80%) afkomstig uit fossiele brandstoffen: aardolie, aardgas en kolen. Nog eens 63 PJ (5%) betreft ingekochte warmte, grotendeels afkomstig uit warmtekrachtkoppelingen (wkk's), gestookt op aardgas. Aardolie is de meest gebruikte brandstof, gevolgd door aardgas. Beide worden zowel als grondstof als energiedrager gebruikt. Kolen worden vrijwel uitsluitend in de staalindustrie gebruikt.

Figuur 1 - Totaal verbruik selectie van Nederlandse energie-intensieve industrie



Bron: CBS-data, 2019: www.opendata.cbs.nl/statline/CBS/nl/dataset/83989NED.

Het hoge aardgasgebruik komt doordat aardgas lange tijd lokaal goedkoop beschikbaar was. Aardolie wordt gebruikt voor de productie van brandstoffen en plastics en kan door de geografische ligging aan zee gemakkelijk geïmporteerd worden. Nederland importeert nu het grootste gedeelte van zijn energievraag in de vorm van aardolie, aardgas en kolen. De binnenlandse brandstoffenproductie betreft voornamelijk aardgas en is slechts goed voor een fractie van het verbruik.

2.3.2 Toegevoegde waarde ten opzichte van fossiel verbruik

De energie-intensieve industrie produceert veel verschillende producten met gebruik van fossiele energie en grondstoffen. Deze producten leveren een toegevoegde waarde aan de Nederlandse economie, zoals per industriesector omschreven in CE Delft, (2021d). Figuur 2 geeft weer hoeveel deze toegevoegde waarde is per eenheid gebruikte energie en grondstoffen.

Figuur 2 - Economische toegevoegde waarde per eenheid energie- en grondstoffengebruik.



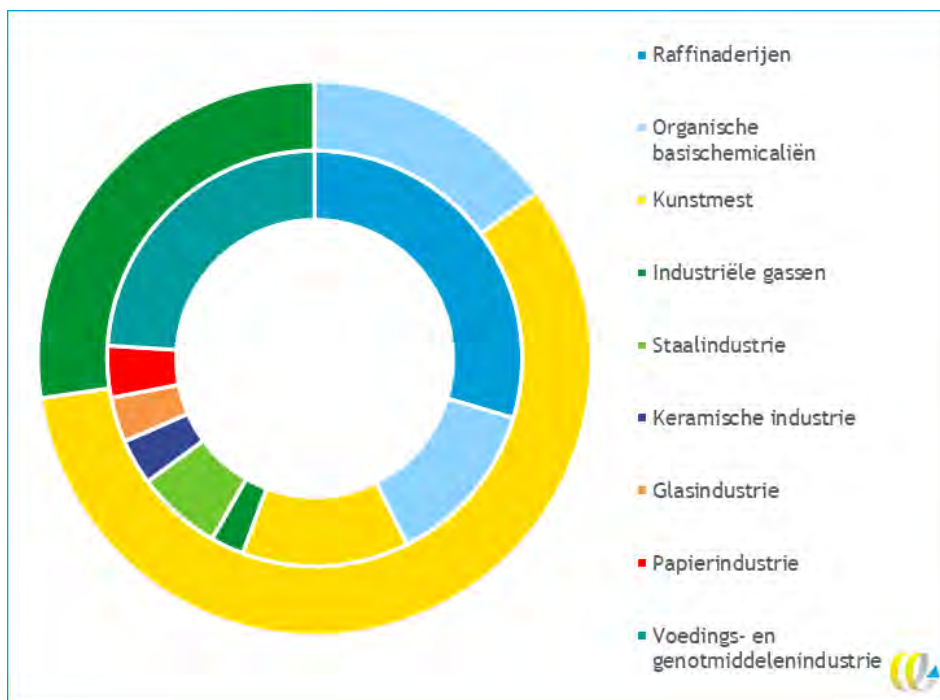
De toegevoegde waarde is hoog voor de papierindustrie, de voedings- en genotmiddelenindustrie, glas; en al in mindere mate de non-ferro, steen en keramiek. Voor de raffinaderijen, staalindustrie, kunstmest, de organische basischemie en industriële gassen is de toegevoegde waarde per energie- en grondstoffenverbruik relatief laag. Deze industrieën gebruiken relatief veel energie- en grondstoffen, terwijl de bijdrage aan de economie beperkt is ten opzichte van dit gebruik.

Een groot energiegebruik, zoals voor energie-intensieve productie, hoeft niet een grote toegevoegde waarde aan de Nederlandse economie te betekenen. Integendeel, vooral de basisindustrieën zijn in Nederland de grootverbruikers, terwijl deze sectoren niet per se de meeste toegevoegde waarde genereren. De niet-energie-intensieve metaal-/elektroproducten en machine-industrie heeft nagenoeg tien keer zoveel toegevoegde waarde als de energie-intensieve organische basischemie (CE Delft, 2021d).

2.3.3 Gebruik van aardgas in de industrie

De Nederlandse energie-intensieve industrie gebruikte in 2019 ruim 280 PJ aan aardgas, zie Figuur 3. Dat is driekwart van wat er in de hele gebouwde omgeving in dat jaar aan aardgas werd gebruikt. Er werd 110 PJ aardgas gebruikt als grondstof, met name voor de productie van waterstof: als zuivere stof in de industriële gassenindustrie, of als tussenproduct voor de productie van ammoniak in de kunstmestindustrie. Er werd meer dan 170 PJ aardgas gebruikt als brandstof in 2019. Aardgas wordt in alle sectoren als brandstof gebruikt, maar het grootste gedeelte van het verbruik is afkomstig van raffinaderijen en de voedings-, en genotmiddelenindustrie.

Figuur 3 - De inzet van aardgas als grondstof (buitenste ring) en als energie (binnenste ring)

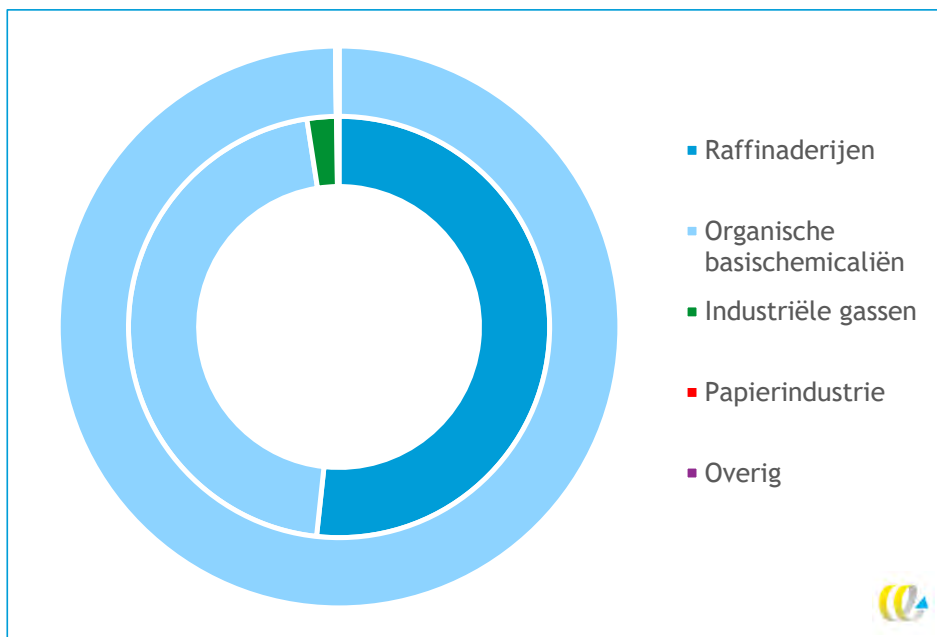


Bron: CBS-data, 2019: www.opendata.cbs.nl/statline/CBS/nl/dataset/83989NED.

2.3.4 Gebruik van aardolie in de industrie

In 2019 gebruikte de Nederlandse energie-intensieve industrie 560 PJ aan aardolie als grondstof en als energie, zie Figuur 4. Dit is exclusief het aardoliegebruik van raffinaderijen voor de productie van brandstoffen. De 340 PJ aan aardolie voor gebruik als grondstof komt vrijwel geheel op het conto van de sector 'organische basischemicaliën', waar chemicaliën en plastics worden geproduceerd uit de aardolieproducten nafta en LPG. Er werd zo'n 220 PJ aan aardolie gebruikt voor energietoepassingen. Dit betreft met name de inzet van restgassen die uit aardolie afkomstig zijn in de raffinage en organische basischemie.

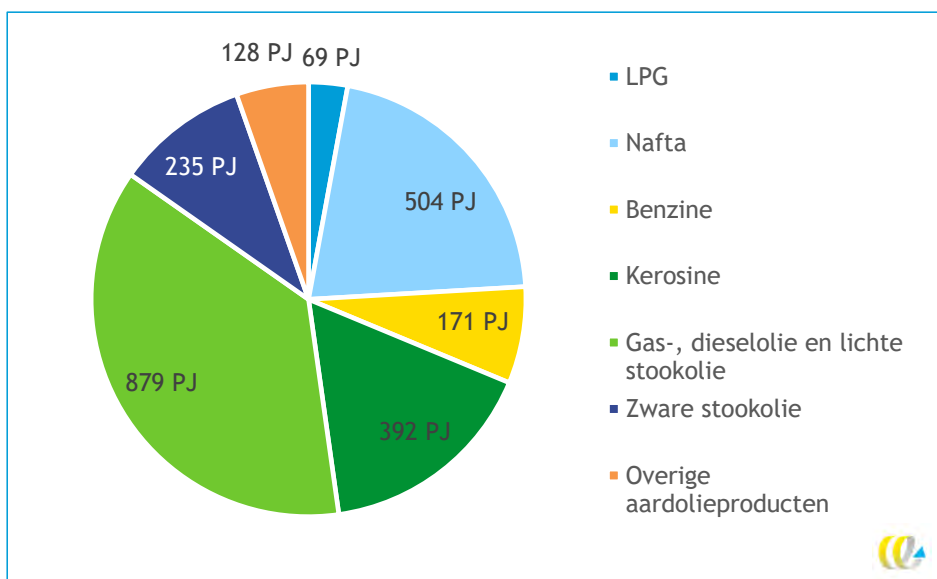
Figuur 4 - De inzet van aardolie als grondstof (buitenste ring) en als energie (binnenste ring)



Bron: CBS-data, 2019: www.opendata.cbs.nl/statline/CBS/nl/dataset/83989NED.

Raffinaderijen verbruikten in 2019 daarnaast bijna 2400 PJ aan aardolie voor de productie van brandstoffen, zie Figuur 5. In de statistieken valt dit niet onder verbruik, maar onder energie-omzetting. Strikt genomen is dit natuurlijk waar, maar voor deze studie is het hele aardolieverbruik van de raffinage van belang omdat alle fossiele aardolie vervangen moet worden in een fossielvrije industrie.

Figuur 5 - Productie van de raffinaderijen



Bron: CBS-data, 2019: www.opendata.cbs.nl/statline/CBS/nl/dataset/83989NED.

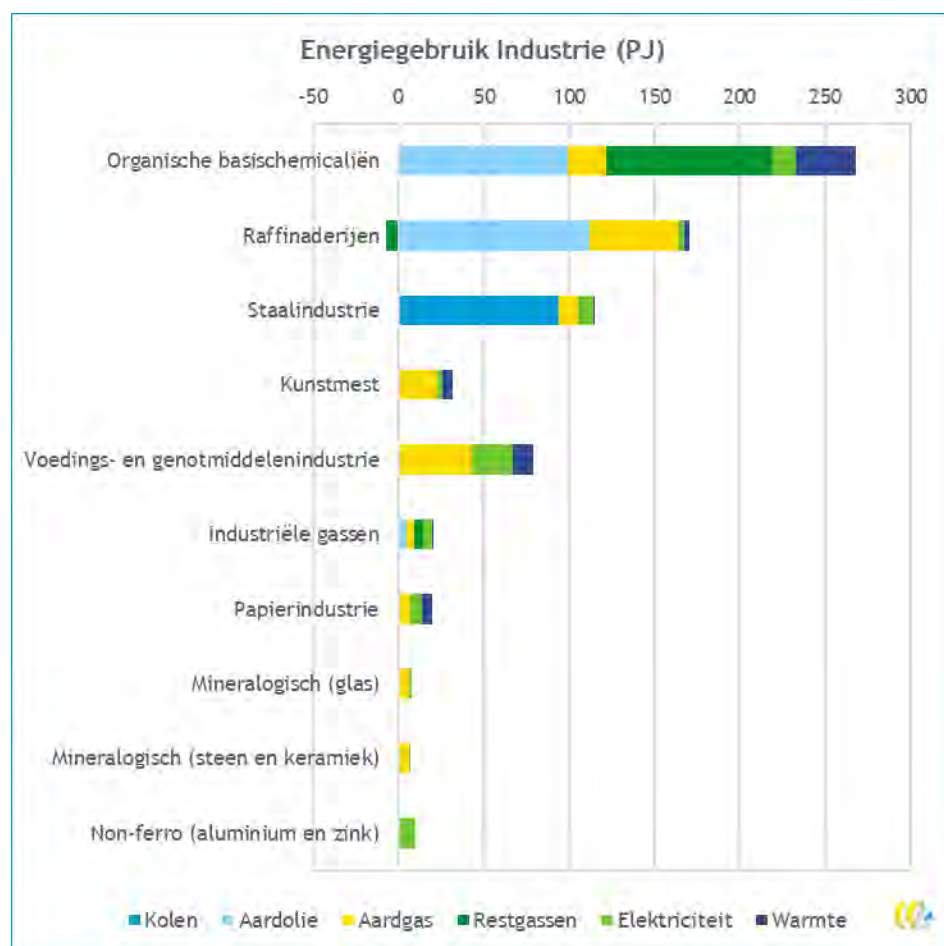
2.4 Gebruik van fossiele energie

Figuur 6 geeft een overzicht van het energiegebruik in de industrie in 2019. De productie van organische basischemicaliën vraagt veel energie (bijna 300 PJ). Ter vergelijking: de hele gebouwde omgeving, dus alle woningen en kantoren, gebruikten dat jaar zo'n 650 PJ (in gas, elektriciteit en warmte). In de processen in deze industrie zijn energie en grondstoffen nauw met elkaar verweven. Een deel van de energie wordt opgewekt uit restgassen die vrijkomen in het proces zelf. Restgassen ontstaan uit de verhitting van grondstoffen. Warmte komt van stoom geproduceerd uit een wkk in de industrie, die industriële bedrijven inkopen en inzetten als energiedrager.

Daarnaast komt een groot deel van de energie uit aardolie, vooral in de raffinaderijen en voor de organische basischemie (de sectoren met de grootste energievraag). In de raffinaderijen is naast aardolie aardgas een belangrijke bron van energie.

De staalindustrie maakt in de verwerking van ijzererts naar staal gebruik van kolen in het proces. Die worden ingezet als energie, maar ook hierbij geldt dat (een belangrijk deel) wordt opgeslagen in het eindproduct staal.

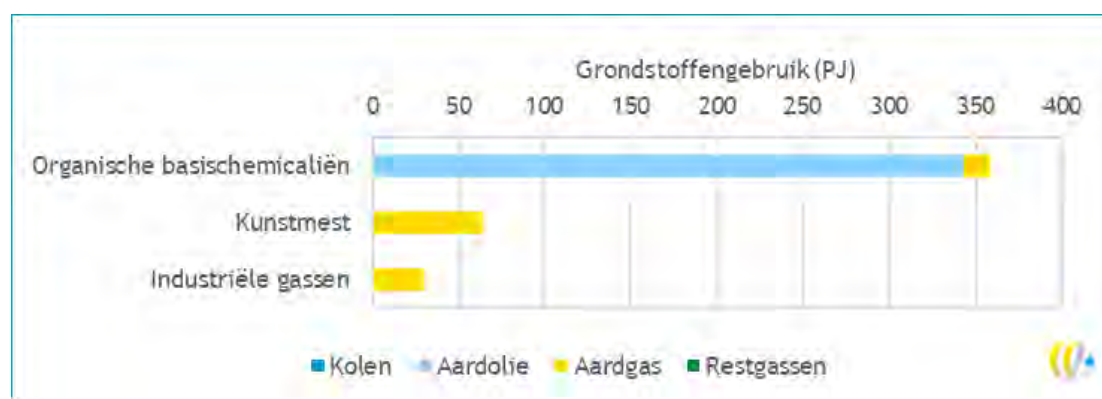
Figuur 6 - Energiegebruik in de Nederlandse industrie in 2019



2.5 Gebruik van fossiele grondstoffen

Figuur 7 laat zien waar binnen de selectie van tien industrieën het overgrote deel van de aardolie wordt ingezet. Aardolie die gebruikt wordt als grondstof voor de productie van brandstoffen (bijna 2.400 PJ) bij raffinaderijen valt buiten deze statistieken, en is dus niet terug te zien in de figuur. In de figuur is te zien dat de organische basischemie een grote hoeveelheid aardolie gebruikt als grondstof. Aardgas wordt met name voor de productie van kunstmest ingezet als grondstof, gevolgd door industriële gassen en de organische basischemie.

Figuur 7 - Fossiele grondstoffengebruik in de industrie in Nederland in 2019



De organische basischemie en de raffinaderijen hangen deels met elkaar samen. Een aantal nafta-krakers zijn direct verbonden met een raffinaderij. Tegelijkertijd wordt nafta ook geïmporteerd via terminals in de haven.

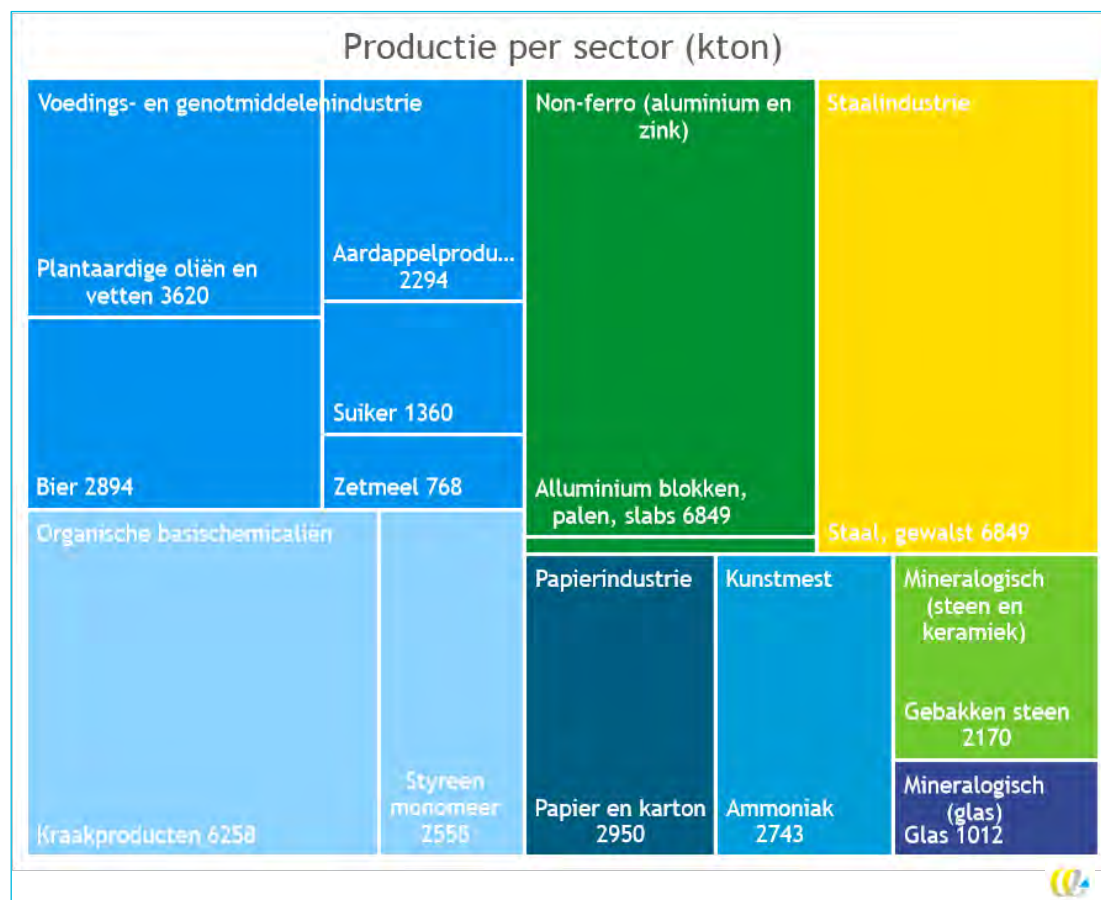
De fossiele grondstoffen die we hier omschrijven, zijn koolwaterstofverbindingen, ingezet als grondstof. Naast fossiele grondstoffen worden in de industrie ook ruwe erts/metalen of andere virgin materialen gebruikt. Voor de productie van aluminium en zink worden metalen gemijnd. Voor de productie van steen en glas wordt klei en zand gewonnen uit de natuur. Hergebruik en recycling van deze materialen worden ingezet om het gebruik van virgin grondstoffen terug te dringen. Van verpakkingsglas werd in Nederland bijvoorbeeld 79% gerecycled en 89% gerecycled of hergebruikt in 2021 (Afvalfonds Verpakkingen, 2022).

2.6 Productie van de industrie

De productie van de energie-intensieve industrie is voor een deel direct afhankelijk van fossiele brandstoffen, omdat deze als grondstoffen worden gebruikt: bijvoorbeeld in de organische basischemie, en in de kunstmest. Een transitie naar fossielvrij heeft grote implicaties op het productieproces.

Figuur 8 geeft een overzicht van de productie per sector in kilotonnen (exclusief de raffinaderijen). De grootste producenten zijn de voedings- en genotmiddelenindustrie en de organische basischemie, gevolgd door de basismetalaalindustrie (non-ferro en staal).

Figuur 8 - Overzicht van productie per sector, exclusief raffinaderijen (in kton)



Bron: Tabel 4 uit (CE Delft, 2021d).

De raffinaderijen produceren een veelvoud aan producten. Gas, dieselolie en lichte stookolie worden gebruikt in de scheepvaart en voor wegtransport (vrachtwagens, mobiele werktuigen, auto's). Kerosine wordt gebruikt als brandstof voor de luchtvaart, zware stookolie voor de (internationale) scheepvaart. Overige aardolieproducten zijn bijvoorbeeld asfalt en nafta.

Nafta uit een raffinaderij is onder andere een grondstof voor de productie van plastics in de organische basischemie, en voor bijvoorbeeld bitumen (onder andere een bouwsteen voor asfalt). In een kraakinstallatie wordt nafta gebruikt voor de productie van grondstoffen voor polymeren, etheen, propeen en benzeen. Deze vallen onder de petrochemische industrie (onderdeel van de organische basischemie). Polymeren (kunststoffen) zijn terug te vinden in alles waar plastic in zit: verpakkingsmateriaal, textiel, auto's, elektronica, maar ook cosmetische en farmaceutische producten.

2.7 Emissies van de energie-intensieve industrie

De energie-intensieve industrie was in 2019 goed voor een uitstoot van 44 Mton, tegenover een uitstoot van 56 Mton voor de industrie als totaal, zie Figuur 9 en Figuur 10. Het grootste

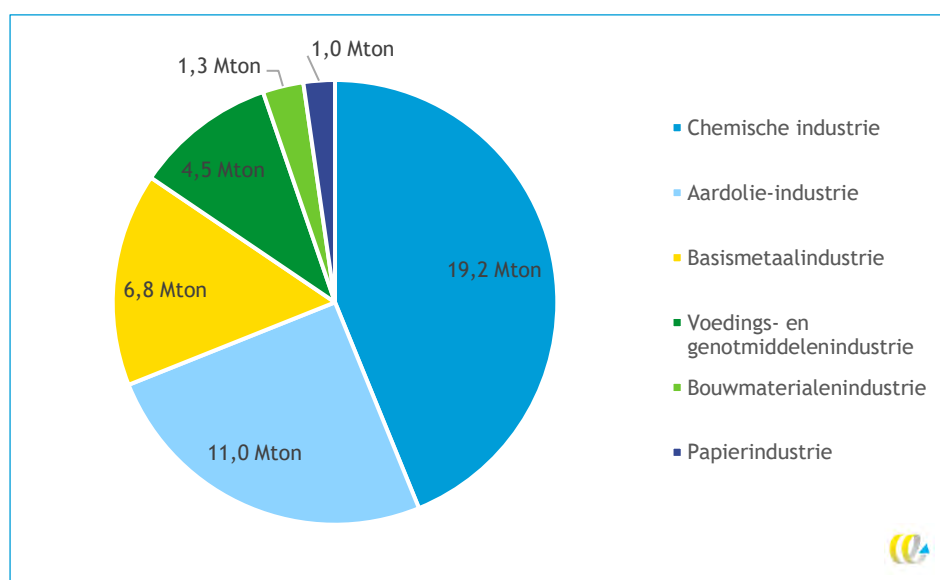
deel van de emissies uit de industrie komt van de chemische industrie en de aardolie-industrie (raffinaderijen).

Onder de chemische industrie valt de kunstmestindustrie, de organische basischemie en de industriële gassen. Emissies in deze industrieën komen voor een deel uit processen en voor een deel uit verbranding.

De raffinaderijen vallen onder de aardolie-industrie. Ook hier komt een deel van emissies uit processen en een deel uit verbranding. Na de chemische en aardolie-industrie heeft de basismetaalindustrie de grootste emissies. De basismetaalindustrie bestaat uit de staalindustrie en de non-ferro-industrie (aluminium en zink). In dit emissiecijfer zitten alleen de directe emissies van de staalindustrie. De totale uitstoot is hoger, omdat er ook nog voor circa 6 Mton CO₂-eq. uitstoot plaats vindt door verbranding van restgassen in de energie-sector.

De voedings- en genotmiddelenindustrie (10%) en de bouwmaterialenindustrie (3%) maken de rest van de emissies uit. De emissies hierin zijn emissies door verbranding.

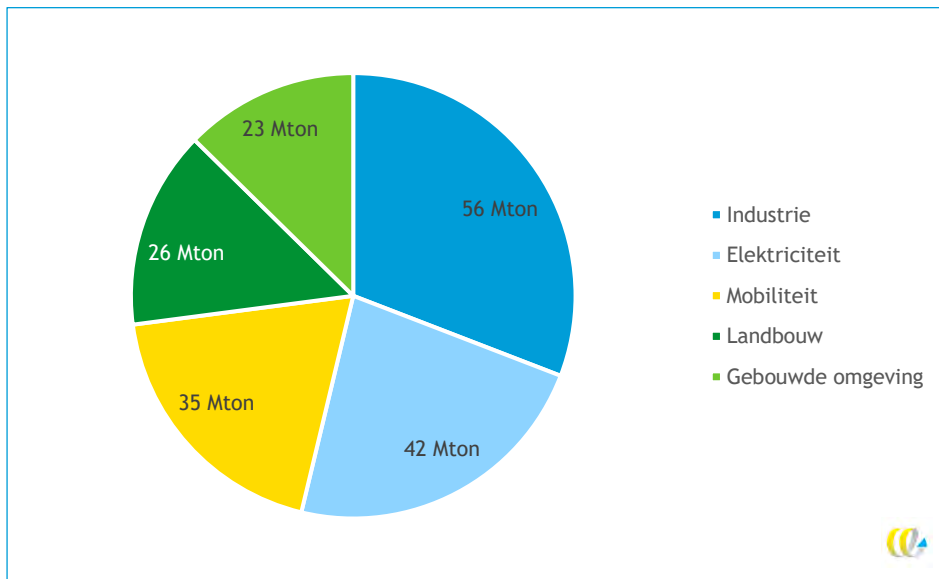
Figuur 9 - Emissies per energie-intensieve industriesector in 2019 in CO₂-eq.



Bron: CBS-data, 2019: www.opendata.cbs.nl/statline/CBS/nl/dataset/83989NED.

De industrie was in 2019 goed voor zo'n 30% van de totale Nederlandse uitstoot en was daarmee de grootste sector qua uitstoot.

Figuur 10 - Uitstoot van de gehele industrie vergeleken met andere sectoren 2019



Bron: CBS-data, 2019: www.opendata.cbs.nl/statline/CBS/nl/dataset/83989NED.

3 Welke energiebronnen, grondstoffen en technieken zijn nodig voor een fossielvrije industrie?

In dit hoofdstuk bekijken we de technische mogelijkheden om de energie-intensieve industrie fossielvrij te maken.

3.1 Welke energiebronnen (en strategieën) zijn er in een fossielvrije toekomst?

In een fossielvrije toekomst zijn er nog steeds veel energiebronnen, met elektriciteit uit zon en wind als belangrijkste goedkope en schaalbare bronnen. We onderscheiden de volgende strategieën en bronnen voor energie:

- **Besparing** van energie is noodzakelijk, omdat ook in een fossielvrije toekomst de opwek van energie grondstoffen benodigt met een impact op het milieu. De International Energy Agency noemt besparing de eerste brandstof: “energy efficiency is the first fuel”.
- **Zonne-energie** in de vorm van zonnepanelen levert betaalbare elektriciteit op en is algemeen toepasbaar. Door de continue schaalvergroting en technologieontwikkeling blijven zonnepanelen goedkoper worden. Een beperking van zonne-energie is de weersafhankelijkheid en de sterke seizoensafhankelijkheid op hogere breedtegraden, zoals in Nederland.
- **Windenergie** kan gewonnen worden door windmolens op land of op zee. Windmolens op land zijn de goedkoopste nieuwe energiebron en kunnen vrijwel overal geplaatst worden. Windmolens op zee produceren veel meer energie, maar tegen een fors hogere prijs en kunnen momenteel alleen in ondiepe wateren worden geplaatst (Lazard, 2021). Windenergie is ook sterk weersafhankelijk.
- **Biomassa** is schaars binnen de eisen voor duurzaamheid. Daarnaast kan niet alle biomassa ingezet worden als energiebron, omdat biomassa juist ook nodig is voor materialen en als grondstof voor de chemie. Nederland streeft ook naar een dergelijke hoogwaardige inzet van biomassa, in lijn met het SER-advies (SER, 2020).
- **Waterkracht** is wereldwijd al een belangrijke hernieuwbare bron. Waterkracht vereist echter dat er een rivier loopt met een flink hoogteverschil en is in Nederland niet op grote schaal toepasbaar. Daarnaast is waterkracht kwetsbaar voor droogte en dus voor klimaatverandering.
- **Geothermie** kan elektriciteit en warmte produceren uit de bodem. De ondergrond is echter lang niet overal geschikt om hoge temperaturen te leveren. In Nederland is de bodem met name geschikt voor de productie van warmte, maar niet voor elektriciteit.
- **Kernenergie** heeft flink hogere kosten dan andere bronnen door de lange bouwperiodes en grote projectrisico's. Daarnaast genereren kerncentrales radioactief afval, waar nog geen permanente oplossing voor is. Kernenergie is echter niet weersafhankelijk en kan zeker een plek hebben in een klimaatneutraal energiesysteem, maar de meeste projecten bevatten in 2050 slechts een beperkt aandeel kernenergie.

Zon en wind zijn de belangrijkste schaalbare bronnen voor hernieuwbare elektriciteit. Zij hebben een enorm potentieel door hun lage kosten en universele inzetbaarheid. Zonnepanelen en windmolens zijn gestandaardiseerde producten die in vrijwel iedere omgeving gebouwd kunnen worden.

3.2 Welke energiedragers zijn er in een fossielvrije toekomst?

Elektriciteit kan in bijna alle gevallen gebruikt worden ter vervanging van aardgas om energie te leveren aan een proces. Dit kan ook bij hogetemperatuurprocessen (750 - 900°C), zoals bijvoorbeeld een stoomkraker om kunststoffen te produceren. Dit vereist wel nieuwe technieken, maar die kunnen ontwikkeld worden.

Belangrijk voor een fossielvrij systeem is dat de elektriciteit hernieuwbaar is. In een elektriciteitssysteem gebaseerd op zon en wind, is er niet altijd voldoende opwek om de vraag te kunnen bedienen, maar daar zijn oplossingen voor. Met vraagsturing, opslag en elektriciteitscentrales op groene waterstof, zal er toch altijd voldoende duurzame elektriciteit zijn. De industrie kan hieraan meehelpen door haar processen zoveel mogelijk flexibel te maken, zodat productieprocessen vooral draaien op momenten dat er veel opwek uit zon en wind is.

Fossielvrije **groene waterstof** kan geproduceerd worden uit water en elektriciteit. Dat kan in Nederland en het kan technisch gezien ook geïmporteerd worden (via leidingen, gecomprimeerd of chemisch gebonden via schepen). Groene waterstof kan direct ingezet worden ter vervanging van de huidige fossiele waterstof in de raffinage- en kunstmestindustrie; ter vervanging van aardgas voor hogetemperatuurprocessen ($> 250^{\circ}\text{C}$), en voor de opwek van elektriciteit op momenten dat er geen hernieuwbare elektriciteit beschikbaar is.

In een klimaatneutrale wereld zal hernieuwbare elektriciteit de belangrijkste energiebron worden. Elektriciteit wordt nu voornamelijk geproduceerd door verbranding van (fossiele) brandstoffen. Direct gebruik van brandstoffen heeft nu dus vaak de voorkeur boven het gebruik van elektriciteit. In de toekomst wordt dat andersom: brandstoffen zullen geproduceerd worden uit hernieuwbare elektriciteit en direct gebruik van elektriciteit zal, waar mogelijk, de voorkeur hebben boven het gebruik van brandstoffen.

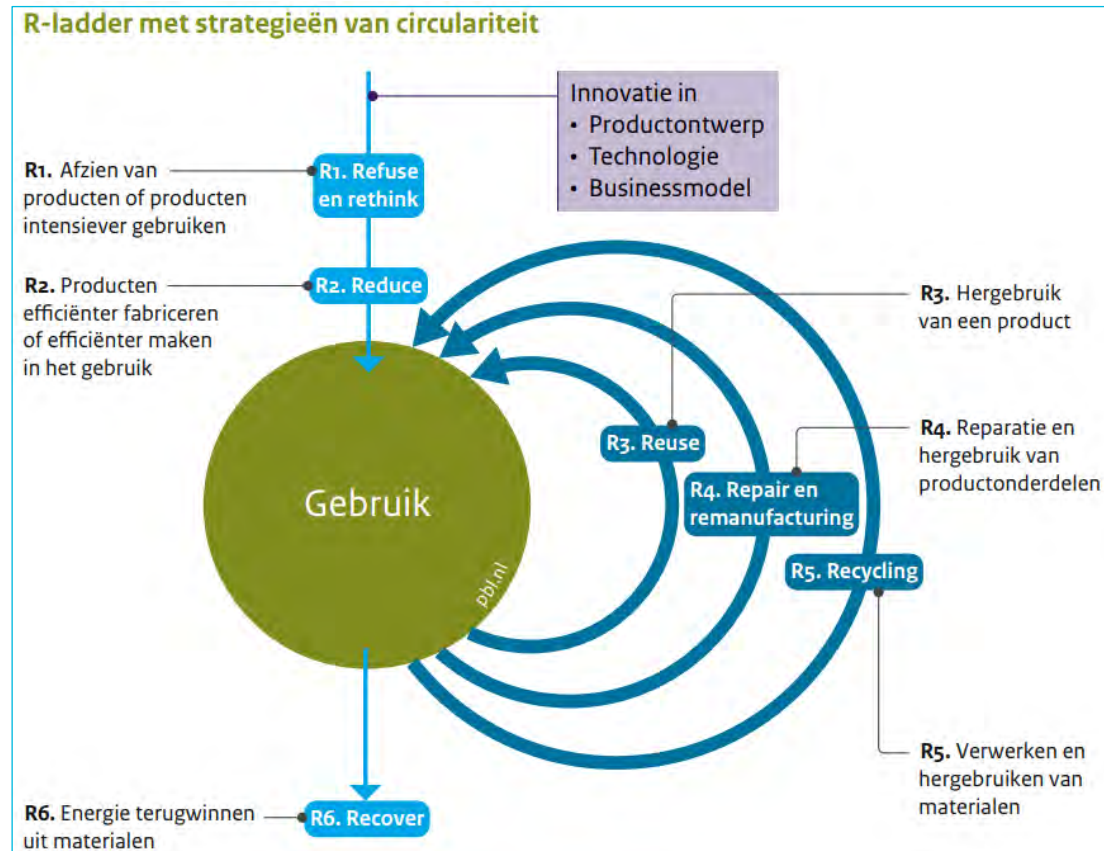
Restwarmte uit processen of **geothermie** kan ingezet worden in lagetemperatuurprocessen, zoals drogen.

3.3 De R-ladder en secundaire grondstoffen

Naast het gebruik van fossiele grondstoffen voor energie, past ook het gebruik van fossiele grondstoffen als basis voor materialen niet in een fossielvrije wereld. Fossiele grondstoffen zullen daarom moeten worden vervangen door alternatieven (bijvoorbeeld biograndstoffen, secundaire grondstoffen of niet-hernieuwbare niet-fossiele grondstoffen). Of er voldoende grondstoffen beschikbaar zijn om aan onze totale grondstofbehoefte te voldoen, is afhankelijk van de omvang van de vraag naar grondstoffen, en het aanbod in vervangende grondstoffen. Naast substitutie van grondstoffen zal allereerst op een reductie van de vraag naar grondstoffen moeten worden ingezet.

De circulaire economie draagt bij aan de grondstoffentransitie. De R-ladder (Figuur 11) geeft een prioritering van strategieën voor circulariteit, waarin gebruik van grondstoffen geminimaliseerd wordt, en hergebruik geoptimaliseerd. Hoe hoger de strategie op de ladder, hoe meer grondstoffen bespaard worden.

Figuur 11 - De R-Ladder met strategieën in volgorde van bijdrage aan circulariteit



Bron: (PBL, 2021).

De R-strategieën sluiten op de volgende manier aan bij de circulaire maatregelen die in het Nationaal Programma Circulaire Economie (Ministerie van I&W, 2023) worden benoemd (vermindering van grondstoffen, substitutie van grondstoffen, levensduurverlenging, hoogwaardige verwerking):

1. **Refuse en rethink (R1) en reduce (R2)** gaan over het direct verminderen van (fossiel) grondstoffengebruik. Manieren om dit te bereiken zijn: minder producten consumeren (refuse), producten te delen of ze efficiënter te ontwerpen/produceren (rethink, reduce). 'Rethink' kan ook betekenen dat fossiele en primaire grondstoffen worden vervangen door alternatieven met een lagere milieu-impact. Minder grondstoffengebruik kan ook bereikt worden door slimmer ontwerpen zodat er minder materiaal nodig is om dezelfde functie te bereiken (reduce, rethink).
2. **Reuse (R3), repair en remanufacturing (R4)** gaan over het verlengen van de levensduur van producten, bijvoorbeeld door het direct hergebruiken ervan, of door het repareren ervan. Dit laatste vraagt om productontwerp dat dit mogelijk maakt. Levensduurverlenging vertraagt de vraag naar grondstoffen.
3. **Recycling (R5)** gaat over het hoogwaardig verwerken van materialen en producten die aan het einde van hun levensduur zijn, zodat er een groter aanbod van hoogwaardige secundaire grondstoffen beschikbaar komt.

Na recycling komt verbranding, waarbij energie en sommige grondstoffen uit de bodemas van een afvalenergiecentrale teruggewonnen kunnen worden (**Recover**).

Naar verwachting is het niet mogelijk de volledige vraag naar (fossiele) grondstoffen te vervangen door alternatieve (secundaire) grondstoffen. Daarom zijn de circulariteitstrategieën die inzetten op een vermindering van de vraag naar grondstoffen, essentieel om een fossielvrije industrie te realiseren.

3.4 Welke grondstoffen zijn er in een fossielvrije toekomst?

Er zijn verschillende grondstoffen en strategieën denkbaar om de huidige grondstoffenvraag naar aardgas en aardolie in de industrie te vervangen:

- **Vraagreductie**, zoals hierboven omschreven in de R-ladder, is nodig om fossielvrij te kunnen produceren. Grondstoffen zijn schaars in een fossielvrij systeem. Dat geldt voor alle grondstoffen, inclusief grondstoffen geproduceerd uit hernieuwbare elektriciteit (groene waterstof en synthetische grondstoffen), omdat voor de productie van hernieuwbare elektriciteit ook schaarse grondstoffen nodig zijn (IEA, 2022b).
- **Secundaire grondstoffen** zijn materialen die worden teruggewonnen of gerecycleerd uit afval, bijproducten van productieprocessen, of afgedankte producten die opnieuw kunnen worden gebruikt als grondstof voor nieuwe producten. Dit is een brede groep aan materialen, waarmee virgin materialen deels vervangen kunnen worden. Recycling en terugwinning vervangen dan virginproductie. De beschikbaarheid van secundaire grondstoffen/materialen is afhankelijk van de hoeveelheid afval die vrijkomt.
- **Groene waterstof** kan ingezet worden als grondstof in productieprocessen, bijvoorbeeld voor de productie van kunstmest en bij raffinage. In een fossielvrij systeem is er geen ruwe aardolie, maar worden biobrandstoffen van biomassa gemaakt. Per liter bio-brandstof is meer waterstof nodig, maar omdat de vraag naar brandstoffen sterk afneemt in een fossielvrije toekomst, zal ook de waterstofvraag van de raffinage krimpen. Waterstof kan ook dienen als basis voor synthetische grondstoffen.
- **Biomassa** kan worden gemaakt uit allerlei stromen van plantaardige of dierlijke oorsprong. Naast productiestromen zoals hout, bieten of koolzaad, zijn er ook veel reststromen beschikbaar, zoals afgedankt frituurvet, houtsnippers, afval van de voedingsindustrie. Het heeft de voorkeur om biomassa zo hoogwaardig mogelijk in te zetten: eerst als materiaal in bijvoorbeeld de bouw, dan als grondstof voor chemicaliën, en pas als laatste voor (hogetemperatuur-)warmte of biobrandstof.
- **Synthetische grondstoffen** worden gemaakt uit groene waterstof en hernieuwbare CO₂. Hernieuwbare CO₂ is bijvoorbeeld CO₂ uit biomassa of afgevangen uit de lucht met Direct Air Capture. Het voordeel van synthetische grondstoffen is dat de productie schaalbaar is door simpelweg meer zon, wind en elektrolyse te bouwen. Het nadeel is dat dit erg duur is, waardoor de inzet van andere bronnen vaak de voorkeur geniet.

Synthetische brandstoffen kunnen een deel van de huidige vraag naar brandstoffen vervangen, maar de omvang in een fossielvrije wereld is beperkt: het aandeel elektrische auto's neemt verder toe onder stimulerend beleid en met de komst van zero-emissiezones in de Europese steden. In de binnenvaart kunnen elektriciteit en biobrandstoffen (bijvoorbeeld biodiesel) een deel van de diesel en stookolie vervangen. De kerosine, die nu ingezet wordt in de luchtvaart, kan uit biomassa of synthetisch gemaakt worden. Er is hiervoor nog geen concreet beleid.

Daarnaast zijn er veel andere grondstoffen nodig, zoals ijzererts voor staal, klei voor bakstenen, silicazand voor glas, of suikerbieten voor suiker. Deze grondstoffen zijn echter niet van fossiele oorsprong en hoeven dus niet vervangen te worden door een fossielvrij alternatief. Uiteraard geldt ook hiervoor dat het voor het milieu beter is om het gebruik terug te dringen en reparatie, hergebruik en recycling te stimuleren.



3.5 Is import een optie?

Zowel energie als grondstoffen kunnen geïmporteerd worden. De import van hernieuwbare energie zal echter fors duurder zijn dan de kosten die we gewend zijn voor de import van fossiele brandstoffen. Dit leggen we hieronder uit.

Fossiele brandstoffen zijn goedkoop te transporteren door hun hoge energiedichtheid en omdat ze bij kamertemperatuur vast (kolen) of vloeibaar zijn (aardolie en aardolie-producten). Daarom is er voor aardolie en kolen een wereldmarkt. Aardgas kan vloeibaar gemaakt worden als LNG bij -162°C , waar flinke kosten aan zijn verbonden. Sinds de jaren 2000 is er echter steeds meer handel in LNG.

Transport van elektriciteit over lange afstanden is veel lastiger dan transport van fossiele brandstoffen. Afstanden tot enkele duizenden kilometers zijn technisch gezien goed te overbruggen met gelijkspanningskabels (HVDC), maar dit betreft kapitaalintensieve megaprojecten die tot nu toe buiten China nog nauwelijks van de grond komen. Voor nog grotere afstanden is transport van elektriciteit niet goed mogelijk. Daarnaast is elektriciteit duur om voor langere perioden op te slaan in batterijen, omdat batterijen een hoge aanschafprijs hebben, die bij langetermijnopslag terugverdiend moet worden door de batterij maar een paar keer per jaar op te laden en te ontladen. Opslag in stuwmeren is wel goed haalbaar, maar daar is Noordwest Europa te vlak voor.

Import van elektriciteit is dus niet eenvoudig, maar de import van brandstoffen is eenvoudiger. Voor sommige toepassingen zijn nog brandstoffen nodig, zoals zeescheepvaart en luchtvaart, of elektriciteitsopwekking bij een gebrek aan zon en wind. Deze brandstoffen kunnen in Nederland geproduceerd worden uit elektriciteit, maar kunnen ook geïmporteerd worden. Het transporteren van deze brandstoffen wordt, afhankelijk van het type, lastiger en duurder dan dat nu het geval is, maar waarschijnlijk goedkoper dan het zelf produceren (zie Hoofdstuk 4).

Groene waterstof wordt gemaakt uit hernieuwbare elektriciteit en kan in principe over lange afstanden getransporteerd worden. Waterstof kan op verschillende manieren grootschalig getransporteerd worden:

- **Gasvormig** door nieuwe of bestaande buisleidingen. Over grotere afstanden (internationaal) is er veel energie nodig om de drukverliezen van de leidingen te compenseren met compressoren.
- **Vloeibaar** in schepen die lijken op LNG-tankers. Er is erg veel energie nodig om waterstof vloeibaar te maken bij -253°C .
- **Als LOHC** (Liquid Organic Hydrogen Carrier), waar een hulpmolecuul wordt gebruikt dat wordt 'opgeladen' en 'ontladen' met waterstof. Voor het ontladen zijn nog aanzienlijke hoeveelheden energie nodig.
- **Als ammoniak** in schepen. Ammoniak wordt gemaakt uit waterstof en stikstof en kan zonder omzetting gebruikt worden of terug worden gekraakt naar pure waterstof. Ammoniak wordt getransporteerd als vloeistof bij -33°C en atmosferische druk.

IRENA heeft onderzocht wat de goedkoopste manier is om waterstof te transporteren. Pijpleidingen zijn het meest aantrekkelijk voor kleinere afstanden (tot enkele duizenden kilometers). Bij langere afstanden worden de kosten van de aanleg en de energiekosten voor compressie te hoog. Hergebruik van bestaande pijpleidingen kan de kosten drukken en deze afstand dus oprekken. Voor grote hoeveelheden en afstand lijkt ammoniak op dit moment het meest aantrekkelijk. LOHC en vloeibare waterstof lijken slechts een ondergeschikte rol te gaan spelen.



Alle methoden om waterstof over lange afstanden te transporteren hebben echter omzettingverliezen, zo'n 20-40% voor LOHC (bij gebruik als waterstof) (Niermann, 2018) en ongeveer 50% voor ammoniak (bij gebruik als ammoniak) (Murray, C. J. L. et al., 2020), en daardoor hoge kosten (vloeibare waterstof en in mindere mate pijpleidingen). Er is dan meer hernieuwbare elektriciteit nodig om in de uiteindelijke energievraag te voorzien. Daarnaast hebben alle energiedragers een aanzienlijk lagere energiedichtheid dan fossiele brandstoffen. Transport van energie over lange afstanden zal dus duurder worden.

Transport van brandstoffen is echter goedkoop als er vraag is naar diezelfde brandstof, dus zonder dat het getransporteerde molecuul weer omgezet moet worden naar waterstof. Import van ammoniak, synthetische brandstoffen, pyrolyse-olie of biodiesel blijft dus relatief goedkoop. Deze brandstoffen kunnen vrij eenvoudig geïmporteerd worden via schepen, vergelijkbaar met de huidige import van ruwe aardolie.

De import van biomassa voor het gebruik als grondstof is alleen haalbaar voor biomassa met een relatief hoge economische waarde en dus vaak een relatief hoge energiedichtheid. Import van houtsnippers zal dus economisch haalbaar zijn, maar import van dunne mest waarschijnlijk niet. Hoogenergetische stromen kunnen dus goed elders verwerkt worden, maar laagenergetische stromen moeten lokaal verwerkt worden.

3.6 Welke technieken zijn nodig voor een fossielvrije industrie?

Om de energie-intensieve industrie fossielvrij te maken, zijn vervangende technologieën nodig. Een overzicht van de vervangende technologieën staat in Tabel 1.

Tabel 1 - Circulaire opties en nieuwe technologie die nodig is voor een fossielvrije industrie

Subsector	Huidige technologie	Voorbeelden van circulaire opties	Nieuwe technologie
Raffinage	Productie van fossiele brandstoffen met fossielgestookte installaties	R1: Minder reizen R1: Carpooling/collectief vervoer R1: Elektrificatie/ groene waterstof	<ul style="list-style-type: none"> – Productie van biobrandstoffen – Productie van synthetische brandstoffen – Elektrolyse voor waterstof – Laadinfrastructuur voor EV's
Organische basischemicaliën	Stoomkraken van fossiele nafta	R1: Verlagen vraag naar chemicaliën R1: Chemicaliën gemaakt uit biomassa, CO ₂ , etc. R2/R3: Anders ontwerpen van eindproducten, zoals dunnere of herbruikbare verpakkingen R5: Efficiëntere recycling (mechanisch en chemisch)	<ul style="list-style-type: none"> – Betere mechanische recycling – Chemische recycling – Elektrische kraken van bio-/synthetische nafta – Andere productieroutes biochemicaliën (bioraffinage)
Kunstmest	Productie van waterstof uit aardgas, ammoniaksynthese met Haber-Bosch	R2: Kringlooplantbouw, precisie-landbouw R2: Grotendeels plantaardig dieet R5: Terugwinning van meststoffen uit rioolwater	<ul style="list-style-type: none"> – Vervanging van grijze door groene waterstof uit elektrolyse – Co-elektrolyse van lucht en water voor directe productie van ammoniak



Subsector	Huidige technologie	Voorbeelden van circulaire opties	Nieuwe technologie
Industriële gassen	Productie van waterstof en koolmonoxide uit aardgas (voor gebruik in raffinage)	Zie circulaire opties raffinage/ gekoppeld aan circulaire opties raffinage	<ul style="list-style-type: none"> – Vervanging van grijze door groene waterstof uit elektrolyse – Koolmonoxide uit biogas of co-elektrolyse van CO₂ en stoom
Staalindustrie	Hoogoven (blast furnace) op steenkool	R1: Vraagvermindering door substitutie van staal met alternatieven zoals hout, bioplastic, etc. R2: Minder auto's, minder conservenblikken R5: Secundair staal beschikbaar houden voor recycling	<ul style="list-style-type: none"> – Vervanging hoogoven door combinatie van reductie-installatie op waterstof (DRI) en vlamboogoven (EAF) – Technieken die hoge kwaliteit staal kunnen verkrijgen uit gemengde stroom van secundair staal
Non-ferrometalen (aluminium en zink)	Elektrolyse, gasgestookte smeltovens	R5: Efficiëntere terugwinning metalen uit afval en bodemassen	<ul style="list-style-type: none"> – Inductieovens om metaal te smelten – Ontwikkeling nieuwe technologieën voor hogere terugwinning
Keramische industrie	Gasgestookte keramiekoven	R1: Alternatieve materialen, bijv. houten gevelbekleding R2: Slanker ontwerpen R3: (Bak)stenen en dakpannen hergebruiken	<ul style="list-style-type: none"> – Elektrische keramiekoven – Keramiekoven op waterstof
Glasindustrie	Gasgestookte glasoven	R1: Verpakkingen van alternatief materiaal R2: Hervulbare verpakkingen R3: Hergebruik tafelglas	– Elektrische glasoven
Papierindustrie	Droogproces met stoom uit gasboiler	R1: Verzenden in doos van product zelf R3: Herbruikbare dozen	<ul style="list-style-type: none"> – Warmtepompen – Elektrische boiler
Voedings- en genotmiddelenindustrie	Gasgestookte ovens, drogers, boilers	R0: Minder bewerkt voedsel eten R2: Minder voedselverspilling R8: Restproducten verwerken tot nieuw voedsel	<ul style="list-style-type: none"> – Warmtepompen – Elektrische boiler – Elektrische ovens – Warmtepompdroger

Bron: (EP, 2020).

Een aantal van de bestaande processen zullen aangepast worden, bijvoorbeeld de vervanging van een gasgestookte boiler door een e-boiler.

Sommige processen zijn zodanig anders, bijvoorbeeld bioraffinage ter vervanging van fossiele raffinage, dat het volledige proces vervangen moet worden in een fossielvrije wereld. Biomassa speelt een belangrijke rol in het voorzien in grondstoffen voor het maken van materialen en producten en tot op zekere hoogte voor biobrandstoffen en energie. De opbouw van biomassa is anders dan olie of gas, wat ervoor zorgt dat er nieuwe processen nodig zijn, en nieuwe productontwerpen. Samenwerking over de keten is hierbij belangrijk.

Daar komt bij dat niet alle producten of halffabricaten die op dit moment (in Nederland) gebruikt of geproduceerd worden, nodig zijn in een wereld zonder fossiele grondstoffen.

We zien immers nu al dat benzineauto's vervangen worden door elektrische auto's. De aanpassingen van de technologieën in de industrie zijn afhankelijk van de energiedragers of producten die er gemaakt worden.

3.6.1 Technieken om secundaire en biobased grondstoffen te produceren

Om grondstoffen in een fossielvrije industrie beschikbaar te maken, zijn technieken nodig om grondstoffen terug te winnen uit bestaande materialen en producten en technieken om biobased materialen te produceren.

In een fossielvrije industrie worden materialen die al in de omloop zijn (bijvoorbeeld afgedankte producten en recycklaat) belangrijke grondstoffen. Zo ontstaat een vraag naar industriële recycling. Deze 'nieuwe' industrie kan overigens ook energie-intensief zijn. Welke recyclingprocessen gunstig zijn in Nederland, zal afhangen van het aandeel van de kosten van energie in het recycleproces; de waarde van het recycklaat en de kosten van transport van het te recyclen materiaal. Daarnaast zal beleid (denk aan belasting op virgin plastics) gericht op hergebruik van deze grondstoffen een belangrijke driver vormen om markten voor secundaire grondstoffen te ontwikkelen.

Inzameling- en scheidingstechnieken, hergebruik en recycling

Voor het halen van hogere hergebruikpercentages bij materialen, kunnen technieken, naast beleid, een rol spelen. Het uitbreiden van gescheiden inzameling voor afval en het optimaliseren en opschalen van voorsorteer- en nascheidingstechnieken kunnen ervoor zorgen dat meer materialen en grondstoffen teruggewonnen kunnen worden.

Inzetten op behoud van kwaliteit en hergebruik van hoge kwaliteit materialen zorgt voor het langer in kringloop houden van deze materialen en dus een groter aandeel secundaire grondstoffen op lange termijn, omdat minder materiaal verloren gaat dan bij recycling. Wel kan het zijn dat materialen niet direct beschikbaar komen. Het overgrote deel van het staal wereldwijd (meer dan 90%) wordt bijvoorbeeld ingezet voor middel- of langetermijntoepassingen (World Steel Association). Dat geldt ook voor bouwmaterialen waarbij bouwgrondstoffen pas na langere tijd terugkomen als secundair bouw materiaal.

Asfalt kan hoogwaardig gerecycled worden, door steen en mastiek in oud asfalt van elkaar te scheiden. Zo kunnen de mastiek en de stenen in nieuwe deklagen toegepast worden. Onbeschadigd of licht beschadigd hout kan ook hoogwaardig ingezet worden door bijvoorbeeld Cross Laminated Timber.

Technieken voor kunststofrecycling

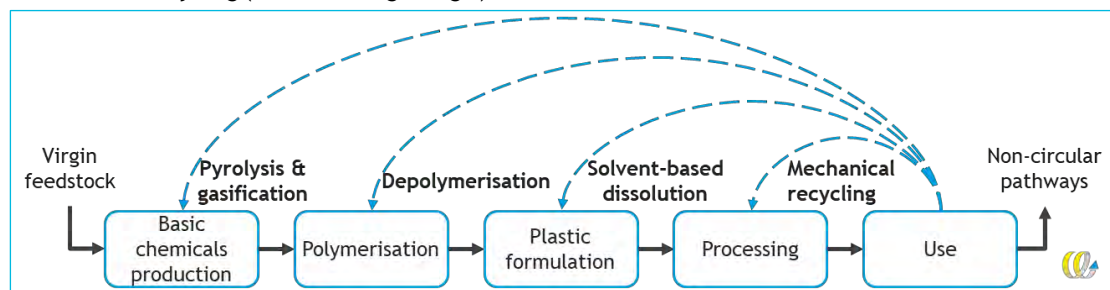
Over het algemeen geldt dat recycling energie-intensiever wordt naarmate materialen tot kortere moleculen worden afgebroken (tot chemische bouwstenen), omdat er daarna meer omzettingstappen nodig zijn om weer nieuwe producten te maken (Figuur 12). Kunststoffen bieden binnen de energie-intensieve industrie een groot potentieel voor toename in recycling, omdat nu slechts een deel van de plastics gerecycled wordt, terwijl voor glas dit percentage bijvoorbeeld vele malen hoger ligt. Vergassing en pyrolyse kost aanzienlijk meer energie dan mechanische recycling. Bij pyrolyse wordt een deel van de feedstock intern verbrand voor het proces. Hierdoor wordt zo'n 50% procent van de afval-input uiteindelijk nieuw plastic (de 'plastic-to-plastic yield') (CE Delft, 2022b). In een fossielvrije industrie zou de CO₂ die vrijkomt uit de verbranding, opnieuw ingezet moeten worden (CCU) of opgeslagen worden (CCS). Het aandeel dat energie uitmaakt in de kosten, kan in het laatste geval toenemen.



Mechanische en chemische recycling zijn beide nodig. Waar het kan, heeft mechanische recycling, waar minder energie voor nodig is en meer grondstoffen behouden worden, de voorkeur ten opzichte van chemische recycling. Als het materiaal dat middels recycling gemaakt wordt, een hoge economische waarde heeft, zijn de kosten voor energie niet leidend in de businesscase. We verwachten dat recyclingprocessen die hoogwaardige producten maken, of processen met een relatief laag energiegebruik, een gunstige businesscase geven in een fossielvrije industrie in Nederland. Op dit moment concurreren mechanische en chemische recycling met elkaar in de markt.

Het kan dus zijn dat afvalplastic uit Nederland dat geschikt is voor chemische recycling, verscheept wordt naar bijvoorbeeld Afrika, het Midden-Oosten, Noord- en Zuid-Amerika en Australië, of binnen Europa naar Spanje/Portugal, waar goedkope elektriciteit beschikbaar is voor chemische recycling.

Figuur 12 - Recyclingprocessen voor kunststoffen: productie van kleine moleculen (energie-intensief) naar mechanische recycling (relatief weinig energie)



Bron: (Crippa, M. et al., 2019).

Er kunnen andere redenen zijn om bepaalde processen in Nederland te willen, ondanks een toename in kosten. Voorbeelden zijn: voorzieningszekerheid van materialen, geschikte - infrastructuur, aanwezige kennis over een proces.

4 Welk effect heeft hernieuwbare energie op de industrie?

In dit hoofdstuk maken we een analyse op basis van beschikbaarheid en betaalbaarheid van energie binnen een internationale context. We gaan ervan uit dat beschikbaarheid en prijs de zwaarstwegende voorwaarden zijn voor de energie-intensieve industrie.

Het is belangrijk op te merken dat dit niet de enige voorwaarden zijn voor een energie-intensieve industrie. Geschikte infrastructuur, een stabiel politiek klimaat en beschikbaarheid van personeel zijn voorbeelden van andere voorwaarden die bijdragen aan een positief vestigingsklimaat. Desalniettemin zijn betaalbaarheid en beschikbaarheid leidend in deze analyse.

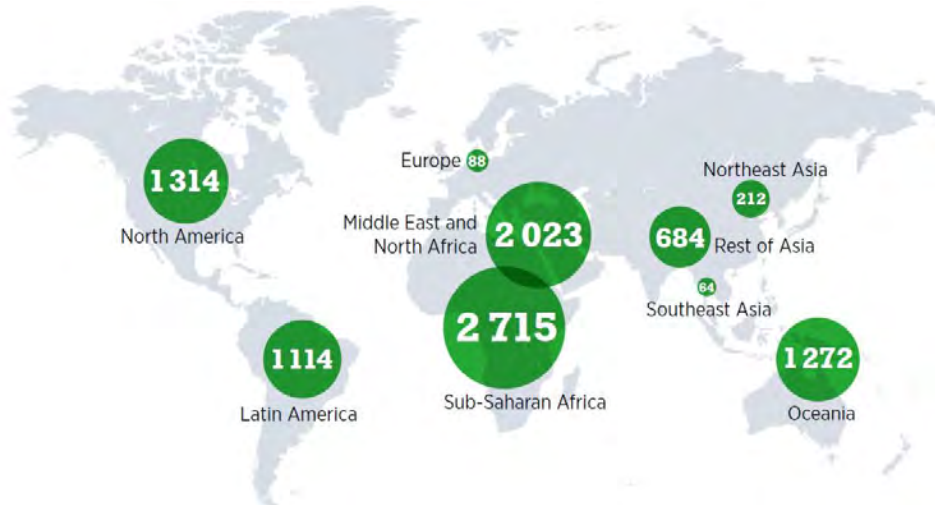
4.1 Grotere internationale verschillen in beschikbaarheid van betaalbare energie

De verschillen in kosten van energie tussen landen en werelddelen zullen groter worden dan nu het geval is.

Er zitten grote verschillen in de condities voor zon en wind over de wereld, zowel qua weersomstandigheden (zonuren, windsnelheid) als de hoeveelheid geschikt land. Daardoor ontstaan er grote prijsverschillen voor hernieuwbare elektriciteit. Met name op plekken rond de evenaar waar veel zon en wind is, en locaties waar het geothermiepotentieel groot is (IJsland), zullen grote hoeveelheden goedkope groene elektriciteit beschikbaar komen.

Dit vertaalt zich door in prijsverschillen voor waterstof, waar eventuele waterschaarste een extra beperking kan zijn. Dit is te zien in Figuur 13, waar een modellering van IRENA is weergegeven van het potentieel van *goedkope* groene waterstof in 2050. Afrika, het Midden-Oosten, Noord en Zuid Amerika en Australië hebben een groot potentieel, terwijl het potentieel van Europa en Zuidoost Azië in verhouding klein is. Deze laatste regio's kunnen wellicht wel voldoende waterstof produceren voor hun eigen behoefte, maar alleen tegen (veel) hogere kosten, waardoor import mogelijk aantrekkelijker is dan zelf produceren.

Figuur 13 - Technisch potentieel voor groene waterstof goedkoper dan 1,5 \$/kg in 2050, in EJ (1018 J)



Bron: (IRENA, 2022).

4.2 Noordwest-Europa zal netto importeur van energie blijven

Noordwest Europa heeft enerzijds een hoge vraag naar energie door een hoog welvaartsniveau en een hoge bevolkingsdichtheid, en anderzijds een lage beschikbaarheid van betaalbare hernieuwbare energie, vergeleken met andere delen in de wereld. We gaan van een overvloed aan betaalbare fossiele energie naar een situatie van schaarste aan betaalbare hernieuwbare energie. De positie van de energie-intensieve industrie verandert daarmee. Europa kan dan zelf energie produceren (tegen hogere kosten) voor gebruik in industriële processen, een deel van haar energie (blijven) importeren, of energie-intensieve half-fabricaten importeren.

Een hoge vraag en een laag aanbod van betaalbare hernieuwbare energie zullen Europa dwingen om zo efficiënt mogelijk met energie om te gaan. Hernieuwbare energie kan dan het best als volgt worden ingezet:

1. Bespaar zoveel mogelijk energie.
2. Pas efficiënte elektrificatie toe waar mogelijk.
3. Zet flexibele productie in waar mogelijk.
4. Zet waterstof, waar nodig, direct in als energiedrager, zonder het eerst om te zetten naar een ander molecuul voor transport/gebruik.
5. Zet de overgebleven energie in voor de productie van energie-intensieve producten en op waterstof gebaseerde producten.

Het verschil tussen de energiebehoefte en de eigen opwekking zal geïmporteerd worden. De import kan gereduceerd worden door meer zelf te produceren, maar er zal een evenwicht ontstaan, waarbij de kosten van import gelijk zijn aan die van de extra eigen productie. Ook voor de import van energie is er een volgorde op basis van financiële aantrekkelijkheid:

1. Importeer energie-intensieve producten die goedkoop te transporteren zijn:
 - Op waterstof gebaseerde producten, bijvoorbeeld ammoniak, methanol en synthetische kerosine (maar niet waterstof zelf);
 - Energie-intensieve halfproducten, bijvoorbeeld ruwijzer en aluminium;

- De import van deze producten zal altijd goedkoper zijn dan de import van pure waterstof en productie in Nederland. Waterstof is immers veel duurder om te transporteren dan deze producten, terwijl de kosten voor omzetting elders waarschijnlijk lager liggen.
2. Importeer elektriciteit uit nabijgelegen gebieden met gelijkstroomkabels.
 3. Importeer waterstof via pijpleidingen uit nabijgelegen gebieden. Voor Noordwest-Europa is import uit Spanje, Portugal en Noord-Afrika kansrijk.
 4. Importeer waterstof als vloeibare waterstof, LOHC of ammoniak voor reconversie naar waterstof. Dit is de duurste manier om energie te importeren.

4.3 Gevolgen voor de industrie

Door schaalvoordelen en leercurves van productietechnieken zal de prijs van hernieuwbare energiedragers, zoals groene elektriciteit, en groene waterstof flink dalen. Daartegenover staat dat de vraag naar groene energiedragers vanuit sectoren buiten de industrie (zeescheepvaart, luchtvaart, mobiliteit, woningen) flink zal toenemen. Dat kan tot situaties van schaarste leiden. Zeker in de transitiefase zal hernieuwbare energie in Noordwest-Europa duurder zijn dan fossiele energie nu. Daarbij komt dat hernieuwbare energie blijvend duurder zal zijn in Noordwest-Europa dan in overige werelddelen, zoals gedemonstreerd in dit hoofdstuk. De industrie zal zich aan moeten passen aan deze nieuwe realiteit.

Zuiver economisch gezien betekent dit dat energie-intensieve producten die goed te transporteren zijn, niet langer competitief te produceren zijn in Nederland. Zonder aanvullend industriebeleid zal dit voor sommige industrieën betekenen dat het energie-intensieve deel van de productie zich zal verplaatsen naar buiten Nederland (en mogelijk buiten Europa).

Energie maakt voor bepaalde processen in de energie-intensieve industrie een groot onderdeel van de productiekosten uit, soms meer dan 35%. Gemaakte kapitaalinvesteringen zijn in deze specifieke processen een kleiner onderdeel van de totale kosten. De prijs van beschikbare hernieuwbare energie zal bepalend zijn voor de vestigingslocatie van deze productieprocessen. De productie van bepaalde halffabricaten, zoals ruwijzer en aluminium, kan dan (gemiddeld over een jaar) te duur worden in Nederland. Het is dan economisch voordeliger om halffabricaten te importeren.

De minder energie-intensieve verwerking van halffabricaat tot eindproduct kan wel competitief blijven in Noordwest-Europa. Dit geldt bijvoorbeeld voor de kunstmestindustrie, waar de productie van ammoniak vervangen kan worden door import, terwijl de verwerking van ammoniak tot kunstmest mogelijk wel toekomstbestendig is. Ook in de staalindustrie is een soortgelijke opsplitsing te maken tussen de productie van ruwijzer en de verwerking van ruwijzer en schroot tot staalproducten. Daarmee zou er in de Nederlandse economie vooral plek zijn voor sectoren die veel toegevoegde waarde leveren aan de economie per gebruikte eenheid energie, terwijl energie-intensieve industrieën door creatieve destructie moeilijker hun toekomst kunnen veiligstellen.

De overblijvende industrie zal haar energieverbruik moeten terugdringen door energiebesparing om competitief te blijven. Daarnaast zal de industrie waar mogelijk moeten elektrificeren om zo gebruik te kunnen maken van de goedkoopste energiedrager: elektriciteit. Industrieën waarbij energiekosten slechts een klein deel van de kostprijs uitmaken, kunnen eventueel ook gebruikmaken van duurdere energiedragers.

Zonder industriebeleid zal een deel van de industrie mogelijk dus verdwijnen uit Europa om economische redenen. De Europese Unie werkt aan de Net-Zero Industry Act om kritische



industrie te behouden in Europa. Dit toekomstige steunpakket doet daarentegen niets af aan de dynamieken geschetst in dit hoofdstuk: Europa kan haar industrie behouden, maar enkel tegen hogere kosten dan import. Het is dus een keuze tussen goedkope producten en onafhankelijkheid van andere landen.

De huidige energiecrisis als voorproefje van de toekomst?

Sinds het najaar van 2021 zijn de energieprijzen in Europa sterk gestegen als gevolg van de gascrisis die volgde op het uitbreken van de oorlog in Oekraïne. Door het wegvallen van Russisch pijpleidinggas, stegen de gasprijzen in Europa enorm. Deze crisis had grote gevolgen voor de industrie in Nederland en Europa, en biedt een inkijkje in welke industrieën het meest gevoelig zijn voor hoge energieprijzen ten opzichte van het buitenland in de vorm van het tijdelijk 'uitzetten van hun productieprocessen'. Dat zijn voorbeelden waarbij de marginale kosten van energieprijsstijgingen niet meer opwegen tegen de marginale opbrengsten van productie (de productverkoop die met die energie mogelijk wordt gemaakt):

- De chemie, kunstmestproductie, aluminium- en zinkfabrikanten hebben hun productie allemaal sterk afgeschaald. Aluminiumfabrikant Aldel is failliet gegaan.
- Ook andere sectoren werden geraakt, zoals de voedselindustrie en de papierindustrie, maar zij zijn grosso modo wel door blijven produceren op min of meer gelijk niveau. De meeste verwerkende industrieën konden de energiekosten doorbelasten in de (grotendeels binnenlandse, en dus afgeschermden) gestegen productprijzen. Dat heeft de inflatie aangewakkerd.
- Er zijn veel plannen aangekondigd voor de import van waterstof en met name ammoniak: Koole Terminals, Horisont Energi, Equinor, Var Energi, Air Products, Gunvor, Gasunie, HES International, Vopak³, OCI, Global Energy Storage⁴ en Yara⁵ werken allemaal aan plannen voor importterminals voor ammoniak, alleen of in consortia.

³ www.vopak.nl/nieuws/vlissingen/vopak-bereidt-zich-voor-op-import-groene-ammonia-north-sea-port

⁴ www.industrielinqs.nl/2022/09/01/fluxys-en-advario-ontwikkelen-ammoniakterminal-in-antwerpen/

⁵ www.omroepzeeland.nl/nieuws/14911847/kunstmestfabriek-yara-schroeft-ammoniakproductie-nog-verder-terug



5 Welk effect heeft de grondstoffentransitie op de industrie?

Fossiele brandstoffen worden ook als grondstof gebruikt, bijvoorbeeld bij de productie van kunststoffen, basischemicaliën, cosmetica, smeermiddelen, verf, lak, etc. Bij gebruik en bij verbranding van deze grondstoffen aan het einde van de levensduur, komt fossiel CO₂ vrij. Om binnen het koolstofbudget te blijven, zal er ook een grondstoffentransitie moeten plaatsvinden.

Deze grondstoffentransitie houdt in dat fossiele grondstoffen vervangen worden door gerecyclede materialen, synthetische grondstoffen op basis van hernieuwbare elektriciteit, of biobased materialen. De opties zijn dus secundair, duurzaam biobased en duurzaam synthetisch.

In dit hoofdstuk beschrijven we effecten van een grondstoffentransitie naar fossielvrij op de Nederlandse industrie. Aanvullend benoemen we wat hiervoor nodig is, en welke andere ontwikkelingen bij kunnen dragen.

5.1 Gevolgen internationale positie op huidige en nieuwe industrie

In een fossielvrije industrie zijn afval, biomassa en synthetische brandstoffen de grondstoffen voor productieprocessen. Afval kan ingezet worden voor recycling. Biomassa of synthetische brandstoffen zullen aanvullen waar recycling niet voldoende materialen geeft. De beschikbaarheid van goedkope (kostbaar te vervoeren) grondstoffen heeft invloed op de locatie van processen in de industrie. Omdat in Nederland weinig biomassa beschikbaar is, en omdat elektriciteit elders goedkoper is, is het waarschijnlijk dat biobrandstoffen, half-fabricaten en synthetische brandstoffen geïmporteerd worden in een fossielvrije toekomst.

De waarde van afval is nu nog laag, maar bij toenemende vraag gaat deze omhoog. Afval kan geïmporteerd en geëxporteerd worden voor recycleprocessen. Het type recycling dat wordt ingezet, wordt bepaald door energiekosten en de waarde van het recyclelaat dat geproduceerd wordt. Bijvoorbeeld voor pyrolyse: wanneer kostbare hernieuwbare energie ingezet moet worden voor de productie van pyrolyse-olie, en de waarde van pyrolyse-olie niet hoog is, kan import van pyrolyse-olie voor de productie van een hoogwaardig product aantrekkelijker zijn. In Nederland zal recycling ingezet worden met een relatief lage energievraag en een hoogwaardig recyclelaat.

De analyse is gebaseerd op de mogelijkheid van goedkope beschikbare secundaire grondstoffen, biomassa, en synthetische grondstoffen in Nederland. Er kunnen andere redenen zijn om toch in Nederland te produceren. Voorbeelden daarvan zijn: beschikbare infrastructuur, kennis, of een keuze vanuit beleid om (een deel van) de productie binnen Nederland te houden/op te zetten. Een dergelijke ontwikkeling zien we bij chemische recycling.



Biobased productie is in een Nederlandse fossielvrije industrie toegespitst op hoogwaardige, kennisintensieve productie. Het gaat om de verwerking van voorbewerkte biomassa (reststromen), of zelfs polymeren voor de productie van hoogwaardige producten, zoals cosmetische en farmaceutische artikelen, bouwmaterialen, verf, of voor kennisintensieve bewerkingsstappen. Daarvoor zullen biomassa met een hoog koolstofgehalte, halffabricaten of bio-oliën geïmporteerd worden. Verwerking van biomassa reststromen tot kunststofproducten vindt ook plaats in Nederland, in beperkte omvang, op basis van beschikbare biomassa reststromen in Nederland.

5.2 Afname in consumptie

Bij een omschakeling van fossiele grondstoffen naar biogene grondstoffen en synthetische grondstoffen treden ook veranderingen op in de concurrentiepositie van de Nederlandse industrie. In een fossielvrije industrie ontstaat snel schaarste, omdat de productie afhankelijk is van schaarse bronnen als afval en biomassa. Hierdoor worden producten kostbaarder. Als grondstoffen (en daarmee producten) duur zijn, wordt circulariteit aantrekkelijker. Dat betekent dat het aantrekkelijker wordt om minder producten en minder materialen te gebruiken, meer her te gebruiken, te repareren en te recycelen. Deze ontwikkeling zal niet vanzelf gaan.

Om een fossielvrije industrie te realiseren die in de vraag kan voorzien, is beleid nodig om de vraag te reduceren. Een afname in vraag naar materialen zou kunnen door bijvoorbeeld een aanpassing van levensstijl en een sterke toename in hergebruik en recycling van producten. Om dat te realiseren is normering en/of beprijzing nodig.

Andere ontwikkelingen, zoals EcoDesign, product as a service, deeleconomie en verlengen van een garantietermijn, kunnen bijdragen aan een afname in consumptie. We zien dit niet als autonome trends. Om ervoor te zorgen dat deze ontwikkelingen groeien en tot een afname in vraag naar materialen leidt, is passend beleid en ketensamenwerking nodig. Het delen van elektrische scooters bijvoorbeeld, leidt tot een afname in vraag als het een eigen scooter of een auto vervangt, maar niet als het de fiets vervangt (CE Delft, 2021b). De Europese Commissie stelt in de nieuwe EcoDesign Directive een uitbreiding van EcoDesign-voorwaarden voor specifieke productgroepen. Daardoor moeten producten langer meegaan, waardoor de vraag naar materialen voor die producten afneemt. Dit heeft effect op de productie van de industrie, maar wel alleen voor delen van de industrie die materialen produceren voor de productgroepen die onder de EcoDesign Directive vallen.

We zien geen autonome trend in de afname in consumptie. Wel kan een fossielvrije industrie bijdragen in een afname in consumptie, omdat schaarste in secundaire grondstoffen, afval en duurzame biograndstoffen producten kostbaarder kunnen maken.

5.3 Hergebruik van materialen en producten

In een fossielvrije industrie worden materialen schaars, waardoor hergebruik van materialen en producten interessanter wordt. De invloed op de Nederlandse industrie is dan bijvoorbeeld een afname in productie van bouwmaterialen (aluminium, glas) en een afname in productie van plastics voor producten met een lange levensduur. Plastic onderdelen van auto's kunnen bijvoorbeeld waardevol zijn in een fossielvrije industrie, waardoor een groot deel hergebruikt wordt, met afname in virginproductie tot gevolg. Productie van plastics voor korte toepassingen, zoals voedselverpakkingen, zal waarschijnlijk niet afnemen, omdat deze materialen minder geschikt zijn voor direct hergebruik. Recycling is dan waarschijnlijker.

Een toename in hergebruik van materialen vereist aanpassingen in het ontwerp van producten, in de inzameling van deze producten en verwerkingslocaties. Hiervoor is samenwerking in de keten nodig. Een toename in hergebruik van producten draagt bij aan een verlengde levensduur en een afname van de vraag naar virgin producten. Voorbeelden zijn modulair bouwen en tweedehands kleding. Een groter hergebruik van producten zorgt voor een afname in de productieomvang van de industrie. Hetzelfde geldt voor materialen: materialen kunnen opnieuw ingepast worden in producten, waardoor er minder productie van virgin materialen nodig is. In de huidige situatie verwachten we geen grote autonome ontwikkeling in het hergebruik van materialen.

5.4 Secundaire grondstoffen

In een fossielvrije industrie zijn secundaire grondstoffen waardevol. Recycling zal toenemen in een fossielvrije industrie, om materialen terug te kunnen winnen en in te zetten voor de productie van nieuwe materialen. Hiervoor is het nodig dat recycling, gescheiden inzameling en nasortering van afval wordt gestimuleerd.

Voor de metaalindustrie in Nederland kan het aandeel schroot toenemen, vooral als het proces verschuift van het omzetten van ijzererts naar een uitbreiding van de verwerking van schroot tot staalproducten. Voor de andere industrieën verwachten we geen grote toename in recycling. Papier en karton worden al met name uit oud papier gemaakt. Wel zijn er nog winsten te behalen door zwerfafval te verminderen en inzameling te verhogen. De glasindustrie gebruikt ook vooral gerecycled glas in de productie.

Veel van de geproduceerde materialen komen niet direct beschikbaar in de vorm van afval, maar blijven nog een tijd aanwezig in producten met een lange levensduur. Een toename in de wereldbevolking betekent dan dat er niet voldoende grondstoffen beschikbaar zijn om deze in de omloop te krijgen voor een circulaire economie. Samen met procesverliezen in recycling zorgt dit voor een mismatch tussen de vraag en het aanbod van afgedankt plastic (Ministerie van I&W & Ministerie van EZK, 2018). Dat betekent dat er een vraag naar andere koolstofbronnen, zoals afgevangen CO₂ en biomassa, ontstaat.

Op dit moment vormen secundaire materialen wereldwijd slechts 7,2% van de materiële input in de wereldeconomie. Voor kunststofrecycling geldt dat er nog een grote slag te halen is. Slechts ongeveer een derde van de kunststofverpakkingen wordt gerecycled. Plastic verpakkingen bestaan vaak uit veel verschillende soorten plastic, wat het lastig recycelen maakt. De ontwikkeling van beleid rondom plastic hergebruik en -recycling kan zorgen voor een grote toename in het percentage gerecycled plastic. We verwachten een toename in recycling van kunststoffen in een fossielvrije wereld in 2037, mits daarvoor stimulerend/normerend beleid wordt gevoerd.

5.5 CO₂ en waterstof als grondstoffen

CO₂ en waterstof zijn bouwstenen voor basischemicaliën en uiteindelijk voor allerlei producten. CO₂ kan afgevangen worden of uit de lucht via Direct Air Capture (DAC) gewonnen worden. DAC kost veel elektriciteit, en de beschikbaarheid van CO₂ via deze technologie nemen we als onwaarschijnlijk in Nederland, op basis van de internationale concurrentie op elektriciteitsprijs.

CO₂-afvang en -gebruik (Carbon Capture and Use of CCU) is wel een mogelijkheid om koolstofatomen uit procesgassen terug te winnen. Op dit moment wordt dit voor fossiele processen voorgesteld. In een fossielvrije toekomst kan CO₂-afvang als toevoeging gelden



voor biobased productie en voor chemische recycling. De beschikbaarheid is dan direct gelinkt aan de beschikbaarheid van goedkope duurzame biomassa in Nederland en van secundaire kunststoffen. Deze is niet groot, waardoor het onwaarschijnlijk is dat processen die gebruikmaken van CO₂ en waterstof om een halffabricaat of product te maken, in Nederland plaatsvinden. Import van de halffabricaten zoals polymeren, is een waarschijnlijker toekomstscenario.

5.6 Toename van biobased materialen

In een fossielvrije toekomst zullen fossiele materialen voor een deel vervangen worden door biobased materialen. Naar verwachting zal er voorbewerking van biomassa met een hoog watergehalte elders plaatsvinden, of zelfs productie van biobased producten op plekken waar tegen lage kosten voldoende biomassa beschikbaar is.

In Nederland is te weinig biomassa beschikbaar om een volwaardige biobased economy op te kunnen zetten (Wageningen University & Research, 2017). Dat betekent dat er import van biobased producten, of import van biomassa nodig zal zijn. Het is onwaarschijnlijk dat biomassa met een hoog watergehalte ver getransporteerd wordt, omdat het transport dan te veel energie vereist voor een te lage opbrengst in energie of materiaal. Voorbeelden van biomassa met een hoog aandeel water zijn: rioolslib, mest of de natte GFT-fractie. Biomassa met een hoog koolstofgehalte en weinig water, zoals gebruikte frituurolie of getorreficeerd hout, kunnen wel over lange afstanden getransporteerd worden.

De mate waarin biobased productie toeneemt in Nederland is onder andere afhankelijk van de beschikbaarheid van biogene reststromen, de ontwikkeling van technieken voor biobased productie, en de ontwikkeling van de vraag naar materialen. Voor alle vraag geldt dat als biobased productie veel energie vraagt, deze producten waarschijnlijk geïmporteerd zullen worden.

De belangrijkste materialen in de Nederlandse industrie (naar omvang) zijn aluminium en zink, staal, kraakproducten, steen, ammoniak, papier en karton. Ammoniak kan synthetisch gemaakt worden, en aluminium, zink, steen, papier en karton bestaan niet uit fossiele grondstoffen, dus deze laten we buiten beschouwing. Kraakproducten worden uit fossiele grondstoffen gemaakt, en voor de productie van staal wordt nu steenkool gebruikt als grondstof. Biobased materialen kunnen (een deel van) de kraakproducten (zoals plastics) en het staal vervangen.

Kraakproducten worden ingezet voor de productie van plastics en van brandstoffen. In Europa bestaat de vraag naar plastics voor ongeveer 40% uit verpakkingen, 20% wordt ingezet in de bouw, en 10% in de automotive industrie (Plastics Europe, 2021). De vraag naar verpakkingen neemt naar verwachting niet af. Een deel van de plastic verpakkingen kunnen vervangen worden door biobased verpakkingen. Ook in de bouw kunnen biobased materialen plastic vervangen. Biobased materialen hebben een potentie om beton, staal en kunststof voor een deel te vervangen in de bouw. Dit gaat waarschijnlijk niet vanzelf, maar vraagt om aanpassing van regulering en stimulerend beleid.

Staal wordt gebruikt voor de constructie van een grote verscheidenheid aan producten, zoals onder andere bruggen, schepen, gebouwen, auto's en machines. Stalen producten kunnen aan het einde van hun levensduur in principe worden hersmolten naar staal. Dit zal in de toekomst ook nog gebeuren. Een deel van het staal dat nu gebruikt wordt, bijvoorbeeld in gebouwen, kan in de toekomst vervangen worden door biobased materialen (bijvoorbeeld hout).



5.7 Effecten van een eiwittransitie op de industrie

De grondstoffentransitie kan samengaan met een eiwittransitie: van dierlijke naar plantaardige eiwitten. Het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV) heeft een Nationale Eiwitstrategie ontwikkeld, waarin wordt voorgesteld om in Nederland het areaal eiwitrijke gewassen te vergroten. Voor de productie van plantaardige eiwitten is aanzienlijk minder land nodig dan voor de productie van dierlijke eiwitten (Voedingscentrum, 2015). De landbouw kan aanzienlijk veranderen, en dit heeft een effect op de industrie die hiervan afhankelijk is.

De zuivelindustrie en de vlees- en visverwerkende industrie zouden veranderen als gevolg van de eiwittransitie. Wanneer landbouwareaal wordt ingezet voor de productie van gewassen in plaats van veehouderij, kan de industrie rondom de verwerking van gewassen uitbreiden. Dat kunnen bijvoorbeeld meel of suikerfabrieken zijn, maar ook de productie van vleesvervangende producten. Als gevolg zouden ook afvalstromen van deze industrie ingezet kunnen worden voor de productie van biobased basischemicaliën of specialty chemicals.

Een aanzienlijk deel van de dierlijke landbouw in Nederland wordt in Nederland verwerkt en vervolgens geëxporteerd. De eiwittransitie zou wereldwijd doorgevoerd moeten zijn, of de landbouw in Nederland zou gericht moeten zijn op binnenlandse vraag, om een groot effect te hebben op de Nederlandse voedselindustrie.

De vraag naar kunstmest kan afnemen door de ontwikkeling van precisie-, biologische-, en kringlooplandbouw. Nederland is een belangrijke exporteur van kunstmest in Europa. Als de ontwikkeling van precisielandbouw en kringlooplandbouw in Europa (of wereldwijd) sterk toeneemt, zal dit invloed hebben op de vraag naar kunstmest. Dit is geen autonome ontwikkeling, hiervoor is beleid en/of regelgeving nodig.

6 Toekomstbeeld

In dit hoofdstuk vatten we de bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken samen in een overkoepelend beeld van de Nederlandse industrie: wat verdwijnt, wat blijft en wat komt erbij? We bespreken eerst de kansen voor de nieuwe industrie en daarna de kansen voor de huidige industrie.

6.1 Nieuwe fossielvrije industrie

De transitie naar een fossielvrije industrie is een vorm van creatieve destructie, waarbij oude technieken en toepassingen verdwijnen door de opkomst van nieuwe. In deze paragraaf willen we dan ook aandacht besteden aan de kansen die de transitie biedt, door een aantal sectoren te schetsen waar goede kansen liggen voor Nederland.

Nederland heeft een hoogopgeleide beroepsbevolking, goede fysieke en digitale infrastructuur, een goed onderwijs- en onderzoekssysteem, uitstekende landbouwgrond, weinig criminaliteit en corruptie en een stabiel politiek klimaat. Ook zonder goedkope fossiele energie zijn er dus voldoende redenen waarom bedrijven zich in Nederland zouden vestigen. Voor de fossielvrije industrie in Nederland liggen kansen bij processen die veel toegevoegde waarde leveren aan de economie per gebruikte eenheid energie.

Industrie voor levensduurverlenging - Door schaarste van duurzame biomassa en secundaire grondstoffen neemt de waarde van grondstoffen toe. Het wordt dan interessanter om producten langer in gebruik te laten, of (delen van) producten te hergebruiken. De reparatie- en service-industrie neemt dan toe.

(Mechanische) recycling - Mechanische recycling wordt verbeterd en opgeschaald, omdat de vraag naar secundaire grondstoffen groeit. Mechanische recycling heeft de voorkeur boven chemische recycling, omdat grondstoffen schaars zijn en mechanische recycling een hoger materiaalrendement heeft.

Hoogwaardige chemische recycling - Een fossielvrije chemie is niet mogelijk zonder - naast mechanische recycling - ook de technologieën voor chemische recycling verder te ontwikkelen. Nederland is al voorloper op dit vlak, met de clusters rond chemische recycling in Geleen (Chemelot) en Moerdijk. De verdere versterking van deze ontwikkeling in recyclen en upcyclen biedt daarbij ook kansen om kennis en technologie te ontwikkelen en te exporteren.

Voedselindustrie - Er zijn kansen om de veranderingen in de voedselindustrie hand-in-hand te laten gaan met veranderingen in de landbouwsector, bijvoorbeeld door de opschaling van de productie van vleesvervangers en kweekvlees en innovaties op dat gebied.

Maakindustrie - De maakindustrie is de laatste schakel in de industriële keten van grondstof naar eindproduct. Deze sector is weinig energie-intensief, maar genereert wel veel hoogwaardige werkgelegenheid en toegevoegde waarde. De metaal-/elektro-industrie genereert bijvoorbeeld ongeveer 40% van de omzet van de industrie, terwijl zij slechts 5% van de energiekosten van de industrie veroorzaakt (CE Delft, 2021c). De maakindustrie is divers en beslaat zowel traditionele sectoren, zoals de machinebouw en de auto-industrie, als nieuwe sectoren, zoals fabrieken voor zonnepanelen en batterijen. Een groei van de maakindustrie



kan een bijdrage leveren aan de Nederlandse economie zonder gebruik van fossiele brandstoffen voor energie.

Biobased producten en brandstoffen - De transitie naar fossielvrije grondstoffen voor plastics en chemicaliën vereist onder andere technieken die biomassa efficiënt kunnen omzetten in hoogwaardige producten. Deze technieken staan echter nog grotendeels in de kinderschoenen of zijn bewezen, maar nog niet opgeschaald. Om deze technieken verder te ontwikkelen, zijn hoogopgeleide mensen nodig die hun werk kunnen doen in een eco-systeem dat hun onderzoek optimaal ondersteunt. Voor een deel kan voorbewerkte biomassa geïmporteerd worden. Daarnaast kan Nederland met zijn grote voedselindustrie en landbouwsector daarbij zorgen voor een deel van de aanvoer van de nodige reststromen. Bij krimp van het areaal voor veeteelt ontstaat er zelfs ruimte om specifiek gewassen te telen voor de productie van biobased materialen, bijvoorbeeld suikerbieten voor de productie van het bioplastic PLA.

6.2 Aanpassingen in de huidige industrie

Sommige deelsectoren zullen moeten verdwijnen, omdat ze de overstap naar fossielvrije producten niet kunnen maken:

- **Fossiele raffinage** verdwijnt, omdat fossiele producten niet compatibel zijn met een fossielvrije wereld, er andere producten nodig zijn en de huidige installaties niet geschikt zijn om de nieuwe producten te produceren.
- **Fossiele organische basischemie**: de grondstoffen en processen veranderen zo, dat een groot deel van de productie naar het buitenland verplaatst. Nederland gebruikt wel eigen afvalstromen en importeert duurzame biomassa voor de productie van hoogwaardige biobased materialen en grondstoffen.

6.2.1 Industrie met sterke concurrentie van import

Er zullen mogelijk ook industrieën uit Nederland gaan verdwijnen, omdat zij niet langer kunnen concurreren met andere wereldregio's waar hernieuwbare energie goedkoper is en veel biomassa beschikbaar is. Het gaat dan om producten waar energie een groot aandeel heeft in de kostprijs en die tegen lage kosten te vervoeren zijn, zodat er een wereldmarkt is met een uniforme prijs. Deze industrieën kunnen zonder ondersteunend beleid verdwijnen en vervangen worden door goedkopere import.

- **Aluminium (en zink)** worden geproduceerd met een elektrolyseproces dat veel elektriciteit vraagt. Met name aluminium gebruikt veel energie ten opzichte van de geleverde toegevoegde economische waarde. Beide metalen zijn eenvoudig en tegen lage kosten te importeren op de wereldmarkt.
- **Ruwijzer** wordt gemaakt uit ijzererts, waarbij veel waterstof nodig is. Veel ijzererts komt van landen buiten Europa, die vaak beschikken over goedkopere hernieuwbare energie.
- **Ammoniak en methanol** zijn veelgebruikte tussenproducten in de kunstmestindustrie en de chemie. De voornaamste grondstof voor deze producten is waterstof en ze zijn relatief eenvoudig te vervoeren.
- **Synthetische brandstoffen**, zoals synthetische kerosine, worden gemaakt uit waterstof en CO₂. Er is veel energie nodig voor de productie van de waterstof en eventueel ook voor de afvang van CO₂ uit de atmosfeer. Synthetische brandstof is chemisch vrijwel identiek aan de bestaande fossiele brandstoffen en kan dan ook goedkoop in de bestaande ketens vervoerd worden.

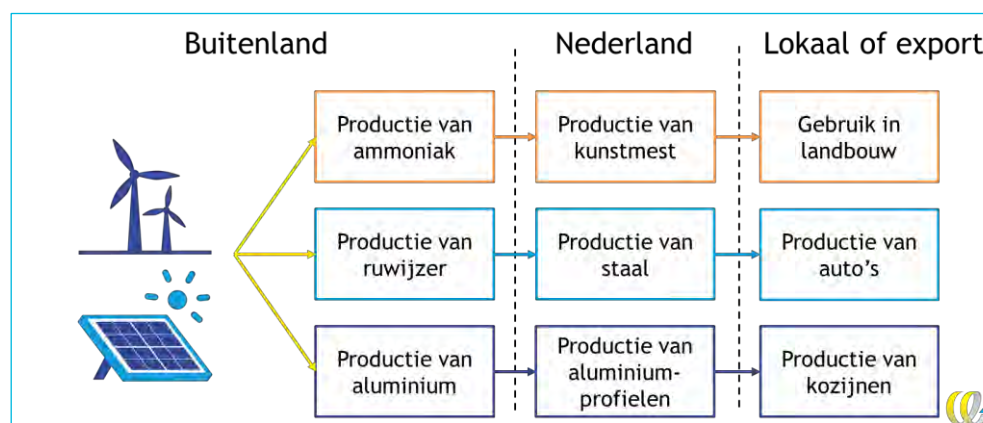


6.2.2 Industrie met relatief weinig veranderingen

Een groot deel van de industrie zal kunnen blijven bestaan in haar huidige vorm, mitst de productie-installaties worden omgebouwd zodat het proces fossielvrij wordt. Dit kan relatief eenvoudig door verwarmingsinstallaties op aardgas om te bouwen naar waterstof of te vervangen door elektrische procesverwarming. Het gaat dan met name om verwerkende industrieën, die de meeste toegevoegde economische waarde genereren (zie Paragraaf 2.3.2).

- **Verwerking van energie-intensieve halffabricaten naar eindproducten:** sommige energie-intensieve halffabricaten, zoals polymeren, zullen aantrekkelijk worden om te importeren, zie Paragraaf 6.2.1. Dit betekent echter niet dat de gehele sector verdwijnt. Het is goed mogelijk om het energie-intensieve gedeelte van het productieproces elders ter wereld uit te voeren en de verwerking tot eindproducten in Nederland. De werkgelegenheid en economische waarde die daarmee verloren gaat, is beperkt, doordat het meest hoogwaardige en kennisintensieve gedeelte van de productieketen in Nederland blijft. In Figuur 14 zijn enkele voorbeelden illustratief weergegeven van een dergelijke opdeling.

Figuur 14 - Illustratieve productieketens met het meest energie-intensieve deel in het buitenland en het hoogwaardigste deel in Nederland



- **Sectoren die relatief weinig energie-intensief zijn** maken producten waar de kosten voor energie maar een klein gedeelte zijn van de totale kosten. Een verhoging van de kosten voor energie heeft dus een relatief kleine invloed op de kostprijs van het product en zal geen aanleiding geven om de productie te verplaatsen. Voorbeelden zijn de papier- en voedselindustrie, of midden-klein-bedrijven, zoals drukkerijen, metaalbedrijven of producenten van plastic producten.
- **Sectoren die wél energie-intensief zijn, maar hoge transportkosten hebben.** De transportkosten zijn dan ook bij hoge energieprijzen nog altijd hoger dan het verschil in kostprijs van het product. Voorbeelden zijn: de keramische industrie (bakstenen, straatstenen, stoeptegels) en de glasindustrie (verpakkingen). Elektrificatie van energiegebruik, energiebesparing en inzetten op circulariteit (bijvoorbeeld statiegeld uitbreiden naar meer typen glazen verpakkingen) kan deze sectoren fossielvrij maken.

7 Transitiepad

In de vorige hoofdstukken hebben we met name beschreven hoe het eindbeeld van een fossielvrije Nederlandse industrie eruit kan zien. In dit hoofdstuk schetsen we hoe de transitie zelf eruitziet: welke randvoorwaarden zijn er om fossielvrij te kunnen produceren, wanneer moet wat gebeuren en met welk beleid kan het gat tussen wens en werkelijkheid worden gedicht?

7.1 Technische voorwaarden voor een transitie naar fossielvrije productie

Er zijn de nodige randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan voordat bedrijven producten op een fossielvrije manier produceren. Hier presenteren we eerst de technische randvoorwaarden: wat is er fysiek nodig om fossielvrij te kunnen produceren? Deze omstandigheden komen er niet vanzelf, het benodigde beleid bespreken we in Paragraaf 7.3.

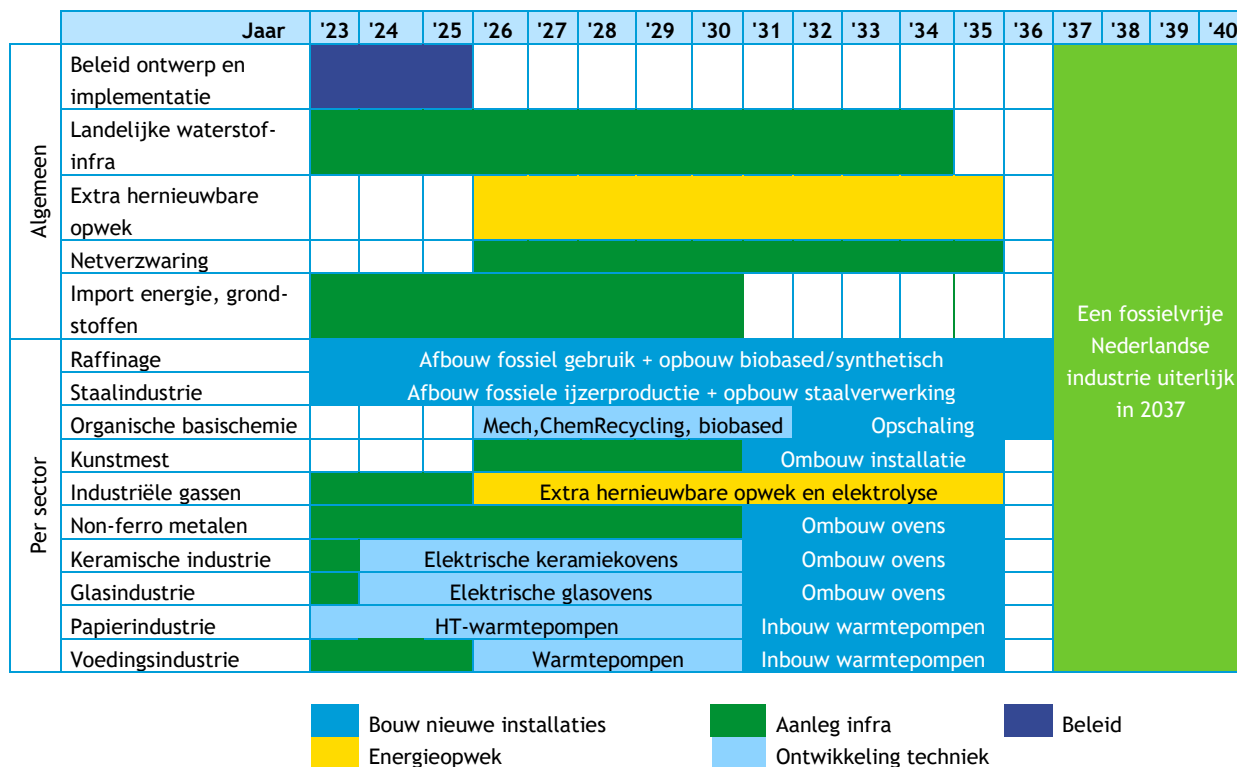
1. **Techniek gereed voor grootschalige implementatie** - De technieken om de energievraag fossielvrij te maken, zijn deels al gereed, maar vereisen soms ook nog meer dan vijf jaar ontwikkeling. De technieken om de grondstoffenvraag fossielvrij te maken, zijn nog aanmerkelijk minder ontwikkeld, het zou nog tien jaar kunnen duren voordat ze breed verkrijgbaar zijn op industriële schaal.
2. **Infrastructuur gereed** - De infrastructuur voor de aanvoer van hernieuwbare elektriciteit, waterstof en grondstoffen moet aangelegd worden. Een nieuwe elektriciteitsaansluiting of forse verzwaring van een bestaande aansluiting kost vijf tot tien jaar (CE Delft, 2021a). Het nationale hoofdleidingnetwerk voor waterstof zou in 2027 gereed moeten zijn (Gasunie, 2022), maar aansluitingen voor kleinere gebruikers kunnen nog een aantal jaren langer duren.
3. **Voldoende hernieuwbare energie** - Er is veel extra hernieuwbare elektriciteit nodig voor de energievoorziening van een fossielvrije industrie. Die wordt deels direct als elektriciteit ingezet, en deels omgezet naar waterstof. Er vindt reeds een grote opschaling plaats richting 2030, maar dit zal onvoldoende zijn om de volledige industrie te verduurzamen, zelfs rekening houdend met het eventueel verdwijnen van bedrijven of industriesectoren. Andere sectoren (bijvoorbeeld mobiliteit, gebouwde omgeving) vragen immers ook veel extra elektriciteit en de mogelijkheden voor verdere opschaling vóór 2030 zijn beperkt. Tussen 2030 en 2035 moet het aanbod van hernieuwbare elektriciteit dus sterk groeien om in de vraag vanuit de industrie te kunnen voldoen.
4. **Voldoende hernieuwbare grondstoffen** - De bedrijven die nu fossiele grondstoffen verwerken, moeten op tijd voldoende hernieuwbare grondstoffen hebben. Het gaat dan met name om de beschikbaarheid van biomassa voor inzet in de organische basischemie.
5. **Installaties omgebouwd** - De ombouw van de energievoorziening van een fabriek naar fossielvrij kost enkele jaren. Voor sommige sectoren zijn echter geheel nieuwe processen nodig en moeten er dus geheel nieuwe fabrieken worden gebouwd. We nemen aan dat de voorbereiding parallel start met de ontwikkeling van techniek en de aanleg van infra, waardoor de netto benodigde ombouwtijd beperkt blijft tot circa vijf jaar.

7.2 Transitiepad toegelicht

Als aan deze randvoorwaarden wordt voldaan, kan de Nederlandse industrie technisch gezien in 2037 fossielvrij zijn, zie Tabel 2. De tabel schetst een ambitieus pad voor de ontwikkeling van nieuwe technieken, de aanleg van infrastructuur, de realisatie van

additionele hernieuwbare opwek, de ombouw van fabrieken en niet in de laatste plaats, het voorbereiden van het nodige beleid.

Tabel 2 - Transitiepad naar een fossielvrije industrie per sector



Aan de energiekant moeten eerst besluiten worden genomen over waar meer hernieuwbare opwek en elektrolyse-installaties in Nederland kunnen worden gebouwd. Dan kan de daadwerkelijke bouw beginnen. Vervolgens zijn met name de doorlooptijd van netverzwaring en de aanleg van landelijke waterstofinfra belangrijk, maar als hier snel mee wordt begonnen, kan de infrastructuur ruim voor 2037 gereed zijn. De bouw van nieuwe installaties gaat in Tabel 2 pas van start nadat de netverzwaring rond is, maar dit kan ook deels parallel lopen. Voor de verduurzaming van de kunstmestindustrie en de industriële gassenindustrie is import van ammoniak en import en productie van groene waterstof nodig.

Aan de grondstoffenkant ligt dit anders: er is nu nog geen serieus beleid voor het fossielvrij maken van grondstoffen. Dit beleid zal eerst ontwikkeld en geïmplementeerd moeten worden, waarna de techniek met zeer ambitieuze tijdslijnen ontwikkeld en opgeschaald moet worden. De opschaling van sortering en mechanische recycling kan met normering en stimulering gerealiseerd worden. De versnelde ontwikkeling van chemische recycling en de productie van biobased kunststoffen en chemicaliën gaat ook pas van start als het beleid geïmplementeerd is.

Last but not least, moet het voor bedrijven al zo snel mogelijk economisch aantrekkelijk zijn om hun productie om te zetten naar fossielvrij. Als de hele wereld fossielvrij is, dan is deze businesscase niet meer aan de orde, omdat er simpelweg geen andere keuze is. Tot dan zal er een overgangsfase zijn, waarin bedrijven op verschillende momenten



overstappen en fossiel nog wel een optie blijft, zij het een steeds onaantrekkelijker optie. In deze tussenfase concurreren fossiel en fossielvrij met elkaar.

Om in 2037 fossielvrij te zijn, moet nu al nagedacht worden over te maken of te vermijden investeringen. Een recente studie van TNO laat bijvoorbeeld zien dat om in 2050 nagenoeg fossielvrij te zijn, er in de staalindustrie geen investeringen meer in hoogovens gemaakt moesten worden na 2010, en in de restgassenketels niet meer na 2025 (TNO, 2023).

Een fossielvrije industrie is alleen mogelijk als deze ook geen fossiele producten meer produceert. Met name voor raffinage van fossiele brandstoffen is dit een aandachtspunt: het heeft geen zin om alle Nederlandse fossiele raffinagecapaciteit te sluiten als er nog volop voertuigen rondrijden die gebruik maken van fossiele brandstoffen. Deze brandstof zal dan geïmporteerd en hier verbrand worden, met als gevolg dat er nog steeds CO₂-emissies uitgestoten worden. De afbouw van het gebruik van fossiele brandstoffen zal dus net zo snel moeten gaan als de opbouw van productie en import van biobrandstoffen en synthetische brandstoffen, zodat deze in 2037 voldoende is om te stoppen met raffinage van aardolie.

7.3 Benodigd beleid voor overgang naar fossielvrije industrie

In deze paragraaf noemen we een aantal belangrijke categorieën van beleidsmaatregelen om een overgang naar fossielvrij te borgen. Dit zijn de pijlers van een effectief beleidskader voor een fossielvrije industrie. Zonder aanvullend beleid zullen de nu te verwachten autonome ontwikkelingen namelijk niet resulteren in een volledig fossielvrije industrie in 2037.

Beleid voor vraagreductie en hergebruik

Een afname in vraag is noodzakelijk om voldoende grondstoffen beschikbaar te hebben in een fossielvrije industrie. Om vraagreductie en hergebruik te stimuleren, zijn meerdere beleidsmaatregelen nodig. Vanuit de EU wordt al gestuurd op een normering voor recyclelaat in specifieke productgroepen. In Nederland wordt een normering voor een verplicht aandeel recyclelaat in polymeren onderzocht. NPCE geeft veel handvatten voor inzetten op, onderzoeken van en verkenningen naar maatregelen op het gebied van verminderen van grondstoffengebruik, levensduurverlenging en consumptie van burgers. Voorbeelden zijn: het beter beprijzen van milieuschade (EU-brede aanpak), een primaire fossiele grondstoffenhoefting en het stimuleren van afname van consumptie onder burgers.

Daarnaast wil de Europese Commissie het recht op reparatie van consumentengoederen uitbreiden. Voorbeelden voor beleid vanuit de EU gericht op levensduurverlenging, zijn: productpaspoorten en ontwerprichtlijnen (EcoDesign). Vervanging is nu vaak goedkoper en gemakkelijker dan reparatie. Om dit om te draaien, is verder onderzoek naar geschikte normering en stimulering nodig.

Afbouwpad voor gebruik van fossiele brandstoffen en grondstoffen

Er is nu geen beleid om het gebruik van fossiele brandstoffen en grondstoffen in de industrie geleidelijk af te bouwen naar nul. Er zijn wel doelstellingen en beleid om klimaatneutraal te worden of in hoge mate circulair. Deze doelstellingen laten echter ruimte voor fossiel, zolang de emissies maar gecompenseerd of opgeslagen (CCS) worden, zodat er geen netto uitstoot is. Fossielvrij is echter precies wat het zegt: een *complete* stop op het

gebruik van *alle* fossiele brandstoffen en grondstoffen. Een bindend afbouwpad voor het gebruik van fossiel is de enige manier om zeker te stellen dat er helemaal geen fossiel meer gebruikt wordt.

Een afbouw van fossiel naar nul in 2037 lijkt wellicht radicaler dan het is. Het reductiepad van het Europese emissiehandelssysteem (EU-ETS) leidt namelijk ook al naar netto nul uitstoot in 2040, al blijven het gebruik van fossiel met CCS, compensatie door negatieve emissies en het gebruik van fossiele grondstoffen wel toegestaan. Fossielvrij in 2037 gaat dan nog net een stap verder. Voor een deel van de sectoren betreft het alleen een versnelling van de ontwikkelingen - voor veel industrie is het uiteindelijk aantrekkelijker om klimaatneutraal te worden door hun fossiele energie en grondstoffen te vervangen door hernieuwbare alternatieven (bijvoorbeeld door elektrificatie) dan vast te houden aan fossiele energie met CCS. De consequenties zijn uiteraard groter voor de industrie, die ook op de langere termijn geen aantrekkelijke duurzame alternatieven hebben voor CCS. Tegelijkertijd biedt beleid voor een fossielvrije industrie in 2037 duidelijkheid en kansen voor versnelling van de transitie.

Ingroeipad voor hernieuwbare grondstoffen

De grondstoffentransitie is één van de lastigste elementen van een fossielvrije industrie. Er zijn erg grote veranderingen noodzakelijk over de gehele productieketen. Het huidige beleid is niet voldoende om hier te komen. In de RED III staat bijvoorbeeld wel een verplicht percentage van 60% hernieuwbare waterstof in 2035 voor de industrie opgenomen, maar er is nog geen verplicht aandeel voor andere synthetische of biobased grondstoffen voor de industrie. De grondstoffentransitie kan snel vaart krijgen door een ingroeipad vast te stellen voor een minimaal aandeel gerecycled of biobased materiaal, analoog aan de bijmengverplichting voor brandstoffen. Het doel van fossielvrije grondstoffen in 2037 is haalbaar bij een snelle groei van het verplichte aandeel hernieuwbare grondstoffen, oplopend tot 100% in 2037. Dit doel is echter eenvoudiger te halen als niet alleen de grondstoffen vergroend worden, maar consumptie ook beperkt wordt.

Stimulerings- en innovatiebeleid voor fossielvrije technieken

Voor een transitie naar fossielvrije energie is stimulering nodig: onder andere voor hogetemperatuur-warmtepompen, elektrische glasovens, warmtepompdrogers en elektrische industriële ovens. Er zijn bestaande subsidieregelingen voor vernieuwende industriële technieken, zoals de DEI+ en het Europese Innovation Fund. Daarnaast is er een missiegedreven onderzoeksagenda voor de verduurzaming van industriële warmte⁶. In deze agenda zitten echter niet alle benodigde technieken en de subsidieregelingen kunnen alleen technieken steunen waarvoor marktpartijen een aanvraag doen. Er is dus meer nodig om ervoor te zorgen dat alle technieken op tijd ontwikkeld zijn.

Met name voor efficiëntieverbetering en opschaling van sortering en mechanische recycling is stimulering nodig, om zoveel secundaire grondstoffen beschikbaar te maken. De technieken voor geavanceerdere recycling en de productie van biobased grondstoffen en chemicaliën zijn ook nodig, en zijn het minst vergevorderd. Er is brede stimulering nodig voor deze technieken. Het gaat hierbij echter om doelgerichte innovatie. De doelen uit het MMIP6 uit

⁶ [MMIP 7: Een CO₂-vrij industrieel warmtesysteem](#)

het Klimaatakkoord⁷ zijn dan ook een prima uitgangspunt, maar de tijdslijnen moeten krasser om een hoge zekerheid te hebben dat de technieken op tijd gereed zijn.

Bescherming van Nederlandse fossielvrije industrie tegen fossiele import

Nederland zou op het wereldtoneel absoluut een voorloper zijn als haar hele industrie tegen 2037 fossielvrij is. De Nederlandse industrie moet echter concurreren met import uit andere landen in Europa en in de wereld.

De invoering van het Europese Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) is een goede eerste stap. Onder het CBAM wordt de import van een aantal energie-intensieve producten belast aan de hand van hun CO₂-footprint als het exporterende land niet zelf een voldoende hoge heffing op CO₂-uitstoot heeft. De scope van de eerste fase van CBAM beslaat cement, ijzer en staal, kunstmest, aluminium, waterstof en elektriciteit⁸. Het CBAM zal zeker helpen, maar geldt niet voor eindproducten, waardoor de Europese industrie alsnog op achterstand staat. Daarnaast helpt het CBAM niet tegen import uit andere Europese landen als zij nog niet fossielvrij zijn.

Verbreding van de SDE++ naar, of inzet van andere instrumenten voor levensduurverlenging en productie en gebruik van hernieuwbare grondstoffen kan helpen om de concurrentiepositie van de Nederlandse fossielvrije industrie te beschermen. Een EU-brede aanpak heeft de voorkeur.

⁷ www.klimaatakkoord.nl/themas/kennis--en-innovatieagenda/documenten/publicaties/2019/11/07/mmip6-sluiting-van-industriële-ketens

⁸ www.taxation-customs.ec.europa.eu/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en



Referenties

- Afvalfonds Verpakkingen, 2022. *Recycling verpakkingen Nederland 2021*, Leidschendam: Stichting Afvalfonds Verpakkingen.
- Aldel, s.d. *Het onzichtbare bijproduct van Aldel; een stabiel elektriciteitsnet* [Online] www.aldel.nl/het-onzichtbare-bijproduct-van-aldel-een-stabieler-elektriciteitsnet.
- CBS, 2020. Statline: Energiebalans; aanbod en verbruik, sector, 6 april www.opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/83989NED/table?ts=1586249681798. 04/06/2020.
- CBS, 2021. Statline Database: Emissies broeikasgassen (IPCC); klimaatsector, kwartaal, 12 maart 2021. www.opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/84979NED/table.
- CBS, 2022. *Uitstoot broeikasgassen 2,1 procent hoger in 2021* [Online] www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2022/11/uitstoot-broeikasgassen-2-1-procent-hoger-in-2021.
- CE Delft, 2021a. *Doorlooptijden investeringen elektrificatie: Inzicht in de tijdlijn van het Klimaatakkoord*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2021b. *Effect of shared electric mopeds on CO₂ emissions*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2021c. *Groeiprojecties energie-intensieve industrie*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2021d. *Groeiprojecties energie-intensieve industrie. Referentiescenario's voor impactanalyse klimaatbeleid*, Delft: CE Delft.
- CE Delft, 2022a. *Gaswinning op de Noordzee, en de afspraken daarover in het Akkoord voor de Noordzee*.
- CE Delft, 2022b. *Monitoring chemical recycling. How to include chemical recycling in plastic recycling monitoring?*
- Crippa, M., De Wilde, B., Koopmans, R., Leysens, 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*, Brussels: European Commission (EC).
- De Tijd, 2022. *De Nyrstar-fabriek als virtuele batterij* [Online] www.tijd.be/connect/nyrstar/transition/de-nyrstar-fabriek-als-virtuele-batterij/10388647.html.
- Energy Monitor, 2021. *The paper industry's burning secret*. www.energymonitor.ai/sectors/industry/the-paper-industrys-burning-secret.
- EP, 2020. *Energy-intensive industries: Challenges and opportunities in the energy transition*, Brussels: European Parliament (EP).
- Euractiv, 2021. *Glass packaging industry goes electric, adding to growing demand for renewable power*. www.euractiv.com/section/energy-environment/news/glass-packaging-industry-goes-electric-adding-to-growing-demand-for-renewable-power.
- Fertilizers Europe, 2019. *How fertilizers are made* [Online] www.fertilizerseurope.com/fertilizers-in-europe/how-fertilizers-are-made.
- Fertilizers Europe, s.d. *Energy Cost*. 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*.
- Gasunie, 2022. *Waterstofnetwerk Nederland*, Gasunie. www.gasunie.nl/projecten/waterstofnetwerk-nederland.
- Horiba, s.d. *Petrochemical Industry* [Online] www.horiba.com/deu/process-and-environmental/industries/petrochemical-industry.
- IEA, 2022a. *Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2021 - Global emissions rebound sharply to highest ever level*.



- IEA, 2022b. *The role of critical minerals in clean energy transitions*: International Energy Agency.
- IRENA, 2022. The Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jan/12A_Geopolitics_MS.pdf?la=en&hash=BD12BA5AE3060B3CF4284251BC357673BEB7DBCE.
- JRC, 2020. *Production costs form iron and steel industry in the EU and third countries*.
- Lazard, 2021. *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 15.0*.
- Ministerie van I&W, 2023. *Nationaal Programma Circulaire Economie 2023-2030 (NCPE)*.
- Ministerie van I&W & Ministerie van EZK, 2018. *Transitieagenda circulaire economie: Kunststoffen*, Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
- Murray, C. J. L., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi-Kangevari, M., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M., Abdollahpour, I., et al., 2020. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396, 1223-1249.
- NewClimate Institute, 2022. *What is a fair emissions budget for the Netherlands?*
- 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* [Online] www.nwgd.nl/kennisbank/drogen-in-de-papier-en-karton-industrie.
- PBL, 2019a. *Decarbonisation options for the Dutch aluminium industry*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL, 2019b. *Decarbonisation options for the Dutch paper and board industry*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL, 2019c. *Decarbonisation options for the Dutch steel industry*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL, 2020. *Decarbonisation options for the Dutch ceramic industry*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL, 2021. *Integrale Circulaire Economie Rapportage (ICER)*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- PBL & TNO, 2019. *Decarbonisation options for the Dutch fertiliser industry*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).
- Plastics Europe, 2021. *Plastics - the Facts 2021 - An analysis of European plastics production, demand and waste data*, 12.
- Reuters, 2021. Gas price surge pushes Europe's ceramics industry to breaking point. www.reuters.com/world/europe/gas-price-surge-pushes-europes-ceramics-industry-breaking-point-2021-10-27.
- SER, 2020. *Biomassa in balans: Een duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen*, Sociaal-Economische Raad (SER) www.ser.nl/-/media/ser/downloads/adviezen/2020/biomassa-in-balans.pdf.
- SteelOrbis, 2023. Energy prices become key factor in European metallurgical market in 2022. 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*. www.omgeving.tatasteel.nl/assets/user/Duurzaamheidsambities/Tweede%20kamer%20briefing_mrt2022.pdf.
- TNO, 2023. *Uitfasering fossiele technieken*.
- Universiteit Utrecht, 2019. *Efficiënte Biomassa Logistieke Ketens voor Nederland*.
- Voedingscentrum, 2015. *Nieuwe eiwitbronnen als vleesvervanger*.
- Wageningen University & Research, 2017. *De logistiek van biomassa voor de biobased economy*.



World Steel Association, *world steel - circular economy* [Online]

www.worldsteel.org/circulareconomy.

YK ALU, 2022. Many aluminium smelters in Europe have started to shut down production due to energy prices. www.ykalu.com/2022/07/15/many-aluminium-smelters-in-europe-have-started-to-shut-down-production-due-to-energy-prices.



A Verkenning per sector

In deze bijlage schetsen we in meer detail een beeld van de effecten van fossielvrije energie en grondstoffen per sector. Dat doen we door eerst in te gaan op de huidige opzet van de sector: producten, proces, grondstoffen en emissies. Vervolgens beschrijven we de technieken die nodig zijn voor fossielvrije productie en de tijdslijn waarop deze geïmplementeerd kunnen worden. Onze belangrijkste bronnen bij deze analyses zijn de MIDDEN-rapporten van PBL en TNO. Ten slotte beschouwen we de internationale concurrentiepositie volgens de methode in Paragraaf 3.6.1.

Voor de raffinage en de organische basischemie hanteren we een andere opzet, omdat hun productieprocessen zeer ingrijpend veranderen doordat er vraag komt naar andere producten.



1. 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).

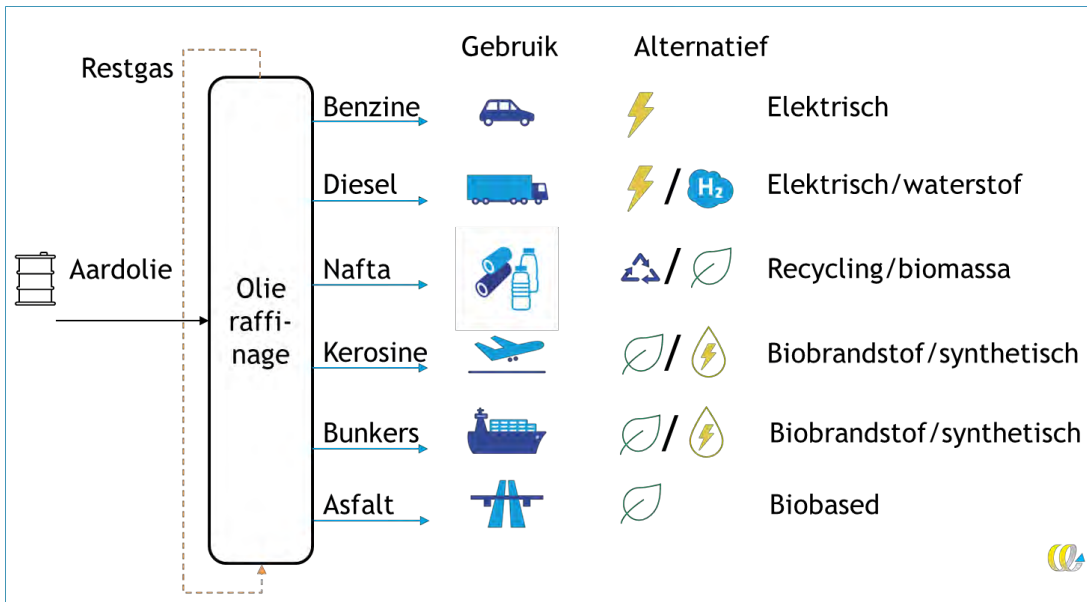
Nederland telt zes raffinaderijen: Shell Pernis, BP Rotterdam, ExxonMobil Rotterdam, Gunvor Rotterdam, Vitol Rotterdam en Zeeland Refinery Vlissingen. Zij gebruiken ongeveer 330 PJ/j aan energie, in de vorm van aardolie, aardgas en elektriciteit. De emissies van de raffinage zijn 11 Mton CO₂/j.

VERVANGING PRODUCTEN

De raffinaderij produceert nu 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 15 geeft een overzicht van de alternatieven voor de producten uit een raffinaderij.

Figuur 15 - 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.

VERVANGENDE PROCESSEN

De fossiele raffinaderijen zijn niet langer aanwezig in een fossielvrije toekomst. Daarvoor komen nieuwe processen in de plaats:

1. Allereerst ontstaat er vraag naar processen voor recycling. Daarbij gaan we uit van zoveel mogelijk recycling van producten naar nieuwe producten met dezelfde eigenschappen. Plastics worden dan terug omgezet in plastics.
2. Reststromen biomassa kunnen aangewend worden voor de productie van biomaterialen, biobased grondstoffen en geavanceerde biobrandstoffen.
3. De vraag naar brandstoffen en kunststoffen die overblijft kan met synthetische brandstoffen en biomassa-reststromen geproduceerd worden. Productie in Nederland zal waarschijnlijk echter niet kunnen concurreren met import.

	Gebruik	Alternatief proces
Benzine		Opwek hernieuwbare elektriciteit
Diesel		Opwek hernieuwbare elektriciteit*
Nafta		Toename mechanische en/of thermische recycling + Resterende hoeveelheid wordt biobased productie
Kerosine		Import synthetische kerosine*
Bunkers		Import bunkers*
Asfalt		Toename recycling + Resterende hoeveelheid wordt biobased productie

De productie van biobrandstoffen is ook mogelijk, mits goedkope hoogenergetische biomassa in Nederland beschikbaar is of geïmporteerd kan worden. De productie van biobrandstoffen vereist andere processen dan de productie van fossiele brandstoffen. Biobrandstoffen uit plantaardige oliën (koolzaad, palm, frituurvet, etc.) lijkt nog redelijk op de raffinage van fossiele olie, maar de productie van geavanceerde biobrandstoffen uit hout of reststromen vereist compleet andere processen, zoals (hydro-)pyrolyse, vergassing of superkritische watervergassing en Fischer-Tropsch. De energievraag van biobrandstofproductie is qua opbouw vergelijkbaar met die van fossiele raffinage: het grootste gedeelte van de energie komt uit de grondstoffen zelf en de rest is op relatief hoge temperaturen (200-800 °C).

INTERNATIONALE POSITIE

De productie van synthetische kerosine en bunkers zal waarschijnlijk niet in Nederland plaatsvinden. Nederland heeft onvoldoende goedkope waterstof beschikbaar in vergelijking met andere landen. Import van elders geproduceerde synthetische brandstoffen is goedkoper dan import van waterstof om er hier synthetische brandstoffen van te maken.

*Uit de figuur bij vervangende processen (import synthetische kerosine en bunkers): De productie van biobrandstoffen zoals biodiesel, biomethanol, biokerosine, zou deels in Nederland plaats kunnen vinden, maar of dat gebeurt is afhankelijk van de biomassa die in een proces gebruikt wordt. In alle gevallen moet rekening gehouden worden met de duurzame beschikbaarheid van biomassa. Biobrandstoffen staan lager in de ladder dan biobased materialen. Synthetische brandstoffen verdienen de voorkeur, maar staan in concurrentie met biobrandstoffen bij ontbreken van beleid.

Bij bioraffinage geldt dat de gekozen locatie waarschijnlijk veel biomassa beschikbaar heeft en goedkope elektriciteit voor het productieproces. Biomassa kan ook vervoerd worden, maar alleen biomassa met een relatief laag vochtgehalte en een hoge energiedichtheid zal economisch vervoerd kunnen worden (Universiteit Utrecht, 2019). Laagwaardige reststromen kunnen alleen lokaal economisch verwerkt worden.

SAMENVATTING: TOEKOMSTBEELD



In een fossielvrije toekomst ontstaat in Nederland een vraag naar fabrieken voor mechanische en chemische recycling van kunststoffen.



Nederland gebruikt eigen afvalstromen en importeert hoogenergetische biomassa (binnen de duurzaamheidsnormen, en naar beschikbaarheid) voor de productie van hoogwaardige biobased materialen, grondstoffen en brandstoffen.

De nadruk voor brandstoffen ligt op import. Synthetische kerosine en bunkers worden geïmporteerd. Import-terminals worden daarvoor geschikt gemaakt. Reststromen uit de productie van biobased materialen worden ingezet voor de productie van biobrandstoffen.

De vraag naar energie voor deze nieuwe activiteiten zal veel lager zijn dan de huidige energievraag voor raffinaderijen, omdat er nog maar een fractie van de producten zal worden geproduceerd.

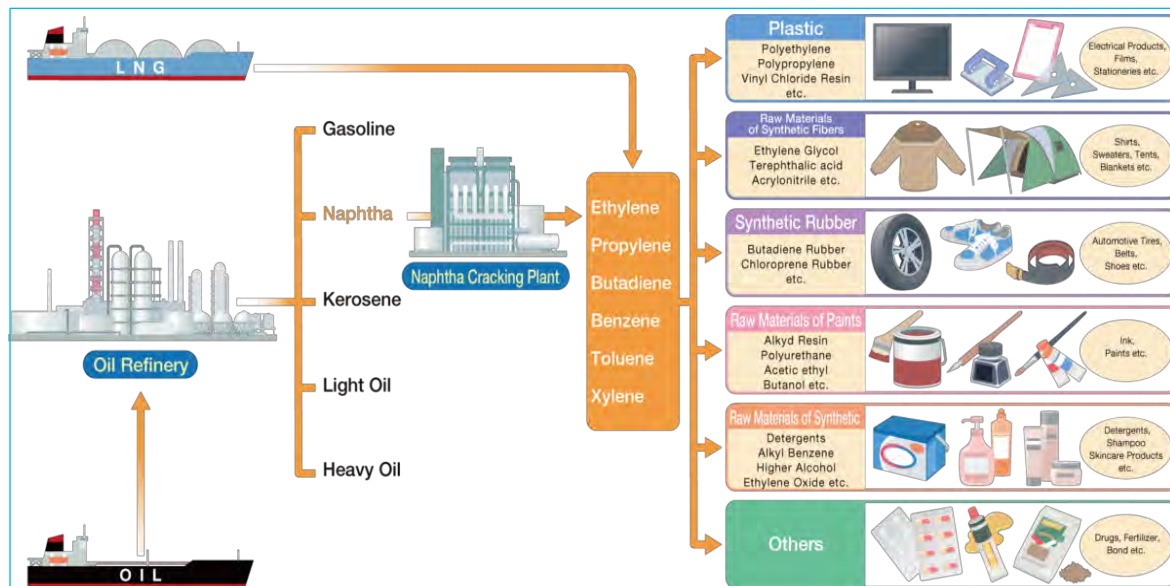


2. Organische basischemie

BESCHRIJVING - PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

De organische basischemie verwerkt aardoliestromen tot de grondstoffen waarmee plastics en rubbers worden gemaakt, zie Figuur 16. 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 butadien, en aromaten (benzeen, toluen, xylenen) geproduceerd. Een deel van deze stromen wordt in de organische basischemie verder verwerkt tot veelgebruikte tussenproducten zoals glycol, acrylonitril en styreen.

Figuur 16 - 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.

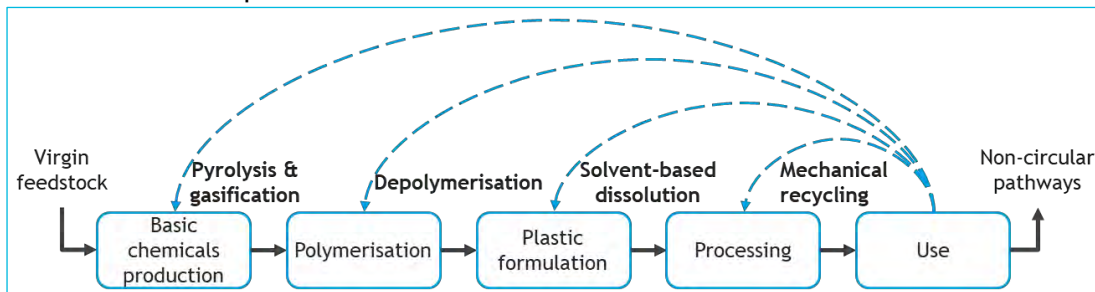
VERVANGENDE PROCESSEN

Er zijn drie belangrijke vervangende processen nodig voor een fossielvrije organische basisindustrie:

1) verbeterde recycling, productie van grondstoffen en producten uit biomassa, 2) elektrificatie, 3) 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 17, 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.

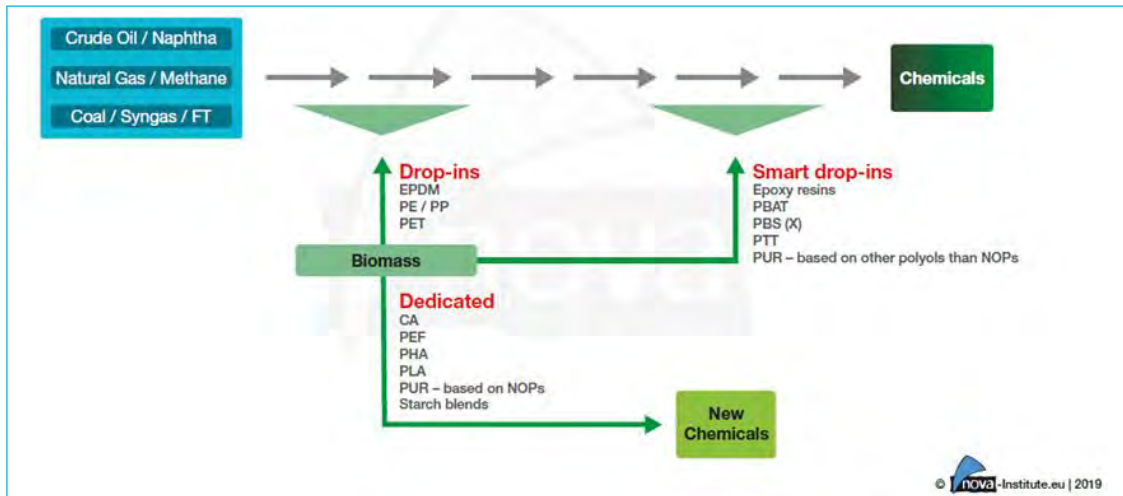
Figuur 17 - De verschillende vormen van recycling, variërend van energie-intensief en robuust aan de linkerkant, tot efficiënt maar nauw toepasbaar aan de rechterkant.



Bron: (Crippa, M. 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 18. 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 18 - 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 is het aan te raden om de CO₂-emissies af te vangen en op te slaan die vrijkomen bij 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, waardoor negatieve emissies worden gecreëerd, wat op termijn ook nodig is om de ergste effecten van klimaatverandering af 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, 2021d). De organische basischemie heeft stevige concurrentie van producenten buiten Europa, met name uit het Midden-Oosten en de USA. Er worden met name eindproducten geïmporteerd (plastics, rubbers) en niet zozeer de tussenproducten die krakers maken (etheen, propaan, 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 fossielvrije toekomst.

SAMENVATTING: TOEKOMSTBEELD



In een fossielvrije toekomst ontstaat in Nederland een vraag naar fabrieken voor mechanische en chemische recycling van kunststoffen.



Nederland gebruikt eigen afvalstromen en importeert halffabricaten (polymeren) en in beperkte mate hoogenergetische biomassa (binnen de duurzaamheidsnormen, en naar beschikbaarheid) voor de productie van hoogwaardige producten en biobased materialen en grondstoffen.

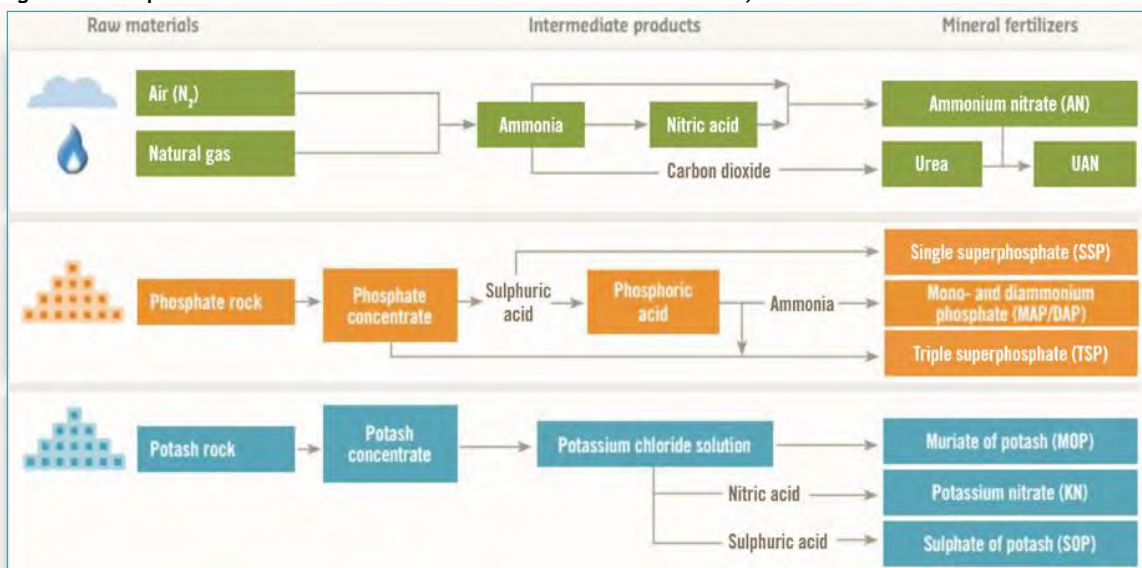


3. Kunstmest

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 19 - 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 19). 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 stotten in 2018 gezamenlijk 5,3 Mton CO₂-eq. uit, waarvan een deel als lachgas (N₂O) (PBL & TNO, 2019).



WELKE TECHNIEK VOOR FOSSIELVRIJ?

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-Bosch-proces. 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 kinderschoenen.

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 FOSSIELVRIJ?

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.





4. Industriële gassen

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

De industriële gassenindustrie produceert luchtgassen (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 ontzwellen. 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 luchtgassen 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.

Luchtgassen 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.

WAT GEBEURT ER MET DE VRAAG?

De vraag naar pure waterstof zal gaan stijgen door nieuwe toepassingen, met name voor de productie van staal, de opwek van CO₂-vrije elektriciteit, zwaar transport en de scheepvaart. Het gebruik van waterstof voor het raffineren van brandstoffen zal afnemen, omdat de daling in de raffinage van fossiele brandstoffen niet gecompenseerd wordt door de groei in raffinage van biobrandstoffen. Netto resulteert dit echter nog steeds in een toename in de vraag naar waterstof.

WELKE TECHNIEK VOOR FOSSIELVRIJ?

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, Q. et al., 2010).

HOE SNEL KAN FOSSIELVRIJ?

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.

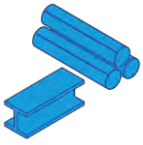


INTERNATIONALE POSITIE

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, 2021d).

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. De behoefte aan pure waterstof kan dus niet eenvoudig vervangen worden door import en zal waarschijnlijk worden blijven bediend door lokale productie.





5. Staalindustrie

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 oxystaalafabriek 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, 2019c).

WELKE TECHNIEK VOOR FOSSIELVRIJ?

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 FOSSIELVRIJ?

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, 2021d). 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.





6. Non-ferrometaal

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 producenten van non-ferrometalen in Nederland zijn voormalig Damco Aluminium Delfzijl (Aldel) en zinkproducent Nyrstar in Budel. Deze processen kennen nauwelijks directe emissies, omdat zij voornamelijk elektriciteit gebruiken. Er is echter veel elektriciteit voor nodig om de ertsen op hoge temperatuur om te zetten in metaal: Aldel verbruikte op volle capaciteit zo'n 1,8 TWh/j aan elektriciteit, zo'n 1,5% van het totale elektriciteitsverbruik van Nederland (PBL, 2019a).

WELKE TECHNIEK VOOR FOSSIELVRIJ?

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. De aluminiumproductie maakt nog gebruik van fossiele koolstofelektrodes die in het proces worden afgebroken tot CO₂, maar er worden inerte elektrodes ontwikkeld die dat probleem niet hebben.

Daarnaast is elektrolyse van metalen goed flexibel te opereren. Aldel paste de productie dan ook actief aan aan de elektriciteitsprijs (Aldel, s.d.) en ook een Belgische vestiging van Nyrstar onderzoekt dit (De Tijd, 2022).

HOE SNEL KAN FOSSIELVRIJ?

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

Aldel is failliet, een doorstart is onzeker. Bij een eventuele doorstart kunnen de gasgestookte fornuizen binnen tien jaar vervangen worden door inductiefornuizen. Inerte elektrodes voor aluminiumproductie zouden ook voor 2030 beschikbaar moeten zijn (PBL, 2019a).

INTERNATIONALE POSITIE

Het aandeel van energie in de totale productiekosten van aluminium bedraagt zo'n 40% van de totale productiekosten (YK ALU, 2022).

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.





7. Keramische industrie

PRODUCTEN, PROCES, ENERGIE, GRONDSTOFFEN EN EMISSIES

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

Keramiëk 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 keramiëkfabrieken, met name langs de grote rivieren. In totaal stoten deze fabrieken zo'n 0,5 Mton CO_2 per jaar uit (PBL, 2020).

WELKE TECHNIEK VOOR FOSSIELVRIJ?

Een fossielvrije keramiëkindustrie 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 groen gas wellicht ook een optie, indien voldoende beschikbaar.

HOE SNEL KAN FOSSIELVRIJ?

Waterstof: de techniek om keramiëk 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.

Elektriciteit: elektrische keramiëkovens zijn commercieel verkrijgbaar, maar alleen op kleine schaal. Leveranciers moeten ook grote keramische ovens ontwikkelen en aanbieden, dat duurt zo'n vijf tot acht jaar. Daarna moeten de fabrieken omgebouwd worden en het elektriciteitsnet verzaamd worden, wat ook zo'n vijf tot acht jaar duurt. Voor 2037 kan de keramische industrie zijn overgestapt op elektriciteit.



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, 2021d). 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.





8. Glasindustrie

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 FOSSIELVRIJ?

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 eindelijk en 100% gerecycled worden. Glasscherven smelten bovendien bij een lagere temperatuur dan de grondstoffen voor nieuw glas.

HOE SNEL KAN FOSSIELVRIJ?

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 verzaamd worden. Dit kost ook zo'n 5-8 jaar. Een fossielvrije glasindustrie is dus mogelijk voor 2037.

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 productie-kosten, 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, 2021d). 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.





9. Papierindustrie

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, 2019b). 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 FOSSIELVRIJ?

Een fossielvrije papierindustrie is mogelijk door het aardgas voor 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 FOSSIELVRIJ?

Elektrische boilers zijn nu verkrijgbaar op industriële schaal en komen in aanmerking voor SDE++. Implementatie duurt vijf tot acht jaar, vanwege de benodigde netverzwaring, waarmee de sector rond 2030 fossielvrij kan zijn.

Hogetemperatuur warmtepompen zijn nog onvoldoende ontwikkeld om op grote schaal toegepast te worden. Dit duurt waarschijnlijk nog vijf tot tien jaar, waardoor de sector pas na 2030 klimaatneutraal kan zijn.

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, 2021d), 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, 2021d). 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.





10. Voedingsindustrie

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 ($< 100^{\circ}\text{C}$) of middelhoge ($< 200^{\circ}\text{C}$) temperaturen.

WELKE TECHNIEK VOOR FOSSIELVRIJ?

Warmtevraag op lage temperatuur kan goed ingevuld worden met warmtepompen, die restwarmte 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.

HOE SNEL FOSSIELVRIJ?

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 ($> 100^{\circ}\text{C}$) 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, 2021d). 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.

