



Kosteneffectieve alternatieven voor CCS

Een analyse van de mogelijke rol
van CCS in vier industriële sectoren



CE Delft

Committed to the Environment

Kosteneffectieve alternatieven voor CCS

Een analyse van de mogelijke rol van CCS in vier industriële sectoren

Dit rapport is geschreven door:
Bettina Kampman, Diederik Jaspers en Joeri Vendrik

Delft, CE Delft, oktober 2020

Publicatienummer: 20.200225.130

Industrie / Kooldioxide / Reductie / Processen / Technieken / Opslag / Economische factoren /
Beleidsmaatregelen / Afvangen

Opdrachtgever: Natuur & Milieu
Uw kenmerk: 200225

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

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

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	3
	Summary	5
1	Inleiding	8
	1.1 Achtergrond	8
	1.2 Doelstelling en afbakening	8
	1.3 Leeswijzer	9
2	Beleidscontext	10
	2.1 Nationaal beleid	10
	2.2 Europees beleid	11
3	Verduurzaming van de industrie	13
	3.1 Carbon Capture and Storage (CCS)	13
	3.2 Andere decarbonisatieroutes	17
4	Sectoranalyse	25
	4.1 IJzer en staal	26
	4.2 Cement	29
	4.3 Chemie	33
	4.4 Raffinage	36
5	Conclusies en aanbevelingen	39
	5.1 Er zijn veel verschillende CO ₂ -reductietechnieken nodig	39
	5.2 De rol van CCS in de verduurzaming van industrie	40
	5.3 Risico op lock-in?	41
	5.4 Beleidsaanbevelingen	42
	Referenties	44
A	Verdieping sectoranalyse	48
	A.1 IJzer en staal	48
	A.2 Cement	53
	A.3 Chemie	58
	A.4 Raffinage	67
B	Technologieomschrijvingen	73
	B.1 Productie groene waterstof	73
C	Technologische gereedheid (TRL)	75



Samenvatting

Inleiding

De industrie staat voor de opgave om haar CO₂-uitstoot de komende tien jaar fors te verminderen, om uiteindelijk in 2050 op nagenoeg nul CO₂-uitstoot uit te komen. Om deze langetermijndoelstelling te bereiken is een transitie nodig van energie- en grondstoffen-gebruik, die de komende jaren in gang moet worden gezet. Zo is in het Klimaatakkoord afgesproken dat de uitstoot van de industrie in 2030 met 14,3 Mton CO₂ per jaar extra wordt verminderd, bovenop het effect van het huidige beleid.

Om dit te bereiken kunnen verschillende maatregelen worden getroffen, zoals energie-besparing, elektrificatie, hergebruik en recycling. Daarnaast kan ook afvang en ondergrondse opslag van CO₂ in de zeebodem (CCS) worden toegepast. Om te voorkomen dat de toepassing van CCS de ontwikkeling van andere transitietechnieken belemmert zijn in het Klimaatakkoord een aantal beperkingen gesteld aan subsidiëring van CCS: alternatieven voor CO₂-reductie krijgen voorrang, gesubsidieerde CCS mag maximaal bijdragen aan de helft van de CO₂-reductiedoelstelling voor de industrie (7,2 Mton CO₂) en na 2035 worden er geen nieuwe subsidiebeschikkingen voor CCS meer uitgegeven voor fossiele CO₂.

Dit onderzoek brengt de belangrijkste maatregelen in kaart waarmee de CO₂-uitstoot van de industrie kan worden verminderd. Vervolgens zoeken we antwoord op de vraag voor welke toepassingen CCS nodig is om de reductiedoelstellingen voor 2030 en 2050 te halen en waar de inzet van CCS een risico creëert voor een 'lock-in' van bestaande fossiele processen. De studie focust op vier industriële sectoren met veel CO₂-uitstoot en waar veel aandacht is voor CCS: staalproductie, cementproductie, chemie en raffinage.

CO₂-reductiemaatregelen in de industrie

Voor elk van deze sectoren zijn de meest kansrijke opties en technologieën geanalyseerd, waarbij is gekeken naar het potentieel voor CO₂-reductie, de *technology readiness level* (TRL, een indicator van 1 (laag) tot 9 (hoog) om aan te geven hoe ver een innovatie technologisch is ontwikkeld), kosten en eventueel andere praktische belemmeringen. Op basis van deze overwegingen is voor elke sector een globale tijdlijn opgesteld, om een beeld te geven van de snelheid waarmee de technische transitie in deze sectoren plaats zou kunnen vinden, bij effectief klimaatbeleid en een succesvolle ontwikkeling van de technieken.

- Voor de verduurzaming van de ijzer- en staalindustrie biedt CCS al op korte termijn kansen voor CO₂-reductie, al dan niet in combinatie met het opschalen van het Hlsarna-proces. Alternatieven die op termijn beschikbaar kunnen komen zijn directe reductie met waterstof op basis van duurzame energie, directe elektrolyse, de inzet van bio-cokes en circulariteit.
- CO₂-reductie in de cementindustrie is voor Nederland op dit moment niet relevant, omdat de productiecapaciteit de afgelopen decennia is afgebouwd. CCS heeft wel veel potentieel in deze sector op de korte tot middellange termijn, op de langere termijn komen ook alternatieven in beeld.
- De chemie is een zeer diverse sector, voor verduurzaming moeten dan ook veel verschillende technologieën worden ingezet. CCS kan op korte termijn worden toegepast bij bestaande fossiele waterstof- en ammoniakproductie in de kunstmestindustrie. Verduurzaming van de kunstmestindustrie kan daarnaast worden gedreven door verminderde vraag naar kunstmest als gevolg van circulaire landbouw. Voor andere processen kan beter worden ingezet op alternatieven.
- Verduurzaming van de raffinagesector zal op de langere termijn worden gedreven door verminderde vraag naar fossiele brandstoffen. Bij het raffinageproces zijn er op korte

termijn kansen voor CCS bij de waterstofproductie, in de toekomst komen daar proces-intensificatie en groene waterstof bij.

De rol van CCS en risico's op lock-in

Er zijn verschillende CO₂-reductiemaatregelen geïdentificeerd voor elk van de vier sectoren, maar veel technieken bevinden zich nog in een onderzoeks-, test- of opschalings-fase en kunnen niet op korte termijn op grote schaal worden toegepast. Bovendien zijn de kosten, effectiviteit, en praktische haalbaarheid nog onzeker. Om de lange termijn klimaat-doelstellingen te halen moet er nog hard worden gewerkt aan de ontwikkeling van de duurzame alternatieven.

CCS kan voor een aantal sectoren op korte termijn worden toegepast. Zo kan er al op korte termijn CO₂-reductie worden bereikt, terwijl de andere technieken verder worden ontwikkeld en marktrijp worden gemaakt. CCS houdt wel de processen op basis van fossiele brandstoffen in stand. Het is daarom zinvol om de inzet van CCS te focussen op de routes waar CCS tegen relatief lage kosten op grote schaal kan worden toegepast, waar op dit moment nog geen alternatieve technieken zijn om grootschalige CO₂-reductie te realiseren. Zo kan het kosteneffectieve CO₂-reductiepotentieel van CCS worden benut om de klimaat-doelstellingen voor 2030 te halen terwijl het risico op lock-in wordt geminimaliseerd. We zien dan vooral een mogelijke rol voor CCS in de ijzer/staalindustrie en bij waterstofproductie in de kunstmest-, petrochemie- en raffinagesector.

Als de CCS-processen en infrastructuur eenmaal operationeel zijn, zijn de gebruikskosten relatief laag waardoor er minder prikkel is om in andere verduurzamingstechnieken te investeren. Deze lock-in risico's kunnen worden verminderd door CCS niet te ontwikkelen voor processen waar de komende 10-15 jaar andere alternatieven grootschalig kunnen worden ingezet, en door een beleidskader op te stellen dat voldoende kansen creëert voor de alternatieven. Bovendien kan bij sommige toepassingen de vraag naar de producten in de toekomst afnemen (bijvoorbeeld benzine of kunstmest). Door bij eventuele investeringen in CCS met deze vraagontwikkeling rekening te houden kan het risico op *stranded assets* en versnelde afschrijving van investeringen worden verminderd.

Aanbevelingen

Er zijn verschillende technologieën geïdentificeerd die kunnen zorgen voor een transitie van de fossiele naar een duurzame industrie. Deze moeten nog verder worden ontwikkeld en gestimuleerd om ook daadwerkelijk op grote schaal toegepast te kunnen worden. De verdere invulling van de afspraken rondom CCS in het Klimaatakkoord betekent daarom ook implementatie van beleid dat ervoor zorgt dat het CO₂-reductiepotentieel van de verschillende alternatieven wordt gerealiseerd en vergroot.

Dit betekent:

- Stabiel en effectief korte- tot langetermijnbeleid dat bedrijven aanspoort om CO₂-reductietechnologieën toe te passen die nu al tegen redelijke meerkosten kunnen worden toegepast of zelfs al rendabel zijn.
- R&D- en innovatiebeleid voor het versnellen van de verdere ontwikkeling en toepassing van nieuwe technologieën en innovaties met een groot CO₂-reductiepotentieel voor de toekomst.
- Ambitieuw hernieuwbaar energiebeleid, dat zorgt voor een sterke groei van de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit en groene waterstof voor de industrie.
- Implementatie van beleid gericht op het gebruik van duurzame biomassa in de industrie, en het vergroten van circulaire inzet van materialen en producten.

Summary

Introduction

The industrial sectors steel, cement, chemicals and refineries face the challenge of substantially reducing their CO₂ emissions over the coming decade, tailing off towards zero by 2050. To reach this goal, it will require a transitional change in energy and raw materials use that needs to be initiated in the next few years. Pathways and technologies for industry decarbonisation include improved energy efficiency, electrification, reuse and recycling. Carbon Capture and Storage (CCS) - the process of capturing CO₂ and sequester it in the seabed - could also be used for hard to abate emissions from these sectors.

In the Netherlands, the climate policy plans for the coming years are laid out in the National Climate Agreement, which contains the policies and measures agreed on by the Dutch government and the sectors¹. This includes the goal to reduce industrial emissions by an additional 14.3 Mt CO₂ annually up to 2030, on top of the 5.1 Mton CO₂ emission reduction prescribed understanding policies.

To ensure that the CCS deployment would not hamper the development of other decarbonisation technologies, the Dutch Climate Agreement limits public subsidies to CCS. Other means of CO₂ abatement must be prioritised; subsidised CCS may account for at most half the CO₂ reduction target for industry (7.2 Mt CO₂); and after 2035 no new CCS subsidies are to be granted for fossil CO₂. The details of this policy have not yet been decided on.

Focused on the Netherlands, this study reviews the main routes for reducing industrial CO₂ emissions and examines four industries with high CO₂ emissions where there is currently major interest in CCS: the steel, cement, chemicals production and refinery sectors. It identifies the industrial processes for which CCS will be needed to reach the 2030 and 2050 emission reduction targets in the Netherlands and where, instead, the use of CCS might lead to risks of lock-in in fossil processes.

CO₂ abatement measures for heavy industry

For each of these industry sectors in the Netherlands, the study analyses the most promising routes and technologies according to their CO₂ reduction potential, the level of technology readiness, costs and any other practical obstacles. Based on these considerations, for each sector the study provides an approximate timetable for the technical transition towards decarbonisation to take place, assuming effective climate policy and successful development of the technology.

- In the **iron and steel industry**, CCS has CO₂ reduction potential in the near term, possibly in combination with an upscaled HIsarna process (a more energy efficient iron making technology that results in waste gas with high CO₂ content). Alternatives becoming available in the future include direct reduction technology using hydrogen produced with renewable energy, direct electrolysis, biocoke use and circularity.
- CO₂ abatement in the **cement industry** is no longer relevant for the Netherlands, since production capacity having been phased out over the last few decades. In countries across Europe where there is active cement production, CCS does have major CO₂

¹ The participating sectors are: electricity, industry, built environment, traffic and transport, and agriculture.

reduction potential in the short to medium term, though, while alternatives will also be emerging in the longer term.

- The **chemical industry** is highly diversified in the Netherlands, so emissions reduction will require a wide range of technologies. In the near term, CCS can be deployed with existing fossil hydrogen and ammonia production in the fertiliser industry. In this industry, further emission cuts will also come from reduced fertiliser demand as circular agriculture gains ground. For other processes it will be better to opt for alternatives to CCS like electrification.
- CO₂ abatement in the **refinery sector** will, in the longer term, be driven by reduced demand for fossil fuels. In the near term, though, there is scope for CCS deployment with hydrogen production for refineries, with process intensification, green hydrogen and e-fuels emerging as future options.

The role of CCS and lock-in effects

While the assessment in this report identified numerous CO₂ abatement options in each of the four sectors, most of the technologies are still in early development, in the pilot or semi-technical phase and cannot be deployed on any major scale in the near term. Their cost, efficiency and practical feasibility are also as yet unclear. To reach the 2050 climate-neutrality target an all-out effort is required to develop sustainable alternatives.

For certain industry sectors, CCS is a mature technology and can be applied in the near term as a route to CO₂ reduction while other technologies are being further developed and prepared for market. There is a risk, however, that CCS may lead to lock-in of fossil-based processes. Once CCS processes and infrastructure are in place, operational costs may be relatively low and may reduce the incentive to invest in other CO₂ reduction technologies. This risk can be reduced when the roll-out of CCS is directed at processes where there are currently no other options for achieving significant CO₂ cuts. By furthermore focussing on projects where CCS can lead to significant CO₂ reduction at relatively low cost, cost-effective CO₂ mitigation can be achieved towards 2030 while minimising the risk of lock-in. Against this background, we conclude from the assessment in this report that the biggest potential for CCS is in the iron/steel industry and with hydrogen production in the fertiliser, petrochemical and refinery sectors.

This risk of lock-in can also be reduced by not investing in CCS for processes where alternative technologies will become available in the coming 10-15 years, and by implementing a policy framework that provides sufficient incentives for these alternatives. This is key to achieve future climate goals. Furthermore, product demand in some industries may decrease in the future (gasoline or fertiliser, for example). These developments should be taken into account when investing in CCS for such industries, to reduce the risk of stranded assets.

Recommendations

There is a range of routes and technologies for achieving a transition from fossil-based to sustainable industry. Some are already well developed, like direct reduction of iron ore and methanol from CO₂. Many others still require further development, though, and will need to be incentivised before they can be deployed on any major scale. To ensure that this CO₂ reduction potential is indeed realised and even boosted, an effective policy framework for the various alternative technologies is crucial. Only then can the Dutch climate targets be achieved, also in the longer term after the CCS support policies are phased out.

This means:

- Stable and effective near- to long-term policies encouraging companies to implement CO₂ abatement technologies that can already be applied at little or no additional cost.
- R&D and innovation policies for speeding up further development and deployment of new technologies and innovations with major CO₂ reduction potential.
- Ambitious renewable energy policies, for increased production of renewable power and green hydrogen for industrial use.
- Implementation of policies for boosting industrial use of renewable biomass and more circular use of materials and products.
- Further development and implementation of the CCS policies that are laid out in the Dutch Climate Agreement, to drive the necessary investments in those sectors where the near-term benefits are clear and lock-in risks can be minimised, i.e. in the iron/steel industry and with hydrogen production in the fertiliser, petrochemical and refinery sectors.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De industrie staat voor de opgave om haar CO₂-uitstoot in 2030 met 59% te verminderen ten opzichte van 1990, om uiteindelijk in 2050 op nagenoeg nul CO₂-uitstoot uit te komen. Het doel voor 2030 betekent een forse opgave voor de sector, bovenop het bestaande beleid is nog eens 14,3 Mton CO₂-reductie nodig.

Een deel van deze CO₂-reductie zal naar verwachting worden behaald door afvang en offshore, ondergrondse opslag van CO₂ (CCS). In het Klimaatakkoord is afgesproken om de subsidie voor deze techniek te beperken tot maximaal 7,2 Mton CO₂ in 2030 om andere verduurzamingsopties niet in de weg te zitten.

In de discussie in Nederland is men het er in het algemeen over eens dat de toepassing van CCS andere alternatieve transitietechnieken niet mag belemmeren en verdringing van structureel duurzame technieken voorkomen moet worden. Er is echter nog geen consensus over wat dit concreet betekent voor de toepassing van CCS in verschillende sectoren en toepassingen. Voor welke processen is de toepassing van CCS geen belemmering voor alternatieven? Er bestaat een breed scala aan voorspellingen en verwachtingen wanneer duurzame alternatieven een voldoende technologie gereedheidsniveau zullen bereiken. Maar veel van deze ontwikkelingen zijn nog onzeker. Daarnaast ontbreekt soms beschikbare informatie om tot een onderbouwde prognose te komen die kan worden gebruikt om te bepalen of de toepassing van CCS structurele verduurzaming niet belemmert, vertraagt of verdringt.

Natuur & Milieu heeft daarom aan CE Delft gevraagd om de relevante informatie in kaart te brengen waarmee de discussie over deze vragen gevoed kan worden. Dit onderzoek bouwt daarmee voort op de 'Routekaart CCS' die in 2018 is ontwikkeld, in nauwe samenwerking met een groot aantal belanghebbenden (De Gemeyn, 2018).

1.2 Doelstelling en afbakening

De doelstelling van dit project is om te onderzoeken voor welke mogelijke toepassingen van CCS er technisch haalbare technieken zijn die kosteneffectiever zijn of kunnen worden dan CCS. Vervolgens zoeken we antwoord op de vraag voor welke toepassingen CCS nodig is om de reductiedoelstellingen voor 2030 en 2050 te halen, gezien het plafond van 7,2 Mton voor CCS. Dit zijn toepassingen waarvoor geen realistische alternatieven beschikbaar zijn.

Het rapport moet een feitenbasis vormen voor verdere discussie met stakeholders en beleidsmakers.

De studie focust op de volgende sectoren:

- staalproductie;
- cementproductie;
- chemie;
- raffinage.

Dit zijn de sectoren met veel CO₂-uitstoot, en waar veel aandacht is voor CCS.

1.3 Leeswijzer

Het rapport is als volgt opgebouwd:

- In Hoofdstuk 2 beschrijven we de huidige beleidscontext.
- Hoofdstuk 3 schetst een globaal beeld hoe de verduurzaming van de industrie eruit kan zien en welke verduurzamingsrichtingen mogelijk zijn.
- In Hoofdstuk 4 volgt de analyse van de vier sectoren: welke verduurzamingsopties zijn er, hoe ver zijn ze verwijderd van grootschalige toepassing, hoe verhouden de alternatieven zich tot CCS, welke rol kan CCS hebben in de verduurzaming van de sector? Het hoofdstuk zelf bevat alleen de conclusies van deze analyse, de achtergrondinformatie hiervoor is te vinden in Bijlage A.
- De conclusies en beleidsaanbevelingen die uit deze studie volgen staan in Hoofdstuk 5.

2 Beleidscontext

2.1 Nationaal beleid

Het Klimaatakkoord (Klimaatakkoord, 2019) beschrijft een visie voor de industrie waarin de uitstoot van CO₂ nagenoeg nul is in 2050. Tegelijkertijd is de industrie dan circulair, mondiaal toonaangevend en innovatief. Hiervoor is een ambitie neergezet van 14,3 Mton CO₂-reductie in 2030, bovenop bestaand beleid. De totale opgave komt hiermee op 19,4 Mton CO₂-reductie ten opzichte van 55,1 Mton CO₂-uitstoot in 2015. Het Klimaatakkoord beschrijft vervolgens met welk beleid deze ambitie zal worden gerealiseerd.

CCS is één van de technieken die kan bijdragen aan CO₂-reductie in de industrie. Het is een techniek waar in het buitenland al een aantal projecten voor lopen, maar nog niet in de EU. Studies laten wel zien dat er ook in Nederland industriële regio's zijn waar CCS zou kunnen worden toegepast, en een relatief kosteneffectieve CO₂-reductietechniek is (PBL, 2017; Berenschot, Ecofys, 2018). Deze techniek roept echter ook veel discussie op. Aan de ene kant is CCS een manier om op relatief korte termijn CO₂-emissiereducties te bereiken in bepaalde sectoren. Aan de andere kant kunnen investeringen in CCS de ontwikkeling en toepassing van alternatieve duurzame technologieën in de weg staan en daarmee een barrière vormen voor de energietransitie van fossiele naar hernieuwbare energie, en van een lineaire naar een circulaire economie. Het Klimaatakkoord erkent dit spanningsveld en stelt dat er een balans gevonden moet worden tussen enerzijds het voorkomen van verdringing van schone technieken en anderzijds het benutten van het CO₂-reductiepotentieel dat CCS biedt voor het behalen van de klimaatdoelstelling.

Vanwege de mogelijke nadelen van CCS is deze techniek met een aantal randvoorwaarden opgenomen in het Klimaatakkoord. De volgende beperkingen worden gesteld aan subsidiëring van CCS:

1. Zeef: Alternatieven krijgen voorrang op CCS.
2. Plafond: Gesubsidieerde CCS mag maximaal de helft van de emissiereductie bedienen (7,2 Mton CO₂).
3. Horizon: Na 2035 worden er geen nieuwe SDE+-beschikkingen voor CCS meer uitgegeven, daarna worden alleen nog beschikkingen afgegeven voor negatieve emissies (afvang en opslag van CO₂ van biomassa, BECCS) en CCU (Carbon, Capture and Utilisation).

De toepassing van CCS na 2035 wordt niet beperkt, alleen de (nieuwe) subsidies². Het is goed denkbaar dat CCS na 2035 voor sommige toepassingen ook zonder subsidies rendabel is, bij hoge CO₂-prijzen, achterblijvende ontwikkeling van de alternatieven of innovaties die leiden tot lagere kosten voor CCS. Daarnaast worden er voorwaarden gesteld zoals in Nederland alleen offshore opslag van CO₂, en wordt er verwezen naar het wettelijk kader voor onder andere veiligheid, voorkomen van lekkages en monitoring.

Deze afspraken over de zeef, het plafond en de horizon moeten de komende tijd verder worden uitgewerkt om concreet te kunnen worden geïmplementeerd in de beleidsmaatregelen die worden ontwikkeld om het Klimaatakkoord uit te voeren. Hiervoor moeten de criteria uit het Klimaatakkoord verder worden gedefinieerd: wanneer belemmert CCS de ontwikkeling en toepassing van alternatieve transitietechnieken? Dit vergt een analyse van

² Let wel: na 2035 worden er geen *nieuwe* beschikkingen meer afgegeven. De looptijd van de beschikkingen afgegeven voor 2035 loopt wel tot na 2035 door.

de verschillende CO₂-reductietechnieken, maar ook van de bredere ontwikkelingen rondom de verduurzaming van de Nederlandse industrie. CCS moet niet de transitie van oude fossiele naar nieuwe duurzame processen belemmeren. Een belangrijke vraag daarbij is hoe kan worden voorkomen dat CCS door de subsidies de komende jaren een voordeel krijgt ten opzichte van andere technieken, en daardoor uiteindelijk het meest kosteneffectief wordt - niet doordat de techniek op zich goedkoper is maar omdat andere technieken dat voordeel niet hebben gehad.

2.2 Europees beleid

CCS wordt ook op EU-niveau gezien als een van de technieken waarmee de EU haar lange termijn CO₂-reductiedoelstellingen kan halen (EU, 2019). Het EU ETS en het Europese Innovatiefonds (Innovation Fund) worden gezien als de belangrijkste EU-beleidsinstrumenten om CCS-projecten te ondersteunen. Met de voorganger van het Innovatiefonds, het NER300-programma, is het niet gelukt om CCS-projecten te realiseren, de lessen die daaruit zijn getrokken zijn meegenomen in de ontwikkeling van het Innovatiefonds. Het fonds wordt gevuld met inkomsten van het EU ETS, en overgebleven budget van het NER300-programma.

Het fonds richt zich op een breed scala aan innovatieve technologieën en processen in de energie-intensieve industrie, op CCU, CCS, hernieuwbare energieproductie en energie-opslag. Het Innovatiefonds streeft er ook naar om een mix van technologieën te subsidiëren, er is echter geen plafond voor specifieke technieken of andersoortige randvoorwaarden opgenomen. Voor de evaluatie van de aanvragen worden de volgende selectiecriteria gebruikt:

- mate van CO₂-reductie;
- mate van innovatie;
- volwassenheid van het project ('maturity');
- opschalingsmogelijkheden;
- kosteneffectiviteit.

De eerste call for tender voor het Innovatiefonds is begin juli 2020 geopend³. Het fonds draagt tot 60% bij aan de meerkosten van een project (ten opzichte van de gangbare techniek). Het is nog niet bekend of ook Nederlandse CCS-projecten een subsidieaanvraag zullen indienen.

Het Klimaatakkoord is ontwikkeld vanuit de huidige Nederlandse klimaatambitie en de huidige EU-energie- en klimaatdoelen. De Europese Commissie heeft echter in december 2019 in de 'Europese Green Deal' plannen gepresenteerd om de klimaatambitie op te schroeven (Europese Commissie, 2019): de EU-doelstelling voor het terugdringen van de broeikasgasuitstoot in 2030 wordt verhoogd van minstens 40% tot ten minste 50%, met 55% als streefdoel (alle percentages ten opzichte van 1990). Deze Green Deal is positief ontvangen door zowel het Europese Parlement als de Europese Raad en wordt nu verder in concrete beleidsvoorstellen uitgewerkt.

In dit kader heeft de Europese Commissie in maart 2020 een nieuwe Europese industrie-strategie gepubliceerd (EC, 2020). Dit is een verdere uitwerking van de wijze waarop de Europese industrie kan bijdragen aan de Europese ambitie om in 2050 klimaatneutraal te

³ [European Commission Funding & tender opportunities, Work programme INNOVFUND-2020](#), of zie [European Commission Innovation and Networks Executive Agency \(INEA\), Innovation Fund](#)



worden. Een belangrijk onderdeel van deze strategie is de transitie naar schone en betaalbare energie en grondstoffen, met daarbij aandachtspunten zoals energiebesparing, hernieuwbare energie, onderzoek en innovatie en circulaire economie. Voor dit laatste is ook een uitgebreider actieplan strategie opgesteld die tegelijkertijd met de nieuwe industrie-strategie is gepubliceerd (EC, 2020).

CCS wordt in de Green Deal genoemd als een van de prioritaire gebieden voor de verduurzaming van de industrie, naast schone waterstof, brandstofcellen en andere brandstoffen, en energieopslag. De nieuwe Europese industriestrategie noemt CCS echter niet, en werkt het dus ook niet verder uit. Het Actieplan voor een Circulaire Economie noemt alleen CCU, waarbij CO₂ wordt afgevangen en vervolgens langdurig wordt opgeslagen in bouwmaterialen. Het lijkt er dus niet op dat het Europese beleid rondom CCS sterk zal veranderen de komende tijd. Het Innovation Fund zal het belangrijkste instrument zijn, naast het EU ETS.

3 Verduurzaming van de industrie

CCS is slechts één van de mogelijke richtingen voor verduurzaming van de industrie. Om de mogelijke rol van CCS en de wenselijkheid hiervan te kunnen inschatten en beoordelen is het daarom belangrijk om inzicht te krijgen in de bredere context van verduurzaming van de sector. In dit hoofdstuk zullen daarom de belangrijkste verduurzamingsrichtingen van de industrie besproken worden. Het gaat hier om een algemene introductie van de richtingen en de rol die deze kunnen spelen in de verduurzaming van de industrie. Vervolgens worden in Hoofdstuk 4 specifieke technieken binnen deze richtingen besproken en geanalyseerd, voor elk van de vier industrieën waar we in dit rapport naar kijken.

Bij deze analyse zal rekening gehouden worden met de diversiteit van de industriële sectoren en bijbehorende processen. Door de verscheidenheid aan processen bestaat er niet één verduurzamingsrichting die het meest effectief is voor de hele industrie, maar zal CO₂-reductie plaatsvinden door middel van een scala aan verduurzamingsrichtingen.

De bronnen van CO₂-emissies van de industrie kunnen grofweg ingedeeld worden in twee categorieën:

1. Ten eerste worden CO₂-emissies veroorzaakt door het **energiegebruik** van de industrie. Door efficiëntiemaatregelen kan het energiegebruik van de industrie verminderd worden, maar hier zitten grenzen aan. Dit betekent dat klimaatneutrale energiebronnen nodig zijn voor verduurzaming van de industrie. De enige opties hiervoor zijn het gebruik van hernieuwbare energiebronnen of het gebruik van fossiele energiebronnen in combinatie met volledige afvang van CO₂.
2. De tweede bron van CO₂-emissies in de industrie zijn zogenaamde **procesemissies**. Dit gaat om CO₂ geproduceerd in het primaire productieproces in plaats van bij de verbranding van fossiele brandstoffen, bijvoorbeeld bij de productie van cement of stoom. Deze emissies zijn inherent aan het productieproces en zullen ook nog bij een volledig klimaatneutrale energievoorziening blijven bestaan. Bij een verder ongewijzigd proces vormt de enige optie voor reductie van procesemissies toepassen van CCS (end-of-pipe). Het alternatief is dan het aanpassen of vervangen van de huidige productieprocessen door een duurzaam proces of het gebruik van andere duurzame grondstoffen of producten.

De producten die geproduceerd worden in de industrie kunnen daarnaast ook emissies veroorzaken in de gebruiksfase. Deze emissies zijn in deze studie niet meegenomen, zij worden niet toegerekend aan de industrie en lenen zich ook minder voor CCS. Het gaat bijvoorbeeld om emissies die vrijkomen bij de verbranding van benzine in voertuigen.

In de volgende paragraaf wordt een introductie gegeven van CCS en wordt besproken hoe deze techniek bij kan dragen aan de verduurzaming van de industrie. Vervolgens worden de andere decarbonisatieroutes voor de industrie behandeld.

3.1 Carbon Capture and Storage (CCS)

Bij CCS wordt CO₂ die vrijkomt bij processen opgevangen en vervolgens opgeslagen onder de grond. Dit levert een reductie van de CO₂-uitstoot op aangezien de vrijgekomen CO₂ hierdoor niet in de atmosfeer terechtkomt.

CCS is een techniek die CO₂-uitstoot reduceert aan het eind van het proces, zonder dat het productieproces zelf aangepast hoeft te worden. Dit betekent dat de oude, fossiele processen behouden kunnen worden (retro-fit). Dit maakt CCS met name geschikt voor CO₂-reductie op de korte termijn, bij bestaande installaties. Omdat alleen in de afvang-installatie en niet in een geheel nieuw productieproces geïnvesteerd hoeft te worden, is de investering relatief beperkt en kan CCS betrekkelijk snel worden uitgerold (de TRL bedraagt 6-9). Wel vergt het proces veel energie, zie de bijlage voor een nader toelichting.

Een risico van toepassen van CCS bij de huidige fossiele productieprocessen is dat het kan leiden tot een lock-in. Investerings in CCS kunnen ten koste gaan van investeringen in nieuwe intrinsiek duurzame processen. De benodigde CO₂-reductie wordt al behaald via CCS, waardoor er weinig noodzaak is voor het veranderen van het productieproces.

De bestaande assets kunnen langer worden gebruikt. Op die manier vertraagt CCS de transitie van fossiele productieprocessen naar nieuwe duurzame technieken. Daarnaast bestaat er een risico op *stranded assets* wanneer wordt geïnvesteerd in CCS-installaties en infrastructuur voor sectoren of processen die in de toekomst overbodig worden, vanwege verminderde vraag naar het eindproduct, toenemende circulariteit of de opkomst van alternatieve CO₂-reductietechnologieën.

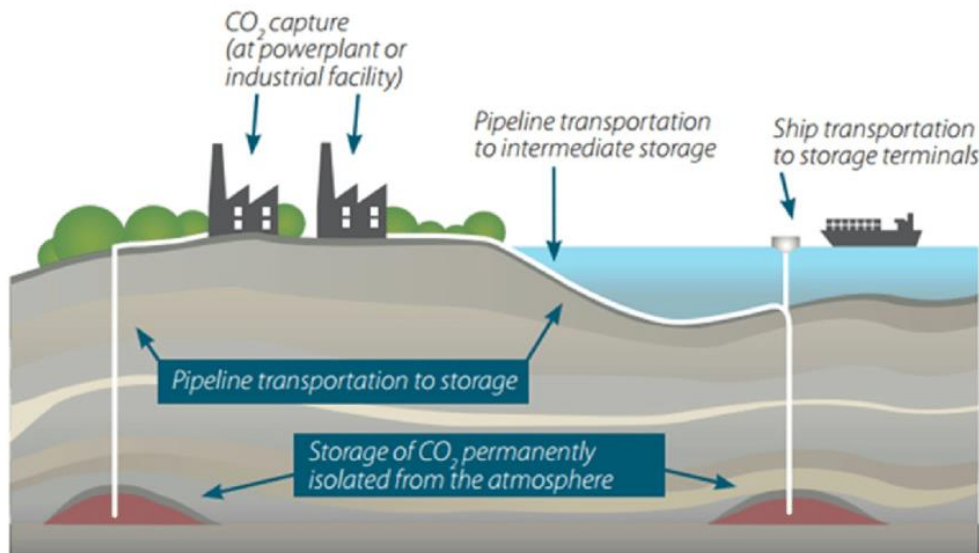
CCS kan ook toegepast bij nieuwe processen die ingezet worden om de transitie naar vergaande emissiereductie verder door te zetten. Het gaat dan om productie van zogenaamde blauwe waterstof op basis van aardgas. Daarnaast kan CCS gebruikt worden in combinatie met biomassa om negatieve emissies te realiseren en op die manier CO₂ uit de atmosfeer te onttrekken. Dit wordt BECCS genoemd, Bio-Energy with Carbon Capture and Storage. De CO₂ wordt opgenomen door biomassa. Vervolgens wordt de biomassa verbrand en de vrijgekomen CO₂ afgevangen en opgeslagen.

CCS is overigens niet helemaal klimaatneutraal. Niet alle CO₂ wordt afgevangen, daarnaast is er momenteel nog veel energie nodig die meestal niet klimaatneutraal wordt opgewekt. Daarnaast blijven mogelijk emissies bestaan bij andere stappen in de keten.

Proces

Het proces van CCS bestaat grofweg uit drie componenten, zie Figuur 1:

Figuur 1 - Stroomdiagram van het CCS-proces



Bron: [Researchgate.net](https://www.researchgate.net).

Als eerste moet de CO₂ afgevangen worden uit rookgassen of CO₂-houdende processtromen bij een elektriciteitscentrale of bij een industriële installatie. De CO₂ moet vervolgens klaargemaakt worden voor transport door middel van zuivering en droging. De CO₂ kan in gasvorm worden getransporteerd door een pijpleiding of via een vrachtwagen of schip na vervloeiing⁴. Tot slot volgt superkritische opslag in lege gas- of olievelden of aquifers⁵.

Er zijn drie soorten afvang van CO₂ mogelijk, namelijk pre-combustion, post-combustion en oxyfuel. Bij pre-combustion CCS wordt, zoals de naam al suggereert, de CO₂ afgevangen voorafgaand aan het primaire productieproces. De fossiele brandstof wordt hierbij vergast tot koolstofmonoxide en waterstof. Koolmonoxide reageert vervolgens door met stoom tot extra waterstof, waarbij ook CO₂ en water vrijkomen. De vrijgekomen hoog geconcentreerde CO₂ kan dan makkelijk afgevangen worden. De geproduceerde H₂ kan gebruikt worden als grondstof of verbrand worden voor warmte/energieopwekking, in plaats van de oorspronkelijke fossiele brandstof en geeft geen CO₂-emissies.

Post-combustion CCS is de meest gangbare techniek. Bij dit proces blijft het productieproces identiek, en wordt de CO₂ afgevangen uit de rookgassen door een in retro-fit toegevoegde installatie. Deze vorm van CCS kan gebruikt worden bij de huidige industriële installaties die daarvoor nauwelijks tot geen aanpassing vergen. Voor de afvang van CO₂ uit de rookgassen wordt meestal de beproefde aminegasbehandeling gebruikt, een techniek die nu commercieel beschikbaar is (TRL 8).

⁴ Proces waarbij de CO₂ vloeibaar gemaakt wordt.

⁵ Watervoerende lagen.

De laatste variant, oxyfuel CCS, is een variant op post-combustion CCS. Hierbij wordt pure zuurstof gebruikt tijdens de verbranding van de fossiele brandstof in plaats van normale buitenlucht. Door de afwezigheid van stikstof bestaan de rookgassen vrijwel uitsluitend uit water en CO₂. Hierdoor zijn de kosten en het energieverbruik van het afvangen van CO₂ hier lager. Maar de productie van zuurstof met luchtdestillatie (ASU) kost weer extra energie.

Opslag kan in principe ook onder land plaatsvinden maar in Nederland is besloten dat alleen offshore ondergrondse opslag van CO₂ toegestaan wordt (Klimaatakkoord, 2019). Voor het transport van grote hoeveelheden CO₂ vanuit industriële clusters naar de Noordzee is transport via pijpleidingen de meest voor de hand liggende optie. De infrastructuur hiervoor is echter nog niet/nauwelijks aanwezig. Het aanleggen van deze infrastructuur vraagt om grote investeringen en is tijdsintensief.

Het opslaan van CO₂ in de gas-/olievelden of aquifers is een volwassen technologie. Het wordt al op verschillende locaties in de wereld toegepast bij de winning van gas of olie⁶. Het doel van deze CO₂ opslag is bij deze toepassing vaak anders dan bij CCS, maar de gebruikte techniek is hetzelfde. De opslagcapaciteit voor CO₂ onder zee is circa 1.200 Mton (Rijksoverheid, sd), wat meer dan 20 keer zoveel is als de totale jaarlijkse CO₂-uitstoot van de industrie. Dit betekent dat de opslagcapaciteit de komende decennia ruim voldoende is.

Wanneer is CCS interessant?

Deze vraag wordt in de volgende hoofdstukken in meer detail beantwoord, maar hier kunnen we alvast een aantal basisprincipes toelichten.

CCS is met name interessant voor sectoren die veel CO₂ uitstoten, tot 2050 perspectief hebben binnen een klimaatneutrale economie, en waarvoor er ook op de lange termijn geen alternatieven zijn voor CCS. Daarnaast kan het worden ingezet als tijdelijke oplossing voor sectoren die veel CO₂ uitstoten en waar op korte termijn geen alternatieve maatregelen zijn om de CO₂-emissies terug te dringen. Ook de zuiverheid van de af te vangen stroom speelt een rol, omdat deze sterk bepalend is voor de kosten van CCS.

De afvang van de CO₂ is het onderdeel van het proces met de hoogste kosten. Daarnaast heeft deze stap een hoge energie-intensiteit. Het energieverbruik en de kosten van de afvang zijn sterk afhankelijk van de CO₂-concentratie van de rookgassen. Hoe hoger de CO₂-concentratie, hoe lager de kosten en het energieverbruik. De zuiverheid van de CO₂-stroom is afhankelijk van het productieproces.

De CO₂-bronnen kunnen grofweg opgedeeld worden in drie categorieën:

1. **Bronnen met hoog geconcentreerde CO₂-stromen.** Hieronder vallen ammoniak-fabrieken, methanolfabrieken, ethanolfabrieken, aardgas- en biogas behandelings-installaties, CO₂ geproduceerd bij de productie van waterstof uit steenkool, aardolie of aardgas en etheenoxidefabrieken. Bij deze productieprocessen komt vrijwel zuivere CO₂ vrij die na drogen en compressie direct kan worden opgeslagen of afgevoerd via een pijpleiding. Afvang van CO₂ bij deze bronnen is al gangbaar en geïmplementeerd in de vorm van CCU. Bij deze bronnen liggen de kosten van afvang tussen de 10 en 20 euro per ton CO₂, exclusief transport en opslag (CE Delft, 2016a).

⁶ Het toevoegen van CO₂ aan gas- of olievelen zorgt voor een stijging van de productie uit deze velden. Dit proces heeft enhanced gas/oil recovery.

2. **Hoogovens, waterstoffabrieken, cementovens en vergelijkbare bronnen.** De concentratie van de vrijgekomen CO₂ bij deze processen varieert van 20-30% voor hoogovens tot 40-70% voor waterstoffabrieken. Bij deze processen is scheiding van de CO₂ uit de vrijgekomen rookgassen noodzakelijk. Bij deze bronnen liggen de kosten van afvang tussen de 40 en 50 euro per ton CO₂, exclusief transport en opslag (CE Delft, 2016a).
3. **Grote gasgestookte vuurhaarden en afvalverbranding.** Grote aardgas of restgas-gestookte vuurhaarden zijn bijvoorbeeld de fornuizen van stoomkrakers en fornuizen van atmosferische destillatie bij aardolieraffinaderijen. De CO₂-concentratie in de afgassen is hier lager met 10-15%, dus bij deze processen is energie-intensievere scheiding noodzakelijk. Voor dergelijke deze bronnen liggen de kosten van afvang tussen de 60 en 80 euro per ton CO₂, exclusief transport en opslag (CE Delft, 2016a).
4. **Gasgestookte wkk.** Deze categorie zal steeds meer een rol gaan spelen bij het stabiliseren van fluctuaties in het aanbod van duurzame energie (flex). Omdat hier de concentratie CO₂ in de rookgassen 4-5% is, kost deze categorie de meeste energie per ton afgevangen CO₂ en lopen de kosten verder op, naar schatting tot tussen 80 en 120 euro per ton CO₂.

Vanwege de kosten en het energiegebruik is CCS het eerst voor de hand liggend bij processen waarbij er sprake is van hoge CO₂-concentraties. Bij de processen uit de eerste van de bovenstaande categorieën wordt de CO₂ vaak al afgevangen. Nu wordt de opgevangen CO₂ gebruikt voor CCU-toepassingen, maar CCS is hierbij ook een optie.

Ook voor de tweede categorie is CCS een realistische en betaalbare optie. Enkele voorbeelden van processen die in deze categorie vallen zijn productie van waterstof door middel van stoomreforming van aardgas (blauwe waterstof), cementproductie en de productie van ijzer en staal door middel van ijzerreductie met cokes.

Bij de derde categorie van bronnen kent CCS hogere kosten door het hoge energieverbruik en vergt meer financiële steun. Dit kan echter veranderen als de kosten van CCS sterk dalen door technologische ontwikkelingen of door een hogere CO₂-prijs.

Op dit moment wordt de vierde categorie buiten beschouwing van afvang en CCS gehouden vanwege het relatief hoge energieverbruik en de te hoge kosten. Ook dit kan veranderen door technologische ontwikkelingen.

Tot slot is de locatie van de CO₂-bron relevant in verband met de infrastructuur die nodig is voor het transport. In Nederland is besloten dat alleen offshore ondergrondse opslag toegestaan wordt. Daardoor is CCS lastiger voor industrie op grotere afstand uit de kust, zoals in het midden en oosten van het land. Daarnaast is het goedkoper als meerdere partijen uit industrieclusters CCS toepassen, aangezien dan geen aparte buisleiding nodig is voor elk bedrijf. Afgevangen CO₂ kan ook getransporteerd worden per schip. Dit is goedkoper dan buisleidingen als het om kleinere hoeveelheden CO₂ gaat.

3.2 Andere decarbonisatieroutes

3.2.1 Energie-efficiëntie en procesintensivering

CO₂-reductie kan ook worden bereikt door het verbeteren van de energie-efficiëntie van processen. Dit betekent dat dezelfde producten geproduceerd worden met minder energie. Het gaat dan om maatregelen die geen radicale veranderingen in de productieprocessen teweegbrengen en daardoor relatief makkelijk te implementeren zijn. Voorbeelden van

energiebesparende maatregelen zijn verbeterde isolatie, hergebruik van restwarmte of gebruik van zuinige verlichting. De voornaamste barrière van dit soort maatregelen zijn niet zozeer de hoge investeringskosten, maar de focus op operationele efficiëntie en beperkte aandacht bij bedrijven voor energiebesparing. Sommige energie-efficiëntiemaatregelen, zoals zuinige verlichting en bepaalde vormen van isolatie, zijn rendabel. Kleinere bedrijven zijn verplicht om dergelijke maatregelen te treffen; grotere bedrijven die onder het EU ETS en/of MJA/MEE-convenanten vallen mogen afwijken en hoeven deze maatregelen niet te treffen. Probleem vormt de hoge eisen aan Return-On-Investment voor investeringen in de industrie, waarbij op zich rendabele investeringen voor energiebesparing het toch afleggen tegen nog rendabeler investeringen zodat dat kapitaal voor verbeterprojecten niet beschikbaar is.

Bij energie-efficiëntiemaatregelen is er sprake van incrementele verbeteringen. Bij procesintensivering daarentegen is er sprake van een radicale verandering van het gehele chemische proces. Er kunnen grote besparingen gerealiseerd worden door het intensiveren van de warmteoverdracht, het toepassen van nieuwe scheidingsmethodes en het combineren van verschillende functies die oorspronkelijk door verschillende onderdelen uitgevoerd worden. Procesintensivering heeft een groot potentieel, maar de meeste technieken met microflowreactoren en complexere membranen zijn momenteel nog niet marktrijp waardoor het nog niet op industriële schaal toegepast kan worden. Dit geldt niet voor conventionele membranen en nieuwe katalysatoren. Bij de laatste winnende operationele overwegingen het vaak van potentiële verbeteringen in energie-efficiëntie.

3.2.2 Elektrificatie

Elektrificatie betreft het inzetten van elektriciteit ter vervanging van een andere energiedrager zoals aardgas. Door het groeiende aandeel van hernieuwbare elektriciteitsproductie zal de CO₂-uitstoot van elektriciteit per kWh sterk dalen in de komende jaren. Dit leidt tot een toenemend potentieel voor decarbonisatie van de industrie door middel van overschakeling van fossiele brandstoffen naar elektriciteit, bijvoorbeeld voor de productie van warmte. Daarnaast heeft het overschakelen naar elektrische processen nog andere voordelen, zoals efficiëntievoordelen bij toepassing van hoge- en lagetemperatuurwarmtepompen.

Een groot gedeelte van de industriële processen kan geëlektrificeerd worden. Zo zijn er verschillende technologieën commercieel beschikbaar als alternatief voor fossiele brandstoffen bij de productie van warmte. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van bijvoorbeeld warmtepompen, stoomrecompressie, elektrische fornuizen of elektrische weerstandverwarming. Daarnaast kan elektrificatie fossiele productieprocessen vervangen, bijvoorbeeld bij de productie van staal. De energievraag van industriële processen is meestal volcontinu. Dit betekent dat overstappen naar elektriciteit voor warmteproductie in de industrie zeer grote structurele investeringen in de capaciteit van het net kunnen vergen. Bij een grote energievraag worden alternatieven voor elektriciteit die tot lagere infrastructuurkosten leiden, zoals waterstof, biogas/biomassa, CCS of CCU, aantrekkelijker.

3.2.3 Biomassa

Als fossiele brandstoffen vervangen worden door biomassa vindt CO₂-emissiereductie plaats doordat fossiele CO₂-emissies worden vervangen door biogene, kortcyclische CO₂-emissies. Er moet per route worden gekeken of over de gehele levenscyclus ook daadwerkelijk emissiereductie behaald wordt: als het energiegebruik voor de biobased productieroute veel hoger is dan dat van de productieroute van de fossiele referentie, kan het voordeel teniet worden gedaan. Biobased is dus niet per definitie beter. Daarnaast is het noodzakelijk dat duurzame biomassa gebruikt wordt.

Het gebruik van biomassa in de industrie wordt gelimiteerd door de beschikbaarheid van duurzame biomassa. Als uit wordt gegaan van strenge duurzaamheidseisen is er niet voldoende duurzame biomassa voor alle mogelijke toepassingen in de industrie (CE Delft, 2020a), als we ervan uitgaan dat ook andere sectoren en landen biomassa willen gebruiken. Daarom is het zinvol om cascadering van biomassa toe te passen, wat betekent dat de biomassa gebruikt wordt voor de meest hoogwaardige toepassingen. Deze hoogwaardige toepassingen kunnen bepaald worden op basis van verschillende criteria, zoals economische waarde of CO₂-reductie. Daarnaast is het vanwege de schaarste logisch om de duurzame biomassa voornamelijk toe te passen voor sectoren waar weinig of geen realistische alternatieve verduurzamingsopties zijn. Dit geldt voor de industrie maar ook voor andere sectoren die moeten verduurzamen, zoals in de luchtvaart.

Energetische toepassingen

Biomassa kan gebruikt worden als brandstof. Tot nu toe werd het gezien als een op de korte termijn inzetbaar alternatief voor de verbranding van fossiele brandstoffen. Het gebruik van biomassa voor energetische toepassingen wordt op grote schaal toegepast in Nederland. Zo wordt biomassa bijgestookt in verschillende kolencentrales en zijn er meerdere biomassa-centrales die warmte leveren aan warmtenetten. Het verbranden van biomassa ligt echter onder vuur in Nederland vanwege de grote hoeveelheden biomassa die hiervoor nodig zijn, twijfels over de duurzaamheid van de gebruikte biomassa en impact op de luchtkwaliteit (SER, 2020). Door het wegvallen van SDE-subsidies zal deze toepassing van biomassa in de toekomst worden afgebouwd. De inzet van biomassa voor warmte is vaak relatief makkelijk te vervangen door alternatieve oplossingen.

Toepassing als grondstof/materiaal

Biomassa kan ook gebruikt worden als grondstof in de industrie. Het dient dan als een alternatieve, duurzame koolstofbron. In principe kan biomassa gebruikt worden als alternatief voor fossiele koolwaterstoffen bij bijna elk industrieel proces. Biomassa kan gebruikt worden voor de productie van biobased producten, bijvoorbeeld als bouw materiaal. Daarnaast kan het gebruikt worden als grondstof in de chemie, bijvoorbeeld voor de productie van bioplastics. De toepassing van biomassa als materiaal kan tot aanzienlijke CO₂-reductie leiden en heeft weinig alternatieven.

3.2.4 Groene waterstof

Waterstof is een koolstofvrije energiedrager die gebruikt kan worden als alternatieve energiedrager en als grondstof voor de industrie. Momenteel wordt waterstof voornamelijk gebruikt voor de productie van kunstmest en in raffinageprocessen. In de toekomst kan het gebruikt worden voor decarbonisatie van de hogetemperatuurwarmtevraag in de industrie, zero-emissie transport en wellicht ook voor warmtevraag in een deel van de gebouwde omgeving⁷. Daarnaast kan het gebruikt worden als grondstof voor nieuwe processen.

Momenteel wordt vrijwel alle waterstof geproduceerd met gebruik van fossiele brandstoffen, voornamelijk door middel van steam reforming van aardgas. Bij de productie van deze 'grijze' waterstof komt CO₂ vrij. Om bij te dragen aan de verduurzaming van de industrie moet waterstof in de toekomst CO₂-vrij geproduceerd worden. Dit kan door productie

⁷ Natuur en Milieu heeft deze afweging waar (groene) waterstof het beste toegepast kan worden uitgewerkt in een ['waterstofladder'](#).

van waterstof door middel van elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit (groene waterstof). De hoge productiekosten van groene waterstof ten opzichte van de grijze variant zijn een barrière voor de decarbonisatie van de waterstofproductie. Blauwe waterstofproductie (zie inzet) is goedkoper en kan wellicht worden ingezet om deze transitie op gang te helpen (CE Delft, 2018).

Blauwe waterstof als katalysator voor verduurzaming van de industrie?

Waterstof kan in verschillende sectoren in de industrie, zoals de chemie of de ijzer- en staalindustrie, dienen als alternatief voor fossiele brandstoffen. Het kan gebruikt worden als grondstof en kan daarnaast gebruikt worden voor het produceren van hogetemperatuurwarmte voor processen waarbij de temperatuurniveaus boven de 250°C uitkomen. Voor deze processen zijn weinig andere duurzame technieken aanwezig.

In de komende decennia zal groene waterstof, waarbij waterstof geproduceerd wordt door elektrolyse met elektriciteit van hernieuwbare bronnen, nog te duur zijn en daarom niet op grote schaal toegepast worden. Dit betekent dat de decarbonisatie van de bovenstaande processen met groene waterstof voorlopig nog niet van de grond zal komen zonder financiële steun vanuit de overheid.

De decarbonisatie van deze processen kan versneld worden door in de tussentijd gebruik te maken van blauwe waterstof. Bij de blauwe productieroute wordt waterstof geproduceerd door stoomreforming (SMR) met aardgas. Hierbij komen rookgassen vrij met een hoge CO₂-concentratie, waardoor deze relatief goedkoop en completer (rond 90% afvang om efficiëntieredenen) afgevangen kunnen worden. Daardoor is blauwe waterstof voorlopig een stuk goedkoper dan de groene variant, al heeft ook blauwe waterstof voorlopig nog subsidie (of een hoge CO₂-prijs) nodig. Deze blauwe waterstof kan gebruikt worden om de transitie van industriële processen op basis van fossiele brandstoffen naar processen op basis van waterstof te versnellen. Zo kan de benodigde infrastructuur voor het transport van waterstof gereed gemaakt worden en kunnen processen omgezet worden. Ook kan de huidige fossiele waterstofproductie, waarbij nu nog aardgas gebruikt wordt zonder CCS, gedecarboniseerd worden.

Naarmate de prijzen van groene waterstof dalen en de prijzen van aardgas stijgen, zal groene waterstof de blauwe waterstof gaan vervangen. Wanneer de prijs van groene waterstof daalt zullen steeds meer elektrolyzers geplaatst worden en geen nieuwe SMRs meer, waardoor het aandeel groene waterstof steeds groter wordt. Aangezien de infrastructuur en processen al ingericht zijn op het gebruik van waterstof kan deze transitie dan veel sneller plaatsvinden. Het risico bij productie van waterstof via de blauwe productieroute is echter wel dat dit ten koste gaat van innovaties op het gebied van groene waterstofproductie en op die manier de transitie naar groene waterstof juist vertraagt. Er is dan sprake van een lock-in.

3.2.5 Circulaire economie

De voorgaande verduurzamingsrichtingen waren gericht op het verminderen of verduurzamen van het energiegebruik van een bestaand proces of een bestaande keten.

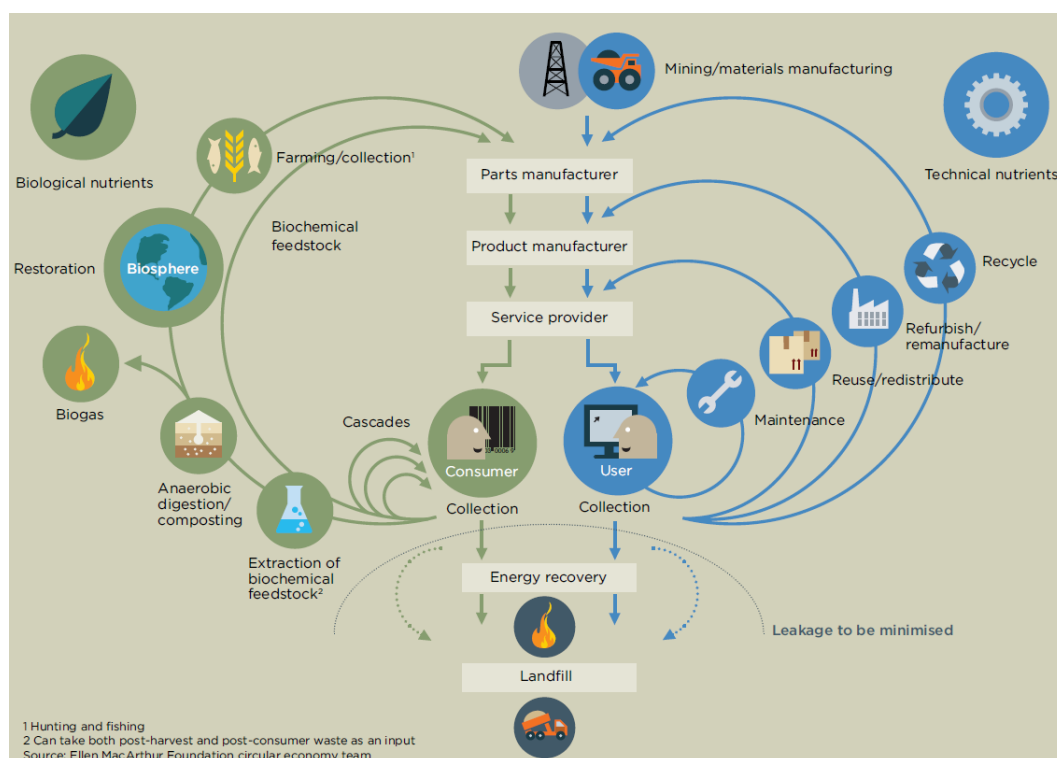
De circulaire economie heeft daarentegen invloed op de keten zelf.

In een lineaire economie worden grondstoffen omgezet in producten en worden deze producten na de gebruiksfase afgedaan als afval. Bij een circulaire economie daarentegen worden producten volledig hergebruikt of hoogwaardig gerecycled. Hierbij ontstaat dan ook geen afval. Momenteel bevindt Nederland zich in een tussenstadium waarbij een deel van de producten na de gebruiksfase gerecycled worden, maar waarbij ook nog een aanzienlijk deel eindigt als afval. Hierdoor worden de meeste producten nog steeds uit nieuwe grondstoffen gemaakt.

In een circulaire economie worden producten zo efficiënt mogelijk gebruikt en wordt de maximale waarde behouden aan het eind van zijn levensduur. Dit betekent dat renovatie de voorkeur heeft ten opzichte van recyclen, hergebruik de voorkeur ten opzichte van renovatie en onderhoud de voorkeur ten opzichte van hergebruik. Bij hergebruik wordt het product na de levensduur opnieuw gebruikt zonder grote aanpassingen, bij renovaties worden defecten verholpen en bij recycling worden producten aan het eind van de levensduur verwerkt in nieuwe producten.

De grote diversiteit aan routes die kunnen bijdragen aan de ontwikkeling van een circulaire economie is weergegeven in Figuur 2.

Figuur 2 - Grafische weergave circulaire economie



Bron: (Ellen MacArthur Foundation, 2013).

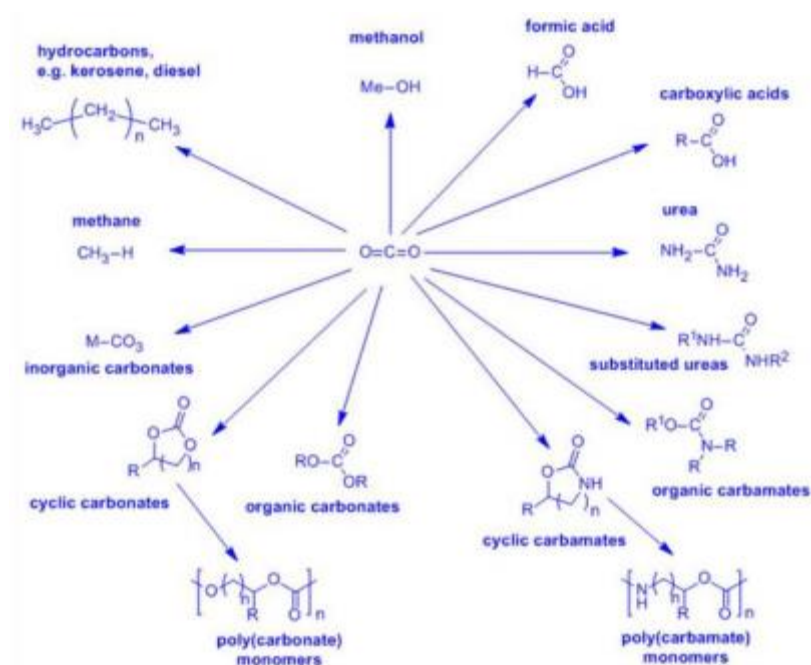
Een circulaire economie leidt tot emissiereductie doordat er CO₂-intensieve grondstoffen hergebruikt of vervangen kunnen worden en het vermindert de uitputting van eindige grondstoffen. Daarnaast zorgt het voor kostenbesparing doordat de waarde van grondstoffen en producten behouden blijft. Het doel is dat de Nederlandse economie op de lange termijn circulair wordt, maar dit zal nog een tijd duren. Recycling van materialen wordt reeds toegepast in onder meer de ijzer- en staalindustrie en bij kunststoffen. In andere sectoren, zoals de cementindustrie, wordt dit nog niet toegepast. De toekomstige ontwikkeling richting een circulaire landbouw zal gevolgen hebben voor kunstmestproductie, een onderdeel van de chemische industrie.

3.2.6 Carbon Capture and utilization (CCU)

Bij CCU wordt de CO₂ die vrijkomt bij processen opgevangen, net als bij CCS. Dezelfde afvangtechnieken als bij CCS kunnen hiervoor gebruikt. Het verschil tussen CCU en CCS zit in wat er met de opgevangen CO₂ gedaan wordt. Bij CCS wordt de opgevangen CO₂ opgeslagen, bij CCU wordt de opgevangen koolstof verwerkt in nieuwe producten of anderszins nuttig gebruikt. Hierdoor wordt elders in de keten het gebruik van fossiele grondstoffen en emissies gereduceerd. De hergebruikte CO₂ blijft echter wel fossiel tenzij afkomstig is van biogene grondstoffen. Dan zijn zelfs negatieve emissies van CO₂ mogelijk bijvoorbeeld bij stroomopwekking met biomassa en CCS (BECCS) en deels bij afvalverwerkers met >50% biogeen afval in combinatie met CCS en/of mineralisatie.

CCU kan toegepast worden bij een zeer breed scala aan producten, zie Figuur 3.

Figuur 3 - Overzicht chemische groepen geproduceerd met CCU



Bron: (Styring, 2011).

Uniek is dat CCU in Nederland al wijdverbreid wordt toegepast en er ruim een half miljoen ton CO₂ geleverd wordt via een CO₂-distributienetwerk (OCAP). Dit voor gebruik in de glastuinbouw voor de stimulering van de groei van gewassen. Bij die toepassing wordt het gebruik van fossiel aardgas voor CO₂-dosering verminderd wat tot een netto CO₂-emissiereductie leidt. Maar de gedoseerde CO₂ wordt niet permanent vastgelegd en komt nog wel vrij.

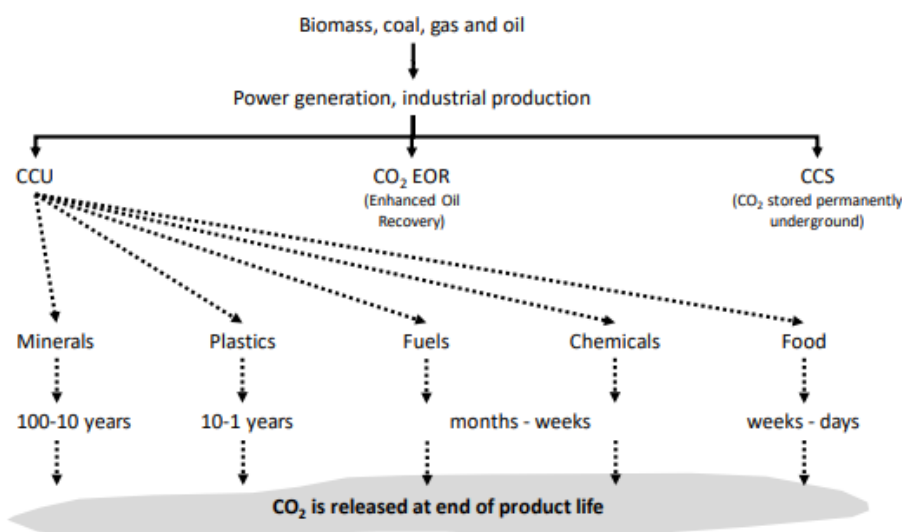
In de toekomst kan afgevangen CO₂ in combinatie met groene waterstof gebruikt worden voor de productie van producten met een met een verlaagde CO₂-voetafdruk zoals synthetische brandstoffen en methanol, welke laatste een belangrijke bouwsteen is voor de

chemie. Daarnaast kan mineralisatie⁸ toegepast worden, kan het gebruikt worden voor productie van polyurethanen⁹ en kan het gebruikt worden in combinatie met restgassen van de staalproductie voor productie van onder andere synthetische ethanol of nafta.

Het energieverbruik van de CCU-productieroutes kan een barrière vormen, met name voor productieroutes waarbij gebruik wordt gemaakt van (groene) waterstof. Dit betekent dat CCU concurreert met andere processen waarbij groene waterstof en hernieuwbare elektriciteit gebruikt worden.

Het is belangrijk om de netto CO₂-besparing van de verschillende routes goed te analyseren, de CO₂-reductie kan sterk variëren tussen verschillende CCU-routes. Dit kan goed met een levenscyclusanalyse (LCA) van 'wie naar graf'. Bij lang cyclische CCU wordt de CO₂ vastgelegd in een materiaal, bijvoorbeeld bij mineralisatie. In dat geval is de CO₂-reductie groot, en is er alleen uitstoot bij de CO₂-afvang. Als de producten waarin het wordt gebruikt een korte levensduur hebben, is er slechts sprake van uitstel van de emissies. De emissiereductie wordt dan behaald doordat het CCU-product fossiele brandstoffen vervangt. Volledige emissiereductie is in deze gevallen alleen mogelijk als er biogene CO₂ gebruikt wordt. In de onderstaande figuur is de periode van de opslag van CO₂ bij verschillende CCU-routes weergegeven. Bij CO₂ EOR en CCS is sprake van permanente opslag en ook mineralisatie kan permanente opslag opleveren (> 100 jaar).

Figuur 4 - Overzicht periode van opslag van CO₂ bij verschillende materialen



Bron: (Houses of Parliament - Parliamentary Office of Science and Technology, 2018).

⁸ In dit proces worden CO₂ en mineraaloxides of -silicaten omgezet in mineraal carbonaten, welke gebruikt kunnen worden als aggregaat in de bouw.

⁹ Dit kan gebruikt worden als schuim voor onder meer matrassen, autostoelen en schoenen.

Momenteel is de vraag naar CO₂ voor CCU-toepassingen beperkt. Er kan orde-grootte kilotonnen CO₂ gebruikt worden. In de toekomst kan de vraag echter sterk toenemen als CCU gebruikt wordt voor de productie van chemicaliën als methanol. Er is een grote wereldwijde vraag naar methanol, en het is mogelijk dat grote productiefaciliteiten naar Nederland komen als hier goedkope CO₂ beschikbaar komt. In dat geval kunnen orde grootte megatonnen CO₂ hiervoor gebruikt worden¹⁰. Voor dit proces zijn echter ook grote hoeveelheden groene waterstof nodig, tegen een redelijke prijs. Dit is voorlopig nog niet realistisch.

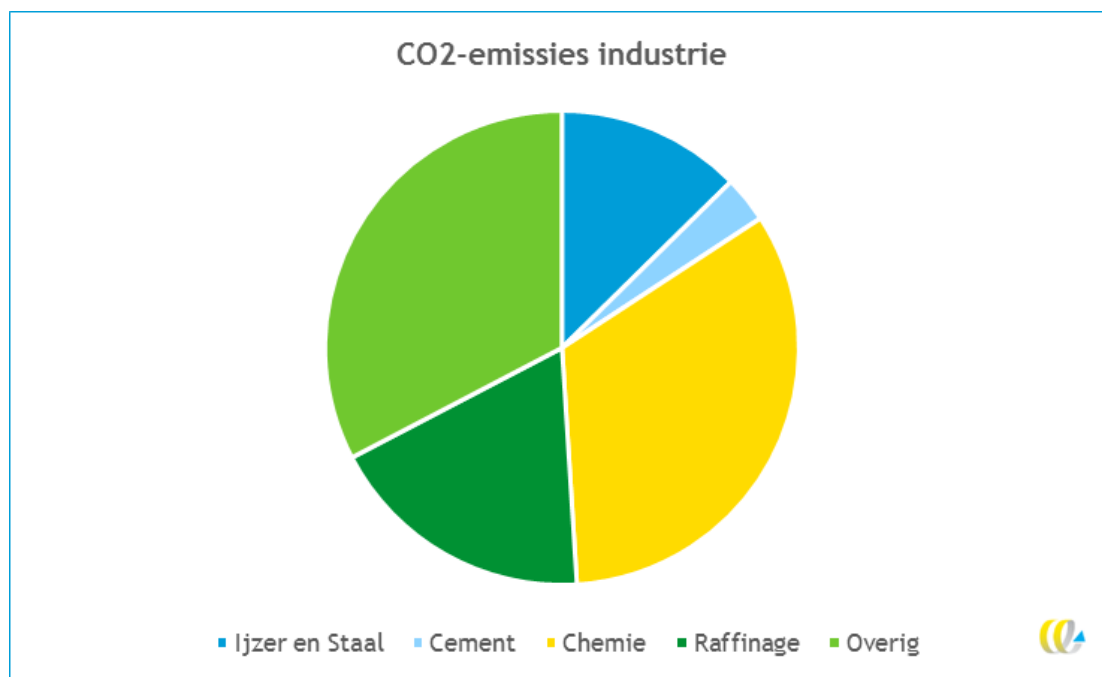
¹⁰ <https://setis.ec.europa.eu/publications/setis-magazine/carbon-capture-utilisation-and-storage/carbon-capture-and-utilisation-%E2%80%93>



4 Sectoranalyse

In het vorige hoofdstuk hebben we de verschillende verduurzamingsrichtingen van de industrie beschreven. In dit hoofdstuk worden deze richtingen verder uitgewerkt en geanalyseerd per sector. Hierbij kijken we naar de belangrijkste industriële sectoren waarvoor CCS een mogelijke decarbonisatie optie is: ijzer- en staalproductie, cementproductie, chemie en raffinage. Deze sectoren zijn het meest geschikt indien gekozen zou worden voor CCS omdat er bij deze processen sprake is van een puntbron van CO₂ en de concentratie van CO₂ bij de verschillende vrijkomende afgassen relatief hoog is. Deze sectoren zijn samen verantwoordelijk voor circa 2/3 van de CO₂-emissies van de industrie in Nederland, zoals weergegeven is in Figuur 5.

Figuur 5 - Overzicht CO₂-emissies industrie



Bron: (Emissieautoriteit, 2018).

Voor deze sectoren zijn de verschillende CO₂-reductieopties in kaart gebracht en onderling vergeleken. Zover de data het toelaat wordt hierbij gekeken naar effectiviteit (CO₂-reductie), kosten, technologische gereedheid (TRL, zie Appendix B), energieverbruik en mogelijke andere belemmeringen. Op basis van deze analyse konden we een potentieel tijdspad ontwikkelen van toepassing en uitrol van de verschillende opties, en conclusies trekken over de mogelijke rol van CCS en de alternatieve technieken in de sector. Een eerste overzicht van de mogelijke verduurzamingsopties is gegeven in Tabel 1.

Tabel 1 - Overzicht van beschikbare verduurzamingsopties voor de vier sectoren waar dit rapport op focust

Sector	CCS	Elektrificatie	Groene waterstof	CCU	Biomassa	Circulaire economie	Overig
IJzer en staal	CCS bij hoogovengas	Elektro-winning	Directe reductie		Biocokes	Recycling schroot-metaal	Hlsarna
Cement	CCS bij klinker-productie (Oxyfuel-CCS)		Hoge-temperatuur-warmte	Mineralisatie	Houtbouw	Cement-recycling	Alternatieve bindmiddelen
Chemie	CCS bij H ₂ -productie SMR	Elektrische verwarming, elektrisch kraken	Vervanging grijze H ₂ kunstmest, methanol en overigen	Productie kunststoffen	Bio-chemicaliën	Kunstof-recycling Circulaire landbouw	Proces-intensificatie
Raffinage	CCS bij H ₂ -productie SMR	Elektrische aandrijving, elektrische verwarming.	Opwaardering brandstoffen met groene H ₂	Synthetische brandstoffen	Biobrandstoffen		Proces-intensificatie

In de volgende paragrafen geven we per sector:

- een korte beschrijving van de belangrijkste CO₂-reductietechnologieën die op dit moment beschikbaar of in ontwikkeling zijn;
- een globale tijdlijn die laat zien wanneer deze technologieën beschikbaar zouden kunnen komen, bij effectief beleid en een succesvolle ontwikkeling van de techniek;
- conclusies over de rol van CCS in de sector.

Een uitgebreide beschrijving van de technologieën is opgenomen in Bijlage A. We verwijzen dan ook naar die bijlage voor meer informatie over de technologieën die hier worden besproken.

4.1 IJzer en staal

4.1.1 Technologieën

CCS kan goed worden toegepast bij ijzer- en staalproductie, omdat er CO₂-rijke bronnen zijn, zoals het hoogovengas, waar de CO₂ tegen relatief lage kosten kan worden afgevangen. Naast CO₂ bevat hoogovengas ook nog CO, wat gebruikt kan worden voor CCU-reacties, bijvoorbeeld naar ethanol. Er zijn daarnaast ruime mogelijkheden om de energie-intensieve CO₂-afvang te voeden met restwarmte op locatie. De ligging van Tata Steel aan zee in de buurt van offshore opslagmogelijkheden is ook een voordeel voor CCS.

Een van de mogelijke alternatieve CO₂-reductietechnologieën in de ijzer- en staalindustrie is het Hlsarna-proces, een lopend initiatief van Tata Nederland dat neerkomt op een simplificatie van het ijzerproces. Dit proces levert een 20% rendementswinst op en daarmee ook een vergelijkbare emissiereductie van CO₂. De energiebron voor het proces is fossiel, deze technologie betreft nog geen overstap naar duurzame bronnen. Om meer emissiereductie te bereiken is voorzien in een combinatie van Hlsarna met CCS, waarbij CO₂ afgevangen wordt uit de CO₂-rijke gassen die vrijkomen.

Een alternatieve technologie is directe reductie, een relatief snel toepasbare, beproefde technologie die al wordt toegepast in regio's waar aardgas zeer goedkoop is. Directe reductie is echter alleen duurzaam als het wordt gevoed met 100% waterstof die duurzaam wordt geproduceerd. Toepassing op waterstof is enkel nog op pilotschaal bewezen. In Zweden werkt Vattenfall aan deze route. Daarnaast heeft deze route een zeer grote hoeveelheid groene waterstof nodig die op korte termijn nog niet beschikbaar is tegen redelijke kosten.

Verder lijkt elektrolyse van ijzererts een mogelijkheid, dat is qua principe vergelijkbaar met de huidige conventionele elektrolyse van aluminiumerts. Echter, deze route bevindt zich nog in de kinderschoenen van de laboratoriumtesten en zal niet snel kunnen worden toegepast, de grote behoefte aan (duurzame) elektriciteit nog daargelaten.

Gezien de grote schaal ligt verduurzaming door gebruik van via biomassa, oftewel staalproductie die volledig wordt gebaseerd op biocokes niet voor de hand vanwege de beperkte beschikbaarheid van duurzame biomassa op de lange termijn. Een kleine hoeveelheid koolstof is gewenst in DRI ijzer. Biomassa biedt de mogelijkheid om biogene koolstof toe te voegen aan ijzer gevormd uit reductie met groene waterstof.

Volledige circulariteit is een zeer aantrekkelijke route, omdat er dan geen ruime hoeveelheden energie voor de reductie van erts meer hoeft te worden ingezet. Momenteel wordt schroot al om deze reden verwerkt, maar de vraag overstijgt het aanbod, waardoor er nog ruime hoeveelheden primair ijzer uit de hoogovens moet komen. Zodra de vraag afneemt door alternatieven voor ijzer en staal en/of er meer schroot kan worden aangevoerd levert dit afname van de vraag naar primair ijzer op en daarmee CO₂-emissiereductie.

Samengevat zien de CO₂-reductiemaatregelen voor de ijzer- en staalindustrie er als volgt uit, met enkele selectiecriteria ten opzichte van de referentiesituatie:

Tabel 2 - CO₂-reductiemaatregelen ijzer- en staalindustrie

Nr.	CO ₂ -reductiemaatregel	CO ₂ -reductie	Duur invoering* (TRL)	Kosteneffectiviteit (kosten per bespaarde ton CO ₂)	Toelichting
1	CCS op bestaande processen	Middel-groot	Kort-middel (TRL 7-9)	Medium	Kansrijk vanwege CO ₂ -rijke bronnen, mogelijkheden voor gebruik restwarmte huidige processen voor de afvang en nabijheid van offshore opslag.
2	Hlsarna, zonder CCS	Beperkt, 20%	Middellang (TRL 7)	Medium	In combinatie met CCS is 80% reductie te behalen.
3	Directe reductie met groene H ₂	Groot	Kort-lang (TRL 6-9)	Medium-hoog	Technologie met syngas al uitontwikkeld, maar grote uitrol met groene waterstof nog niet mogelijk door hoge kosten en te weinig hernieuwbare elektriciteitsproductie.
4	Directe elektrolyse	Groot	Lang (TRL 5)	Medium-hoog	Transitie met steeds meer groene elektriciteit mogelijk. Grote elektriciteitsvraag.
5	Biocokes	Medium	Kort-medium (TRL 9)	Hoog	Maar beperkte toevoer mogelijk, concurrentie met andere toepassingen van biomassa.

Nr.	CO ₂ -reductiemaatregel	CO ₂ -reductie	Duur invoering* (TRL)	Kosteneffectiviteit (kosten per bespaarde ton CO ₂)	Toelichting
6	Circulariteit	Groot	Direct-lang (TRL 6-9)	Laag	Schrootverwerking is ontwikkeld, maar verontreinigde stromen kunnen nog worden toegevoegd. Bij afnemende vraag en verbeterde recycling neemt vraag naar primair ijzer sterk af.

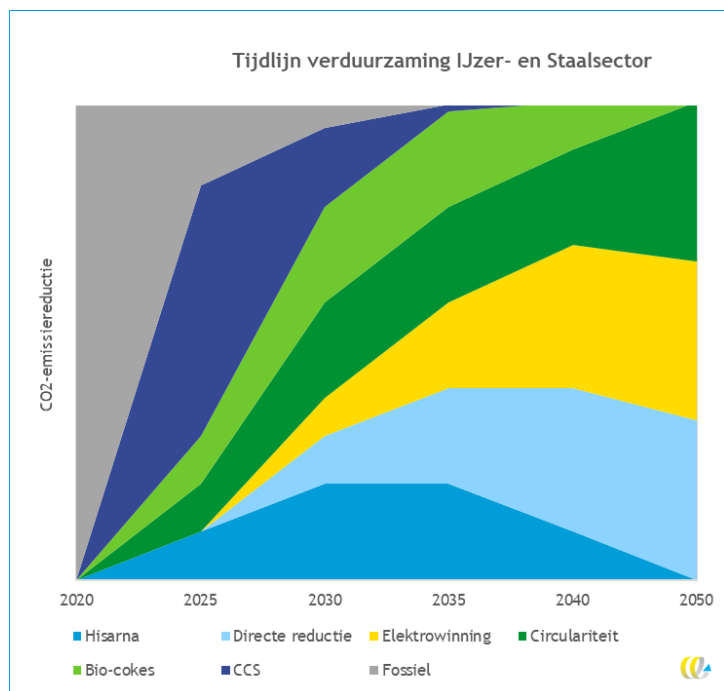
* Kort < 5 jaar, Middel 2025-2035, lang >2035.

De beoordeling op de verschillende criteria zijn de huidige verwachtingen bij een succesvolle ontwikkeling van de technologieën. De uiteindelijke scores worden bepaald door enerzijds de resultaten van de technische ontwikkeling, en anderzijds de mate waarin het beleid investeringen in deze ontwikkelingen stimuleert.

4.1.2 Tijdlijn

In Figuur 6 is te zien hoe het tijdpad van verduurzaming van de IJzer- en Staalsector eruit zou kunnen zien. Er is hiervoor een semi-kwantitatieve analyse uitgevoerd. Dit betekent dat de afbeelding een globaal beeld geeft van de ontwikkeling van de sector, maar dat er geen conclusies aan verbonden kunnen worden over hoe groot het aandeel van elke verduurzamingsoptie zal zijn. Het is namelijk erg onzeker hoe de sector zich de lange termijn gaat ontwikkelen en welke technologieën dominant gaan worden. Dit hangt van verschillende factoren af, zoals prijsontwikkelingen, vraagontwikkeling, beschikbaarheid van grondstoffen en beschikbaarheid van duurzame elektriciteit. Daarom is aangenomen dat de reductie-opties voor de lange termijn, in dit geval directe reductie, elektrowinning en circulariteit, een gelijk aandeel hebben in 2050.

Figuur 6 - Globale tijdlijn verduurzaming ijzer- en staalsector



4.1.3 Conclusies over de rol van CCS in deze sector

Voor 2030 zijn er voor de ijzer- en staalindustrie technologisch gezien een aantal alternatieven voor CCS beschikbaar, waarvan directe reductie (DRI) het meest kansrijk is. De grootste belemmering vormt de aanvoer van de hiervoor benodigde grote hoeveelheden groene waterstof in combinatie met redelijke kosten. Daarnaast zijn de operationele kosten niet lager, waardoor er geen business case is om te investeren in een nieuwe installatie in plaats van gebruik te blijven maken van de bestaande installaties. We schatten de praktische haalbaarheid van deze alternatieve technologie daarom voor de korte termijn niet hoog in, voor de langere termijn biedt zij wel mogelijkheden.

Inzet van biomassa in de vorm van biocokes zou grote hoeveelheden duurzame biomassa vergen welke concurreert met andere toepassingen van de op zich schaarse duurzame biomassa. Het is de vraag of bij cascadering van de beschikbare biomassa toevoer er voldoende overblijft tegen een voldoende lage prijs. Het is bovendien een minder logische route in het kader van de discussie rond het recente SER-advies over biomassa.

Toepassing van CCS of CCU kan daarom een aantrekkelijke CO₂-reductiemaatregel zijn in deze sector, in elk geval totdat andere alternatieven beschikbaar komen. Dit zou goed te combineren zijn met de huidige operatie en processen en ook goed aansluiten bij ‘tussenschappen in verduurzaming’ zoals Hlsarna. De kosten zijn relatief beperkt, in vergelijking met de alternatieven. Al deze maatregelen kunnen financieel aantrekkelijk worden gemaakt met behulp van subsidies zoals de SDE++ of het Innovation Fund, naast het EU ETS en de toekomstige hogere CO₂-prijzen.

In de periode van 2030 tot 2050 moet er dan worden gewerkt aan een steeds grotere duurzame toevoer van groene stroom en groene waterstof tegen voldoende lage kosten, dit zijn voorwaarden voor grootschalige verduurzaming via alternatieve technieken. De directe reductietechniek is een kansrijk alternatief, die kan met de groene waterstof verder vergroenen. Indien elektrowinning voldoende ontwikkeld is zou de elektrolysestap kunnen worden overgeslagen wat het nog efficiënter maakt. Een tussenvorm naar volledige verduurzaming zou nog een blauwe variant kunnen zijn: staalproductie met DRI dat gebruik maakt met het Midrex-proces, op basis van kolen en CCS. Hiervoor zou een extra kolenvergasser nodig zijn.

4.2 Cement

4.2.1 Technologieën

De cementindustrie is een belangrijke bron van CO₂-emissies in Europa. In 2018 was de sector verantwoordelijk voor 18% van de industriële CO₂-emissies die vallen onder het ETS-systeem. In Nederland is de rol van de cementindustrie minder prominent. Er wordt een grote rol voorzien voor CCS in de cementindustrie vanwege het gebrek aan alternatieven voor verduurzaming, de vraag is wel in hoeverre dit relevant is voor Nederland.

In Nederland is de laatste overblijvende productielocatie voor klinkers in 2019 gesloten (ENCI, 2020). Daarom is de potentie voor CO₂-reductie via CCS voor deze industrie in Nederland momenteel vrijwel nihil. In de toekomst kan de aanwezigheid van goede CO₂-infrastructuur en goede mogelijkheden voor CCU-mineralisatie echter een prikkel zijn voor nieuwe cementbedrijven om zich te vestigen in Nederland. Daarom wordt deze sector hier toch besproken.

De focus van deze analyse ligt op de productie van cement voor productie van beton, omdat dit de meest gebruikte toepassing is. De conclusies voor betontoepassingen gelden in grote lijnen echter ook voor andere cementtoepassingen.

Bij het productieproces van cement zijn er twee CO₂-emissiebronnen, namelijk de directe procesemissies en de emissies gerelateerd aan de verwarming van de cementoven. De emissies gerelateerd aan verbranding van de energiedragers, nodig vanwege de behoefte aan hogetemperatuurwarmte in het proces, kunnen worden gereduceerd door gebruik van energiedragers als groengas of groene waterstof. De directe procesemissies kunnen echter niet voorkomen worden bij de conventionele cementsoorten, aangezien deze inherent zijn aan het productieproces. De alternatieven voor verduurzaming van de cementproductie zijn echter beperkt. De enige opties zijn het afvangen van de CO₂, overstappen naar alternatieve bindmiddelen en circulariteit (recycling van beton).

Er kan een aanzienlijke hoeveelheid CO₂ worden gereduceerd in de cementindustrie door procesefficiëntie en het gebruik van alternatieve bindmiddelen. Daarnaast kunnen alternatieve materialen, zoals hout en carbstone, gebruikt worden. Deze alternatieven kunnen op de korte termijn nog niet de volledige cementvraag van 5 Mt per jaar vervangen, mede gezien de beperkte beschikbaarheid van hout, slak en mineraal. Daarom zullen conventionele cementsoorten noodzakelijk blijven. Bovendien zullen de huidige cementfabrieken pas gesloten worden als ze afgeschreven zijn. De cementindustrie ziet dan ook CO₂-afvang en opslag als een belangrijke techniek om klimaatdoelstellingen mee te halen.

Er zijn verschillende alternatieve bindmiddelen met een lagere CO₂-voetafdruk die gebruikt kunnen worden als alternatief voor de huidige cementsoort. Voorbeelden hiervan zijn CSA-beliet, Solidia en geopolymere. Daarnaast kunnen alternatieven voor cement of beton geproduceerd worden met afgevangen CO₂, via CCU-routes (mineralisatie). Tot slot kan in sommige gevallen hout gebruikt worden als alternatief voor materialen die gebruik maken van cement. De eigenschappen van de alternatieve materialen moeten vergelijkbaar zijn met de eigenschappen van de cementsoort die nu zijn goedgekeurd. Met name de sterkte van de alternatieve materialen is belangrijk. In dit opzicht zijn de alternatieve materialen meestal inferieur aan beton geproduceerd met Portlandcement. Er zijn voldoende materialen die kunnen dienen ter vervanging van niet-constructief beton, maar voor constructief beton zijn de alternatieven vaak niet sterk genoeg. De productieprocessen voor de alternatieve materialen hebben een hoge TRL, wat betekent dat deze materialen binnen afzienbare termijn op de markt kunnen komen. Het zal echter nog een tijd duren voordat deze materialen daadwerkelijk gebruikt kunnen worden, aangezien ze eerst uitgebreid getest moeten worden vanwege de strenge veiligheidseisen die worden gesteld aan het cement.

Voor de lange termijn lijkt circulariteit een zeer aantrekkelijke route, omdat er dan geen nieuw cement meer geproduceerd hoeft te worden. Momenteel wordt echter nog geen teruggewonnen cement hergebruikt ter vervanging van primair cement, aangezien de technieken om cement goed terug te winnen nog niet uitontwikkeld zijn. Maar ook als hergebruik toeneemt is het niet waarschijnlijk dat er in de toekomst voldoende cement teruggewonnen om aan de totale vraag naar cement te voldoen. Het resterende deel van de vraag zal ingevuld moeten worden door alternatieven.

Samengevat zien de alternatieven voor de cementindustrie er als volgt uit:

Tabel 3 - CO₂-reductiemaatregelen cementindustrie

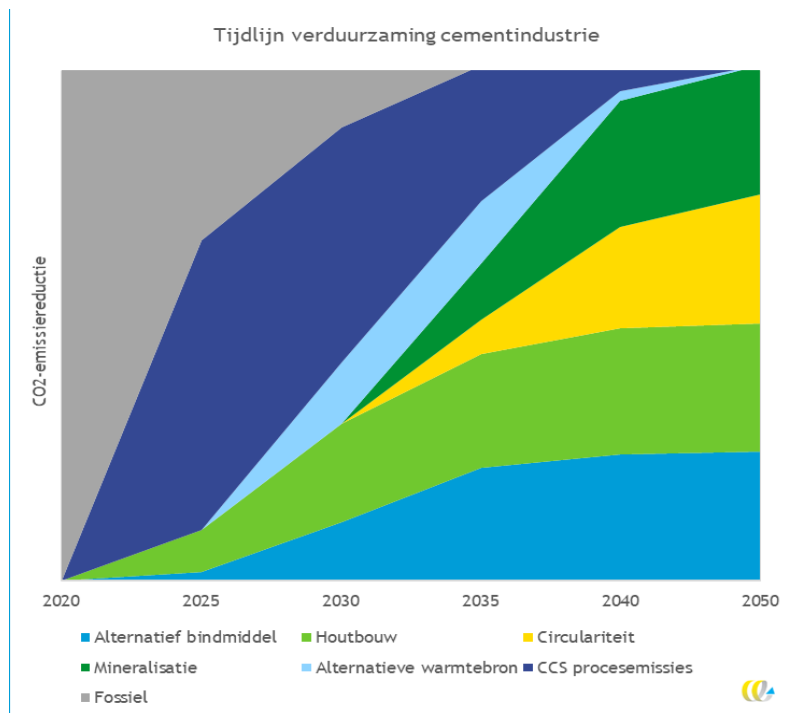
Nr.	Route	CO ₂ -reductie	Duur invoering (TRL)	Duur invoering	Kosteneffectiviteit (kosten per bespaarde ton CO ₂)	Toelichting
1	CCS	Hoog	Middellang (TRL 6)	Middellang	Middel	Door het gescheiden houden van de CO ₂ -stromen levert het procesaandeel reeds geconcentreerde CO ₂ op (LEILAC).
2	Alternatieve bindmiddelen	Middel/hoog (afhankelijk van het materiaal)	Middellang /Lang (TRL 7-9)	Middellang /Lang	Laag-Hoog (afhankelijk van het materiaal)	Sommige soorten kunnen snel geproduceerd worden. Maar deze moeten eerst uitvoerig getest worden voordat ze gebruikt kunnen worden.
3	CCU/mineralisatie	Hoog	Middellang /Lang (TRL 4/5)	Middellang /Lang	Hoog	Hiervoor is afgevangen CO ₂ nodig.
4	Circulariteit	Hoog	Direct-Lang (TRL 4-8)	Direct-Lang	Laag	Recycling van cement kan zelfs leiden tot kosten-besparingen.
5	Biomassa	Hoog (indien duurzame biomassa gebruikt wordt)	Kort (TRL 9)	Kort		De beschikbaarheid van duurzame biomassa is een beperkende factor voor het gebruik van hout in de bouw.

Ook hier zijn de beoordelingen op de verschillende criteria de huidige verwachtingen bij een succesvolle ontwikkeling van de technologieën. De uiteindelijke scores worden bepaald door enerzijds de resultaten van de technische ontwikkeling, en anderzijds de mate waarin het beleid investeringen in deze ontwikkelingen stimuleert.

4.2.2 Tijdlijn

In Figuur 7 is te zien hoe het tijdpad van verduurzaming van de cementindustrie eruit zou kunnen zien. Er is hiervoor een semi-kwantitatieve analyse uitgevoerd. Dit betekent dat de afbeelding een globaal beeld geeft van de ontwikkeling van de sector, maar dat er geen conclusies aan verbonden kunnen worden over hoe groot het aandeel van elke verduurzamingsoptie zal zijn. Het is namelijk erg onzeker hoe de sector zich de lange termijn gaat ontwikkelen en welke technologieën dominant gaan worden. Dit hangt van verschillende factoren af, zoals prijsontwikkelingen, vraagontwikkelingen en beschikbaarheid van grondstoffen. Daarom is aangenomen dat de reductieopties voor de lange termijn, in dit geval houtbouw, alternatieve bindmiddelen, mineralisatie en circulariteit, een gelijk aandeel hebben in 2050.

Figuur 7 - Globale tijdlijn verduurzaming cementindustrie



In de figuur is te zien dat in 2020 bij 60% van de emissies van de cementindustrie CCS toegepast kan worden. Het gaat hier om de procesemissies. Bij de emissies die vrijkomen bij de verbranding van aardgas is CCS momenteel te duur vanwege de lage CO₂-concentratie. Op de korte termijn is alleen houtbouw een reële optie voor verduurzaming. Vanwege de beperkte beschikbaarheid van duurzame biomassa kan dit echter maar een deel van de vraag vervangen. Op de middellange termijn, richting 2030, kunnen alternatieve bindmiddelen, zoals CSA-beliët, Solidia en geopolymeren, een deel van het huidige cement vervangen. Na 2030 worden ook productie van Carbstone met mineralisatie (CCU) en circulariteit door middel van recycling van vulmiddelen en bindmiddelen een reële verduurzamingsoptie. In de transitieperiode tot 2050, waarbij er nog conventionele cementproductie plaatsvindt (al dan niet met CCS), kunnen alternatieve warmtebronnen zoals groengas en waterstof tot emissiereductie leiden. Op de lange termijn is dit niet nodig aangezien er dan andere productieprocessen gebruikt worden.

4.2.3 Conclusies over de rol van CCS in deze sector

De inzet van CCS in de cementindustrie is voor Nederland op dit moment niet relevant vanwege de recente sluiting van de laatste productielocatie van klinker. Mineralisatie van CO₂ in bouwmaterialen, een alternatief voor cementproductie, vormt echter wel een aantrekkelijke route met potentieel omdat er geen grote hoeveelheden duurzame energie (groene stroom en/of waterstof) voor nodig zijn én de vastlegging van CO₂ permanent is. Aansluiting van een mineralisatiefabriek na 2030 bij de industrie in Nederland zou een alternatief kunnen zijn voor CCS: een deel van de industriële CO₂-emissie kan dan worden gebruikt om bouwmaterialen te produceren met een lagere koolstofvoetafdruk. De CO₂ wordt dan langdurig vastgelegd in het materiaal. Deze route zou dan goed gebruik kunnen maken van de CCS-infrastructuur na 2030.

4.3 Chemie

4.3.1 Technologieën

De chemiesector is een zeer diverse sector, met veel verschillende processen en producten. De belangrijkste zijn de productie van intermediates (grondstoffen voor andere processen), kunststoffen en kunstmest.

Voor procesemissies, bijvoorbeeld bij de productie van waterstof en ammoniak (voor kunstmest), is CCS een kosteneffectieve oplossing die op korte termijn een significante CO₂-reductie kan bewerkstelligen. De alternatieven voor deze processen zijn technologisch minder ver ontwikkeld dan CCS of de kosten zijn hoger. Voor andere processen, bij de productie van intermediates en kunststoffen, is CCS geen logische optie vanwege de lage CO₂-concentratie in de gassen die vrijkomen.

Bij CCU-toepassingen is met name CCU-methanolsynthese uit CO₂ interessant omdat methanol een platformchemicalie is voor meerdere producten. Circulair grondstofgebruik leidt direct tot besparingen in energie- en materiaalgebruik. Concreet betekent dit voornamelijk inzetten op bevordering van inzameling, mechanische en chemische recycling van kunststoffen. Daarnaast kan circulaire landbouw leiden tot een lagere vraag naar kunstmest.

Voor de productie van lagetemperatuurwarmte is onder andere elektrificatie een aantrekkelijke en kosteneffectieve optie om op korte termijn aardgas te vervangen. Aandachtspunten daarbij zijn de beschikbaarheid van voldoende hernieuwbare elektriciteit en netcapaciteit.

Voor hogetemperatuurwarmte is elektrificatie op korte termijn nog geen geschikte oplossing, op langere termijn echter wel. Groene waterstof kan ook pas op de langere termijn gaan dienen als bron voor hogetemperatuurwarmte, terwijl blauwe waterstof al sneller geïmplementeerd kan worden. Het grootschalige gebruik van duurzame biomassa voor warmte is niet aantrekkelijk vanwege de beperkte beschikbaarheid, zoals al eerder beschreven.

Duurzame biomassa is echter wel een goed alternatief als grondstof voor de productie van koolwaterstoffen, ook op de lange termijn. Hierbij heeft het de voorkeur om nieuwe ketens op te bouwen op basis van nieuwe biopolymeren in plaats van biomassagebruik in bestaande, verder fossiele, ketens. De beschikbaarheid van voldoende duurzame biomassa en de beperkte bestaande productiecapaciteit zijn echter knelpunten op de korte termijn.

Tabel 4 - CO₂-reductiemaatregelen chemie

Nr.	Route	CO ₂ -reductie	Duur invoering (TRL)	Kosteneffectiviteit (kosten per bespaarde ton CO ₂)	Toelichting
1	CCS	Middel/Hoog	Middellang (TRL 7-9)	Middel	Voor procesemissies, zoals bij waterstof- en kunstmestemissies.
2	Elektrificatie	Middel	Kort/Middellang (TRL 2-6)	Laag-Hoog	LT-warmte is goed mogelijk, HT-warmte lastig.
3	Groene waterstof	Middel	Middellang/Lang (TRL 8-9)	Hoog	Grootschalig toepasbaar, maar voorlopig nog te duur in vergelijking met blauwe en grijze H ₂ . Daarnaast is de hernieuwbare productie van elektriciteit nog te laag.

Nr.	Route	CO ₂ -reductie	Duur invoering (TRL)	Kosteneffectiviteit (kosten per bespaarde ton CO ₂)	Toelichting
4	Duurzame biomassa	Middel/Hoog	Kort-Lang (TRL 4-6)	Middel	Als materiaal of grondstof ook op de lange termijn een optie. f. Gebruik voor energie levert minder op en is daarom alleen een potentiële optie in de transitieperiode.
5	CCU	Laag-Hoog	Middellang (TRL 7-8)	Laag-Hoog	Hangt sterkt af van toepassing en welke grondstof vervangen wordt.
6	Proces-intensificatie	Hoog	Lang (TRL 3-8)	Hoog	
7	Circulaire economie	Hoog	Middellang/Lang (TRL 6-8)	Middel	

Ook hier zijn de beoordelingen op de verschillende criteria de huidige verwachtingen bij een succesvolle ontwikkeling van de technologieën. De uiteindelijke scores worden bepaald door enerzijds de resultaten van de technische ontwikkeling, en anderzijds de mate waarin het beleid investeringen in deze ontwikkelingen stimuleert.

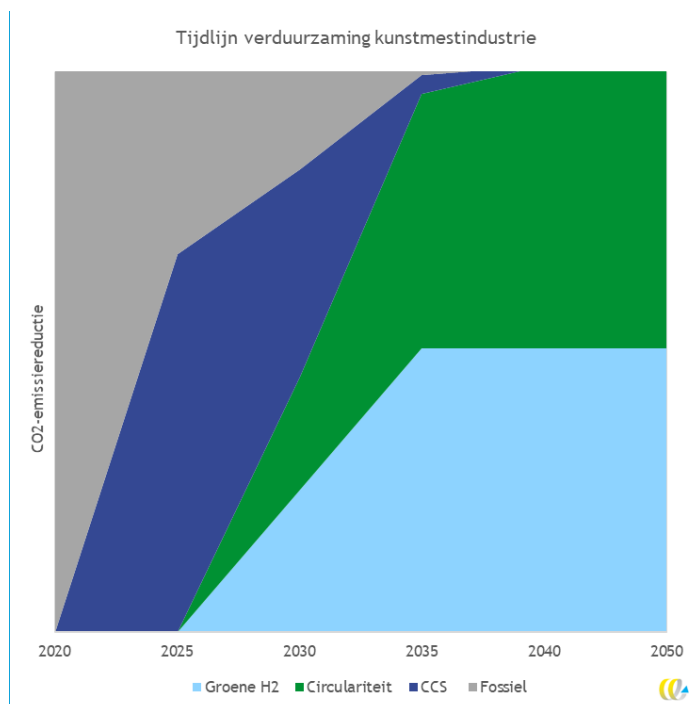
4.3.2 Tijdlijn

Er is in de analyse onderscheid gemaakt tussen intermediates, kunststoffen en kunstmest. Hieruit volgt dat CCS op korte termijn voornamelijk interessant is bij kunstmestproductie, vanwege de grote hoeveelheden waterstof die hiervoor nodig zijn. Vanwege de specifieke focus op de mogelijke rol van CCS in deze studie is specifiek voor deze sector een tijdlijn opgesteld, zie Figuur 8.

Het overgrote deel van de emissies van de kunstmestindustrie komen voort uit de productie van waterstof, waar nu aardgas voor gebruikt wordt. Als er gebruik gemaakt wordt van een SMR kan 2/3 van de CO₂-emissies afgevangen worden (Berenschot, TNO, 2017). Momenteel is dit, naast vraagvermindering als gevolg van kringlooplandbouw, de enige reële optie voor vergaande emissiereductie. In de toekomst kan de waterstofproductie met aardgas in een SMR vervangen worden door groene waterstof. Dit is nu nog echter te duur. De toekomstige ontwikkeling van de vraag naar kunstmest is onzeker, en zal afhangen van de snelheid waarmee wordt overgestapt naar kringlooplandbouw.

Om deze overwegingen in een tijdlijn te zetten is een semi-kwantitatieve analyse uitgevoerd. Dit betekent dat de afbeelding een globaal beeld geeft van de ontwikkeling van de sector, maar dat er geen conclusies aan verbonden kunnen worden over hoe groot het aandeel van elke verduurzamingsoptie zal zijn. Het is namelijk erg onzeker hoe de sector zich de lange termijn gaat ontwikkelen, met name wat de invloed van circulaire landbouw op de kunstmestvraag gaat zijn. Er is aangenomen dat de vraag naar kunstmest op de lange termijn met 50% gereduceerd wordt door kringlooplandbouw, hoewel het ook mogelijk is dat het gebruik van kunstmest helemaal afgebouwd is in 2050 als gevolg van de kringlooplandbouw. Dit hangt van verschillende factoren af, zoals beleids- en prijsontwikkelingen.

Figuur 8 - Globale tijdlijn verduurzaming kunstmestindustrie



4.3.3 Conclusies over de rol van CCS in deze sector

De chemie kent in de periode naar 2030 een aantal kansrijke mogelijkheden voor verduurzaming, vooral op het gebied van grondstoffen: invoering van chemische recycling van kunststoffen, kringlooplandbouwen en het toepassen van biobased grondstoffen. De hoogwaardige toepassing van biomassa voor biochemicals en biopolymeren past bij een strategie om biomassa te cascaderen en sluit goed aan bij het recente SER-advies.

Daarnaast is CCU-methanolsynthese uit CO₂ interessant omdat methanol een platform-chemicalie is voor meerdere producten. Deze route kan ook nu al met beschikbare processen op grote schaal worden ingezet. Dit is al goed uitontwikkeld voor kunststof- en benzineproductie waarvan een drietal fabrieken op volle schaal in China zijn gerealiseerd. De vastlegging van CO₂ verschilt hierbij wel; in geval van brandstoffen voor verbrandingsmotoren is er geen vastlegging, dus een beperktere emissiereductie ten opzichte van fossiel. En in kunststoffen wél een vastlegging. De termijn is afhankelijk van de circulariteit en de reststroomverwerking in de toekomst, al dan niet met CO₂-afvang.

Elektrificatie kan al deels in de periode tot 2030 worden ingevoerd voor warmte en stoom, al dan niet in hydride vorm. Van 2030 tot 2050 zal het gebruik van groene waterstof, elektrochemische routes en procesintensificatie voor verdere decarbonisatie kunnen zorgen, mits 'beschikbaar en betaalbaar'.

CCS zou dan een sluitpostfunctie kunnen hebben waar bovenstaande routes niet inzetbaar zijn. CCS is in de chemie met name geschikt voor de productie van waterstof vanwege de hoge CO₂-concentraties. Dit betekent dat het tot significante reducties kan leiden bij de kunstmestindustrie, al moet daar wel rekening worden gehouden met het risico op lock-in als gevolg van de dalende vraag als gevolg van kringlooplandbouw. Bij andere processen ligt CCS minder voor de hand, aangezien het vrij energie-intensief is om CO₂ af te vangen bij

relatief lage CO₂-concentraties in de afgassen. Procesintegratie van de afvang met optimaal gebruik van beschikbare restwarmte kan dit echter wel verzachten, waardoor deze route niet bij voorbaat kan worden uitgesloten.

4.4 Raffinage

4.4.1 Technologieën

De raffinagesector gebruikt olie voor de productie van vloeibare brandstoffen en grondstoffen voor de chemie.

Voor het energiegebruik op de raffinaderij zelf gelden grotendeels dezelfde conclusies als voor de chemie. Een groot verschil is echter dat een significant deel van het energiegebruik wordt gedekt door de verbranding van de raffinaderijgassen. Indien een andere energiebron wordt ingezet, moet er een nieuwe bestemming gevonden worden voor deze gassen, waar ook kosten aan verbonden zijn. Daarom zijn CCS en de productie van blauwe waterstof uit raffinaderijgassen voor de bestaande installaties kosteneffectieve oplossingen om de CO₂-uitstoot van raffinaderijen op de korte termijn flink naar beneden te brengen. Hiermee worden echter nog geen stappen gezet richting een meer structurele verduurzaming van de sector.

Als we buiten de raffinaderij kijken, valt er veel te winnen door vervanging van de huidige fossiele brandstoffen door andere, duurzame energiedragers. Dit levert twee keer winst op: CO₂-reductie op de raffinaderij omdat er minder brandstof geraffineerd hoeft te worden en CO₂-reductie bij de eindgebruiker omdat er geen fossiele brandstof meer verbrand wordt. Hierbij is de milieuwinst het grootst als er gebruik gemaakt wordt van het meest efficiënte alternatief: elektrisch waar het kan, waterstof als elektrisch niet mogelijk is (bijvoorbeeld in het zware vrachtverkeer) en biobrandstoffen of e-fuels voor de zeescheepvaart en luchtvaart.

Tabel 5 - CO₂-reductiemaatregelen raffinage

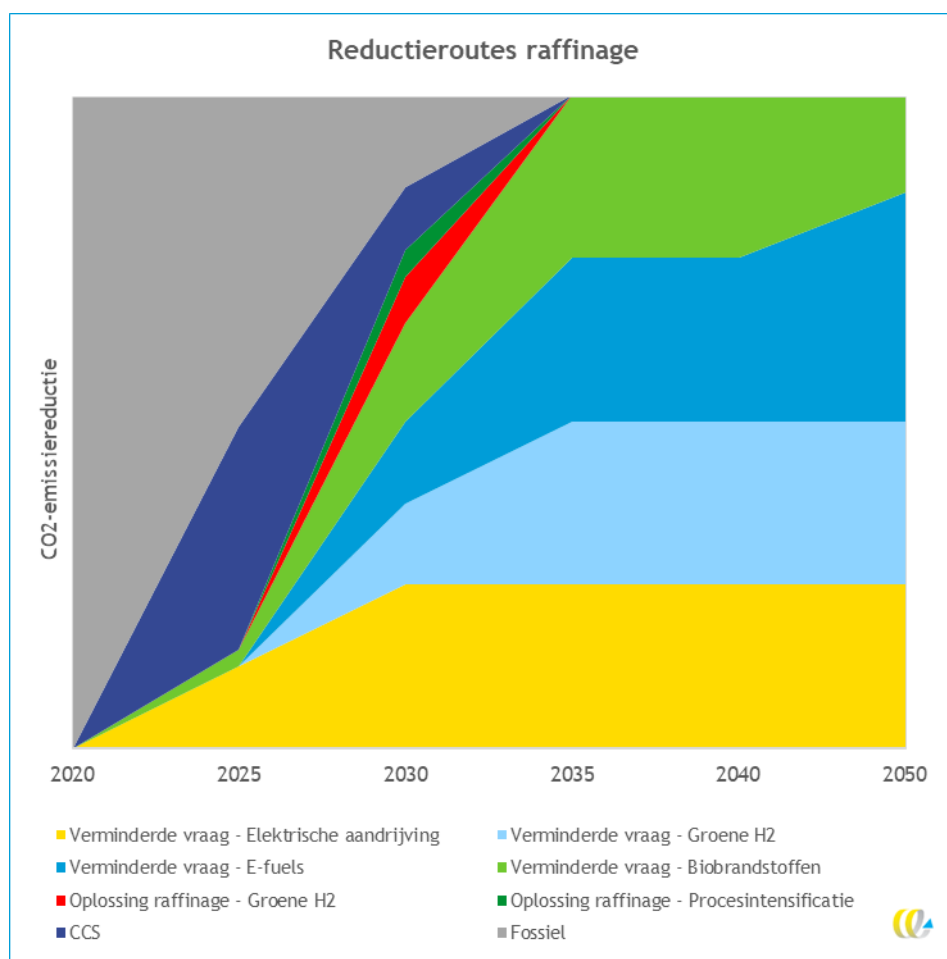
Nr.	Route	CO ₂ -reductie	Duur invoering (TRL)	Kosten-effectiviteit (kosten per bespaarde ton CO ₂)	Toelichting
1	CCS	Hoog	Middellang (TRL 6-9)	Middel	Afhankelijk van het type afgas.
2	Groene waterstof	Middel	Middellang (TRL 8-9)	Hoog	Andere bestemming voor kraakgassen nodig.
3	Proces-intensificatie	Hoog	Lang (TRL 3-9)	Hoog	Zeer kapitaalintensief, meeste zijn nog in de laboratoriumfase.
4	Andere brandstoffen in eindsectoren	Hoog	Direct-Lang (TRL 7-9)	Laag-Hoog	Verbrandingsemissies worden ook voorkomen. Extra hernieuwbare elektriciteit nodig.

Ook hier zijn de beoordelingen op de verschillende criteria de huidige verwachtingen bij een succesvolle ontwikkeling van de technologieën. De uiteindelijke scores worden bepaald door enerzijds de resultaten van de technische ontwikkeling, en anderzijds de mate waarin het beleid investeringen in deze ontwikkelingen stimuleert.

4.4.2 Tijdlijn

In Figuur 9 is te zien hoe het tijdpad van verduurzaming van de raffinagesector eruit zou kunnen zien. Er is hiervoor een semi-kwantitatieve analyse uitgevoerd. Dit betekent dat de afbeelding een globaal beeld geeft van de ontwikkeling van de sector, maar dat er geen conclusies aan verbonden kunnen worden over hoe groot het aandeel van elke verduurzamingsoptie zal zijn. Het is namelijk erg onzeker hoe de sector zich op de lange termijn gaat ontwikkelen en welke technologieën dominant gaan worden. Dit hangt van verschillende factoren af, zoals prijsontwikkelingen, vraagontwikkeling, beschikbaarheid van grondstoffen, beschikbaarheid van duurzame elektriciteit en ontwikkelingen in de infrastructuur. Dit betekent dat de aandelen van de verschillende technologieën in de toekomst slechts indicatief zijn.

Figuur 9 - Globale tijdlijn verduurzaming raffinagesector



Momenteel wordt circa 40% van de emissies van de raffinagesector veroorzaakt door waterstofproductie (eigen berekening op basis van (Emissieautoriteit, 2018; Berenschot, TNO, 2017)). Deze emissies kunnen afgevangen worden. De resterende emissies worden voornamelijk veroorzaakt door verbranding van aardgas en kunnen niet afgevangen worden. In de toekomst zal de vraag naar raffinageproducten afnemen doordat er overgeschakeld wordt naar alternatieve brandstoffen in de transportsector. Het is de verwachting dat de vraag naar fossiele motorbrandstoffen op de lange termijn verdwijnt, waardoor raffinaderijen verdwijnen. Bij het lichte transport is een overstap naar elektrische aandrijving op de korte termijn het meest aannemelijk. Daarnaast worden hier momenteel biobrandstoffen gebruikt. Het is de verwachting dat dit in de toekomst niet meer het geval zal zijn aangezien verbrandingsmotoren in auto's dan verdwijnen. Voor zwaarder transport is elektrische aandrijving niet altijd een goede optie vanwege de relatief lage energiedichtheid en zijn waterstof, e-fuels of biobrandstoffen mogelijke alternatieven. Voor sommige zware modaliteiten, zoals langeafstandsvluchten, zijn biobrandstoffen op de lange termijn ook een reële optie. Daarom is er naar verwachting in 2050 ook nog vraag naar biobrandstoffen. Bij elektrische aandrijving en groene waterstof is het transport van de energie problematisch bij vergaande implementatie vanwege de relatief lage energiedichtheid. Daarom is het aannemelijk dat er in de toekomst een groter aandeel aan e-fuels komt.

Op de korte en middellange termijn zullen raffinaderijen nog actief zijn en fossiele motorbrandstoffen produceren. In deze transitieperiode zijn het gebruik van groene waterstof, procesintensificatie en elektrificatie van de verwarming verduurzamingsalternatieven voor CCS.

4.4.3 Conclusies over de rol van CCS in deze sector

In de sector raffinage zal de vraag naar brandstoffen in de toekomst afnemen door het gebruik van biobrandstoffen en elektrisch rijden en wellicht nog andere alternatieven, maar de totale afzet zal tot 2030 nog niet heel sterk dalen.

In hydrorafinaderijen biedt de toenemende vraag naar waterstof een kans om deze op termijn in steeds grotere mate in te vullen met groene waterstof. Groene waterstofproductie wordt nog weinig toegepast en grote volumes zullen pas beschikbaar komen als de hernieuwbare energieproductie verder groeit en de kosten dalen. De inzet van blauwe waterstof, oftewel de toepassing van CCS op de al bestaande waterstofproductieprocessen, zou al wel op kortere termijn een forse CO₂-reductie kunnen bereiken. Deze zou dan op termijn moeten worden vervangen door groene waterstof.

Na 2030 vormt de synthese van e-fuels, al dan niet via CCU, een mogelijke route om verder te verduurzamen. Ook hiervoor moeten ruime hoeveelheden groene stroom en -waterstof 'beschikbaar en betaalbaar' worden. Dit zou met name relevant kunnen zijn voor de luchtvaart met e-kerosine. Deze technieken kunnen dan tijdelijk gebruik maken van de voor CCS ontwikkelde CO₂ afvanginstallaties en infrastructuur. Deze routes zijn echter pas klimaatneutraal als de CO₂ ook klimaatneutraal is, dat wil zeggen uit de lucht wordt gehaald, van biogene oorsprong is of circulair wordt gebruikt (dat wil zeggen weer wordt opgevangen en hergebruikt).

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Er zijn veel verschillende CO₂-reductietechnieken nodig

De sectoranalyse in het vorige hoofdstuk laat zien dat er veel verschillende CO₂-reductie-maatregelen mogelijk zijn in deze vier sectoren, maar dat voor elk nog de nodige uitdagingen moeten worden overwonnen. Veel van de technieken lijken kansrijk maar bevinden zich nog in een onderzoeksfase en blijven wellicht aanzienlijk duurder dan de huidige processen. Dit betekent dat ze nog niet op korte termijn op grote schaal kunnen worden toegepast, bovendien zijn de kosten, effectiviteit, en praktische haalbaarheid nog onzeker. De analyse laat het grote belang zien van onderzoek en ontwikkeling de komende jaren: om de lange termijn klimaatdoelstellingen te halen moet er nog hard worden gewerkt aan de ontwikkeling van de duurzame alternatieven.

Een aantal van de geïdentificeerde CO₂-reductietechnieken zijn specifiek voor één sector, maar een aantal categorieën bieden kansen voor grootschalige CO₂-reductie in verschillende sectoren:

- Verschillende vormen van **elektrificatie** bieden in de meeste sectoren mogelijkheden voor CO₂-reductie (in de staalindustrie, in de chemie en in raffinage), soms via direct gebruik van elektriciteit, soms via de inzet van groene waterstof. Deze routes zijn echter pas duurzaam als er ook voldoende duurzame elektriciteitsopwekking is. Gezien de grote energievraag van deze sectoren vergt dit een forse uitbreiding van de huidige capaciteit aan wind- en zonne-energie¹¹. Daarnaast moeten de elektriciteitsnetten worden versterkt en uitgebreid, zijn er grootschalige elektrolyzers nodig voor de groene waterstofproductie, enz.
- **Biomassa** biedt kansen voor CO₂-reductie in elke sector, al verschillen de toepassingen en processen per sector.
- De gevolgen van de **circulaire economie** op de processen en het energie- en grondstoffengebruik van de industrie kunnen groot zijn. Circulariteit in grondstofketens kan grote hoeveelheden primair grondstof- en energieverbruik vermijden, met name bij de productie van ijzer en kunststoffen, wat significant doorwerkt in de CO₂-emissiereductie per ton product. De technologieën hiervoor zijn in deze twee sectoren beschikbaar, een versnelling van de ontwikkelingen kan dus al op korte termijn tot extra CO₂-reductie leiden.
- In de chemie en raffinagesector wordt veel **waterstof** gebruikt. Op termijn kan deze waterstofproductie worden verduurzaamd door over te stappen op groene waterstof, die wordt geproduceerd uit duurzame elektriciteit. Het gaat echter om dermate grote hoeveelheden waterstof dat vergroening via deze route tijd nodig heeft (zie het eerste punt hierboven). CO₂-reductie via CCS kan al wel op kortere termijn worden toegepast: hiervoor hoeven de huidige processen voor de waterstofproductie niet te worden aangepast. De CO₂-afvang kan vaak op de huidige installaties worden gerealiseerd. Bij deze route is er wel een risico op lock-in: als eenmaal de investeringen zijn gedaan voor CCS wordt die route relatief goedkoop, en is de drempel hoger om in de toekomst alsnog over te stappen op groene waterstof. Hier zijn dan extra beleidsmaatregelen voor nodig.

¹¹ In Nederland of daarbuiten. Zo kan er met name bij de waterstofroute ook worden gedacht aan import van groene waterstof, op de lange termijn.

De verschillende technieken zullen waarschijnlijk niet allemaal doorbreken. Een aantal zullen toch minder kansrijk zijn dan nu verwacht, omdat de kosten te hoog blijven, of bepaalde technische problemen toch niet goed kunnen worden opgelost. Een aantal zal ook met elkaar concurreren. Zo zal er bij een aantal materiaal- en productketens minder noodzaak zijn om bestaande processen te verduurzamen bij een groter aandeel recycling/circulair.

CCS heeft als voordeel dat het voor een aantal sectoren al op korte termijn kan worden toegepast en er zo al op korte termijn CO₂-reductie kan worden bereikt. Daarmee kunnen de emissies in de industrie alvast worden gereduceerd terwijl de andere technieken verder worden ontwikkeld en marktrijp worden gemaakt. De (tijdelijke) stimulering van CCS moet deze initiatieven echter niet in de weg staan.

Omdat vrijwel al deze technieken nog sterk in ontwikkeling zijn is het binnen het kader van deze studie niet mogelijk om een concrete schatting te geven van het CO₂-reductie-potentieel van elk van de technieken. Voor de verdere uitwerking van het Nederlandse CCS-beleid is dit ook niet het belangrijkste: het beleid moet ondanks de huidige onzekerheden robuust genoeg zijn om de klimaatdoelen te halen, en daarbij ruimte geven aan de industrie om de kansrijke technieken verder te ontwikkelen.

5.2 De rol van CCS in de verduurzaming van industrie

In die gevallen waar bestaande kapitaalintensieve processen niet kunnen worden aangepast kan CCS op korte termijn tot 2030 een kosteneffectieve oplossing bieden om emissie-reductie te bereiken. Met dit uitgangspunt zien we bij de vier sectoren die in deze studie zijn onderzocht (ijzer/staal, cement, chemie en raffinage) vooral kansen voor CCS in de ijzer/staalindustrie en bij waterstofproductie in de petrochemie en raffinagesector.

In 2030 kan 80% van de CO₂-uitstoot van Tata gereduceerd worden door Hlsarna in combinatie met CCS. 20% van de reductie wordt veroorzaakt door verandering van het productieproces en de resterende reductie door CCS. Van de CO₂-uitstoot van waterstofproductie in de petrochemie en raffinagesector kan 2/3 afgevangen worden als je uitgaat van waterstofproductie in een SMR (Berenschot, TNO, 2017).

De tweede optie, CCS voor waterstofproductie, kan een wegbereider worden voor groene waterstof in de industrie en andere toepassingen. Het wordt steeds duidelijker dat groene waterstof een belangrijke pijler kan worden van een klimaatneutrale samenleving: het kan dienen als opslag van de grote hoeveelheden niet-regelbare hernieuwbare elektriciteit (van wind en zon), het kan de huidige fossiele waterstofproductie voor de industrie vervangen. Daarnaast kan het als duurzame energiedrager ook gebruikt worden voor toepassingen in mobiliteit (bijv. vrachtverkeer en scheepvaart) en gebouwde omgeving (bijv. voor warmte), al ligt gebruik in deze sectoren vanwege de schaarste van groene waterstof op de korte en middellange termijn voorlopig niet direct voor de hand. Groene waterstof loopt nog op alle niveaus in de energieketen tegen uitdagingen aan, terwijl de blauwe waterstofroute al bijna vrij baan heeft en alleen downstream om relatief eenvoudige aanpassingen vraagt (CE Delft, 2018). De blauwe route maakt dan nu al een snelle start van waterstof-toepassingen mogelijk, met relatief lage CO₂-emissies (ca. 10-20% van de huidige waterstof-productieketen) en in grote volumes. In de luwte daarvan kan de productie van groene waterstof zich intussen verder ontwikkelen, inclusief de benodigde groei van hernieuwbare elektriciteitsproductie. CE Delft (CE Delft, 2018) schat in dat tegen 2030 groene waterstof dan marktrijp zou kunnen zijn voor verdere uitbouw van de waterstofketen en uiteindelijke verdringing van blauwe waterstof.

Voor cementproductie is CCS technisch gezien ook een aantrekkelijke optie om al op korte tot middellange termijn significante CO₂-reductie te bereiken. Maar voor Nederland lijkt het potentieel nihil, aangezien de productiecapaciteit de afgelopen decennia is afgebouwd. Op de langere termijn kan een CCS-infrastructuur in Nederland wellicht wel nieuwe productiecapaciteit aantrekken, als cementbedrijven die nu in het buitenland produceren hun CO₂-uitstoot moeten reduceren. Een locatie met goede CCS-faciliteiten kan dan aantrekkelijk zijn.

CCS moet niet worden toegepast als nieuwe processen bestaan die intrinsiek weinig tot geen CO₂-emissies opleveren én al ontwikkeld zijn, zoals directe reductie van ijzer en op groene stroom en elektrolyse gebaseerde (petro-)chemie. Deze alternatieve technologieën hebben wel tijd én overheidsbeleid nodig om daadwerkelijk tot significante CO₂-reductie te kunnen leiden. De toepassingen zullen op zeer kleine schaal moeten beginnen gezien de lange tijd eer de zeer grote hoeveelheden benodigde groene stroom en - waterstof beschikbaar komen. Hiervoor zijn eerst structureel stevige prikkels nodig vanuit de overheid, zoals een hoge CO₂-prijs en stimulering van aanleg van grote hoeveelheden opwekkers van groene stroom door zon en wind. Deze route levert op lange termijn een duurzame industrie op, maar zal de komende 5-10 jaar nog weinig CO₂-reductie opleveren.

5.3 Risico op lock-in?

Investerings in CCS kunnen belemmeringen vormen voor alternatieve technologieën die in de toekomst beschikbaar komen. Deze lock-in kan twee oorzaken hebben:

- als eenmaal is geïnvesteerd in CCS-processen en -infrastructuur zijn de operationele kosten relatief laag, waardoor het lastiger wordt om tegen te concurreren en er geen prikkel is te investeren in andere verduurzamingstechnieken;
- als eenmaal is geïnvesteerd in CCS-processen en -infrastructuur voor sectoren die richting 2050 gaan krimpen vanwege dalende vraag naar fossiele producten (benzine) en circulariteit (kunstmest) bestaat het risico op stranded assets en de noodzaak voor een versnelde afschrijving van de investeringen.

De risico's kunnen worden verminderd door CCS niet te ontwikkelen voor processen waar de komende 10-15 jaar andere alternatieven grootschalig kunnen worden ingezet. Dit criterium is overigens niet altijd eenduidig, gezien de huidige onzekerheden rondom de technische ontwikkelingen. Zo kan bijvoorbeeld de inzet van het Hlsarna-proces met CCS een forse CO₂-reductie bereiken in de ijzer- en staalindustrie, maar concurreert een dergelijke investering wel met andere verduurzamingsopties zoals directe reductie met waterstof die op dit moment wordt ontwikkeld.

Daarnaast is het belangrijk om het beleidskader zo vorm te geven dat er voldoende kansen worden gecreëerd voor de alternatieven. Zo vereist een toekomstige transitie van 'blauwe' naar 'groene' waterstof gericht beleid, bijvoorbeeld financiële ondersteuning en regulerende maatregelen ter stimulering van groene waterstofproductie. Zonder dit beleid zal een lock-in optreden in blauwe waterstof: die route is dan de nieuwe status quo die moet worden verdrongen. En ook hier geldt dat investeringen in de CCS-procesaanpassingen en infrastructuur dan relatief snel moeten worden afgeschreven. Voor sectoren die geen lange-termijnperspectief hebben in een klimaatneutraal 2050 en te maken krijgen met een verminderde vraag zoals bij raffinage en kunstmest, belangrijk om CCS proportioneel toe te passen om het risico op *stranded assets* te voorkomen. In de volgende paragraaf geven we verdere beleidsaanbevelingen om dit soort lock-in te voorkomen.

Daarnaast concluderen we dat de langetermijnpositie en toepassing van CCS sterk zal afhangen van de kostenontwikkeling van CCS: als kostendalingen en/of generiek CO₂-beleid zoals het EU ETS er de komende 10-15 jaar voor zorgen dat CCS ook zonder subsidie rendabel wordt zal CCS ook na de ‘horizon’ van de subsidieverlening op grote schaal toegepast worden.

5.4 Beleidsaanbevelingen

De analyse in dit rapport bouwt voort op de ‘Routekaart CCS’ die in 2018 is ontwikkeld (De Gemeiynt, 2018), en kan de basis vormen voor verdere uitwerking van het beleid rondom CCS-subsidies dat in het Klimaatakkoord is aangekondigd. Het gaat dan met name om de verdere concretisering van de ‘zeef’ (‘alternatieven krijgen voorrang op CCS’).

Uit het overzicht van alternatieve technologieën blijkt dat er weliswaar voor alle sectoren alternatieven zijn, maar dat deze variëren in marktrijpheid (TRL), verwachte meerkosten, en mogelijke toepassingen. De uitdaging is om een helder afwegingskader te ontwikkelen waarmee bepaald kan worden wanneer CCS een alternatieve technologie in de weg staat, en wanneer niet.

Wij concluderen dat er met name in de ijzer/staalindustrie en bij waterstofproductie in de petrochemie, voor kunstmestproductie en in de raffinagesector potentieel ligt voor toepassing van CCS. Voor sectoren die te maken krijgen met een verminderde vraag zoals bij raffinage en kunstmest, is het belangrijk om CCS proportioneel toe te passen om het risico op *stranded assets* te voorkomen. Deze conclusies liggen in lijn met de Routekaart CCS.

De analyse van de vier industriële sectoren die in deze studie zijn onderzocht laat zien dat er weliswaar veel mogelijke technologieën zijn waarmee CO₂-reductie kan worden bereikt, maar dat veel van deze technologieën nog verder moeten worden ontwikkeld om ook daadwerkelijk op grote schaal toegepast te kunnen worden. De verdere invulling van de afspraken rondom CCS in het Klimaatakkoord betekent daarom ook implementatie van beleid dat ervoor zorgt dat het CO₂-reductiepotentieel van deze alternatieven wordt gerealiseerd. Gezien de mix van technologieën die in de verschillende sectoren kunnen zorgen voor CO₂-reductie concluderen we dat een beleidspakket nodig is dat zich richt op de volgende aspecten:

- Stabiël en effectief korte- tot langetermijnbeleid dat bedrijven aanspoort om CO₂-reductietechnologieën toe te passen die tegen redelijke meerkosten kunnen worden toegepast of zelfs al rendabel zijn. Voorbeelden voor dit soort beleid zijn een (volgende hoge) CO₂-prijs en de SDE++-subsidieregeling, normen voor CO₂-emissies of energiebesparing, etc. Dit is een voorwaarde voor CO₂-reductie op korte termijn, maar zal daarnaast ook zorgen voor investeringen in R&D, omdat bedrijven dan kunnen verwachten dat de nieuwe CO₂-reductietechnieken in toekomst rendabel kunnen worden.
- Omdat veel duurzame technologieën voor deze sectoren nog op een TRL-niveau tussen 3 en 6 zitten is R&D- en innovatiebeleid nodig dat zich richt het versnellen van de verdere ontwikkeling en toepassing van nieuwe technologieën en innovaties met een groot CO₂-reductiepotentieel voor de toekomst. Voor de technologieën met een lager TRL zal onderzoek op labschaal nodig zijn, voor de alternatieven met hogere TRL zullen pilot- en demoprojecten nodig zijn waarmee kan worden opgeschaald.
- Daarnaast is ambitieus hernieuwbaar energiebeleid nodig, dat zorgt voor een sterke groei van de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit (wind en zon) voor de industrie. Het gaat dan om productie van de energie, maar ook om de infrastructuur en technologieën die nodig zijn om deze hernieuwbare energie in te zetten voor de

industrie (zoals versterking van de elektriciteitsnetten, systeemintegratie, flexibel vermogen, grootschalige elektrolyse-installaties die zorgen voor conversie van de elektriciteit naar groene waterstof, etc.), Vanwege de grote energievraag van de industrie gaat het hierbij om grote investeringen, en relatief lange tijdspaden voordat deze route daadwerkelijk significante CO₂-reductie kan bereiken, maar het lange termijn potentieel is groot.

- Als blauwe waterstof (uit aardgas met CCS) slechts als tijdelijke tussenoplossing wordt gezien is in de toekomst gericht beleid nodig om deze blauwe waterstof geleidelijk te vervangen door groene waterstof. Deze transitie kan dan plaatsvinden zodra er voldoende groene waterstof beschikbaar is tegen acceptabele kosten.
- Om het CO₂-reductiepotentieel van biomassa in de industrie te benutten is allereerst een heldere visie nodig op het gebruik van biomassa in de industrie, voortbouwend op de acties die zijn afgesproken in het Klimaatakkoord, het SER-advies Biomassa in Balans (SER, 2020), en achterliggende studies van PBL. Vervolgens kan deze visie worden vertaald naar effectief beleid met duurzaamheidscriteria.
- Hetzelfde geldt voor de circulaire economie: om het CO₂-reductiepotentieel van de circulaire economie te realiseren is gericht beleid nodig om het aandeel materialen en producten dat in deze sectoren circulair wordt ingezet te vergroten.

Al deze ontwikkelingen hebben tijd nodig: het gaat hier om grote investeringen, langdurige onderzoekstrajecten en vaak ingrijpende veranderingen aan processen en bedrijven.

Verdere uitwerking van het beleidskader voor CCS betekent dus ook dat er volop moet worden ingezet op de verdere ontwikkeling van de alternatieven: stimuleren van R&D, pilot- en demoprojecten voor nieuwe technieken, sterke groei van duurzame energie-opwekking, energieopslag, groene waterstofproductie en de circulaire economie. Alleen dan kunnen de hier beschreven alternatieven bijdragen aan CO₂-reductie tot 2030, en vervolgens de rol van CCS overnemen, zoals beoogd met de 'horizon' in het CCS-beleidskader, en de sectoren verder verduurzamen richting klimaatneutraal in 2050.

Bij de verdere ontwikkeling van het beleid rondom CCS is het belangrijk om ook de ontwikkelingen rondom het Innovation Fund van de EU in de gaten te houden. Bedrijven kunnen ook daar subsidie aanvragen voor CCS-projecten. Als Nederlandse CCS-projecten hier gebruik van maken kunnen deze uiteraard ook bijdragen aan CO₂-reductie van de industrie in Nederland, wellicht buiten de SDE++ om. Bovendien kunnen de Innovation Fund-projecten de ontwikkelingen rondom CCS versnellen, bijvoorbeeld door te zorgen voor innovaties, kostenverlaging of investeringen in infrastructuur. Dit geldt overigens ook voor de alternatieven: ook die zullen veelal gebruik kunnen maken van het Innovation Fund.

Referenties

Berenschot, Ecofys, 2018. *Chemistry for Climate: Acting on the need for speed : Roadmap for the Dutch Chemical Industry towards 2050*, Utrecht: Berenschot.

Berenschot, TNO, 2017. *CO₂-vrije waterstofproductie uit gas*, Utrecht: Berenschot.

CBS, 2017. *Milieuaspecten van verkeer en vervoer: koolstofdioxide*. [Online]
Available at: <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatschappij/verkeer-en-vervoer/transport-en-mobiliteit/energie-en-milieu/milieuaspecten-van-verkeer-en-vervoer/categorie-milieuaspecten/kooldioxide>
[Accessed 19 2020].

CE Delft, 2012. *Biocokes als alternatief voor petroleumcokes en metallurgische cokes*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2016a. *Kansrijk beleid voor CCS : Bijdrage aan het programma Kansrijk Energie- en Klimaatbeleid*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2016b. *Update prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen 2016*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2018. *Waterstofroutes Nederland, Blauw, groen en import*, Delft: CE Delft.

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

CE Delft, 2020b. *Verkenning ontwikkeling CO₂-vrije flexibele energietechnieken*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020c. *Energy Intensive Industries : challenges and opportunities in energy transition*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2020d. *Kennisdocument waterstof voor de gebouwde omgeving*, Delft: CE Delft.

Cembureau, 2017. *Innovation in the cement industry*. [Online]
Available at: https://cembureau.eu/media/1225/10819_cembureau_innovationbooklet_eu-ets_2017-02-01.pdf
[Accessed Juni 2020].

CEMCA, 2020. *About*. [Online]
Available at: <https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/about/>
[Accessed 30 6 2020].

Christensen, A. & Petrenko, C., 2017. *CO₂-Based Synthetic Fuel: Assessment of Potential European Capacity and Environmental Performance*, Washington DC: The International Council on Clean Transportation (ICCT).

Collodi, G., Azzaro, G., Ferrari, N. & Santos, S., 2016. *Techno-Economic Evaluation of Deploying CCS in SMR Based Merchant H₂ production with NG as Feedstock and Fuel*. Lausanne, Switzerland, Elsevier, pp. 2690-2712.

De Gemeynt, 2018. *Routekaart CCS; CO₂-afvang en opslag, een ongemakkelijk maar onmisbaar onderdeel van de energietransitie*, Klarenbeek: De Gemeynt, CE Delft en Margriet Kuijper.

Delta Concrete Consult, 2020. *Quick-scan verduurzamingsopties voor beton; actualisering van TRL-niveau's en identificatie van evt. implementatie-remmende regelgeving voor pilot-toepassingen*, Vianen: Delta Concrete Consult.

DIFFER, 2020. *Zonnebrandstoffen uit plasmolyse*. [Online]
Available at: <https://www.differ.nl/dossier/zonnebrandstoffen-uit-plasmolyse>

Dimitriou, I., 2015. Carbon dioxide utilisation for production of transport fuels: process and economic analysis. *Royal Society of Chemistry*.

DNV GL; TNO; Enpuls, 2018. *Technologiebeoordeling van groene waterstofproductie*, Groningen: DNV GL Netherlands B.V., Oil & Gas.

E4Tech, 2018. *Masterplan for CO₂ reduction in the Dutch Shipping sector : Biofuels for shipping*, London: E4Tech(UK) Ltd.

EC, 2017. *A European strategy for plastics in a circular economy*, Brussels: European Commission (EC).

EC, 2020. *Action Plan For a cleaner and more competitive Europe, COM (2020)98 final*, Brussels: European Commission (EC).

EC, 2020. *Mededeling van de Commissie aan het Europees Parlement, de Europese Raad, de Raad, het Europees Economisch en Sociaal Comité en het Comité van de Regio's : Een nieuwe industriestrategie voor Europa COM(2020) 102*, Brussel: Europese Commissie (EC).

Ellen MacArthur Foundation, 2013. *Towards the Circular Economy*, Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation.

Emissieautoriteit, 2018. *Rapportages en cijfers ETS: Emissiecijfers 2013-2019*. [Online]
Available at: <https://www.emissieautoriteit.nl/onderwerpen/rapportages-en-cijfers-ets/documenten/publicatie/2020/04/16/emissiecijfers-2013---2019>
[Accessed 1 9 2020].

Emissieregistratie, 2018. *Emissiebronnen*. [Online]
Available at: <http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/erpub/selectie/criteria.aspx>
[Accessed 31 8 2020].

ENCI, 2020. *ENCI Maastricht*. [Online]
Available at: <https://www.enci.nl/nl/enci-maastricht>
[Accessed 28 07 2020].

EU, 2019. *Clean energy for all Europeans*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Eurofer, 2013. *A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050*, Brussels: Eurofer.

Europese Commissie, 2019. *De Europese Green Deal, COM(2019) 640*, Brussel: Europese Commissie.

Gardarsdottir, S. et al., 2019. Comparison of Technologies for CO₂ Capture from Cement Production- Part 2: Cost analysis. *Energies*, Volume 12, p. 542.

Houses of Parliament - Parliamentary Office of Science and Technology, 2018. *Carbon Capture and Usage*, s.l.: s.n.

Hrabovsky, M., 2009. Thermal Plasma Generators with Water Stabilized Arc. *The Open Plasma Physics Journal*, Issue 2, pp. 99-104.

H-vision, 2019. *Blue hydrogen as accelerator and pioneer for energy transition in the industry*, Rotterdam: H-vision.

Hybrit, 2018. *Hybrit : Fossil-Free Steel, brochure*. [Online]
Available at: https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/hybrit/files/hybrit_brochure.pdf?m=20180201085027
[Geopend 28 07 2020].

Klimaatakkoord, 2019. *Klimaatakkoord*, Den Haag: Rijksoverheid.

Nationale Proeftuin Precisielandbouw, 2019. *Nieuwe kringlooptechnieken voor NPPL 2020*. [Online]
Available at: <https://www.proeftuinprecisielandbouw.nl/gezocht-nieuwe-kringlooptechnieken-voor-nppl-2020/>
[Accessed 8 2020].

Natuur & milieu, 2019a. *Gasmonitor 2019 : Marktcijfers warmtetechnieken*, Utrecht: Natuur & Milieu.

nova-Institut, 2019. *Bio-based Building Blocks and Polymers - Global capacities, production and trends 2018-2023*, Hürth: nova-Institut GmbH.

Patisson, F. & Mirgaux, O., 2020. Hydrogen Ironmaking : How it Works. *Metals*, 10(7), pp. E-pub.

PBL, 2017. *Verkenning van Klimaatdoelen*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL).

Rijksoverheid, sd *Noordzeeloket: CO₂-opslag : Huidig gebruik en ontwikkelingen*. [Online]
Available at: <https://www.noordzeeloket.nl/functies-gebruik/co2-opslag/#:~:text=De%20Nederlandse%20CO2%2Dopslagcapaciteit%20in,circa%201.200%20Mt%20onder%20zee.>
[Geopend 2020].

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

SINTEF, 2018. *CO₂ Capture : CEMCAP in cement world*. [Online]
Available at: <https://www.sintef.no/globalassets/project/cemcap/cemcap-in-cement-world.pdf>
[Geopend 21 April 2020].

Styring, P. J. D. d. C. H. R. H. & A. K., 2011. *Carbon Capture and Utilisation in the green economy*, s.l.: s.n.

T&E, 2018. *Roadmap to decarbonising European cars*, Brussel: Transport & Environment (T&E).

Tata Steel, 2020. *Een duidelijke weg naar CO2-neutrale productie*. [Online]
Available at: <https://www.tatasteel.nl/nl/nieuws/Een-duidelijke-weg-naar-CO2-neutrale-staalproductie>
[Geopend 28 07 2020].

Voldsund, M. et al., 2019. Comparison of Technologies for CO2 Capture from Cement Production—Part 1: Technical Evaluation. *Energies*, 12(559).

Wikipedia, 2020. *Hoogoven*. [Online]
Available at: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Hoogoven>
[Accessed 2 10 2020].

transitie naar een circulaire economie de vraag naar nieuw staal verlagen, bijvoorbeeld door meer recycling van schroot en het gebruik van hout in plaats van staal in de bouw.

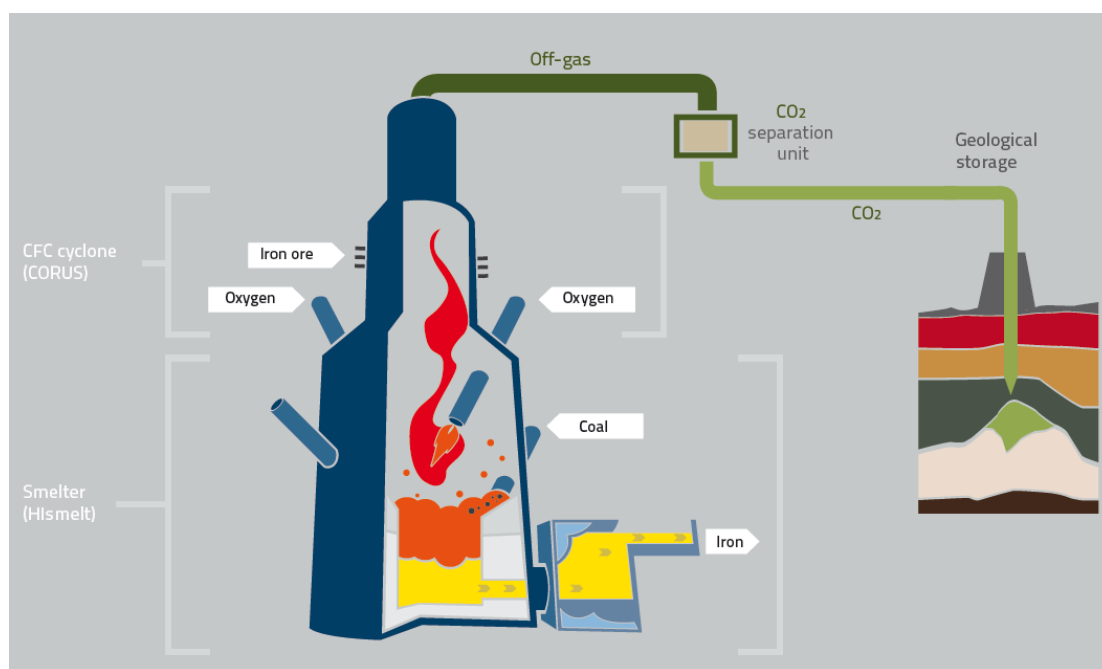
A.1.2 Mogelijkheden voor CCUS

Er zijn meerdere CO₂-rijke bronnen die goed aansluiten bij afvang van CO₂ zoals het hoog-ovengas. Naast CO₂ bevat hoogovengas ook nog CO, wat gebruikt kan worden voor CCU-reacties, bijvoorbeeld naar ethanol. Er zijn daarnaast ruime mogelijkheden voor warmte-integratie om de energie-intensieve afvang te voeden met restwarmte op locatie. De ligging van Tata Steel aan zee in de buurt van offshore opslagmogelijkheden is een voordeel voor CCS.

A.1.3 Alternatief Hlsarna

Een innovatie in het hoogovenproces van Tata Nederland is het Hlsarna-proces, zie Figuur 11. Hlsarna gebruikt pure zuurstof en poederkool om ijzererts te smelten en te reduceren. Hierdoor komt CO₂ geconcentreerd vrij en hoeven er geen pellets, sinter en cokes meer gemaakt te worden.

Figuur 11 - Schematisch overzicht van het Hlsarna-proces



Bron: (Eurofer, 2013).

Door het weglaten van de sinter-, pellet- en cokesproductie kan een tot 20% lager energiegebruik en 20% emissiereductie worden bereikt (Eurofer, 2013). Daarnaast is het bij Hlsarna eenvoudiger en efficiënter om CCUS toe te passen doordat het rookgas geconcentreerde CO₂ bevat. Hierdoor kan totaal tot 80% minder CO₂-emissie worden bereikt.

Zorgpunten zijn:

- koppeling met CCUS is noodzakelijk, anders bedraagt de emissiereductie slechts 20%;
- ‘lock-in-effect’, want de investering in Hlsarna met CCS concurreert met andere meer duurzame processen.

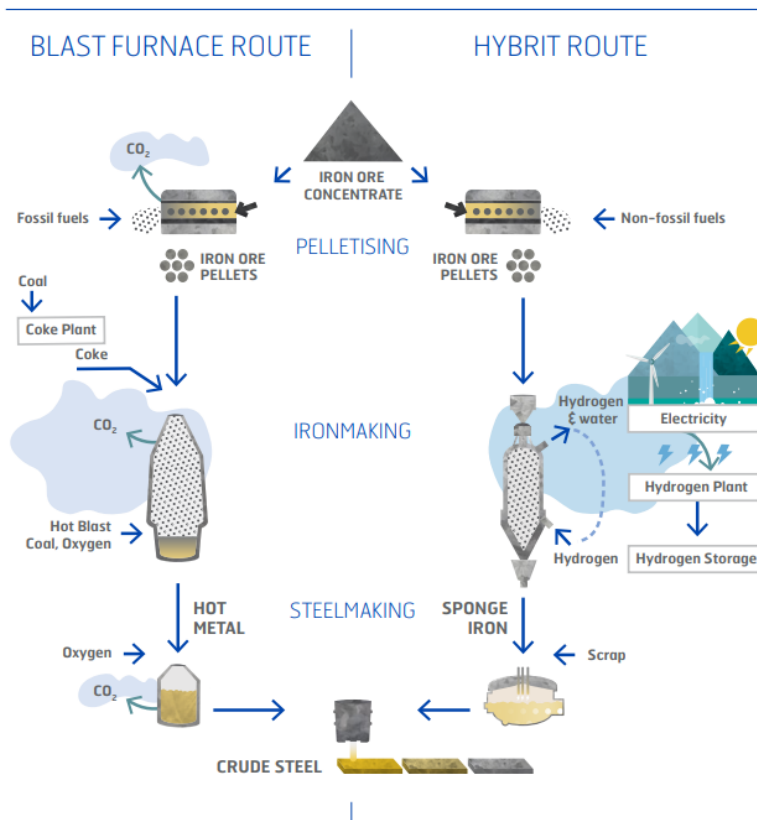
A.1.4 Alternatief directe reductie met waterstof

Bij directe reductie wordt ijzererts in vaste vorm gereduceerd tot ijzer, dus zonder het te smelten. Momenteel wordt de Direct Reduced Iron (DRI) route tot sponsijzer al op grote schaal ingezet in landen als India, Iran en Noord-Australië middels het Midrex-proces. Hierbij wordt syngas uit kolen of aardgas gebruikt als reductiemiddel. Dit aardgas is veelal bij aardoliewinning vrijkomend ruw aardgas (‘associated gas’) dat anders verbrand (‘geflared’) zou worden.

Met deze technologie is al ruime ervaring opgedaan en een hoog TRL-niveau van 9 bereikt.

Een probleem is dat deze route met 100% groene waterstof geen koolstof in het ijzer oplevert, wat wel wenselijk is bij de productie van staal. Om dit DRI-ijzer op specificaties te krijgen wordt aan het eind van het proces extra aardgas ingezet waarbij roetvorming optreedt. Ook wordt DRI-ijzer wel zonder koolstof verkocht (Patisson & Mirgaux, 2020). Een nieuwe route die wordt ontwikkeld is de directe reductie met 100% groene waterstof:

Figuur 12 - Vergelijking van conventionele route met directe reductie met duurzaam opgewekte waterstof



Bron: HYBRIT Fossil-free Steel, Summary of findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016-2017.

In Zweden werkt Vattenfall met het Hybrit-project aan DRI met 100% groene waterstof (Hybrit, 2018). Ook Tata Steel in IJmuiden denkt op de lange termijn aan deze route (Tata Steel, 2020).

Doordat er geen gebruik meer gemaakt wordt van kolen, maar er waterstof als reductie-middel wordt gebruikt, is er in veel mindere mate sprake van koolstofemissie door een reductie van 90% (Patisson & Mirgaux, 2020). Er is met deze route geen noodzaak meer voor CCS, doordat gebruik gemaakt wordt van een wezenlijk ander proces.

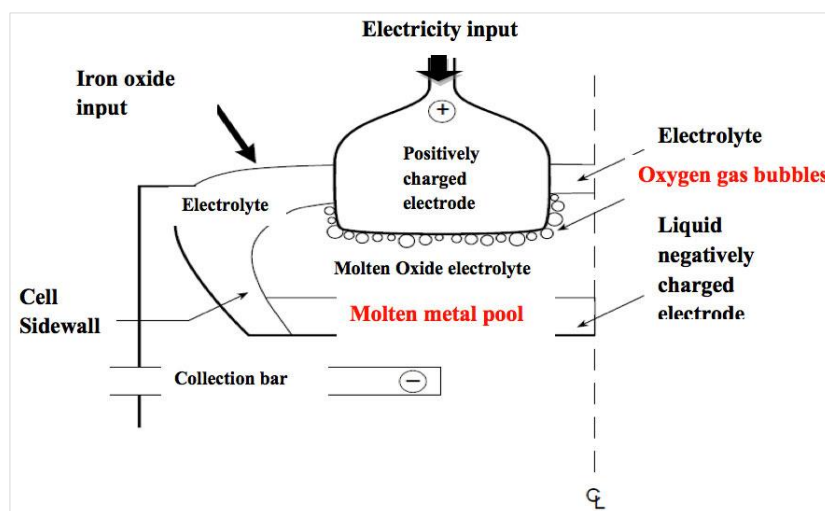
Op zich zijn zowel directe reductie (DRI) als waterelektrolyse-processen die al op grote schaal industriële toepassing hebben. Keerzijde is dat het momenteel erg kostbaar is om duurzame waterstof te maken met elektrolyse uit zon- en windstroom en dat de benodigde grote hoeveelheden hiervoor nog niet leverbaar zijn. Zowel de hoeveelheden groene stroom als de elektrolyse productiecapaciteit kennen nog een beperkt aanbod. Dit kan echter veranderen door de productie van blauwe waterstof, de import van groene waterstof of extra capaciteit voor hernieuwbare opwek te installeren en de bouw van elektrolyzers flink en snel op te schalen.

Het DRI-proces kan in principe (met bijvoorbeeld Midrex-technologie) reeds in 2030 technisch gerealiseerd worden, maar de benodigde groene waterstof vergt een ingroei op de langere termijn. Er zal voor een DRI-plant mogelijk eerst op een kleinere schaal gekozen worden dan vervanging van het huidige Tata IJmuiden. De benodigde forse investeringen die dit vergt, tezamen met de onzekerheid van de CO₂-, H₂- en staalprijzen in de toekomst, maken implementatie onder de huidige omstandigheden onzeker. Forse prikkels zijn nodig om dergelijke zware investeringen voor een DRI-ijzerplant plus bijbehorende gigawatts groene stroomcapaciteit en waterstofelektrolyzers in Nederland te laten plaatsvinden.

A.1.5 Alternatief elektrowinning ijzer

Analoog aan de productie van aluminium met elektrolyse is ijzer ook te produceren via elektrolyse. Groot voordeel is dat dit direct aansluit op de verduurzamingsroute elektrificatie van de industrie met gebruikmaking van duurzame stroom.

Figuur 13 - Schematisch overzicht van het elektrowinningproces



Bron: downtoearth.org

Net als bij de directe reductie middels waterstof is dit een volledig gedecarboniseerde vorm van ijzerproductie, mits de gebruikte stroom dat ook is. Er zal in principe een significante reductie van de CO₂-uitstoot bereikt kunnen worden.

Het gaat om een nieuw proces met een relatief lage graad van ontwikkeling. ArcelorMittal is bezig met de ontwikkeling van de technologie in het Siderwind-project¹². Momenteel is het TRL 5 en er wordt een pilot voorbereid om de technologie naar TRL 6 te brengen. Wellicht kan bij de ontwikkeling gebruik gemaakt worden van de ruime ervaring met de elektrolyse van aluminium en kunnen de reactoren daarvan afgeleid worden.

Een ander probleem zijn de kosten van de benodigde zeer grote hoeveelheden duurzame elektriciteit, die momenteel nog niet beschikbaar zijn. Wel ligt integratie met grote toekomstige windparken voor de hand, als daar op termijn grote overschotten zouden kunnen ontstaan. Dan moet er wel worden geconcentreerd met andere mogelijke afnemers en toepassingen van de elektriciteit.

A.1.6 Alternatief gebruik biocokes

De reductie van ijzer door middel van cokes is een belangrijke CO₂-bron in het huidige productieproces van ijzer. Deze emissies kunnen gereduceerd worden als biocokes gebruikt worden in plaats van petroleumcokes. Het productieproces blijft verder intact.

Er zijn twee routes voor de productie van biocokes uit biomassa. Een eerste optie is het verhitten van houtige biomassa tot 500-700°C in een zuurstofloze omgeving. De biomassa breekt dan af tot gasen, teren en biocokes. Daarnaast kan biomassa behandeld worden in water onder verhoogde druk (10-20 bar) en temperatuur (170-300°C). De biomassa wordt dan ingekoold. Hierbij worden water en daarin oplosbare organische stoffen afgescheiden.

De productie van biocokes is een volwassen technologie en biocokes worden onder meer in Brazilië en Australië gebruikt voor de productie van ijzer (CE Delft, 2012). De kosten van biocokes liggen hoger dan voor de fossiele variant. Daardoor is dit economisch onrendabel zonder financiële steun of prijsprikkels vanuit de overheid (CE Delft, 2020a).

Biocokes worden geproduceerd uit biomassa, daardoor leidt dit alternatief tot emissie-reductie. De CO₂-emissies gedurende de hele productieketen liggen ongeveer vier keer zo laag als de CO₂-emissies van petroleumcokes (CE Delft, 2012). De voorwaarde is wel dat duurzame biomassa gebruikt wordt.

Zoals ook in het vorige hoofdstuk is aangegeven wordt het gebruik van biomassa in de industrie gelimiteerd door de beschikbaarheid van duurzame biomassa. Er is niet voldoende biomassa voor alle mogelijke toepassingen, er moet dus een afweging gemaakt worden of de vervanging van steenkool in de staalindustrie een beter gebruik is van de beschikbare biomassa dan andere toepassingen.

¹² <https://www.siderwin-spire.eu/>

A.1.7 Alternatief circulaire economie

De productie van ijzer is zeer energie-intensief. Niet alleen door de hoge temperaturen, maar ook doordat voor de reductie van ijzerionen in erts veel energie nodig is.

Erts bevat veel meer ijzeroxide dan schroot en heeft dus veel meer energie uit kolen nodig. Daarom is een zo groot mogelijk aandeel van recycling via schroot in een vlamboogoven (electric arc furnace - EAF) energetisch gezien voordelig. Dit sluit ook goed aan bij elektrificatie van de industrie.

Over 2018/2019 verwerkte Tata Steel in IJmuiden een bescheiden 7,8% extern schroot op basis van de totale productie (bron: [Duurzaamheidsrapport FY18/19](#)). Op de langere termijn is het de bedoeling dat dit richting 100% moet, wat dan veel energie en daarmee CO₂-uitstoot bespaart. Hierbij spelen twee factoren:

1. Terugdringen van het gebruik van ijzer en staal door redesign van de producten van afnemers en vervanging van ijzer en staal door andere materialen.
2. Nog verder sluiten van de keten en schroot lokaal verwerken, waardoor steeds minder productie van primair ijzer nodig is in Nederland.

A.2 Cement

A.2.1 Introductie huidige proces

Het productieproces van cement bestaat grofweg uit drie stappen. In de eerste stap worden de grondstoffen gewonnen, gemalen en samengevoegd tot een mengsel. Vervolgens wordt klinker geproduceerd van dit mengsel door middel van verhitting. Tot slot wordt hieruit cement geproduceerd in de cementmolen.

Cement wordt gemaakt van kalksteen. Dit materiaal wordt gewonnen in kalksteengroeves. In Nederland zijn nog enkele kalksteengroeves open, in Limburg en Winterswijk. Na de winning wordt de kalksteen gemalen, gezeefd en gedroogd. Vervolgens worden de andere grondstoffen die nodig zijn voor cementproductie toegevoegd zoals zand, klei en verschillende metaaloxides. Deze grondstoffen worden in de juiste verhoudingen gemengd en het mengsel wordt vervolgens fijngemalen.

Voordat het fijngemalen mengsel de oven ingaat wordt het eerst voorverwarmd. Vervolgens gaat het mengsel de cementoven in en wordt het verwarmd tot circa 1.400 °C, waarbij de calciumcarbonaat uit het kalksteenmengsel omgezet wordt in kalk¹³. Bij deze reactie wordt CO₂ geproduceerd als bijproduct. De kalk reageert vervolgens met de overige grondstoffen in het mengsel tot klinker. De klinker wordt gekoeld en opgeslagen.

Nadat de klinker afgekoeld is wordt het naar de cementmolen gebracht. Hier worden nog extra hulpstoffen toegevoegd, zoals gips en extra kalksteen. Dit mengsel wordt vermalen tot cement in de cementmolen.

¹³ CaCO_3 (calciumcarbonaat) + warmte $\rightarrow$ CaO (kalk) + CO_2 .

A.2.2 Mogelijkheden voor CCS

Bij het productieproces van cement zijn er twee bronnen van CO₂-emissies, namelijk emissies gerelateerd aan verwarming en directe procesemissies. De directe procesemissies zijn 60% van het totaal (SINTEF, 2018). Ten tweede worden energiedragers verbrand om de hoge temperatuur van de kalk en cementoven te bereiken. Hiervoor wordt meestal aardgas gebruikt, wat ook tot CO₂-uitstoot leidt. Dat betekent dat er - ook wanneer de gehele energievoorziening hernieuwbaar zou zijn - nog steeds CO₂ vrij zou komen bij cement-productie.

Bij beide bronnen van CO₂ kan CCS toegepast worden. De CO₂-stroom die vrijkomt bij de thermische behandeling van calciumcarbonaat heeft een concentratie van 20-30%, hiervoor is CCS een interessante optie. De CO₂-stroom die vrijkomt bij de verbranding van energiedragers is een stuk lager, namelijk 10-15%. Voor deze stroom is CCS momenteel geen optie.

Er zijn verschillende (Europese) projecten waarin CO₂-afvangtechnieken bij cementklinkercentrales wordt onderzocht (Cembureau, 2017), waaronder twee Horizon 2020-projecten: CEMCAP en LEILAC. Binnen en buiten deze projecten worden verschillende CO₂-afvangtechnieken voor cementklinkercentrales onderzocht en getest. Ook de cementindustrie ziet CO₂-afvang als een belangrijke techniek om klimaatdoelstellingen te halen.

In het CEMCAP-project zijn verschillende CO₂-afvangtechnieken met elkaar vergeleken op technische, milieukundige en kostenaspecten (Voldsund, et al., 2019), (Gardarsdottir, et al., 2019). Deze technieken zijn het *chilled ammonia*-proces, *membrane-assisted CO₂ liquefaction*-proces, *calcium looping* (zowel *tail-end* als geïntegreerd) en *oxyfuel combustion*. Deze laatste en het geïntegreerde *calcium looping*-proces zijn geen post-combustion-technieken, de rest wel. De oxyfuel combustion-techniek is volgens de Horizon 2020-studie CEMCAP het meest kosteneffectief is (Gardarsdottir, et al., 2019). Daarnaast is de vermeden hoeveelheid CO₂-eq. met die techniek relatief hoog (Voldsund, et al., 2019). Een belangrijke kanttekening die bij deze techniek moet worden gemaakt is dat deze meer aanpassing van de cementklinkercentrale vraagt dan bijvoorbeeld post-combustion-afvang.

Het toepassen van CO₂-afvang bij cementklinkerproductie is in principe mogelijk bij iedere cementklinkerproducent. Er verandert verder niets aan de cementklinker zelf, waardoor ook het gebruik van de cementklinker voor al het cement waarin nu portlandcementklinker gebruikt wordt van toepassing is.

Het TRL van CO₂-afvang bij cementklinkerproductie schatten we in op 6 op basis van (CEMCAP, 2020). De kosten voor CCS bij cementproductie liggen tussen de 42 euro (bij oxyfuel combustion CCS) en 84 euro per vermeden ton CO₂. De kosten liggen het laagst bij oxyfuel combustion en het hoogst bij membrane-assisted CO₂ liquefaction-proces (Gardarsdottir, et al., 2019). Grootschalige inzet van CCS concurreert ook hier met de toepassing van alternatieven wat een lock-in-situatie zou opleveren indien deze cement goedkoper blijft dan de alternatieven.

A.2.3 Alternatief bindmiddel

Zoals eerder besproken zijn de directe procesemissies verantwoordelijk voor 60% van het totaal. Deze emissies zijn inherent aan het huidige productieproces voor klinkers en kunnen daarom bij het huidige productieproces en materiaal niet voorkomen worden. Er zijn echter wel alternatieve materialen met een lagere CO₂-voetafdruk die gebruikt kunnen worden als alternatief voor de conventionele cementsoorten.

De eigenschappen van de alternatieve bindmiddelen moeten vergelijkbaar zijn met de eigenschappen van de cementsoorten die op dit moment gebruikt worden. Met name de sterkte van de alternatieve bindmiddelen is belangrijk. Dit geldt voornamelijk als het gebruikt wordt voor constructief beton. Voor niet-constructief beton hoeft het materiaal minder sterk te zijn. Drie veelbelovende alternatieve materialen worden besproken, namelijk CSA-beliët, Solidia en geopolymeren.

CSA-beliët is een alternatieve klinker die Portlandcementklinker in Portlandcement kan vervangen. CSA-beliëtcement heeft ongeveer dezelfde eigenschappen als Portlandcement, maar leidt tot lagere CO₂-emissies omdat de klinkers onder lagere temperatuur worden geproduceerd en makkelijker te malen zijn. Daarnaast wordt er ook minder calcium-carbonaat gedecarboneerd tijdens de productie van de klinker. CSA-beliët is ter vervanging van hoogovencement echter niet interessant, aangezien de klimaatimpact van CSA-beliët hoogstwaarschijnlijk hoger is dan van hoogovencement. CSA-beliët heeft TRL 9 voor niet-constructief beton en TRL 7 voor constructief beton. Op de lange termijn is er geen reden om aan te nemen dat CSA-beliët duurder is conventioneel cement, aangezien grotendeels dezelfde grondstoffen gebruikt worden. Daarom liggen de additionele kosten per vermeden ton CO₂ op 0 euro (CE Delft, 2016b).

Solidiacement is een alternatieve binder die conventioneel cement in beton kan vervangen. Het kan worden geproduceerd in dezelfde fabrieken als waar Portlandcement wordt geproduceerd, hoewel het proces wel licht moet worden aangepast. Solidia wordt geproduceerd op basis van dezelfde ingrediënten als Portlandcement, alleen heeft het een andere uithardingsreactie waarbij CO₂ wordt vastgelegd. Het reductiepotentieel van Solidia is hoog. Het kan alleen toegepast worden bij niet-constructief beton en heeft een TRL van 9. De kosten van Solidiacement liggen lager dan de kosten van Portlandcement. Dit betekent dat kosten uitgespaard kunnen worden als er overgestapt wordt naar Solidiacement. De kosten vermeden ton CO₂ liggen tussen de -86 en -100 euro (CE Delft, 2016b). Solidiacement zal naar verwachting echter tegen marktprijs aangeboden worden, ook al liggen de productie-kosten lager.

Geopolymeren omvatten een brede groep alternatieve bindmiddelen van anorganische *alkalisch-activeerbare materialen* (ACCMs). Geopolymeren bestaan in de basis uit een reactieve precursor en een alkalische activator, die samen reageren tot een cementachtig product dat cement in beton kan vervangen. Geopolymeren hebben een hoog CO₂-reductie-potentieel en is toepasbaar voor zowel niet-constructief beton (TRL 9) als constructief beton (TRL 7). De additionele kosten voor het gebruik van geopolymeren liggen rond de 49 euro per vermeden ton CO₂ (CE Delft, 2016b) wat hun toepassing op middellange termijn aannemelijk maakt.

A.2.4 Alternatief CCU/mineralisatie

In plaats van het opslaan van de afgevangen CO₂-emissies, kunnen deze ook gebruikt worden voor de productie van nieuwe materialen die als alternatief gebruikt kunnen worden voor nieuw beton. Op deze wijze wordt de CO₂ permanent opgeslagen in deze minerale componenten en wordt de CO₂-voetafdruk van deze bouwmaterialen verkleind. Er zijn verschillende bouwmaterialen die geproduceerd kunnen worden met afgevangen CO₂. De meest reële opties worden behandeld, namelijk productie van Carbstone en Mineraal CO₂.

Carbstone is een betonsoort met een alternatief bindmiddel. Het beton wordt geproduceerd op basis van LD-slakken (een bijproduct uit de staalindustrie), die reageren met CO₂. De CO₂ wordt hierbij opgenomen en daarmee in het materiaal opgeslagen. De Carbstonetechnologie wordt al in de praktijk toegepast en heeft een TRL van 9. Carbstone variant Carbinox wordt

met CO₂ ingezet voor [Orbix](#)-stenen en betonnen vormdelen als vloertegels, dakbedekkings-tegels, klinkers, bouwblokken en briketten voor de staal industrie. De pilot van Orbix wordt gebruikt om eerste batches te produceren dus de TRL bedraagt daar een 6-7.

Carbstone is nog niet bewezen sterk genoeg om gebruikt te worden als constructief beton, wat te maken kan hebben met de lange termijn van certificering. Voor Nederland schommelt de totale cementconsumptie rond 5 Mt per jaar, waarvan 55-60% al hoogovencement is met slak als vulmateriaal (bron: [Betonhuis](#)), maar de bron vermeldt geen opgave van het aandeel cement voor niet-constructief beton.

Op basis van de huidige informatie is er geen reden om aan te nemen dat Carbstone duurder is dan het huidige cement. De reductiekosten zijn daarom 0 euro per vermeden ton CO₂. Hier is de limitatie de hoeveelheid aan beschikbare slakken.

Mineraal CO₂ is een materiaal dat kan worden gebruikt als vervanging voor cement in beton. Het TRL-niveau van Mineraal CO₂ ligt op TRL 4/5 (Delta Concrete Consult, 2020). Het gebruik van mineraal CO₂ is een relatief duurdere maatregel, aangezien de kosten tussen de 86 en 152 euro per vermeden ton CO₂ liggen.

A.2.5 Alternatief circulaire economie

Hergebruik en recycling van cement zorgen ervoor dat de vraag naar primair cement afneemt. Wanneer betonobjecten worden gesloopt, wordt het beton momenteel vaak in de vorm van betongranulaat als vulmiddel hergebruikt. Het is ook mogelijk om de materiaalfracties (zand, grind en cement) uit beton terug te winnen met behulp van nieuwe breektechnologie of extra breekstappen. Door het teruggewonnen cement in te zetten in nieuw beton wordt bespaard op primair cementgebruik - een materiaalbesparing waar ook een CO₂-reductie behaald wordt.

Een eerste mogelijkheid is het terugwinnen van cementsteen uit betonresten door middel van mechanische recycling en het toepassen hiervan in nieuw beton. Er lopen momenteel verschillende onderzoeken naar het toepassen van het teruggewonnen cement. Dit kan op verschillende manieren: als grondstof voor cement(vervangers) of als reactieve vulstof. Het gebruik van teruggewonnen cement als reactieve vulstof heeft TRL 8 voor niet-constructief beton en TRL 7 voor constructief beton. Het toepassen van teruggewonnen cement als vervanger van primair cement is minder ver ontwikkeld.

De reductiekosten van mechanische recycling worden bepaald door de meerkosten die gemaakt worden vergeleken met reguliere sloopactiviteiten om het gerecycled cementsteen/cementsteenrijke fractie te verkrijgen. De kosten per vermeden ton CO₂ liggen tussen de 0 en 2 euro (CE Delft, 2016b).

Een tweede mogelijkheid is een combinatie van mechanisch en thermisch terugwinnen uit betonresten en toepassen in nieuw beton van cement. Deze techniek wordt ontwikkeld door GBN in combinatie met de TU Delft (eerder ook wel C2CA genoemd). Hierbij worden de verschillende fracties eerst mechanisch van elkaar gescheiden, waarna de cementfractie thermisch wordt gereactiveerd. Het TRL van deze innovatie is ongeveer TRL 6 voor niet-constructief beton en TRL 4 voor constructief beton. De reductiekosten worden bepaald door de mate waarin het teruggewonnen cementsteen cementklinker vervangt en de kostenreductie die daardoor optreedt. Aangezien de kosten van het recyclingproces lager liggen dan voor de productie van nieuw cement wordt geld bespaard als mechanische en thermische terugwinning wordt toegepast. De kosten per vermeden ton CO₂ liggen tussen de

-260 en -130 euro (CE Delft, 2016b). Gerecycled cement zal naar verwachting echter tegen marktprijs aangeboden worden, ook al liggen de productiekosten lager.

Het hergebruik en de terugwinning van de materialen uit betonobjecten aan het eind van de levensduur kan verbeterd worden door middel van bepaalde ontwerpprincipes, zoals demontabel bouwen. Demontabel bouwen vergt innovatie op twee vlakken: de manier van slopen en de manier van ontwerpen en bouwen met elementen uit bestaande gebouwen zijn anders dan in de huidige situatie. De kosten liggen relatief hoog, tussen de 40-82 euro per vermeden ton CO₂ voor hoogbouw en tussen de 137-206 euro voor laagbouw.

A.2.6 Alternatief duurzame biomassa

Cement wordt gebruikt voor de bouw, bijvoorbeeld voor de productie van beton. Een alternatief voor verduurzaming is het gebruik van alternatieve materialen waarbij geen cement nodig is, zoals hout. Houtbouw heeft een hoog CO₂-reductiepotentieel. Hout kan echter niet bij alle toepassingen gebruikt worden waarvoor nu beton gebruikt wordt, aangezien het andere eigenschappen heeft. Bij constructies die zwaar belast worden is hout vaak niet mogelijk. Constructies met een combinatie van hout en beton zijn ook een mogelijkheid.

De beschikbaarheid van duurzame biomassa is een beperkende factor voor het grootschalige gebruik van hout in de bouw. Het gebruik van biomassa als materiaal wordt in het algemeen gezien als een hoogwaardige toepassing, aangezien het in zijn huidige vorm en voor lange tijd gebruikt wordt en het tot aanzienlijke CO₂-reductie kan leiden.

A.2.7 Alternatieven warmtebron

De focus van dit hoofdstuk ligt op opties voor het verminderen van de directe proces-emissies van cementproductie, aangezien CCS voor deze emissies een realistische optie is. Een aanzienlijk deel van de CO₂-emissies van cementproductie, ongeveer 40%, wordt echter veroorzaakt door de verwarming van de oven. Voor deze emissies is CCS op dit moment geen reële optie, daarom wordt dit niet uitvoerig behandeld. Maar de verduurzamingsopties hiervoor worden hieronder wel kort benoemd.

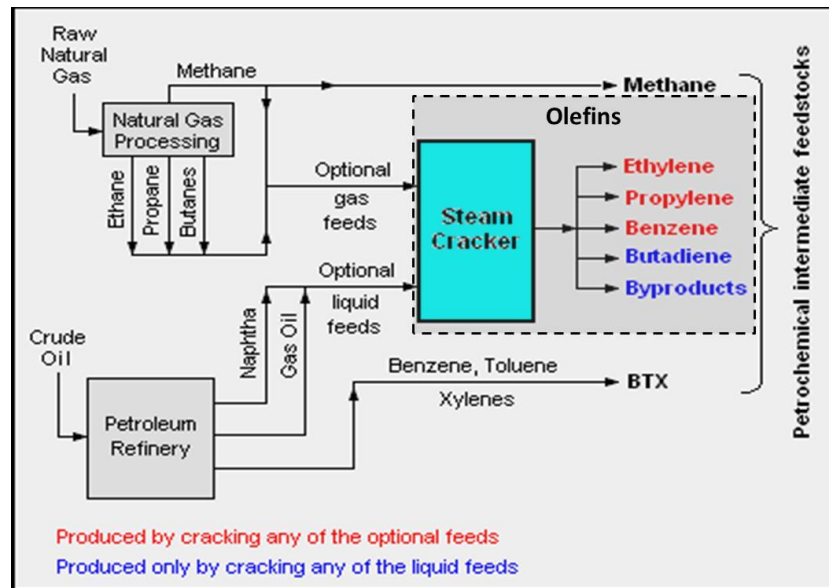
Voor de productie van klinkers moet de temperatuur van de cementoven verhoogd worden tot ongeveer 1.400°C. Deze hoge temperaturen zijn lastig te bereiken met elektrische alternatieven, zoals warmtepompen, die alleen mogelijk een rol zullen kunnen spelen bij voorverwarming. Elektrische hittedraadverwarming zal in Nederland te kostbaar blijven. Daarom liggen alternatieve brandstoffen het meest voor de hand. Een eerste optie hiervoor is het gebruik van groengas (opgewaardeerd biogas) in plaats van fossiel aardgas. Aangezien groengas chemisch identiek is aan fossiel aardgas is dit makkelijk te vervangen in het proces. De kosten en de beschikbaarheid van groengas zijn echter een barrière. Een alternatieve duurzame brandstof voor de verwarming van de cementoven is groene waterstof. Bij groene waterstof zijn de kosten en beschikbaarheid momenteel echter ook nog een barrière.

A.3 Chemie

A.3.1 Huidige proces intermediates

Ook dit is weer een diverse categorie. Een belangrijke klasse vormt de synthese van de basis chemicaliën ethyleen en propyleen, meestal uit nafta door middel van een naftakraker, zie Figuur 14:

Figuur 14 - Productie routes van ethyleen en propyleen uit onder andere nafta



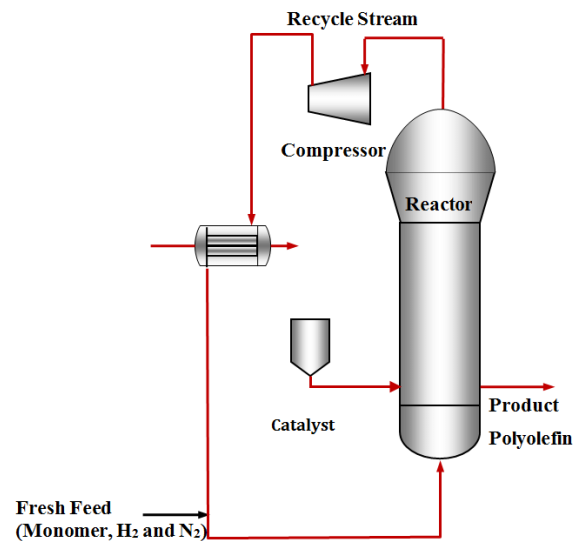
Bron: <https://2b1stconsulting.com/olefins/>

Deze routes leveren onder andere de belangrijkste grondstoffen op voor productie van de belangrijkste categorie kunststoffen polyethyleen (PE, LDPE, HDPE enz.) en polypropyleen (PP).

A.3.2 Huidige proces kunststoffen

Nafta en aardgas vormen meestal de grondstof voor vele kunststoffen. Zie Figuur 15 voor een schema van de productie van PE en PP polyolefinen:

Figuur 15 - PE/PP polyolefineproductie



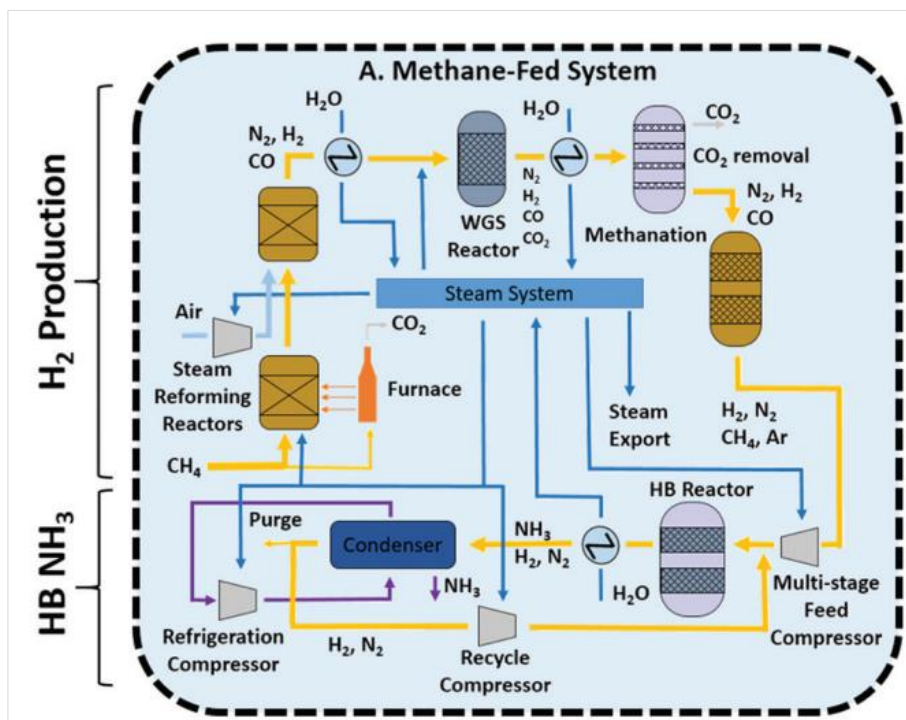
Bron: https://www.researchgate.net/figure/A-process-flow-diagram-representing-the-polymerization-process-of-olefin-in-a-gas-phase_fig10_315668254

Het aardoliegebruik voor de productie van kunststoffen is hoog, typisch 3 ton per ton polyolefine.

A.3.3 Huidige proces kunstmest

Kunstmest heeft als basis ammoniak. Dit wordt momenteel geproduceerd uit stikstof gewonnen uit de lucht via diepkoeling en destillatie (ASU), en waterstof gemaakt uit aardgas (SMR). Dit proces is geschetst in Figuur 16.

Figuur 16 - Conventionele ammoniakproductie op basis van aardgas



Bron: [Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape](#).

A.3.4 Mogelijkheden voor CCS

In de chemie zijn er op meerdere locaties CO₂ af te vangen. In principe is dit bij de volgende situaties in de processen het geval:

1. Stoomproductie uit aardgas voor procesverwarming. Het gaat hier om rookgas van aardgasbranders. Door de relatief lage concentratie aan CO₂ is dit kostbaar want minder efficiënt.
2. Elektriciteitsopwekking met aardgas-wkk. Ook hier vormt de lage concentratie CO₂ van aardgasgestookte wkk een hoge drempel.
3. Ondervuring in procesfornuizen. Dit is ook minder aantrekkelijk bij inzet van aardgas.
4. Waterstofproductie via SMR of ATR ('Blauwe waterstof'). Aansluiting van CCS op dit proces is efficiënt door de hogere concentraties CO₂, bij ATR is CO₂ geconcentreerd.
5. Bij de chemische reactie als product. Bijvoorbeeld bij de productie van ethanol komt geconcentreerd CO₂ vrij. Of bij inzet van carbonaten en neutralisatie van proces-/reststromen met kalkmelk.

De investeringen in CCS onder 4) leveren mogelijk een 'lock-in' op, wanneer groene elektrolyse waterstof voldoende beschikbaar komt. Het is de verwachting dat groene waterstof tussen 2030 en 2050 concurrerend wordt met blauwe waterstof (CE Delft, 2020b).

A.3.5 Alternatief elektrificatie

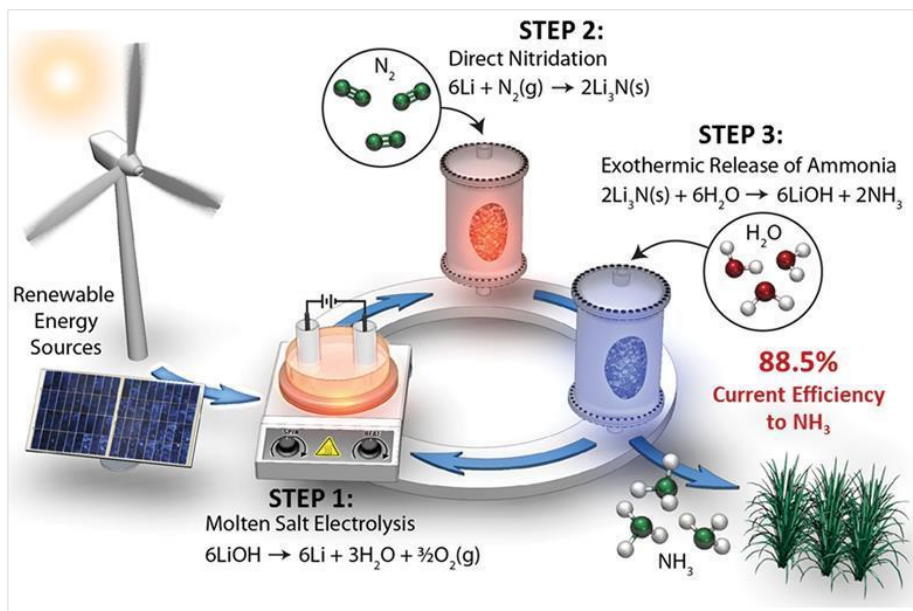
Voor verwarming bij lagere temperaturen tot circa 500°C is elektrificatie een qua kosten haalbaar alternatief, waarbij warmte wordt geproduceerd met behulp van hittedraadverwarming. Dit kan al dan niet in hybride vorm worden toegepast (in combinatie met conventionele branders op aardgas), en met lage- en hogetemperatuurwarmtepompen. Dan kan flexibel worden omgeschakeld naar elektrificatie zodra de stroomprijs voldoende laag is. Hogetemperatuurwarmtepompen betreffen nu veelal stoomrecompressie, dat in staat is om stoom efficiënt op te waarden van lagedrukstoom naar middendrukstoom of van middendrukstoom naar hogedrukstoom (Mechanical Vapour Recompression of MVR). Zie voorbeeld van een [leverancier](#).

Deze optie wordt in basislastbedrijf toegepast bij onder meer brouwerijen, chemische bedrijven en indampers in bijvoorbeeld zoutindustrie, suikerindustrie, papier/pulpindustrie en zuivelindustrie. Inzet van deze techniek voorkomt dat grote hoeveelheden energie in niet meer toepasbare (te lage druk) stoom verloren gaat, zodat inzet bij een hoger stoomdrukkniveau weer wel mogelijk wordt. Er kunnen zo nodig meerdere mechanische stoomcompressoren in serie worden geplaatst om de gewenste stoomkwaliteit te bereiken.

Analoog als bij de warmtepomp is er sprake van een verhouding van geproduceerde thermische energie gedeeld door de aangevoerde energie voor de compressor in de vorm van de prestatiecoëfficiënt (COP). Typische COP waarden voor MVR zijn van minimaal 3,5 tot meer dan 10. Dit behaalt daarmee een significante energiebesparing met dito emissiereductie.

Voor de ammoniaksynthese (in de kunstmestindustrie) is er een directe elektrificatieroute beschikbaar, zie Figuur 17.

Figuur 17 - Elektrificatieroute



Bron: [Royal Society of Chemistry](#)

Een recent [artikel](#) van Ammonia Energy Association beschrijft de stand van zaken welke nog in de laboratoriumfase lijkt te zitten (TRL 2-4). De grote katalysator fabrikant Haldor-Topsoe is verder in de ontwikkeling en werkt aan een kleine pilot plant op industrie schaal op basis van SOEC, die in 2025 gerealiseerd moet gaan worden (TRL 5-6) (bron: [Ammonia Industry](#)).

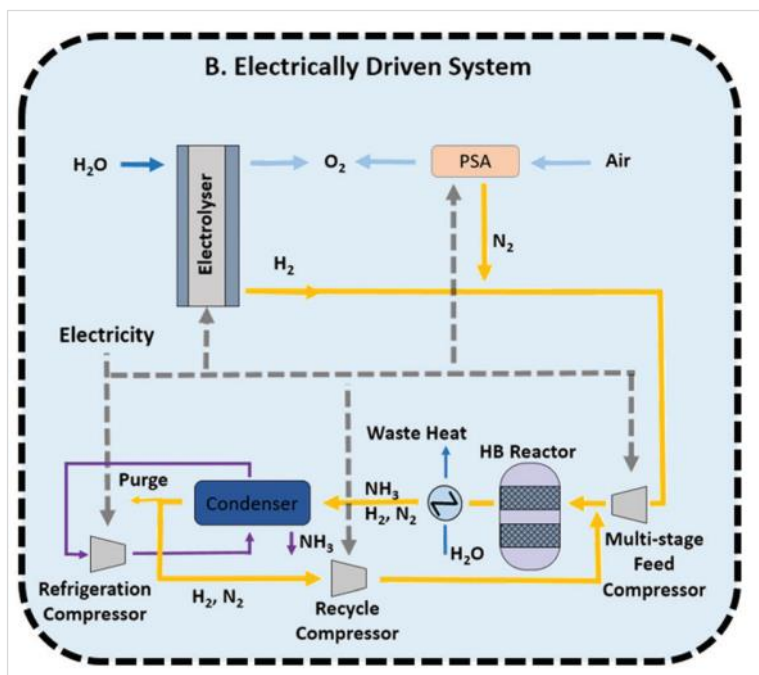
Voordeel is dat dit een directe elektrochemische route is met principieel minder verliezen. Nadeel is de lage graad van ontwikkeling (TRL) en mogelijk dient het rendement nog te worden geoptimaliseerd.

A.3.6 Alternatief groene waterstof

Waterstof wordt gebruikt in verschillende chemische processen, bijvoorbeeld bij de productie van ammoniak (voor kunstmest) en methanol (basisbouwsteen in de chemische industrie). Momenteel wordt hier grijze waterstof voor gebruikt. Bij dit productieproces wordt waterstof geproduceerd met aardgas in een SMR. Zoals eerder besproken kan dit proces verduurzaamd worden door middel van CCS (blauwe productieroute), maar een alternatief is waterstof produceren via een van de groene routes, uit duurzaam geproduceerde elektriciteit.

Naast verduurzaming van het huidige waterstofgebruik in de chemie kan groene waterstof ook gebruikt worden voor verduurzaming van processen die momenteel gebruik maken van aardgas als grondstof, bijvoorbeeld voor de ammoniaksynthese voor kunstmest, zie Figuur 18.

Figuur 18 - Alternatieve ammoniakproductie op basis van duurzame stroom



Bron: [Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape](#).

Veel chemische producten bevatten koolstof en kunnen dus niet gemaakt worden uit waterstof alleen. De fossiele koolstof in deze producten moet vervangen gaan worden door koolstof van een duurzame bron (duurzame biomassa, circulaire koolstof, afgevangen biogene koolstof). Deze vormen van koolstof vereisen toevoeging van waterstof om tot een koolwaterstofproduct te komen, bijvoorbeeld methanolsynthese uit afgevangen CO₂ uit de productie van groengas en groene waterstof.

Ook voor de productie van hogetemperatuurproceswarmte kan waterstof ingezet worden, daar waar warmteproductie door elektrificatie niet rendabel mogelijk is. Hogere temperaturen boven circa 500°C zijn zonder koolstofemissies te bereiken door het verstoken van waterstof of bij omzetting van waterstof in gesmolten carbonaat (MCFC) of vaste oxide (SOFC) brandstofcellen.

De productie van groene waterstof door middel van elektrolyse (alkaline of PEM) is op commerciële schaal toepasbaar (TRL 8-9). De grootste elektrolyzers die nu op de markt zijn, zijn echter pas ordegrrootte enkele MW. Voor grootschalige toepassing van groene waterstof in de chemie is opschaling richting GW-schaal noodzakelijk. Daarnaast is er voor inzet in Nederland momenteel nog onvoldoende hernieuwbare elektriciteitsproductie voor grootschalige productie van groene waterstof. De productie van groene waterstof draagt alleen bij aan verduurzaming als hiervoor overschotten van hernieuwbare elektriciteit gebruikt worden. Als dit niet het geval is moeten gascentrales bijgeschakeld worden om aan de additionele elektriciteitsvraag van elektrolyzers te voldoen, wat leidt tot meer CO₂-uitstoot. Momenteel zijn er nog geen overschotten van hernieuwbare elektriciteit, dit zal pas richting 2030 het geval zijn.

De productiekosten van groene waterstof liggen een stuk hoger dan bij de blauwe variant met CCS. Momenteel liggen de productiekosten van groene waterstof tussen de 3,5-4,5 euro per kg tegenover 1,5-2 euro per kg voor blauwe waterstof. Het is de verwachting dat groene waterstof tussen 2030 en 2050 concurrerend wordt met blauwe waterstof (CE Delft, 2020b).

De schaal en kosten van groene waterstof staat een snelle invoering in de weg. Pas wanneer er grote overschotten aan groene stroom ontstaan zal deze mogelijkheid een redelijke meerprijs (onrendabele top) gaan krijgen. Dit zal niet voor 2030 het geval zijn. Een pilot op bescheiden MW schaal zou wel een demonstratiemogelijkheid kunnen bieden.

A.3.7 Alternatief duurzame biomassa

Diverse typen biomassa kunnen gebruikt worden ter vervanging van fossiele brandstoffen én als grondstof voor chemische stoffen en producten. Met name in de chemische basisproductenindustrie is de potentie voor decarbonisatie door het gebruik van biomassa groot, aangezien daar veel fossiele brandstoffen als grondstof gebruikt worden.

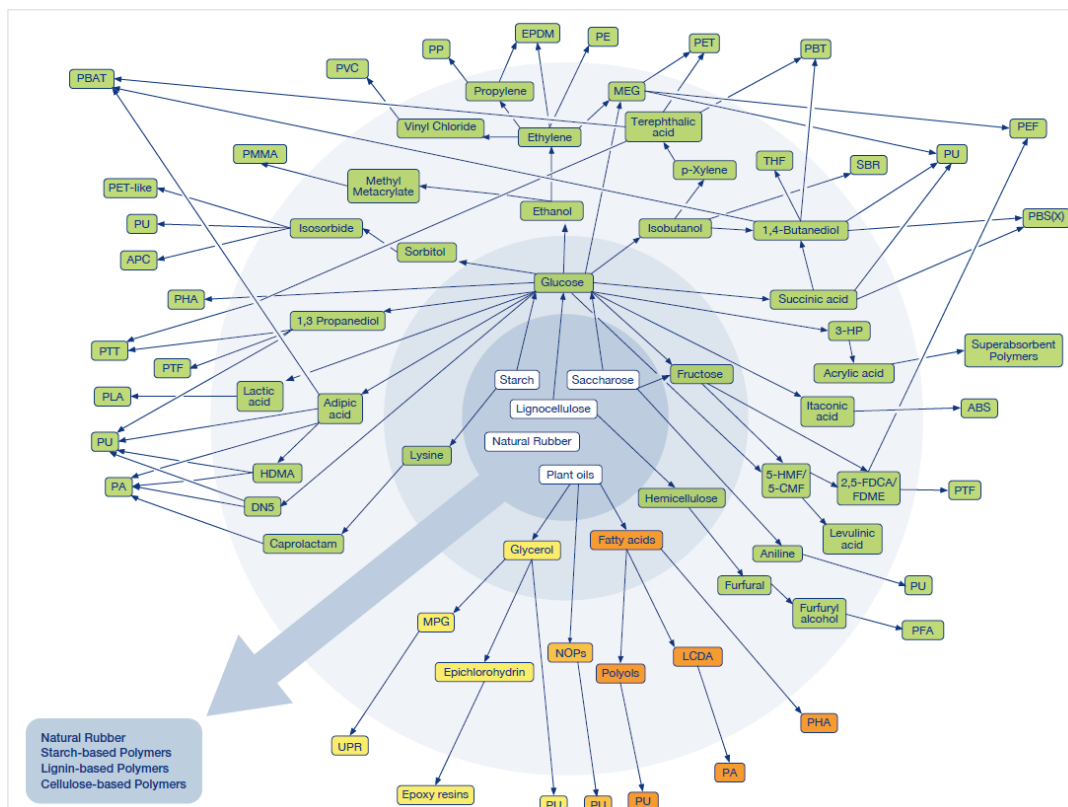
Als fossiele brandstoffen vervangen worden door biomassa vindt CO₂-emissiereductie plaats doordat fossiele eindelevensduuremissies worden vervangen door biogene, kortcyclische eindelevensduuremissies. Er moet per route worden gekeken of over de gehele levenscyclus ook daadwerkelijk emissiereductie behaald wordt: als het energiegebruik voor de productie van chemicaliën of producten veel hoger is dan dat van de productieroute van de referentie, kan het voordeel van einde levensduur teniet worden gedaan. Biobased is dus niet per definitie beter.

De huidige fossiele productieroutes van chemische bouwstenen kunnen vervangen worden door biomassaroutes, bijvoorbeeld productie van bio-ethyleen in plaats van fossiel ethyleen. Dit worden drop-in biochemicalïen genoemd: ze kunnen in huidige productieprocessen 1-op-1 fossiele producten vervangen. Er zijn vaak meerdere biomassaroutes mogelijk. Het eindproduct is in deze gevallen chemisch identiek aan de fossiele variant.

Daarnaast kunnen nieuwe biochemicalïen geproduceerd worden. Dit zijn biobased chemische stoffen die niet via een petrochemische route gemaakt worden, maar die gebruikt worden als grondstof voor producten met gelijkwaardige eigenschappen als een fossiele evenknie en deze kunnen vervangen. Een voorbeeld hiervan is melkzuur, dat wordt gebruikt om het polymeer polymelkzuur (PLA, van *polylactic acid*) te maken. Dit kan gebruikt worden als verpakkingsmateriaal in plaats van polyethyleen, maar heeft dus een andere chemische structuur. Nieuwe ('specifieke') biochemische processen en producten zijn vaak gericht op het behoud van de atomen en chemische structuren (functionele groepen) die in biomassa aanwezig zijn. Hierdoor is het in principe mogelijk om een groter deel van biomassa om te zetten tot eindproducten, waarmee minder chemische stappen en vaak ook minder energie nodig zijn in het productieproces.

Er is een enorme verscheidenheid aan mogelijke routes waarmee verschillende soorten biomassa omgezet kunnen worden tot verschillende biopolymeren (nova-Institut, 2019). Een deel van deze routes is weergegeven in Figuur 19. Deze figuur geeft niet alle mogelijkheden weer en dient ter illustratie; er zijn nog meer routes mogelijk. Dit geeft de complexiteit en veelheid aan mogelijkheden op het gebied van biochemie goed weer.

Figuur 19 - Overzicht van routes van biomassa naar biochemicalïen en biopolymeren die momenteel wereldwijd worden geproduceerd of onderzocht



Bron: (nova-Institut, 2019).

Er zijn veel biochemicalïen en -polymeren die veelbelovend zijn, maar deze productieroutes hebben vaak nog een lage TRL (4-6) en worden nog niet op grote schaal geproduceerd en toegepast in eindproducten. Daarnaast zijn biochemicalïen vaak duurder dan de fossiele tegenhanger.

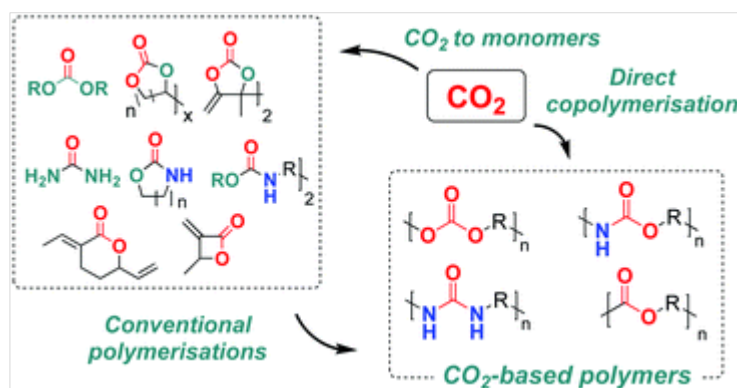
Een extra belemmering voor een overstap naar biochemicalïen is dat er niet zomaar één fossiel ingrediënt vervangen kan worden door een vergelijkbaar biobased ingrediënt. Vaak moet de hele formule veranderd worden als er overgestapt wordt op biomassa als grondstof. Dit is uiteraard geen probleem als alleen de productieroute vervangen wordt voor een biobased route en het eindproduct chemisch identiek is.

De beschikbaarheid van duurzame biomassa is een beperkende factor voor het gebruik van biomassa in de chemie. Het gebruik van biomassa in de chemie kan tot aanzienlijke CO₂-reductie leiden en er zijn weinig alternatieven voor verduurzaming.

A.3.8 Alternatief CCU

De productie van bepaalde kunststoffen is ook mogelijk op basis van CO₂ als een grondstof, zie Figuur 20.

Figuur 20 - CO₂ als grondstof voor bepaalde kunststoffen



Dit kan of direct uit CO₂ geschieden óf indirect via monomeren zoals polyolen. Deze laatste mogelijkheid heeft al een behoorlijk hoog TRL-niveau van 7-8 gezien de polyurethaan demonstratiefabriek van Covestro net over de grens in Duitsland.

Een nadeel van CCU is dat er nog steeds CO₂-afvang noodzakelijk is, wat vaak één van de duurste onderdelen van de CCUS-keten is. Bij CCU is géén sprake van lock-in met CCS, in tegendeel. Investerings in afvang en distributie van CO₂ kunnen worden (her)gebruikt.

A.3.9 Alternatief procesintensificatie

Deze mogelijkheid vervangt grootschalige reactoren door microreactoren of compacte processen op kleinere schaal met een relatief hoge materiaal- en/of energie-efficiëntie. Voorbeeld is de toepassing van pervaporatie membraansystemen bij de verwijdering van water uit ethanol in de plaats van een grote energie intensieve destillatietoren. Hierbij worden afhankelijk van de toepassing tientallen procenten energieverbruik behaald met dito CO₂-emissiereductiepotentieel.

Een ander voorbeeld is de procesgeïntensifieerde reactor van [Ineratec](#) welke efficiënte toepassing van Fisher-Tropsch-proces voor e-kerosine uit duurzaam verkregen syngas op kleine schaal mogelijk maakt. Hun TRL-niveau schatten wij op 5-6 in.

Het TRL-niveau van procesintensificatie *in het algemeen* ligt tussen 3-8 gezien de hoge mate van diversiteit van de processen.

A.3.10 Alternatief circulaire economie

Hergebruik en recycling van chemicaliën verlagen de vraag naar primaire chemicaliën en dragen op deze manier bij aan decarbonisatie de chemie. Daarnaast wordt het materiaalgebruik verminderd. Het is het plan dat Nederland in de toekomst volledig circulair wordt, maar dit is voorlopig nog niet het geval. De Europese Unie heeft de doelstelling dat in 2030 55% van de plastic verpakkingen gerecycled worden (EC, 2017) .

Bij kunststoffen heeft hergebruik en recycling grote potentie. Niet alleen zorgt het voor reductie van CO₂-emissies, maar het zorgt ook voor vermindering van plastic vervuiling. Productie van hogere kwaliteit plastics is noodzakelijk, aangezien de levensduur dan verlengd wordt en betere recycling mogelijk is. Na de levensduur van de kunststoffen is hergebruik het meest wenselijk, aangezien recycling energie en geld kost. Dit is echter vaak niet mogelijk, waardoor recycling noodzakelijk is.

Kunststoffen kunnen mechanisch gerecycled worden, waarbij de kunststoffen in verschillende fysieke processen verwerkt worden tot een nieuw eindproduct. Hierbij blijven de moleculen intact. Bij mechanische recycling is het eindproduct vaak van mindere kwaliteit dan het oorspronkelijke product. Daarnaast zijn afvalstromen van kunststoffen vaak vervuild, wat mechanische recycling lastiger maakt. De vervuiling van afvalstromen van kunststoffen kan verminderd worden door nieuwe scheidingsmethodes zoals röntgen-detectie, Raman-spectroscopie en laserscheiding.

Het is niet mogelijk om de doelstellingen van plastic recycling te halen met alleen mechanische recycling vanwege de beperkingen. Een alternatief voor mechanische recycling is chemische recycling. Chemische recycling heeft verschillende voordelen ten opzichte van mechanische recycling. Zo is het geschikter om vervuilde kunststofstromen te verwerken en kunnen hoogwaardigere eindproducten gemaakt worden. Bij chemische recycling worden de kunststoffen door middel van chemische reacties afgebroken tot de oorspronkelijke bouwstenen. Met deze bouwstenen kunnen nieuwe kunststoffen gemaakt worden als de plastics worden afgebroken tot een zuivere monomeer stroom, zoals bij solvolyse. Momenteel zijn de meeste chemische recycling routes echter gericht op de productie van vloeibare brandstoffen door middel van pyrolyse, katalytisch kraken of vergassing. De kwaliteit van deze vloeibare brandstoffen kan verbeterd worden door gebruik van waterstof. De toepassing van chemische recycling is momenteel nog beperkt en er zijn nog significante innovaties noodzakelijk voordat toepassing op commerciële schaal mogelijk is. Ioniqa schaaft haar pilot plant voor de chemische recycling van PET momenteel op (TRL 7-8).

Een tweede product van de chemische industrie met een grote CO₂-uitstoot is de kunstmest-industrie. Kunstmest wordt gebruikt in de landbouw. Circulaire landbouw, of kringlooplandbouw, kan de vraag naar kunstmest fors reduceren. Bij kringlooplandbouw worden de ketens zoveel mogelijk gesloten en wordt gebruik gemaakt van restproducten (natuurlijke mest) voor bemesting. Ook kunnen mestraffinagesystemen de kringloop beter sluiten. Hierdoor is geen meer kunstmest nodig. Er zijn koplopers in de agrarische sector die op weg zijn in deze richting, maar de verschillen binnen de sector zijn nog aanzienlijk. Het TRL-niveau ligt momenteel op 6-7 (Natuur & milieu, 2019a).

A.4 Raffinage

A.4.1 Huidige procesvoering raffinage

In de petrochemie bestaan zeer diverse typen raffinaderijen. Dit hangt samen met de inzet van de door oliemaatschappijen zelf ontwikkelde en toegepaste processen. Dit wordt primair gedreven door de wens naar steeds meer hoogwaardiger brandstof en koolwaterstofproducten uit goedkope laagwaardige reststromen te produceren gecombineerd met het daar voor benodigde aanvulling van tekorten aan waterstof.

Globaal zijn er twee typen raffinaderijen te onderscheiden, zie figuren in de bijlagen met procesflowschema's:

1. Coking refinery.
2. Hydro-refinery.

Belangrijkste onderscheid is dat bij de coking refinery na destillatie van de aardolie de overblijvende zwaarste fractie (vacuum residu) gekraakt wordt waarbij lichtere producten als nafta, syngas en gasolie gevormd worden plus een koolstof fractie (petcoke). Deze koolstof wordt na behandeling elders ingezet, bijvoorbeeld voor anodes voor de aluminium en staalindustrie. Deze koolstof wordt onttrokken aan de directe emissie als CO₂.

Bij de hydro-refinery type raffinaderij wordt gebruik gemaakt van extra waterstof als reductiemiddel om zwaardere fractie te hydrokraken en hydro-treaten en daarmee te verzadigen. Hierbij wordt de verhouding aan waterstof/koolstof verbeterd en zwavel steeds verder verwijderd. Dit type raffinaderij is voor Nederland de belangrijkste.

De warmte die benodigd is om de raffinaderijprocessen aan te drijven komt grotendeels voort uit raffinaderijgas, dat in een groot aantal procesfornuizen gestookt wordt. Dit raffinaderijgas bestaat uit lichte moleculen uit de aardolie en restgassen van de raffinaderijprocessen.

A.4.2 Mogelijkheden voor CCUS op de raffinaderij

Bij de hydro-refinery is er een steeds grotere behoefte aan waterstof. Deze waterstof wordt in de meeste gevallen gemaakt met een SMR, extern of op site.

Bij Shell wordt gebruikt gemaakt van het eigen proces van vergassing (SGP) van de zeer zware restfractie (vacuümresidu). Bij deze processen komen geconcentreerde CO₂-stromen vrij, welke goed inzetbaar zijn voor CCUS en in veel gevallen ook geen energie intensieve afvang vergen.

Een andere mogelijkheid is om de raffinaderijgassen om te zetten in blauwe waterstof in een nieuw te bouwen fabriek. Met deze waterstof kunnen de procesfornuizen gestookt worden, zoals beoogd in het H-vision project in Rotterdam (H-vision, 2019).

Andere bronnen van CO₂ vormen de rookgassen van procesverwarming en stoomproductie, maar daar zijn de concentraties in de regel lager en zijn wél energie intensieve afvanginstallaties nodig.

CCS kan enerzijds een lock-in veroorzaken, doordat het doorgaan met fossiele feedstocks mogelijk maakt. Anderzijds kan het aanvullend zijn op de toepassing van alternatieven zoals biomassa feedstocks en e-fuels die hieronder worden behandeld.

A.4.3 Alternatieve oplossingen op de raffinaderij zelf

Het energieverbruik op een raffinaderij vertoont grote overeenkomsten met dat van de chemie, zie Paragraaf A3. Daarom gaan we enkel in op de gebieden waar een raffinaderij verschilt van de chemie.

Energiebesparing

Minder energie gebruiken levert direct minder emissie op én lagere kosten. Echter, dit is een weerbarstige route gebleken. Veel besparingen worden bereikt doordat oude productiemiddelen vervangen worden door nieuwe. Maar zaken als thermische isolatie krijgen niet altijd de volle aandacht in een operationele omgeving. Investerings in energiebesparing moeten concurreren met investeringen in proces gerelateerde middelen waarbij hoge Return On Investment (ROI) eisen gelden van typisch in de orde van 15-20%. Deze eisen zijn vaak niet haalbaar bij energiebesparende maatregelen. Daardoor komt het voor dat op zich rendabele investeringen toch uitblijven. ETS-bedrijven hebben de vrijheid om zelf maatregelen te kiezen om emissiereductiedoelstellingen te behalen, zodat er geen verplichting bestaat bepaalde energiebesparende maatregelen te nemen. Een beleidsinstrument zou kunnen zijn om een lijst op te stellen met verplichte energiebesparende maatregelen zoals adequate thermische isolatie en frequentieregeling bij deellast gebruik van elektrische installaties.

Groene waterstof

Momenteel wordt waterstof gebruikt in raffinageprocessen voor opwaardering en ontzwareling van brandstoffen. Hiervoor wordt nu waterstof geproduceerd met aardgas in een SMR. Een duurzaam alternatief is het gebruik van groene waterstof.

Daarnaast is er in de raffinagesector hogetemperatuurwarmte nodig. Hiervoor worden momenteel fossiele brandstoffen verbrand. Verbranding van groene waterstof is een duurzaam alternatief.

Alkalische elektrolyse voor waterstofopwekking is een al lang bestaand industrieel proces (TRL (9)). Maar net zoals bij de chemie staan de schaal en kosten van groene waterstof een snelle invoering in de weg. Pas wanneer er grote overschotten aan groene stroom ontstaan zal deze mogelijkheid een redelijke onrendabele top gaan krijgen. Dit zal niet voor 2030 het geval zijn. Een pilot op bescheiden MW schaal zou wel een demonstratiemogelijkheid kunnen bieden.

De groene waterstof kan verder ingezet worden in het bestaande Fisher-Tropsch-proces (TRL (9)) voor de productie van synthetische brandstoffen, zie verder de paragraaf betreft e-fuels.

Procesintensificatie

Bij procesintensificatie kan gebruik gemaakt worden van procesroutes die normaal niet mogelijk zijn. Dit kan meerdere effecten opleveren:

- veel kleinere reactoren bij dezelfde doorzet (materiaal- en kostenbesparing);
- significant lager energieverbruik per eenheid van product;
- veel grotere materiaal efficiëntie in kg input per kg product;
- directere procesroutes met minder processtappen

- decentrale productie dicht bij de afnemers (minder transportemissies).

Voorbeelden zijn de vervanging van bepaalde destillatiekolommen door membraansystemen zoals pervaporatie, zuurstof- en waterstof selectieve membranen.

Andere voor de petrochemie relevante procesintensificatievoorbeelden zijn het reformen van aardgas tot syngas of het splitsen van CO₂ met behulp van een extreem compacte en veel efficiëntere plasmareactor (Hrabovsky, 2009; DIFFER, 2020). Deze plasmaconcepten sluiten goed aan bij elektrificatie van de industrie, maar hebben nog een lage TRL van 3 en het betekent een rigoureuus ander proces dan men gewend is deze sector.

A.4.4 Alternatieven voor de vraagkant

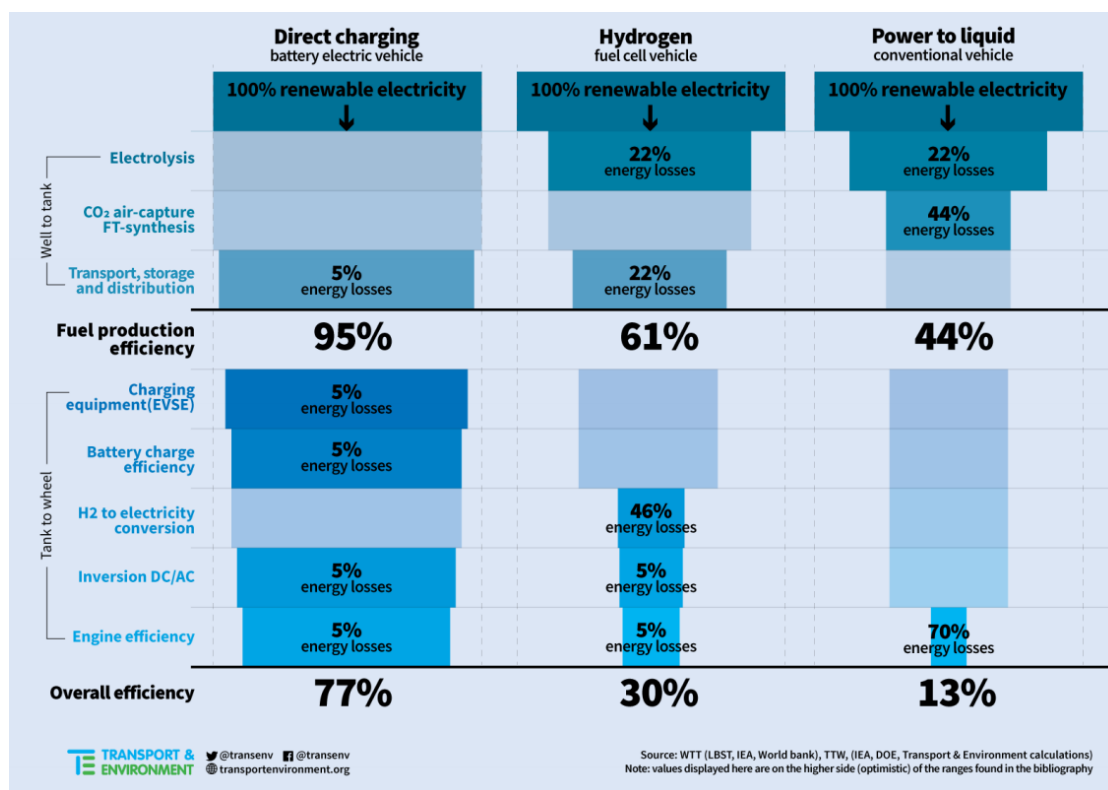
Een groot deel van de output van een raffinaderij betreft vloeibare fossiele brandstoffen voor de mobiliteits- en transportsector. Deze brandstoffen kunnen vervangen worden door andere energiedragers. Dit zorgt voor minder CO₂-uitstoot op raffinaderijen doordat er minder geproduceerd hoeft te worden. Daarnaast kan het vrijkomen van fossiele CO₂ bij verbranding van de brandstof vermeden worden.

Elektrische aandrijving

Bij elektrische voertuigen maakt de verbrandingsmotor plaats voor een elektromotor en de brandstoftank voor een batterij. Indien de batterij wordt opgeladen met duurzame elektriciteit, rijdt het voertuig emissieloos. Nog niet alle batterij-elektrische voertuigen (BEVs) zijn volwassen: scooters, auto's en ov-bussen zijn goed verkrijgbaar. De aanschafprijs voor de voertuigen ligt nog hoger dan voor voertuigen met een verbrandingsmotor, maar de kosten over de levensduur zijn lager en dalen bovendien nog snel. Van bestelauto's, vrachtwagens, touringcars, binnenvaartschepen en mobiele werktuigen zijn de eerste modellen verkrijgbaar. Elektrische vliegtuigen voor de lange afstand en zeeschepen zijn nog niet in zicht.

Elektrisch vervoer verdient waar mogelijk de voorkeur boven waterstof en e-fuels vanwege de veel hogere ketenefficiency:

Figuur 21 - Vergelijking tussen de efficiëntie van batterij-elektrische voertuigen, voertuigen op waterstof en voertuigen met een verbrandingsmotor op e-fuels



Bron: (T&E, 2018).

Groene waterstof

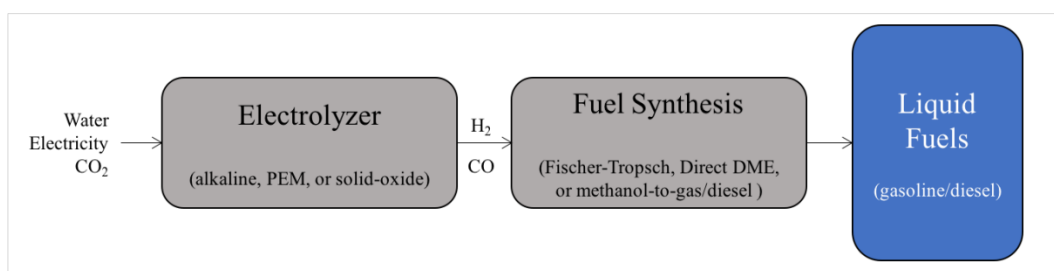
Groene waterstof is een alternatief voor het gebruik van fossiele brandstoffen in de transportsector, met name voor zware modaliteiten. Voor vrachtwagens, touringcars en binnenvaartschepen is het de vraag of de kosten en actieradius van batterij-elektrische voertuigen snel genoeg kan verbeteren. Zo niet, dan is waterstof een goede oplossing om deze modaliteiten te decarboniseren.

E-fuels met CCU

Voor vliegtuigen en zeeschepen is de energiedichtheid van batterijen en waterstof vooralsnog te laag en blijven vloeibare brandstoffen nodig, bijvoorbeeld e-fuels. Met afgevangen CO₂ en waterstof kunnen synthetische brandstoffen geproduceerd worden via Fischer-Tropsch-synthese. Dit is een CCU-proces, aangezien de afgevangen CO₂ gebruikt wordt in een nieuw product. De CO₂ komt later in de keten echter wel weer vrij. Synthetische brandstoffen hebben een hogere energiedichtheid per volume-eenheid dan bijvoorbeeld waterstof en elektriciteit en kunnen daardoor gebruikt worden bij zwaardere transportmodaliteiten, zoals de luchtvaart en de zeescheepvaart. Voor deze toepassingen zijn e-fuels een alternatief voor biobrandstoffen.

Bij Fischer-Tropsch-synthese wordt een mengsel van koolstofmonoxide (CO) en waterstof, genaamd syngas, omgezet in een brandstof van koolwaterstoffen¹⁴. Dit heeft ten opzichte van direct gebruik van waterstof het voordeel dat de energiedichtheid hoger is en dat bestaande verbrandingsmotoren gebruikt kunnen worden. Syngas kan geproduceerd worden door middel van stoomreforming van aardgas. Dit is momenteel het gangbare proces voor Fischer-Tropsch-synthese. Het syngas kan echter ook geproduceerd worden met groene H₂ en afgevangen CO₂. De groene waterstof wordt geproduceerd door elektrolyse met hernieuwbare elektriciteit. De CO₂ kan omgezet worden in CO door middel van co-elektrolyse in elektrolyser (Christensen & Petrenko, 2017) of door middel van een gas-water-shift-reactie (Dimitriou, 2015). Het proces van Fischer-Tropsch-synthese met groene waterstof en afgevangen CO₂ is weergegeven in Figuur 22.

Figuur 22 - Schematische weergave productie synthetische brandstoffen met groene H₂ en CO₂ (e-fuels met CCU)



Bron: (Christensen & Petrenko, 2017).

De Fischer-Tropsch-technologie is een volwassen technologie (TRL 9). Momenteel vindt er al op grote schaal vloeibare brandstoffen gemaakt op basis van aardgas. De toepassing van dit proces voor de productie van e-fuels met CCU wordt echter gelimiteerd door de hoge kosten. De productiekosten liggen een stuk hoger dan voor kerosine, benzine en diesel. Zolang de prijzen van de fossiele brandstoffen niet stijgen zullen de synthetische brandstoffen afhankelijk blijven van overheidssteun. De onrendabele top is 300-500 euro per vermeden ton CO₂ (Christensen & Petrenko, 2017).

Daarnaast is de beperkte beschikbaarheid van groene waterstof een barrière voor de toepassing van e-fuels met CCU. De schaal en kosten van groene waterstof staan een snelle invoering in de weg. Pas wanneer er grote overschotten aan groene stroom ontstaan zal deze mogelijkheid een redelijke onrendabele top gaan krijgen en zullen synthetische brandstoffen een reële optie worden. Gebruik van blauwe waterstof voor synthetische brandstoffen is technisch mogelijk, maar ligt minder voor de hand.

Door het hergebruik van CO₂ in brandstoffen wordt de emissie van CO₂ uitgesteld. De CO₂ komt echter alsnog vrij bij de verbranding van de brandstoffen in een verbrandingsmotor. Als de afgevangen CO₂ een fossiele oorsprong heeft betekent dit dat de keten niet CO₂-neutraal is. Hiervoor zijn duurzame CO₂-bronnen nodig, zoals biomassa. Het gebruik van synthetische brandstoffen kan echter wel leiden tot significante emissiereducties bij inzet van groene waterstof, aangezien het fossiele brandstoffen vervangt. Dit kan leiden tot een emissiereductie tot 70% (Christensen & Petrenko, 2017). Bij deze route is geen sprake van een lock-in door CCS, omdat het grootste deel van de infrastructuur (her)gebruikt wordt.

¹⁴ $n \text{ CO} + (2n+1) \text{ H}_2 \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n+2} + n \text{ H}_2\text{O}$

Biobrandstoffen

Naast het gebruik van elektriciteit voor mobiliteit en transport, zoals in de voorgaande drie routes, is het ook mogelijk om biomassa te gebruiken. Biomassa wordt gezien als één van de opties om de transitie naar duurzame mobiliteit te bewerkstelligen. Modaliteiten die zware goederen vervoeren en lange afstanden overbruggen vragen om een brandstof met een hoge energiedichtheid. Deze modaliteiten veroorzaken bijna de helft van de CO₂-emissies van de transportsector (CBS, 2017). Biobrandstof is daarvoor waarschijnlijk een van de weinige opties, naast waterstof. Ook voor het lichte segment geldt dat er waarschijnlijk nog lange tijd behoefte zal zijn aan hernieuwbare brandstoffen aangezien verbrandingsmotoren nog een lange tijd de vloot zullen domineren dan wel in de vloot aanwezig zullen zijn. Voor dit segment is het echter voornamelijk een transitiebrandstof.

De productie van biobrandstoffen als FAME (biodiesel) en bio-ethanol (benzinevervanger) zijn bewezen technieken en het wordt op grote schaal toegepast. Nederland is een grote producent van biobrandstoffen. Binnen de EU bestaat een bijmengverplichting voor biobrandstoffen bij diesel en benzine, waardoor deze brandstoffen op grote schaal gebruikt wordt.

Er zijn verschillende productieroutes voor kerosinevervangers op basis van biomassa. De meest ontwikkelde productieroutes hebben een TRL van 7 tot 9. Voor de scheepvaart zijn er verscheidene biobrandstoffen die al commercieel toegepast worden en voor de binnenvaart geldt reeds een bijmenglimiet (E4Tech, 2018). Voor zowel toepassingen in de luchtvaart als toepassingen in de scheepvaart liggen de kosten nog een stuk hoger dan de fossiele alternatieven.

Biobrandstoffen kunnen direct bijgemengd worden bij fossiele brandstoffen en daardoor zonder aanpassingen aan de motoren toegepast worden. Er zit bij de meeste biobrandstoffen echter een limiet aan de bijmenging. Daardoor is het verduurzamingspotentieel bij de huidige voertuigen beperkt. Daarnaast zijn niet alle productieroutes van biobrandstoffen even duurzaam, onder meer door emissies gerelateerd aan het landgebruik van energiegewassen. Daarom is het wenselijk om biobrandstoffen te produceren van reststromen.

De beschikbaarheid van duurzame biomassa is een beperkende factor voor het gebruik van biomassa in de transportsector. Vanwege de beperkte beschikbaarheid is cascadering noodzakelijk. Dit houdt in dat biomassa zo hoogwaardig mogelijk gebruikt wordt. Voor zwaar transport is het gebruik van biomassa in principe niet hoogwaardig, aangezien het gaat om verbranding. Er zijn voor zwaar transport echter weinig alternatieven voor verduurzaming, waardoor het alsnog als een hoogwaardige toepassing gezien kan worden. Waterstof is echter wel een goed alternatief. Voor licht transport zijn er wel voldoende alternatieven. Combinatie van biomassa en CCS zou in principe deels negatieve emissies kunnen opleveren, bijvoorbeeld bij BECCS. Voor dat specifieke geval is dan ook geen sprake van een lock-in door CCS, omdat het grootste deel van de infrastructuur (her)gebruikt wordt.

B Technologieomschrijvingen

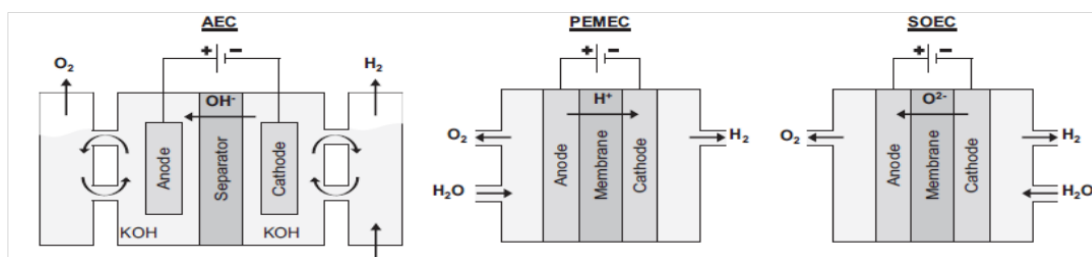
B.1 Productie groene waterstof

Groene waterstof kan in verschillende sectoren bijdragen aan verduurzaming van de industrie. Het is een alternatief voor de blauwe productieroute, waarbij waterstof geproduceerd wordt met aardgas in combinatie met CCS.

Er zijn verschillende routes voor groene waterstofproductie. Ten eerste kan waterstof geproduceerd worden door middel van elektrolyse met groene elektriciteit. Daarnaast kun je waterstof produceren door vergassing van biomassa. Tot slot is waterstofproductie groen als stoom-methaan-reforming wordt toegepast met groengas.

Bij elektrolyse wordt water omgezet in waterstof en zuurstof door toevoeging van elektrische energie. Er zijn verschillende varianten voor elektrolyse. Deze varianten zijn schematisch weergegeven in Figuur 23.

Figuur 23 - Schematische weergave productieroutes elektrolyse. Van links naar rechts Alkaline Elektrolyse, Proton Exchange Membrane elektrolyse en Solid Oxide Elektrolyse



Bron: (DNV GL; TNO; Enpuls, 2018).

De meest gangbare variant is Alkaline Elektrolyse (AE), waarbij gebruik wordt gemaakt van een vloeibaar elektrolyt en waarbij water gesplitst wordt in waterstof- en hydroxide-ionen. De hydroxide-ionen passeren het membraan en worden vervolgens omgezet in water en zuurstof. Deze technologie is commercieel toepasbaar en heeft TRL 8-9 (DNV GL; TNO; Enpuls, 2018).

Een andere variant is Proton Exchange Membrane (PEM) elektrolyse. Hierbij wordt geen vloeibaar elektrolyt gebruikt. PEM-elektrolyzers hebben een polymeermembraan, waar waterstofionen doorheen kunnen passeren. De uitgangsdruk en puurheid van de waterstof ligt bij deze variant hoger dan bij Alkaline-elektrolyse. Ook deze technologie is commercieel toepasbaar en heeft TRL 8-9 (DNV GL; TNO; Enpuls, 2018).

De laatste variant is Solid Oxide Elektrolyse (SOE). Bij deze variant wordt een keramisch membraan gebruikt, waar zuurstofionen doorheen passeren. De operationele temperatuur bij deze variant ligt erg hoog, waardoor hoge rendementen mogelijk zijn. Er wordt geëxperimenteerd met deze technologie, maar deze wordt nog niet op grote schaal toegepast. De TRL is 5-6 (DNV GL; TNO; Enpuls, 2018).

Momenteel is AE de goedkoopste variant met circa 3 euro/kg (exclusief compressie, transport en distributiekosten). Richting 2040 is het de verwachting dat de productiekosten bij PEM vergelijkbaar of zelfs lager zijn (DNV GL; TNO; Enpuls, 2018).

Groene waterstof kan ook worden geproduceerd uit biomassa zoals reststromen uit land- en bosbouw, gft-afval en algen. Een nieuwe conversietechniek die hiervoor kan worden ingezet is vergassing, waarbij biomassa op hoge temperatuur wordt omgezet in een combinatie van waterstof en koolstofmonoxide (synthesegas)¹⁵. Er is echter een beperkte beschikbaarheid aan duurzame biomassa. Het heeft een TRL van 7 en de productiekosten liggen met 3,75 euro/kg hoger dan bij elektrolyse (DNV GL; TNO; Enpuls, 2018).

Productie van groene waterstof door middel van SMR met groengas is een commercieel toepasbare technologie met TRL 9, aangezien het productieproces gelijk is aan SMR met aardgas. De productiekosten liggen echter erg hoog en de beschikbaarheid van groengas is beperkt (DNV GL; TNO; Enpuls, 2018).

¹⁵ Bij vergassing kan ook plastic gebruikt worden in plaats van biomassa.

C Technologische gereedheid (TRL)

Het technology readiness level (TRL) is een indicator om aan te geven hoe ver een innovatie technologisch is uitontwikkeld. Het TRL is geïntroduceerd door de NASA in de jaren '70 en de Europese Commissie (EC) heeft het in het kader van het Horizon 2020-programma licht aangepast.

De door de EC gehanteerde niveaus zijn als volgt:

- TRL 1: basisprincipes geobserveerd;
- TRL 2: technisch concept geformuleerd;
- TRL 3: experimenteel bewijs van concept;
- TRL 4: technologie bevestigd in laboratorium;
- TRL 5: technologie bevestigd in (industriële) relevante omgeving;
- TRL 6: technologie gedemonstreerd in (industriële) relevante omgeving;
- TRL 7: demonstratie van prototype van het systeem in operationele omgeving;
- TRL 8: systeem compleet en gekwalificeerd;
- TRL 9: uiteindelijke versie systeem bewezen in operationele omgeving.