

Technische alternatieven voor CCS in Nederland

Overwegingen bij en data voor de ‘zeef’ voor CCS aanvragen binnen de verbreding van de SDE+

Opgesteld voor:

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Auteurs:

Mark Schenkel, Maurice Quant en Jeroen de Beer
Navigant Netherlands B.V.
Stadsplateau 15
3521 AZ Utrecht

+31 30 662 3389
navigant.com

Referentienummer: 211150
November 2019

DISCLAIMER

Navigant Netherlands B.V. geeft geen garanties ten aanzien van de inhoud van dit rapport en de verleende diensten.

Navigant Netherlands B.V. stelt in dit rapport verwachtingen en scenario's volgens methoden en werkwijzen die van een goed consultant verwacht mogen worden en die in de markt gebruikelijk zijn. Navigant geeft geen garantie ten aanzien van de resultaten van het rapport en de verleende diensten, noch ten aanzien van de conclusies die uit dit rapport getrokken (kunnen) worden. Analyses en conclusies uit dit rapport zijn gebaseerd op aannames die Navigant Netherlands B.V. heeft gedaan en die betrekking hebben op economische groei, vraag, productie, etc. Deze aannames behoeven niet juist te zijn en zijn in ieder geval aan verandering onderhevig. Toekomstige getallen of resultaten kunnen significant afwijken van een verwachting of schatting waarop Navigants analyses zijn gebaseerd.

De analyse vervat in dit rapport is (gedeeltelijk) gebaseerd op informatie die niet door Navigant is opgesteld, maar afkomstig is van anderen. Die informatie is niet door Navigant gecontroleerd. Navigant gaat ervan uit dat deze informatie betrouwbaar, juist en volledig is, maar Navigant garandeert niet dat dat in ieder opzicht voor deze informatie geldt.

EZK dient zich te realiseren dat, indien hij afgaat op de inhoud, data, informatie, meningen en/of conclusies in dit rapport, hij dit geheel voor eigen risico doet. Navigant aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor de inhoud van dit rapport, noch voor het gebruik van dit rapport door de opdrachtgever.

SAMENVATTING

Begrenzing aan CCS in het klimaatakkoord: de zeef

In het Klimaatakkoord is een voorstel gedaan om de subsidiëring van CCS te beperken door het hanteren van een zeef, plafond en horizon. Plafond en horizon beperken de inzet van CCS door de industrie in respectievelijk subsidiabele jaarlijkse volumes en tijdsduur. Het doel van de zeef is ervoor te zorgen dat CCS alleen wordt gesubsidieerd als er geen aantoonbare kosteneffectieve alternatieven zijn. Uiteindelijk moet de zeef zorgen voor de balans tussen het benutten van het CCS potentieel zonder dat er alternatieve kosteneffectieve maatregelen worden verdrongen.

Doel van deze studie

Deze studie probeert vast te stellen welke maatregelen inderdaad als (kosteneffectief) alternatief voor CCS kunnen worden gezien. Deze studie maakt daarvoor gebruik van literatuuronderzoek en kostenanalyse om technische alternatieven in kaart te brengen en te beoordelen aan de hand van vastgestelde criteria; het beoordelingskader.

Beoordelingskader alternatieve maatregelen

De studie maakt gebruik van een voorselectie om maatregelen over te houden die, op basis van verwachte kosten (uit literatuur), tijd tot implementatie en CO₂-vermijdingspotentieel, een redelijke kans hebben om als alternatief op CCS te kunnen worden gezien. De overgebleven maatregelen worden geanalyseerd op kosteneffectiviteit (in €/tCO₂ vermeden) waarbij uitgegaan wordt van kostenniveau in 2020 en de marginaal gemiddelde emissiefactor voor elektriciteit per 2030. Daarnaast worden de overgebleven maatregelen geanalyseerd op de zeven onderstaande criteria:

1. **Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?**
2. **Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?**
3. **Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?**
4. **Wat is de (endogene) onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?**
5. **Wat is de (exogene) invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?**
6. **Wat is de perceptie van risico's door de industrie?**
7. **Is het alternatief haalbaar in Nederland?**

Samen kunnen deze criteria als zeef worden gezien; beoordeling op deze criteria helpt bij het bepalen of een maatregel een technisch alternatief voor CCS kan zijn. Let wel: de studie richt zich uitdrukkelijk *niet* op hoe de zeef kan uitwerken in de beoordeling van subsidieaanvragen onder de SDE++. Ter illustratie: de studie geeft een indicatie van de perceptie van risico's van een bepaald technisch alternatief, maar geeft geen oordeel over de tolerantie voor deze risico's. Binnen de analogie van de zeef geeft de studie aan welke factoren de gaten in de zeef kunnen beïnvloeden, maar schrijft niet voor hoe groot de gaten in de zeef precies moeten zijn.

Analyse en discussie

- Op basis van deze criteria kan gesteld worden dat de inzet van biomassa voor warmte en de directe toepassing van CO₂ een mogelijk alternatief op CCS vormen in 2021, maar dat hun inzet komt met risico's op het gebied van publieke oppositie, mogelijke zorgen over beperkte

beschikbaarheid van duurzame biomassa en lagere klimateffectiviteit. Andere maatregelen lijken minder geschikt door een te geringe CO₂-besparing, te lange implementatietijd of omdat ze te duur zijn.

- De kostenanalyse die gebruikt is om tot deze selectie te komen is gevoelig voor onzekerheden in de inschatting van energieprijzen, technologie- en inpassingskosten, emissiefactoren en andere aannames.
- Op termijn kunnen meer technologieën een alternatief vormen voor CCS, waardoor een zeef relevanter kan worden.
- De zeef is als aanvulling op het plafond nodig om te voorkomen dat alternatieven voor CCS worden verdrongen door CCS.

TABLE OF CONTENTS

| | |
|--|-----------|
| 1. Inleiding..... | 1 |
| 2. Bekende CO₂-afvang Projectontwikkeling in Nederland..... | 3 |
| 3. Beoordelingskader voor Alternatieven CCS..... | 4 |
| 3.1 Identificatie van technische alternatieven | 4 |
| 3.2 Voorselectie van alternatieven..... | 4 |
| 3.3 Toetsing van overgebleven alternatieven | 5 |
| 3.4 Gevoeligheidsanalyse kosteneffectiviteit..... | 7 |
| 4. Lijst met Technische Alternatieven..... | 9 |
| 4.1 Beschrijving technische alternatieven | 9 |
| 4.2 Voorselectie van technische alternatieven..... | 12 |
| 5. Beoordeling resterende Alternatieven..... | 18 |
| 5.1 Industriële restwarmte..... | 19 |
| 5.2 Procesintensificatie | 20 |
| 5.3 Stoomrecompressie..... | 22 |
| 5.4 Chemicaliën (CCU) | 23 |
| 5.5 Directe toepassingen van CO ₂ | 25 |
| 5.6 Groene waterstof als feedstock | 28 |
| 5.7 Groene waterstof inzet voor warmte..... | 30 |
| 5.8 Biomassa inzet voor warmte..... | 32 |
| 5.9 Alternatieve routes voor staalproductie..... | 33 |
| 6. Analyse en Discussie..... | 36 |
| Appendix A. CO₂-afvang Projectontwikkeling in Nederland..... | 40 |

1. INLEIDING

In het Klimaatakkoord zijn afspraken gemaakt over hoe en met welke hoeveelheid broeikasgasemissies van de industrie terug te dringen zijn tot 2030.

Om dit doel te bereiken wordt in 2020 de bestaande SDE+-regeling verbreed naar de SDE++. Naast categorieën voor de productie van hernieuwbare energie komen ook broeikasgas-reducerende opties voor de industrie in aanmerking voor subsidie.

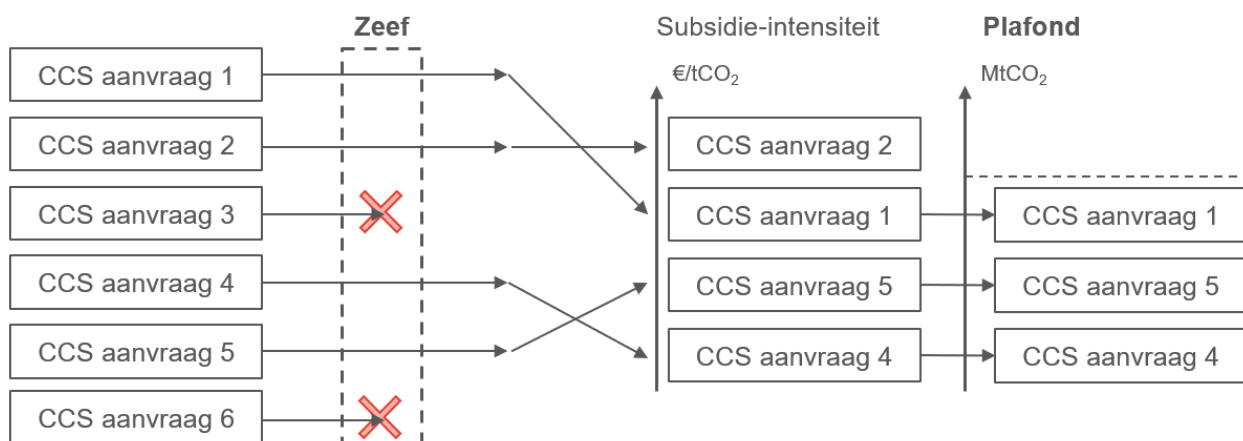
Eén van de maatregelen die de industrie heeft is afgang en opslag van CO₂ (CCS). Het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) ontwikkelt beleid ter ondersteuning van emissiereductie in de industrie, inclusief CCS. Eerdere studies hebben laten zien dat het potentieel voor CCS aanzienlijk is en dat de kosten per ton vermeden CO₂-emissie lager liggen dan veel andere opties die de industrie heeft.¹ CCS mag echter niet de structurele ontwikkelingen van alternatieve technieken in de weg staan.

Begrenzing aan CCS in het klimaatakkoord: de zeef

In het Klimaatakkoord is een voorstel gedaan om de subsidiëring van CCS te beperken door het hanteren van een zeef, plafond en horizon. Deze drie maatstaven moeten er in resulteren dat er voldoende investeringszekerheid is voor bedrijven die willen investeren in CCS en dat er middelen beschikbaar blijven die nodig zijn voor de transitie op de lange termijn.

De horizon zorgt voor een begrenzing in de tijd, door op termijn geen nieuwe subsidiebeschikkingen voor CCS meer af te geven. Het plafond limiteert de toepassing van CCS tot een maximum, voor zover hier subsidie voor nodig is. Het doel van de zeef is er voor te zorgen dat CCS alleen wordt gesubsidieerd als er geen aantoonbare kosteneffectieve alternatieven zijn. Uiteindelijk gaat het om de balans tussen het benutten van het CCS potentieel zonder dat er alternatieve kosteneffectieve maatregelen worden verdrongen.

Figuur 1: Een zeef weert CCS subsidieaanvragen met kosteneffectieve alternatieven. Een plafond begrenst de jaarlijkse subsidiabele megatonnen emissiereductie door CCS.



¹ Zie bijvoorbeeld: Onderbouw ing investeringen voor emissiereductie industrie 2030, Navigant, 2018.

Kosteneffectieve alternatieve maatregelen

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) acht het onwaarschijnlijk dat bedrijven zelf voor CCS kiezen als er een kosteneffectief alternatief is.² De redenering is dat de overheid via een heffing en subsidie bedrijven er al toe beweegt kosteneffectieve maatregelen te nemen. Een zeef als beperking van CCS is daarmee overbodig, volgens de redenering van PBL.

Er zijn echter overwegingen die dit minder zwart/wit maken. Technologieën kunnen bijvoorbeeld een veel langere implementatietijd hebben of zeer gevoelig zijn voor veranderende energieprijzen, waardoor ze minder interessant worden. Dit soort overwegingen kunnen helpen bij het ontwerpen van de zeef. Deze studie richt zich op het zo goed mogelijk vaststellen van deze effecten. Op deze wijze probeert deze studie vast te stellen welke maatregelen inderdaad als (kosteneffectief) alternatief voor CCS kunnen worden gezien.

De studie richt zich uitdrukkelijk *niet* op hoe de zeef kan uitwerken in de beoordeling van subsidieaanvragen onder de SDE++. Ter illustratie: de studie geeft een indicatie van de perceptie van risico's van een bepaald technisch alternatief, maar geeft geen oordeel over de tolerantie voor deze risico's. Binnen de analogie van de zeef geeft de studie aan welke factoren de gaten in de zeef kunnen beïnvloeden, maar schrijft niet voor hoe groot de gaten in de zeef precies moeten zijn.

Opzet studie

Deze studie maakt gebruik van literatuuronderzoek en kostenanalyse om technische alternatieven in kaart te brengen en te beoordelen aan de hand van vastgestelde criteria. Deze aanpak en voorlopige resultaten zijn gevalideerd door interviews met belanghebbenden uit de vijf Nederlandse industriële clusters. Daarnaast zijn experts geraadpleegd die zijn aangewezen door belanghebbenden uit industrie en maatschappelijke organisaties. Dit waren:

- Tjeerd Jongsma ISPT
- Rob Terwel Kalavasta
- Machiel Mulder Rijksuniversiteit Groningen
- Mart van Bracht Topsector Energie

De auteurs zijn deze experts dankbaar voor hun constructieve inbreng. Alle bevindingen in dit rapport komen voor rekening van de auteurs.

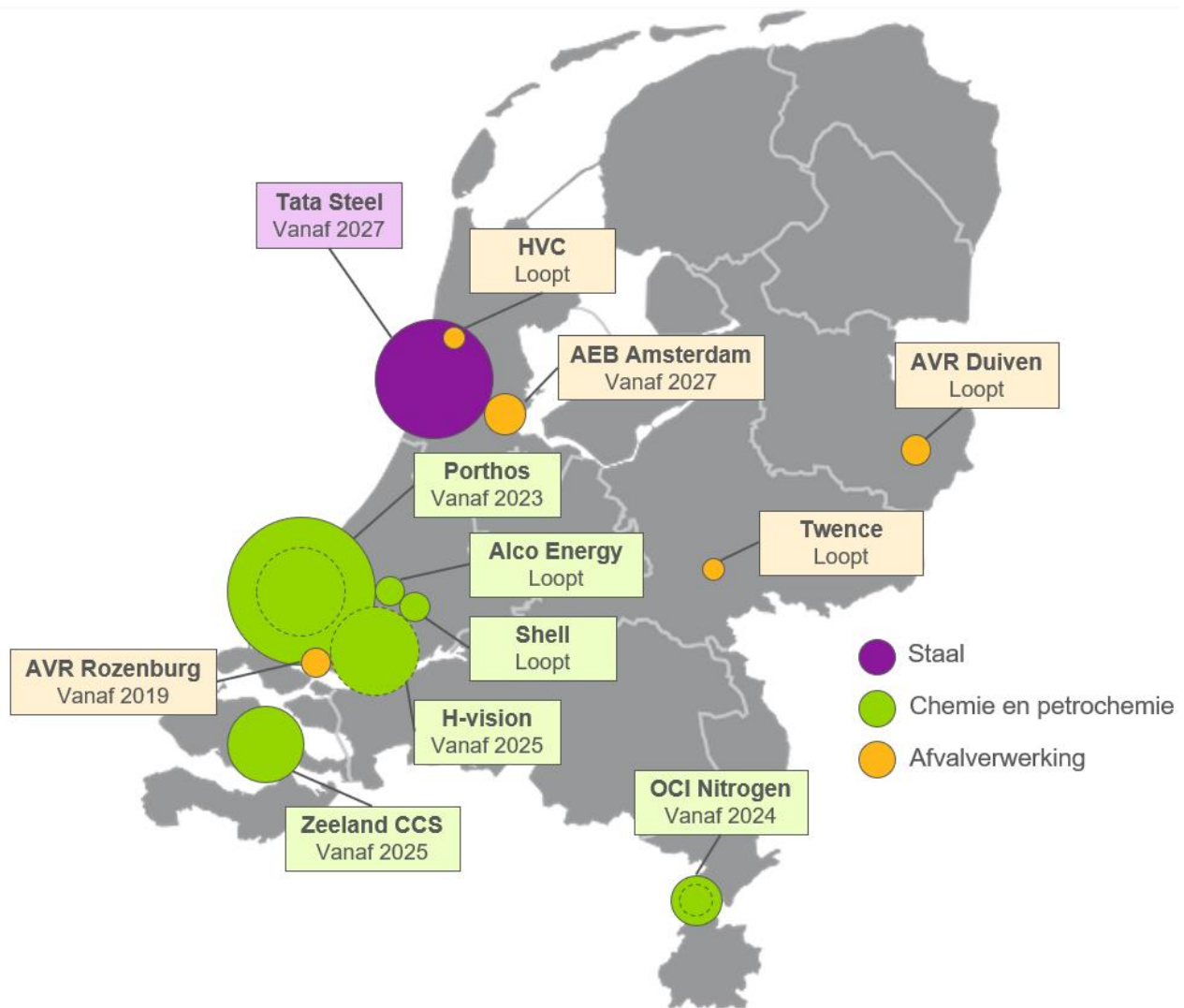
² Effect kabinetsvoorstel CO2-heffing industrie, PBL, juni 2019

2. BEKENDE CO₂-AFVANG PROJECTONTWIKKELING IN NEDERLAND

Om een goed beeld te krijgen van de technische alternatieven voor CCS in Nederland is het van belang om inzicht te geven in waar afvang van CO₂ in Nederland als een veelbelovende optie wordt gezien. Immers, een alternatief voor CCS is alleen een alternatief als deze invloed heeft op dezelfde CO₂-bron.

Op het moment van schrijven zijn elf projecten in Nederland bekend waar CO₂ wordt afgevangen in de industrie of waar er plannen zijn om dit te gaan doen, zie Figuur 2. Appendix A geeft meer informatie per project. Wanneer de eerste ronde van de SDE++ al ruimte biedt voor CCS projecten, is de verwachting dat bedrijven uit het Rotterdamse havengebied al zouden willen meedingen om het Porthos project uit te voeren. Deze inventarisatie is gevalideerd door middel van interviews met belanghebbenden uit de vijf industriële clusters in Nederland.

Figuur 2. Overzicht van CO₂-afvang (CCUS) projectontwikkeling in Nederland



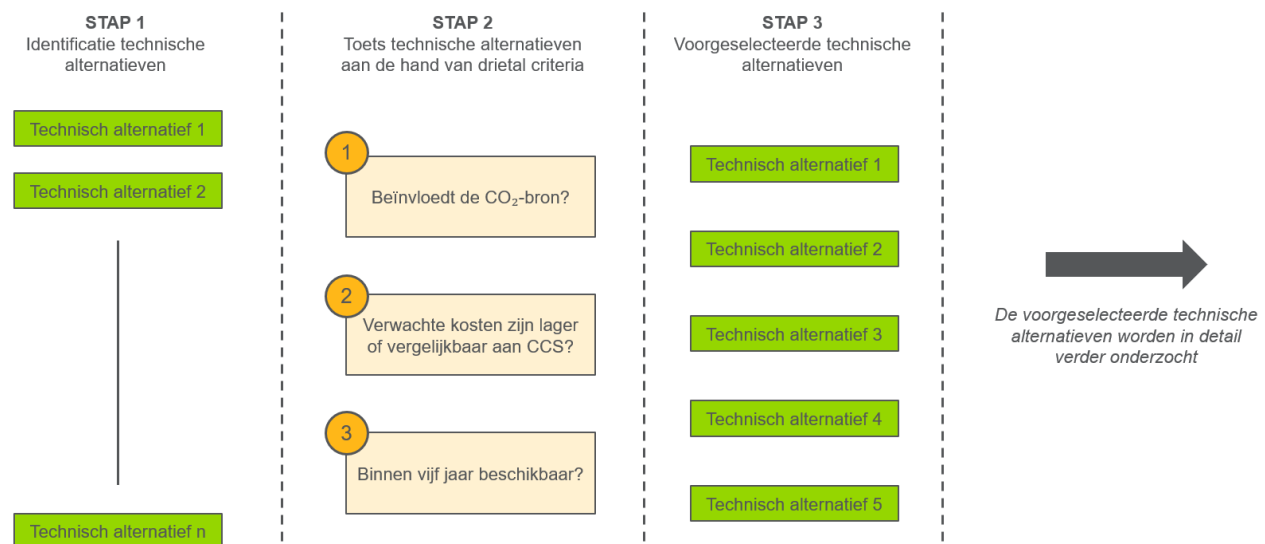
De energiesector valt buiten de scope van dit overzicht. Grootte van de cirkel geeft de relatieve omvang van het CO₂-afvang potentieel van het CCUS project aan. Eventuele overlap tussen CCUS projecten is niet meegenomen in het figuur. Aangegeven jaartallen geven de vroegst mogelijke start van afvang aan.

3. BEOORDELINGSKADER VOOR ALTERNATIEVEN CCS

De zeef moet zorgen dat CCS alleen wordt gesubsidieerd op plekken waar geen kosteneffectieve alternatieven zijn. Hierom moet vastgesteld worden welke technologieën die CO₂ emissies uit de industrie reduceren een kosteneffectief alternatief vormen voor CCS. Dit hoofdstuk geeft een kader om te beoordelen of technische maatregelen een kosteneffectief alternatief voor CCS kunnen zijn.

Deze beoordeling gebeurt in drie stappen. De eerste stap is een inventarisatie van potentiële alternatieven voor CCS. De tweede stap is een voorselectie die zorgt voor een eerste, grovere beoordeling van maatregelen op basis van drie criteria. Deze voorselectie wordt gedaan om de studie zo snel en efficiënt mogelijk te richten op maatregelen die een redelijke kans hebben om als alternatief op CCS te kunnen worden gezien. De derde en laatste stap hanteert zeven criteria om op een groter detailniveau te beoordelen of een bepaalde maatregel een wezenlijk alternatief voor CCS vormt. Dit proces staat schematisch weergegeven in Figuur 3.

Figuur 3. Schematische weergave van beoordelingskader voor alternatieven CCS



3.1 Identificatie van technische alternatieven

Niet alle maatregelen die CO₂ emissies kunnen reduceren in de industrie komen in beeld als mogelijk alternatief voor CCS. In het inventariseren van deze maatregelen worden alleen maatregelen beschouwd die directe emissies uit de Nederlandse industrie kunnen wegnemen wanneer ze door het bedrijf genomen kunnen worden. Maatregelen die emissies van elektriciteitsproductie verminderen worden buiten beschouwing gelaten. Ook maatregelen die de vraag naar producten doen afnemen, zoals recycling, worden hierom niet meegenomen. Het is mogelijk dat de zeef op een ander categorieniveau gaat werken dan deze inventarisatie.

3.2 Voorselectie van alternatieven

Na inventarisatie van maatregelen volgt een voorselectie die zorgt voor een eerste, grove beoordeling van maatregelen op basis van drie criteria:

- 1. De maatregel beïnvloedt een CO₂ bron die ook geschikt/relevant is voor CCS.** Maatregelen die direct ingrijpen op de bron van CO₂ die relevant is voor CCS kunnen een alternatief vormen.

Maatregelen kunnen de emissie van CO₂ vermijden door bijvoorbeeld elektrificatie en de toepassing van waterstof. Dit kunnen ook maatregelen zijn die de emissie van CO₂ verminderen, en daarmee de toepassing van CCS wel belemmeren maar niet blokkeren. Het gaat hier om maatregelen die de emissie van CO₂ zover terugbrengen, dat CCS niet meer op voldoende schaalgrootte kan worden toegepast, wat de relatieve kosten doet toenemen.³

2. **De verwachte kosten van de maatregel zijn vergelijkbaar of lager dan CCS.** Maatregelen waarvan de kosten per vermeden ton CO₂ vergelijkbaar of lager liggen dan CCS kunnen een alternatief vormen.
3. **Het traject van implementatie van de maatregel vergt minder dan vijf jaar (vergelijkbaar of korter dan CCS).** Maatregelen die vlot kunnen worden uitgerold of toegepast kunnen een alternatief voor CCS vormen vóór 2030. Deze implementatietermijn is inclusief de ontwikkeling van technologie, het aanleggen van infrastructuur buiten de poort en het inpassen in bestaande industrie. Dit kan dus betekenen dat een alternatief weliswaar technisch 'volwassen' is, maar als implementatie een zeer lange aanlooptijd kent, vormt de maatregel geen alternatief op CCS.

Wanneer een maatregel niet voldoet aan één of meerdere van deze drie criteria kan worden gesteld dat de maatregel dus geen wezenlijk alternatief vormt voor CCS. Daarmee valt de maatregel af in het beoordelingskader. Deze beoordeling is conservatief; er wordt een ruime interpretatie gehanteerd en bij twijfel gaat een alternatief door.

3.3 Toetsing van overgebleven alternatieven

Resterende maatregelen gaan door naar de laatste stap, waarin aan de hand van zeven criteria op een hoger detailniveau wordt getoetst of de maatregel een alternatief kan vormen voor CCS. Tabel 1 geeft deze criteria en hun overwegingen weer en geeft per criterium een voorbeeld die illustreert waarom dit criterium relevant is. Alle alternatieve maatregelen worden individueel beschouwd; er worden geen combinaties van maatregelen onderzocht.

Tabel 1. Beoordelingscriteria voor alternatieve maatregelen voor CCS

| criterium | Overwegingen | Meting | Illustratief voorbeeld |
|---|---|-------------|--|
| 1 Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn? | Zelfs als de technologie volwassen is, kan implementatie nog jaren duren door bijvoorbeeld aanlooptijden, benodigde infrastructuur of inpassingsproblematiek. | Over x jaar | Diepe elektrificatie van Chemelot vereist aanleg van een HVDC elektriciteitskabel. Dit is een lange-termijn traject. |

³ Een bijzondere categorie is de inzet van bio-energie. Dit verandert niet de omvang maar wel de aard van CO₂; deze is dan biogeen (kort-cyclisch). Dit sluit de inzet van CCS technisch niet uit en kan zorgen voor verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer, zogeheten negatieve emissies. Echter, de verwaarding van deze negatieve emissies is op dit moment onvoldoende mogelijk, waardoor de verwachting is dat in de praktijk een bedrijf ofwel bio-energie inzet, ofwel CCS zal toepassen.

| Criteria | Overwegingen | Meting | Illustratief voorbeeld |
|---|--|--|---|
| 2 Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast? | Wanneer de omvang van CO ₂ reductie van de maatregel klein is ten opzichte van CCS of wanneer de CO ₂ van een bron komt waarop CCS niet kan worden toegepast, vormt het geen alternatief voor CCS. Wanneer de omvang vergelijkbaar is kan het de kostenefficiëntie van CCS dermate beïnvloeden dat de maatregel als alternatief kan worden gezien. | % CO ₂ /jaar t.o.v. CCS alternatief | Een bepaalde energie-efficiënte maatregel reduceert emissies met 1-2%, en beïnvloedt de CO ₂ emissies van een CCS-geschikte bron onvoldoende. |
| 3 Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel? | Als een alternatieve maatregel een aanzienlijk risico vormt voor de bedrijfsvoering, vormt het geen alternatief voor CCS. | Lage/ Gemiddelde/ Hoge betrouwbaarheid | De bedrijfszekerheid van ultradiepe geothermie is onvoldoende getest. |
| 4 Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel? | Wanneer de kosten van een maatregel mogelijk veel hoger kunnen uitpakken kan de maatregel mogelijk niet als alternatief worden gezien. Dit criterium dekt endogene factoren (variërende aansluitkosten, onzekerheid in investeringskosten, etc.) | €/tCO ₂ | De investeringskosten voor een synthetische brandstoffabriek zijn nog onzeker en mogelijk veel hoger dan de gemiddelde projectie. |
| 5 Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen | Wanneer de kosten van een maatregel mogelijk veel hoger kunnen uitpakken kan de maatregel mogelijk niet als alternatief worden gezien. Dit criterium dekt exogene factoren zoals energieprijzen en emissiefactoren. | €/tCO ₂ | Wanneer de prijs van elektriciteit aanzienlijk meer stijgt dan volgens de KEV projectie, zal de inzet van elektrische boilers niet langer kosteneffectief kunnen blijken. |
| 6 Wat is de perceptie van risico's door de industrie? | Zelfs als een maatregel kosteneffectief is, kunnen (bedrijfsspecifieke) risico's zorgen voor het verminderen van de aantrekkelijkheid van het alternatief. | Lage/ Gemiddelde/ Hoge risico's | Er is een risico dat inpassing van elektrische fornuizen in bestaande processen leidt tot vertragingen en uitgestelde of verlaagde productie. |

| criterium | Overwegingen | Meting | Illustratief voorbeeld |
|--|--|--------|---|
| 7 Is het alternatief haalbaar in Nederland? | Dit criterium moet alternatieven die voor Nederland niet relevant zijn tegenhouden. Dit criterium dekt niet-technische overwegingen en gaat niet over het technisch potentieel, dat wordt gedekt door "omvang CO ₂ reductie." | Ja/Nee | Gepatenteerde technologie wordt niet in Nederland geleverd. |

3.4 Gevoeligheidsanalyse kosteneffectiviteit

Voor het inschatten van de onzekerheid in kosteninschatting van een maatregel en de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs (criteria 4 en 5 uit Tabel 1) wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen technologie-endogene (criterium 4) en -exogene factoren (criterium 5) en wordt een range aangegeven waarbinnen wordt aangenomen dat deze factoren variëren in 2020.

Tabel 2 geeft een overzicht van de parameters en geeft de hoogste en laagste waardes. Hierbij wordt voor de base case uitgegaan van de waarden uit het Onrendabele Top (OT) model van het Conceptadvies SDE++ 2020 (CO₂-reducerende opties) van PBL. Voor de hoge en lage waarden worden de parameters ingevuld met eigen expertise. De door PBL verwachte gemiddelde marginale emissiefactor in 2030 is 0,183 kgCO₂/kWh. Deze waarde wordt gebruikt door PBL in de SDE++ -adviezen en wordt niet gevarieerd in de gevoeligheidsanalyse.

Niet alle parameters zijn relevant voor iedere technologie, zo zijn bijvoorbeeld de waterstof- en zuurstofprijs alleen relevant voor 'groene waterstof als feedstock' en 'groene waterstof bij inzet warmte'. Daarnaast zijn de hoge en lage kostenwaarden in onderstaande tabel bedoeld om de maximale theoretische range te bepalen in kosteneffectiviteit van de technologieën. De waarden voor lage kosten en hoge kosten voor alle parameters samen moeten niet als intern consistente scenario's worden gezien. Er is op basis van de tabel ook geen uitspraak mogelijk over de waarschijnlijkheid van de (combinatie van) parameters.

Tabel 2. Parameters voor gevoeligheidsanalyse van kosteneffectiviteit in 2020

| Parameter | Lage Kosten | Base case | Hoge kosten |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Endogeen | | | |
| Investeringskosten | -50% | - | +50% |
| Vollasturen | 8,760 uur | 8,000 uur | 4,800 uur |
| Exogeen | | | |
| Gasprijs | 0,30 €/m ³ | 0,19 €/m ³ | 0,10 €/m ³ |
| Elektriciteitsprijs | 35 €/MWh | 49,80 €/MWh | 60 €/MWh |
| Waterstofprijs | 2,000 €/tonH ₂ | 1,560 €/tonH ₂ | 1,000 €/tonH ₂ |
| Zuurstofprijs | 40 €/tonO ₂ | 0 €/tonO ₂ | 0 €/tonO ₂ |
| WACC | 4% | 6% | 8% |

Bron base case: PBL Conceptadvies SDE++ 2020 OT-model. Lage kosten en hoge kosten per parameter op basis van Navigant inschattingen. De waarden voor lage kosten en de hoge kosten voor alle parameters samen moeten niet als intern consistente scenario's worden gezien. Er is op basis van de tabel ook geen uitspraak mogelijk over de waarschijnlijkheid van de (combinatie van) parameters.

4. LIJST MET TECHNISCHE ALTERNATIEVEN

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van technische alternatieven voor CCS die de industrie heeft om de directe CO₂-emissies terug te dringen. We beschrijven de alternatieven kort en op een algemeen niveau, zonder in te gaan op varianten op de alternatieven of bedrijfsspecifieke situaties. Het overzicht dient als uitgangspunt voor de voorselectie in hoofdstuk 5 en de beoordeling in hoofdstuk 6.

Het onderstaande overzicht van technische alternatieven is opgesteld op basis van verschillende bronnen⁴ en is afgestemd met het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Hierbij wordt een onderscheid gemaakt tussen volgende categorieën:

- **Energie-efficiëntie:** maatregelen die de (relatieve) energiebehoefte van processen verminderen
- **Elektrificatie:** maatregelen die een bestaande energievraag vervangen voor elektriciteit
- **Carbon capture and utilization (CCU):** maatregelen die CO₂ afvangen en hergebruiken
- **Feedstock:** maatregelen die een bestaande feedstock vervangen voor een duurzamer alternatief
- **Duurzame energie:** maatregelen die bestaande energievraag invullen met een duurzaam alternatief
- **Recycling:** maatregelen die afvalstromen laat afnemen door hergebruik

4.1 Beschrijving technische alternatieven

| Categorie | Technologie | Beschrijving |
|---------------------|-----------------------------------|--|
| Energie-efficiëntie | Efficiëntere droogtechnieken | Drogen is een veel voorkomend proces in de industrie, bijvoorbeeld bij de productie van voedingsmiddelen, papier, keramieken chemicaliën. Droogprocessen zijn energie-intensief. Industriële droogprocessen kunnen worden gegroepeerd naar directe drogers, indirecte drogers en overige processen. Gezien de veelheid aan droogtechnieken en toepassingen, is het niet mogelijk één specifieke technologie te noemen die het proces efficiënter maakt. |
| | Efficiëntere scheidingstechnieken | Er zijn veel technologieën om materialen te scheiden. Dat kan op basis van materiaaleigenschappen en aggregatietoestand. Betere scheidingstechnologieën leiden tot hogere productkwaliteit en grote besparingen in energie- en grondstoffenverbruik. Hieronder vallen onder andere nieuwe scheidingstechnieken zoals membraanscheiding, centrifuge, filteren, decanteren, extraheren. Scheidingstechnieken worden in veel sectoren toegepast, maar met name in de chemie, raffinage en voedingsindustrie. |
| | Efficiëntere staalproductie | Alternatieven voor het Hoogovenproces zijn elektrisch staal, direct reduced iron en smeltreductie. De laatste is voor Tata Steel het meest concrete alternatief op dit moment (HISama). Een proefabriek heeft een aantal jaar gedraaid bij Tata Steel in IJmuiden. De volgende stap in de ontwikkeling vindt nu in India plaats. HISama is een nieuw proces om ruwijzer te maken gebaseerd op de smeltreductie technologie. In vergelijking met conventionele ijzerproductie (het hoogovenproces), kunnen de cokesovens en de sinterfabrieken worden vermeden. Een ander verschil met de conventionele route is dat HISama een gas produceert met een hoge concentratie CO ₂ (boven de 85%). Dit maakt HISama uitermate geschikt voor afvang van CO ₂ . Het procesgas bevat geen stikstof omdat HISama werkt met zuurstof in plaats van lucht bij de hoogoven. |

⁴ Gebruikte bronnen zijn onder andere: Navigant (2019) - Verkenning uitbreiding SDE+ met industriële opties, Navigant (2019) – Quickscan alternatieve verwarmingstechnieken, Tata Steel (2017) – HISama: Game changes in the steel industry, PBL (2019) – diverse conceptadviezen.

| Categorie | Technologie | Beschrijving |
|----------------|---------------------------------------|--|
| Elektrificatie | Hergebruik industriële restwarmte | Uitkoppelen restwarmte uit hoge temperatuurprocessen en deze gebruiken om lagere temperatuurprocessen te verwarmen binnen dezelfde fabriek, vermindert de vraag naar primair energiegebruik. Deze vorm van warmte-integratie gebeurt al veel, maar er is nog potentieel voor verdere toepassing. De warmte kan ook worden ingezet bij een andere fabriek of in een andere sector, bijvoorbeeld de gebouwde omgeving. In het eerste geval leidt dit wel tot een vermindering van de emissies van de industrie, in het tweede geval niet. |
| | Procesintensificatie | Er zijn drie manieren van procesintensificatie: (1) het vervangen van processen door processen op basis van andere fysieke principes, leidend tot een efficiëntere omzetting; (2) het combineren van twee of meerdere functies in één apparaat, bijvoorbeeld reactieve destillatie; (3) de processen uitvoeren in microstructuren. Procesintensificatie kan leiden tot een efficiënter gebruik van energie en grondstoffen. Bovendien is het mogelijk de investeringskosten voor installaties omlaag te brengen. |
| | Overige energie-efficiëntie | Hieronder vallen alle energie-efficiëntie technieken die niet in één van de bovenstaande categorieën vallen. Aangezien we alternatieven in kaart brengen die directe emissies van de industrie omlaag brengen, zullen elektriciteitsbesparende technieken alleen als alternatief gelden als de elektriciteit on-site wordt opgewekt. In deze categorie vallen ook technieken die de efficiëntie van inzet van fossiele brandstoffen verhogen. |
| | Elektro-fornuis (voor kraakprocessen) | Fornuizen verhitten nafta (of gasolie) in aanwezigheid van stoom gedurende zeer korte tijd sterk, waardoor de in de voeding aanwezige hoogmoleculaire stoffen worden gekraakt. In een groot aantal stappen worden uit het kraakgas de hoofdproducten etheen en propaan verkregen, naast een flink aantal gasvormige bijproducten. Het merendeel van deze stappen bestaat uit destillatieprocessen. De warmte nodig voor het kraakproces wordt normaliter opgewekt door verbranding van fossiele (rest)gassen. In een elektro-fornuis wordt de warmte opgewekt met elektriciteit. Deze processen zijn momenteel in ontwikkeling. De verwachting is dat ze niet voor 2030 beschikbaar zullen zijn. Het toepassen van elektro-fornuizen heeft grote invloed op de energiehuishouding van de processen. Er moet bijvoorbeeld een alternatieve toepassing worden gevonden voor de restgassen die voor de ondervuring worden gebruikt. |
| | Elektrische boiler | Elektrische boilers produceren stoom en kunnen daardoor gasgestookte boilers (en WKK's) vervangen. De stoom kan dan voor diverse toepassingen worden gebruikt, bijvoorbeeld bij het contactdrogen van papier. |
| | Elektrische glasoven | Elektrische glasovens kunnen worden gebruikt voor het smeltproces in de glasindustrie, waarvoor temperaturen nodig zijn van boven de 1600 °C. Deze hoge temperaturen zijn nodig om het louterproces in gang te zetten, waarmee belletjes uit het glas worden verwijderd. Na het louteren wordt de temperatuur afgebouwd ten behoeve van het vormgeefproces. Afhankelijk van de toepassing daalt de temperatuur tot rond de 1100 °C. Glasovens zijn nu gasgestookt. |
| | Warmtepomp | Het werkingsprincipe van een warmtepomp is dat warmte bij een lage temperatuur wordt opgenomen en met een hoge temperatuur wordt afgegeven. Daarbij kan gebruik worden gemaakt van een vloeistof die bij lage temperatuur verdampt en bij hoge temperatuur condenseert. Het gehele proces van verdampen, comprimeren, condenseren en expanderen vormt een gesloten kringloop waar door middel van elektriciteit energie aan wordt toegevoegd. Op deze manier wordt de warmte opgewaardeerd. De efficiëntie waarmee dit gebeurt wordt uitgedrukt in de COP-waarde. |
| | Stoomrecompressie | Stoomrecompressie is een technologie die wordt gebruikt om restwarmte in de stoomcyclus te houden in plaats van wegkoelen via condensatie. Om deze restwarmte nuttig te kunnen gebruiken wordt deze middels een compressiestap weer op druk en temperatuur gebracht. Voor het aandrijven van de compressor is elektriciteit nodig, maar dat is een fractie van de teruggewonnen restwarmte. De efficiëntie waarmee dit gebeurt wordt uitgedrukt in de COP-waarde. |

| Categorie | Technologie | Beschrijving |
|-----------|--|--|
| CCU | Elektrisch verwarmen (inductie, microgolf, infrarood) | <p>Inductie: Elektrische stromen veroorzaken warmte door de weerstand in een metaal. De stromen kunnen worden opgewekt door een spanningsverschil of via inductie door een wisselend elektromagnetisch veld. Met deze warmte kunnen chemische processen worden uitgevoerd, zoals kraken en destillatie.</p> <p>Microgolf: Toepassingen van microgolf verwarming zijn gebaseerd op het laten trillen van elektrische dipolen in een medium. Door dit trillen ontstaat lokaal warmte. Via de frequentie van de straling is hoge selectiviteit te bereiken die relevant is in chemische processen. Microgolf kan worden ingezet voor zowel droog- als vermarmingsdoeleinden.</p> <p>Infrarood: Infrarood stralingspanelen zijn heel goed toepasbaar voor industriële processen waarbij warmte nodig is. Een groot voordeel van IR verwarming is dat er geen lange opstarttijden nodig zijn waardoor er ten opzichte van de conventionele droog- en verwarmingstechnieken een zeer grote tijdswinst gerealiseerd kan worden.</p> |
| | Indirecte elektrificatie: inzet groene waterstof voor verwarming | De technologie om warmte met waterstof te produceren is vergelijkbaar met warmteproductie met aardgas. Aangezien waterstof anders brandt dan aardgas is het nodig de branders aan te passen of te vervangen. Bovendien is er een waterstofinfrastructuur nodig om de waterstof te transporteren als het niet ter plekke wordt opgewekt. Warmteproductie met waterstof kan worden gebruikt als duurzaam alternatief voor de productie van hoge temperatuur warmte. Daarmee zou warmteproductie met waterstof conventionele warmteproductie met aardgas kunnen vervangen/verdringen. |
| | CO ₂ -mineralisatie | Bij mineralisatie wordt CO ₂ gebonden aan mineralen voor langere tijd of permanent. Belangrijkste voorbeelden zijn het harden van cement met CO ₂ en het produceren van aggregaat door middel van CO ₂ en industriële reststromen. Cement hardening met CO ₂ is het gebruiken van CO ₂ om calciumcarbonaat te vormen in cement. Dit kan gebruikelijke stoomhardening processen vervangen, versnelt het hardeningsproces en creert een permanente opslag van CO ₂ . Aggregaat kan geproduceerd worden door carbonaatmineralisatie: de reactie van CO ₂ met calcium of magnesiumoxide. Deze materialen komen in hogere concentraties voor in industriële reststromen zoals vlieg-as of bodemas van afvalverbrandingsinstallaties. |
| | Brandstoffen | Het produceren van brandstoffen door het omzetten van CO ₂ . Dit vereist veelal waterstof om CO ₂ om te zetten naar syngas (hydrogenering) maar CO ₂ kan ook met behulp van microorganismen of algen worden omgezet. De productie van benodigde waterstof maakt deze processen energie-intensief. Voorbeelden van brandstoffen die geproduceerd kunnen worden zijn diesel, kerosine, methanol en methaan. Doordat de CO ₂ vrijkomt na verbranding van het product en brandstoffen typisch geen lange levensduur hebben vormt deze categorie geen lange-termijn opslagvorm van CO ₂ . De categorie kan, onder de juiste omstandigheden, wel fossiele CO ₂ vermijden. |
| | Chemicaliën | Het produceren van chemicaliën door het omzetten van CO ₂ . Dit is een brede set aan technologieën die gebruik kunnen maken van biochemische processen, elektrochemische processen of meer conventionele chemie. Door de reductie van CO ₂ die nodig is voor de synthese van chemicaliën is vaak veel energie nodig. Dit kan in de vorm van elektriciteit, zonlicht of bijvoorbeeld waterstof (hydrogeneren) zijn. |
| Feedstock | Directe toepassing | CO ₂ vindt directe toepassing in veel verschillende sectoren. De belangrijkste is in voedselproductie. In Nederland is het bekendste voorbeeld het toevoeren van CO ₂ aan broeikasvenn. Daarnaast wordt CO ₂ in frisdrank en het brouwerijwezen gebruikt. CO ₂ wordt ook beperkt toegepast in het produceren van elektronica. |
| | Productie groene waterstof | Groene waterstof wordt geproduceerd door met elektrolyse water te splitsen in zuurstof en waterstof. Voor dit proces is veel elektriciteit nodig. Omdat het hier groene waterstof betreft, zal dit met duurzaam opgewekte elektriciteit moeten gebeuren. Waterstof is voor de industrie een interessante energiedrager, omdat het de mogelijkheid biedt het surplus aan duurzaam opgewekte elektriciteit op te slaan. |
| | Biomassa | In de industrie is duurzame biomassa op de lange termijn een oplossing als vervanger van grondstoffen die we nu uit aardolie en aardgas maken, zoals voor plastics. Als eerste stap worden er dan uit de biomassa grondstoffen voor de industrie gehaald. Het materiaal dat overblijft, kan dan als brandstof dienen om stroom mee op te wekken of als brandstof voor industriële processen waar veel hitte of energie voor nodig is. |

| Categorie | Technologie | Beschrijving |
|------------------|---------------------------------------|--|
| Duurzame energie | Bionafta | Nafta, een product uit de olieraffinage, is een belangrijke grondstof voor de petrochemische industrie in Nederland. In Nederland zijn drie bedrijven met in totaal vijf naftakrakers, die nafta omzetten in een high value chemicals zoals etheen, propyleen, butadien en aromaten. Fossiele nafta kan (gedeeltelijk) worden vervangen door nafta van biogene oorsprong. Bionafta kan worden geproduceerd door pyrolyse van biomassa – dit product wordt ook wel pyrolyse-olie genoemd. Pyrolyse olie wordt gehydrogeneerd om het geschikt te maken als feed voor de naftakraker. Dit kan bij de kraker zelf gebeuren, of bij de productie van de pyrolyse-olie. |
| | Bio-ethanol | Ethanol geproduceerd uit biomassa. Commercieel proces dat reeds op grote schaal wordt toegepast. |
| | Zon-PV en windenergie | Het inzetten van zon-PV en windenergie in de industrie vermindert de elektriciteitsvraag en reduceert daarmee indirecte CO ₂ -emissies vanuit de industrie. |
| | Geothermie | Het gebruik van geothermie in de industrie vermindert de warmtevraag en reduceert daarmee CO ₂ -emissies die anders zouden hebben plaatsgevonden bij het opwekken van warmte door de industrie zelf. |
| | Biomassa (biomassaketel, biogasketel) | Conversie van biomassa in andere energiedragers. Hiervoor zijn verschillende technieken beschikbaar. Valt al gedeeltelijk onder de SDE+. |
| Recycling | Mechanische recycling chemie | Het verwerken van kunststofafval tot secundaire grondstoffen. |
| | Chemische recycling chemie | Met chemische recycling wordt hier de productie van pyrolyse olie uit afvalplastics en vervolgens de inzet van pyrolyse olie in de naftakraker ter vervanging van fossiele nafta. Pyrolyse olie moet gehydrogeneerd worden voordat het kan worden toegepast in de naftakraker. Hiervoor is waterstof nodig, dat moet worden gekocht of gemaakt. In tegenstelling tot de inzet van bionafta worden bij de inzet van pyrolyse olie uit afvalplastics geen directe fossiele emissies (bij het kraakformuis) vermeden, maar wel indirecte fossiele emissies (bij de AVI) vermeden. De gedachte is dat door het sluiten van de kringloop er minder netto CO ₂ -emissies ontstaan bij chemische recycling. De efficiëntie van het pyrolyse proces is 75% (gerelateerd aan de energie-inhoud van het afval). |

4.2 Voorselectie van technische alternatieven

De potentiële technische alternatieven voor CCS uit bovenstaande tabel worden beoordeeld aan de hand van drie criteria (zie paragraaf 3.1). Het doel is dat alleen alternatieven die een vergelijkbare omvang, kostenniveau en snelheid van implementatie hebben als CCS worden geëvalueerd in het volgende hoofdstuk.

Tabel 3 geeft een inschatting van kosten per vermeden ton CO₂ voor elk van de alternatieven. Deze inschatting is gebaseerd op diverse openbare bronnen. Aangezien deze kosteninschatting nog een relatief grote onzekerheid kent en gebaseerd is op een aantal aannames, bijvoorbeeld over energieprijzen, hanteren we het begrip kosteneffectief ruim. We hanteren een bovengrens van €150/tCO₂ voor wat als een kosteneffectief alternatief kan worden beschouwd. Dit is boven het hoogste basisbedrag genoemd in het SDE++ conceptadvies.⁵

⁵ PBL, Conceptadvies SDE++ 2020, Juli 2019

Tabel 3. Ruwe inschatting van de kosteneffectiviteit van technische alternatieven⁶ op basis van literatuur⁷ ten behoeve van voorselectie.

| Technologie | Goedkoper CCS | Vergelijkbaar CCS | Duurder dan CCS |
|--------------------------------|---------------|-------------------|-----------------|
| Efficiënte staalproductie | x | | |
| Stoomrecompressie | x | | |
| Warmtepomp | x | | |
| Mechanische recycling chemie | x | | |
| Industriële restwarmte | x | x | |
| CO ₂ mineralisatie | x | x | |
| Zon-PV en Windenergie | x | x | |
| Biomassa als feedstock | x | x | |
| Biomassa inzet voor warmte | x | x | |
| Elektrische boiler | x | x | x |
| Groene waterstof als feedstock | x | x | x |
| Elektrische glasoven | | x | |
| Chemische recycling chemie | | x | |
| Geothermie | | x | x |
| Elektrofornuis voor kraken | | x | x |
| Chemicaliën (CCU) | | x | x |
| Brandstoffen (CCU) | | | x |
| Bionafta | | | x |
| Groene waterstof inzet warmte | | | x |

⁶ De volgende maatregelen zijn niet meegenomen in dit overzicht: efficiënte droogtechnieken, efficiënte scheidingstechnieken, procesintensificatie, overige energie-efficiëntie, elektrisch verwarmen (inductie, microgolf, infrarood), CCU directe toepassing, bio-ethanol. Voor deze maatregelen is de literatuur niet voldoende uitgebreid om tot een kosteneffectiviteitsmarge te komen. Mede hierom wordt voor deze technologieën in Tabel 4 altijd aangenomen dat de kosten lager of vergelijkbaar zijn met CCS.

⁷ Bestaande literatuurbronnen die zijn geraadpleegd in kader van dit onderzoek zijn onder andere: PBL (2019) - Conceptadvies SDE++ 2020 verbreding algemeen, Navigant (2018) - Verkenning uitbreiding SDE+ met industriële opties, Rijksoverheid (2018) - Kosten Energie- en Klimaattransitie in 2030 - Update 2018, VNCI (2018) - Chemistry for Climate: Acting on the need for speed.

Tabel 4 geeft de beoordeling van de technische alternatieven weer op de drie criteria: een vergelijkbare omvang, kostenniveau en snelheid van implementatie. Bij elk alternatief worden de overwegingen voor de beoordeling gegeven. De groen-gemarkeerde maatregelen zijn hierbij de alternatieven die door de voorselectie komen en in het volgende hoofdstuk worden beoordeeld.

Tabel 4. Beoordeling technische alternatieven ten behoeve van voorselectie.

| Categorie | Technologie | Overwegingen | Beïnvloedt de CO ₂ -bron? | Kosten lager of vergelijkbaar CCS? | Binnen 5 jaar beschikbaar? | Verder onderzoeken? |
|---------------------|-----------------------------------|---|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Energie-efficiëntie | Efficiëntere droogtechnieken | Vooral in de voedingsindustrie, waar geen concrete plannen zijn om CCS toe te passen. Droogtechnieken zijn daarmee geen alternatief voor CCS. | Nee | Ja | Ja | Nee |
| | Efficiëntere scheidingstechnieken | In de chemie is de energievoorziening van scheidingstechnieken (destillatie) sterk geïntegreerd. Het effect van toepassing van bijvoorbeeld membranen op het fossiele energiegebruik is daarmee afhankelijk van de lokale situatie. De CO ₂ -bron die beïnvloed wordt is die van verbrandingsgassen. Vaak gaat het om meerdere kleinere bronnen, minder of niet geschikt voor CCS ⁸ . | Nee | Ja | Ja | Nee |
| | Efficiëntere staalproductie | Het Hlsama proces past in de plannen van Tata om CO ₂ af te vangen, te gebruiken en op te slaan. Het proces zal naar verwachting niet op korte termijn worden geïmplementeerd in Nederland. Een aanvraag subsidieaanvraag zou wel binnen vijf jaar kunnen. De hoge concentratie CO ₂ in het procesgas maakt CCUS mogelijk, in plaats van dat het een alternatief is. | Ja | Ja | Nee | Ja |
| | Industriële restwarmte | Inzet van restwarmte kan ondervuring voorkomen. Kosten en potentieel hangen sterk af van de lokale situatie. In een beperkt aantal gevallen kan het een alternatief zijn voor CCS (post-combustion bronnen, lage CO ₂ -concentratie) | Ja | Ja | Ja | Ja |
| | Procesintensificatie | Procesintensificatie kan leiden tot energiebesparing en zou in enkele gevallen de CCS-bron kunnen beïnvloeden. | Ja | Ja | Ja | Ja |
| | Overige energie-efficiëntie | In het algemeen leveren overige industriële energie-efficiënte maatregelen vaak niet voldoende emissiereductie op om de inzet van CCS te ontmoedigen. | Nee | Ja | Ja | Nee |

⁸ Scheidingstechnieken kunnen pre-combustion CCS ook mogelijk maken. In de chemie kan CO₂ uit synthese gassen worden verwijderd, bijvoorbeeld met membranen of PSA. Dit is echter geen alternatief voor CCS, maar kan CCS juist mogelijk maken.

| Categorie | Technologie | Overwegingen | Beïnvloedt de CO ₂ -bron? | Kosten lager of vergelijkbaar CCS? | Binnen 5 jaar beschikbaar? | Verder onderzoeken? |
|----------------|--|--|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Elektrificatie | Elektro-fomuis (voor kraakprocessen) | De huidige warmteproductie in krakers vindt plaats middels gasgestookte kraakfomuisen. Deze zouden vervangen kunnen worden door elektrische fomuisen. Dit zou de CCS-bron sterk beïnvloeden. De technologie is nog vol in ontwikkeling en is niet beschikbaar binnen vijf jaar. | Ja | Ja | Nee | Nee |
| | Elektrische boiler | Elektrische boilers kunnen aardgasgestookte boilers vervangen. Aangezien koolstofafvang niet voor de hand ligt op afgassen van boilers, zullen ze de CCS bron slechts beperkt beïnvloeden. De kosten zijn met name OPEX gedreven (elektriciteitskosten). | Nee | Ja | Ja | Nee |
| | Elektrische glasoven | Elektrische glasovens zijn relatief duur in aanschaf omdat ze een kortere levensduur hebben dan gasgestookte ovens en duurer in gebruik omdat ze elektriciteit gebruiken. Bovendien zijn er geen CCS projecten voorzien in de glasindustrie, voor zover bekend. | Ja | Ja | Ja | Nee |
| | Warmtepomp | Huidige warmtepompen zijn vooral inzetbaar in het lage temperatuurgebied (tot 140 graden), waardoor ze geen concurrentie vormen voor CCS. Er zijn ook warmtepompen in ontwikkeling die tot veel hogere temperaturen komen, maar die zijn niet beschikbaar binnen vijf jaar. Warmtepompen kunnen ook worden ingezet in combinatie met industriële restwarmte. | Nee Ja | Ja | Ja Nee | Nee |
| | Stoomrecompressie | Stoomrecompressie resulteert in een lager energiegebruik. Afhankelijk van de omvang van de installatie en het toepassingsgebied, kan het van invloed zijn op de CCS-bron. Tot nu toe wordt stoomrecompressie vooral toegepast in de zuivel en petrochemie. In andere sectoren wordt de technologie (nog) niet of in mindere mate toegepast. | Ja | Ja | Ja | Ja |
| | Elektrisch verwarmen (inductie, microgolf, infrarood) | Deze technieken kunnen worden ingezet in droog- en warmteprocessen, maar vooral in niche-markten. Ookal verdringen ze inzet van aardgas, de impact op de CO ₂ emissie zal klein zijn. Bovendien is de verwachting dat het hier niet gaat om CO ₂ -bronnen die geschikt zijn voor CCS. | Ja | ? | Nee | Nee |
| | Indirecte elektrificatie: inzet groene waterstof voor verwarming | Groene waterstof is nu nog erg duur door de hoge e-prijzen de lage emissiereductie. Dit kan veranderen. Lijkt nu geen alternatief, maar dit is wel een relevant concurrent voor CCS op termijn. Omdat de projecties over kosten zeer sterk uiteenlopen, komt dit alternatief door de voorselectie als testcase. | Ja | Nee | Ja | Ja |

| Categorie | Technologie | Overwegingen | Beïnvloedt de CO ₂ -bron? | Kosten lager of vergelijkbaar CCS? | Binnen 5 jaar beschikbaar? | Verder uitzoeken? |
|------------------|--------------------------------|---|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| CCU | CO ₂ -mineralisatie | CCU is altijd in concurrentie met CCS, maar CCS kan een overgangstechnologie zijn. Dus het hoeft CCS niet uit te sluiten. De schaal van deze toepassingen wordt begrensd door beschikbaarheid van bepaalde afvalstromen (bodemas, vliegas, etc). Een typische mineralisatie plant gebruikt tientallen kilotonnen CO ₂ per jaar en staat CCS daarmee niet in de weg. Zolang CCU niet onder ETS valt, is het voor veel bedrijven niet aantrekkelijk. | Nee | Ja | Ja | Nee |
| | Brandstoffen | CCU is altijd in concurrentie met CCS, maar CCS kan een overgangstechnologie zijn. Dus het hoeft CCS niet uit te sluiten. De technologie voor het maken van brandstoffen is niet binnen vijf jaar beschikbaar en nog erg duur. | Ja | Nee | Nee | Nee |
| | Chemicaliën | CCU is altijd in concurrentie met CCS, maar CCS kan een overgangstechnologie zijn. Dus het hoeft CCS niet uit te sluiten. | Ja | Ja | Ja | Ja |
| | Directe toepassing | CCU is altijd in concurrentie met CCS, maar CCS kan een overgangstechnologie zijn. Dus het hoeft CCS niet uit te sluiten. Zolang CCU niet onder ETS valt, is het voor veel bedrijven niet aantrekkelijk. | Ja | Ja | Ja | Ja |
| Feedstocks | Productie groene waterstof | Zie boven bij indirecte electrificatie | Ja | Ja | Ja | Ja |
| | Biomassa | De inzet van biomassa, bionafta of bio-ethanol als feedstock in raffinage of krakers zorgt ervoor dat de afgassen die vaak ingezet worden voor ondervuring, biogeen worden. Maar dit sluit CCS niet uit; biogene CO ₂ en CCS zorgen voor negatieve emissies. Echter, negatieve emissies kunnen op dit moment onvoldoende verwaard worden, waardoor in de praktijk een bedrijf slechts één van beide maatregelen zal nemen. | Ja | Ja | Ja | Ja |
| | Bionafta | | Ja | Nee | Ja | Nee |
| | Bio-ethanol | | Nee | Ja | Ja | Nee |
| Duurzame energie | Zon-PV en windenergie | Duurzame elektriciteit kan de inzet van WKK's verdringen, wanneer voor de warmte andere bronnen worden gezocht. De vervanging van warmte bepaalt of er een alternatief voor CCS bestaat en wordt gedekt door andere hier beschreven technologieën. | Nee | Ja | Ja | Nee |
| | Geothermie | Conventionele geothermie is vooral inzetbaar in het lage temperatuur gebied (tot 130 graden), waardoor het geen concurrentie vormt voor CCS. Ultradiepe geothermie kan hogere temperatuur leveren maar de technische haalbaarheid is nog niet aangetoond. | Nee | Nee | Ja | Nee |

| Categorie | Technologie | Overwegingen | Beïnvloedt de CO ₂ -bron? | Kosten lager of vergelijkbaar CCS? | Binnen 5 jaar beschikbaar? | Verder uitzoeken? |
|-----------|--|--|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|-------------------|
| | Biomassa (biomassaketel, biogasformuis, biogasketel) | Biomassa en CCS gaat goed samen, resulteert in negatieve emissies. CCS mag dus de inzet van biomassa niet uitsluiten maar ook niet andersom. Echter, negatieve emissies kunnen op dit moment onvoldoende verwaard worden, waardoor in de praktijk een bedrijf slechts één van beide maatregelen zal nemen. | Ja | Ja | Ja | Ja |
| Recycling | Mechanische recycling chemie | Recycling zal vooral de downstream processen beïnvloeden, dus niet de naftakrakers direct. Kan wel zorgen voor een lagere doorzet en dus minder CO ₂ , maar dat is een secundair en langere termijn effect. | Nee | Ja | Ja | Nee |
| | Chemische recycling chemie | | Nee | Ja | Ja | Nee |

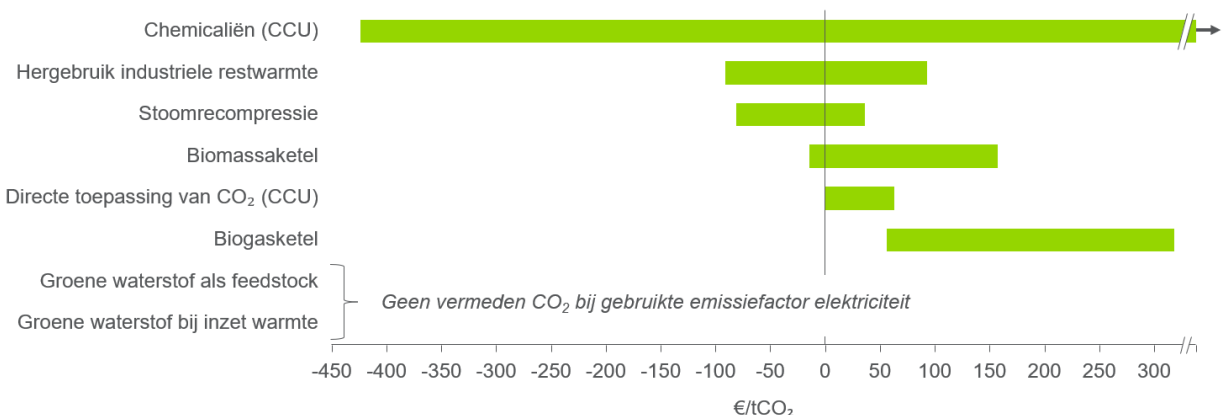
5. BEOORDELING RESTERENDE ALTERNATIEVEN

De alternatieve maatregelen voor CCS die over zijn gebleven na de voorselectie in het vorige hoofdstuk worden hieronder uitgebreider behandeld. De volgende maatregelen worden in de volgende paragrafen stuk voor stuk behandeld, aan de hand van de criteria die zijn vastgesteld in Tabel 1 in Sectie 3.3.

- Industriële restwarmte
- Procesintensificatie
- Stoomrecompressie
- Chemicaliën (CCU)
- Directe toepassingen van CO₂
- Groene waterstof als feedstock
- Groene waterstof inzet voor warmte
- Biomassa inzet voor warmte
- Alternatieve routes voor staalproductie

De bandbreedte van kosteneffectiviteit van deze maatregelen is ingeschat op basis van de parameters voor low, base en high case in Tabel 2. Het betreft hier de kosten die door een bedrijf gemaakt moeten worden.⁹ Er zijn wel indirecte CO₂-effecten buiten de poort van het bedrijf meegenomen, zoals door het gebruik van elektriciteit. Procesintensificatie is hierbij niet doorgerekend omdat de kosten te bedrijfsspecifiek zijn. Daarnaast zijn alternatieve routes voor staalproductie niet doorgerekend omdat de verwachting is dat deze categorie pas over minimaal tien jaar geïmplementeerd kan zijn (zie paragraaf 5.9).

Figuur 4. Kosteneffectiviteit o.b.v. gevoeligheidsanalyse van voorgeselecteerde maatregelen



Bron: Navigant analyse. Parameters voor gevoeligheidsanalyse te vinden in Tabel 2. Voor Chemicaliën (CCU) is slechts de meest kosteneffectieve technologie (polyolenproductie) maatgevend voor de minimale waarde; aangegeven bandbreedte hier is indicatie voor een grotere groep technologieën die niet zijn doorgerekend. Procesintensificatie en alternatieve routes voor staalproductie zijn niet doorgerekend.

⁹ De overweging hierbij is dat een bedrijf de afweging zal moeten maken tussen investeren in CCS of alternatieven daarop.

5.1 Industriële restwarmte

Deze categorie van maatregelen betreft het uitkoppelen restwarmte uit hoge temperatuurprocessen en deze gebruiken om lagere temperatuurprocessen te verwarmen binnen dezelfde fabriek. Dit vermindert de vraag naar primair energiegebruik. Deze vorm van warmte-integratie gebeurt al veel, maar er is nog potentieel voor verdere toepassing. De warmte kan ook worden ingezet bij een andere fabriek of in een andere sector, bijvoorbeeld de gebouwde omgeving. In het eerste geval leidt dit wel tot een vermindering van de emissies van de industrie, in het tweede geval niet.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Binnen 1 jaar

Het uitkoppelen van restwarmte gebeurt momenteel al en zou vanuit technisch oogpunt al op grotere schaal kunnen worden toegepast dan nu het geval is. De belangrijkste huidige barrières zijn daarom niet technisch, maar bijvoorbeeld financieel of kennisgericht. Investerings kunnen nog niet rendabel zijn voor betrokkenen partijen of afspraken die nodig zijn aangaande het uitkoppelen naar andere fabrieken of sectoren kosten tijd. Daarnaast is er niet altijd voldoende kennis of capaciteit binnen een bedrijf of industrieel cluster aanwezig om concrete stappen te zetten.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

Laag

Door het uitkoppelen van restwarmte is er minder warmteopwekking nodig elders in een fabrieksproces. Daardoor zou theoretisch gezien een grote CO₂-reductie behaald kunnen worden op de bron waarop anders CCS zou worden toegepast. In de praktijk is zijn diverse warmte-integratie projecten echter al gaande en is de omvang van CO₂-reductie door nieuwe projecten met betrekking tot het hergebruik van industriële restwarmte klein.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Hoge betrouwbaarheid.

Het hergebruik van industriële restwarmte is een maatregel welke nu al wordt toegepast in Nederland. De maatregel is technologisch gezien relatief eenvoudig en ontwikkeld in vergelijking met een aantal andere alternatieven. De exacte toepassing van warmte-integratie projecten zal locatie-specifiek zijn en verschillend per situatie, maar over het algemeen kan worden gesteld dat de technische mogelijkheden voor restwarmtebenutting betrouwbaar zijn.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Lage onzekerheid: 45 €/tCO₂

Omdat het hier om een bewezen technologie gaat is de onzekerheid in de kosteninschatting relatief laag. De onzekerheid bij industriële restwarmte heeft vooral te maken met dat warmte-integratieprojecten locatie- en bedrijfsspecifiek zijn en dat er afspraken gemaakt moeten worden tussen partijen wanneer warmte wordt uitgewisseld tussen bedrijven.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Lage onzekerheid: 44 €/tCO₂

De invloed van veranderende marktomstandigheden is relatief laag op de kosteneffectiviteit van industriële restwarmte. De gasprijs is de enige marktfactor die op dit alternatief van toepassing is, maar

een verandering hiervan heeft weinig effect heeft op de kosteneffectiviteit. Uit de KEV2019¹⁰ blijkt daarnaast dat de gasprijs niet dusdanig variabel is in de periode 2020 tot en met 2030.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Lage risico's

De risico's van het hergebruik van industriële restwarmte zijn relatief laag, vooral wanneer restwarmte wordt hergebruikt binnen hetzelfde bedrijf. De risicoperceptie vanuit het bedrijfs perspectief zou groter kunnen zijn wanneer er warmte-uitwisseling plaatsvindt tussen bedrijven, omdat partijen dan van elkaar afhankelijk zijn.

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

Er zijn geen andere omstandigheden bekend die implementatie in Nederland niet haalbaar maken.

Conclusie

Het hergebruik van industriële restwarmte is al een breed toegepaste maatregel in de industrie. Diverse barrières belemmeren echter de uitrol van een nog bredere toepassing in Nederland, waarbij een belangrijke factor de samenwerking is tussen bedrijven wanneer het warmte-uitkoppeling betreft tussen partijen. Voor een individueel bedrijf vormt het hergebruik van industriële restwarmte daarom in het algemeen geen alternatief voor CCS.

5.2 Procesintensificatie

Procesintensificatie (PI) is een containerbegrip voor een breed scala aan principes en daarop gebaseerde technologieën. De kern is dat op basis van nieuwe, radicaal innovatieve ideeën over het ontwerp van processen en apparatuur, de productie van materialen en goederen efficiënter wordt wat betreft energie- en grondstofgebruik, goedkoper, veiliger en beter¹¹.

PI kan worden bereikt door bijvoorbeeld twee processen die zich normaal in twee apparaten voltrekken, onder te brengen in één apparaat. Een andere manier van procesintensificatie is om een bepaalde hoeveelheid product te vervaardigen in een apparaat dat 10 tot 100 keer kleiner is dan gebruikelijk. Veelal is dit mogelijk door bijvoorbeeld te werken met onverdunde in plaats van sterk verdunde oplossingen of veel hogere temperaturen.

PI kan worden toegepast in een aantal industrieën, met name chemie (petrochemie, bulkchemie, fijnchemie) en voeding (voedingsingrediënten en consumentvoeding)

Er zijn ongeveer 90 PI technieken, waarvan 60% commercieel beschikbaar is.¹² Voorbeelden zijn de Spinning Disk Reactor – waarbij extreem hoge warmteoverdracht in een reactor kan worden verkregen, en de Divided Wall Column – een efficiëntere manier van scheiding dan destillatie. Volgens Akze blijft Nederland achter in de toepassing van PI, terwijl in andere landen veel PI technologieën al worden toegepast. De reden kan zijn de perceptie van het risico, met name op het gebied van veiligheid, van de Nederlandse chemische industrie.

¹⁰ PBL (2019). Klimaat- en energieverkenning 2019. Beschikbaar via: <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-klimaat-en-energieverkenning-2019-3508.pdf>

¹¹ European Roadmap for Process Intensification, Creative Energy, Energy Transition, 20XX

¹² Wereldwijde aandacht voor PI ontbreekt in Nederland, 20 jaar PIN NL: Voorzitter Henk Akse blikt terug en vooruit, NPT Procestechnologie, 25 februari 2019.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Binnen 5 - 7 jaar.

Het hele proces van besluitvorming tot ingebruikstelling van nieuwe reactoren duurt vele jaren. Eerst moeten een aantal studies worden uitgevoerd op het gebied van technische en economische haalbaarheid, milieuvergunningen, veiligheid etc. voordat er kan worden gewerkt aan een investeringsbeslissing. De engineering en bouw kosten dan ook nog enige tijd. Het hangt natuurlijk af van de complexiteit van de techniek, maar een minimale termijn van 5 jaar lijkt redelijk.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

Sterk afhankelijk van de PI-techniek.

De omvang van de CO₂-reductie hangt af van welk proces (of welke processen) wordt vervangen door het PI-proces, en hoe dit oude proces was geïntegreerd in de energiehuishouding van de plant. Een destillatiekolom in een petrochemische proces, bijvoorbeeld, is vaak in hoge mate geïntegreerd. Vervanging door bijvoorbeeld een Divided Wall Column zal tot energiebesparing leiden, maar de uiteindelijke invloed op de CO₂-bron voor CCS is moeilijk in te schatten.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Lage tot gemiddelde betrouwbaarheid.

Sommige PI-technieken zijn commercieel bewezen in bepaalde processen, andere hebben deze status nog niet bereikt. Voor alle industriële processen geldt dat de continuïteit van de bedrijfsvoering en de veiligheid bovenaan staan. Aanpassingen in het proces op commerciële schaal worden pas gedaan als ze volledig bewezen zijn in dat proces. Als dat niet het geval is, zal er op kleinere schaal (pilot) getest worden zonder dat de bedrijfsvoering in gevaar komt.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Hogere onzekerheid (geen kwantitatieve inschatting)

Sterk afhankelijk van de PI-techniek en de situatie. Leveranciers van commerciële technieken kunnen een goede kosteninschatting maken van de CAPEX. De kosten voor inpassing van de techniek in het proces zijn echter afhankelijk van de lokale situatie en kunnen alleen worden vastgesteld met een gedetailleerde engineeringstudie. Deze kosten kunnen oplopen tot enkele maken de CAPEX. De OPEX worden sterk beïnvloed door de efficiëntie-winst, die ook weer sterk afhangt van de lokale situatie.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Lage onzekerheid (geen kwantitatieve inschatting)

De belangrijkste marktomstandigheden die de rentabiliteit van commerciële PI-technieken beïnvloeden zijn de prijs van energie en van de koolstofheffing.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Hoge risico's

In Nederland worden de veiligheidsrisico's nog als hoog ingeschat. Volgens Akze kan dit te maken hebben met het feit dat de Nederlandse industrie een zeer goede trackrecord heeft op het gebied van veiligheid en een nieuwe techniek per definitie een veiligheidsrisico met zich meebrengt.¹⁰

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

Er zijn technieken die al commercieel worden toegepast in het buitenland, en worden geleverd door internationaal werkende bedrijven.

Conclusie

Procesintensificatie kan leiden tot energiebesparing in de chemische en voedindustrie. CCS wordt door enkelen chemische bedrijven overwogen. Toepassing van CCS zal zelden of nooit leiden tot een knelpunt voor de toepassing van PI, omdat het effect op de CO₂-bron voor CCS in de meeste gevallen klein zal zijn.¹³

5.3 Stoomrecompressie

Stoomrecompressie is een technologie die wordt gebruikt om restwarmte in de stoomcyclus te houden in plaats van te koelen via condensatie. Om deze restwarmte nuttig te kunnen gebruiken wordt deze middels een compressiestap weer op druk en temperatuur gebracht. Deze technologie is met name interessant voor bedrijven met een overschot aan lage druk stoom en een vraag naar stoom op een hogere druk. Stoom op een lagere druk (beneden 5 bar) is vanwege de lage temperatuur (onder de 150°C) moeilijk te gebruiken. Door recompressie van de stoom wordt weer een product met waarde gemaakt.

Voor het aandrijven van de compressor is elektriciteit nodig, maar dat is een fractie van de teruggewonnen restwarmte. De efficiëntie waarmee dit gebeurt wordt uitgedrukt in de COP-waarde. Voor stoomrecompressie kan een COP van 10 of zelfs meer worden bereikt.

Stoomrecompressie kan in sommige gevallen een terugverdientijd onder de 5 jaar opleveren. Bedrijven zouden in dat geval deze maatregel al moeten implementeren in het kader van de omgevingsvergunning, ongeacht of ze CCS overwegen of niet.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Binnen 5 jaar.

Stoomrecompressie is een volwassen technologie. De uitdagingen liggen met name bij de inpassing in het proces en de gevolgen voor de energiehuishouding. De economische haalbaarheid kan van geval tot geval sterk variëren.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

Relatief klein.

Stoomrecompressie zal de vraag naar primaire hoge-druk stoom terugdringen. Als deze stoom in een stoomketel wordt opgewekt, zal dit leiden tot een afname van de CO₂-emissie bij de verbrandingsgassen. Aangezien damprecompressie ook elektriciteit vraagt, moet worden gecorrigeerd voor de emissies bij de productie van elektriciteit.

Stoomrecompressie zal slechts een zeer beperkt effect hebben op de rentabiliteit van CCS. Dit komt doordat warmte in een grote plant van verschillende kleinere bronnen kan komen, die niet geschikt zijn voor CCS. Implementatie van CCS zal dus zelden of nooit een belemmering zijn voor stoomrecompressie.

¹³

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Hoge betrouwbaarheid

Stoomrecompressie is gebaseerd op bewezen technologie. De compressors een aandrijving die nodig zijn om de stoom op hogere druk te brengen, worden door vele leveranciers aangeboden. Bij toepassing in nieuwe processen, zal de technologie waarschijnlijk eerst via een pilot getest moeten worden.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Lage onzekerheid: < 10 €/tCO₂

Zoals gezegd zijn de kosten sterk afhankelijk van de situatie ter plaatse. De onzekerheid in kosten worden grotendeels bepaald door de kosten van uitkoppeling van warmte, de benodigde infrastructuur en integratie in het systeem. De onzekerheid in CAPEX voor de compressor is beperkt. De OPEX wordt gedomineerd door de elektriciteitskosten in verhouding tot de kosten van het opwekken van primaire stoom

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Gemiddelde onzekerheid: 51 €/tCO₂

De belangrijkste marktfactor is de prijs van elektriciteit ten opzichte van die van gas.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Lage risico's

De technische risico's zijn beperkt en goed te managen via standaard processen. Het is vooral een economische afweging.

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

Er zijn geen andere omstandigheden bekend die implementatie in Nederland niet haalbaar maken.

Conclusie

Stoomrecompressie zal slechts een zeer beperkt effect hebben op de rentabiliteit van CCS. Implementatie van CCS zal dus zelden of nooit een belemmering zijn voor stoomrecompressie. Bedrijven zijn bovendien al verplicht deze maatregel te nemen bij een terugverdientijd onder de 5 jaar, ongeacht plannen voor CCS. De maatregel zal zelden worden genomen alleen om de emissie van CO₂ terug te dringen, maar vooral vanwege de economische voordelen.

5.4 Chemicaliën (CCU)

Het produceren van chemicaliën door het omzetten van CO₂. Dit is een brede set aan technologieën die gebruik kunnen maken van biochemische processen, elektrochemische processen of meer conventionele chemie. Door de reductie van CO₂ die nodig is voor de synthese van chemicaliën is vaak veel energie nodig. Dit kan in de vorm van elektriciteit, zonlicht of bijvoorbeeld waterstof (hydrogeneren) zijn.

Doordat er onder deze noemer veel verschillende technologieën bestaan, zal per criterium kort weer worden gegeven welke technologieën het best scoren. Ieder criterium wordt beoordeeld volgens dit meest optimistische beeld. Dit betekent dat bij verschillende criteria telkens een andere individuele technologie wordt geëvalueerd.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Binnen 5 jaar in het beste geval.

Er bestaan volwassen CCU technologieën in deze categorie die relatief snel geïmplementeerd (in het meest optimistische scenario binnen vijf jaar) kunnen worden. Voorbeelden zijn het produceren van polyether carbonaat polyolen (PCP) of routes gebaseerd op synthetische methanol (methanol uit CO₂ en H₂), zoals Methanol-to-BTX (aromaten) of Methanol-to-Olefin (olefinen). Polyolen produceren uit CO₂ lijkt sterk op de conventionele route en zou daarom relatief snel geïmplementeerd kunnen worden. Dit ligt het meest voor de hand bij bestaande polyolenfabrieken zoals die van Shell, Huntsman of DuPont.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

In potentie tot 100%.

CCU technologieën voor het produceren van chemicaliën zijn in principe (technisch) ongelimiteerd in hoeveel CO₂ ze kunnen afvangen en verwerken. Er zijn echter wel praktische beperkingen door de benodigde hoeveelheid H₂ en de verwachte afzetmarkt. In het algemeen zijn de meest schaalbare technologieën (dat wil zeggen: technologieën met een grotere afzetmarkt) sterker afhankelijk van H₂ en minder verder in de ontwikkeling. Het is dus zeker niet zo dat alle CO₂ uit bronnen die geschikt zijn voor CCS ook voor CCU kunnen worden ingezet; de technologieën die het snelst te implementeren zijn kunnen deze schaal mogelijk niet op korte termijn leveren.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Gemiddelde betrouwbaarheid in het beste geval.

Er is weinig ervaring met deze categorie CCU toepassingen op industriële schaal, waardoor de betrouwbaarheid vaak nog onbekend is. Wel moet aangetekend worden dat sommige CCU processen, zoals de productie van polyolen, maar weinig verschillen van conventionele processen, wat de betrouwbaarheid vergroot.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Hogere onzekerheid: sterk afhankelijk van de gekozen technologie.

De onzekerheid in kosteninschatting door technologie-endogene factoren verschilt sterk per technologie. Voor de minder volwassen technologieën is deze uiteraard nog groot. Investeringskosten en variabel kosten, bijvoorbeeld, de kosten van katalysatoren beslaan nog een grote bandbreedte. Chemische routes die grotendeels gebruikmaken van bestaande technologie hebben dit minder, zoals routes gebaseerd op methanol.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Hogere onzekerheid: sterk afhankelijk van de gekozen technologie.

De invloed van de marktprijs van chemicaliën is van grote invloed op de business case van CCU. De kostprijs van CCU zal niet veranderen, maar de competitieve positie zeker. Daarnaast geldt dat veel routes gebruik maken van relatief grote hoeveelheden groene H₂, waarvan de kostprijs direct gekoppeld is aan elektriciteit.

Voor de kosteneffectiviteit van CCU is de toerekening van CO₂-reductie relevant. Op dit moment wordt CCU op industriële restgassen niet gezien als een emissiereductie onder ETS. De implicatie hiervan is dat wanneer CCS beschikbaar is als alternatief voor CCU, het hierdoor voor emittenten aantrekkelijker is om CCS toe te passen dan CCU – deze route van permanente CO₂ opslag wordt onder ETS immers wel als emissiereductie erkend. In afwachting van vernieuwde richtlijnen binnen ETS zullen ontvangers van CO₂ bereid moeten zijn voor deze derving te compenseren. Hoe hoger de CO₂ prijs, hoe hoger deze compensatie zal moeten zijn en hoe minder aantrekkelijk de CCU route wordt ten opzichte van CCS.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Gemiddelde risico's in het beste geval.

Routes die sterk lijken op conventionele routes, zoals de productie van polyolen, hebben vergelijkbare risico's met deze conventionele routes. Routes die grotere hoeveelheden H₂ of CO₂ nodig hebben zullen afhankelijk zijn van beschikbare infrastructuur om deze gassen te transporteren. Deze vereiste is er ook bij CCS.

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja.

Er zijn geen andere omstandigheden bekend die implementatie in Nederland niet haalbaar maken.

Conclusie

Chemicaliën produceren uit CO₂ kan een mogelijk alternatief zijn voor CCS. Omdat het een zeer diverse groep van technologieën betreft is meer onderzoek nodig om hier uitsluitsel over te geven. Sommige technologieën die snel te implementeren zijn vragen onvoldoende CO₂ om een alternatief te vormen op CCS en anders zijn de technologieën die dat wel doen vaak nog niet snel genoeg te implementeren.

Grootschalige afvang van CO₂ die nodig is voor CCS, is ook nodig voor CCU. In die zin wordt CCS door sommige partijen voorgesteld als een goede transitietechnologie. In afwachting van de grootschalige beschikbaarheid van CCU technologieën met een bewezen positieve impact op het klimaat, kan CCS alvast zorgen voor de beschikbaarheid van grote volumes relatief pure CO₂ en de infrastructuur om dit te transporteren. In deze redenering zal CCS CCU niet in de weg zitten, maar versterken. Feit blijft dat een moleculair CO₂ ofwel ondergronds opgeslagen kan worden, ofwel gebruikt worden voor een nieuw product.

CCS wordt wel genoemd als een opstapje voor CCU. De aangelegde infrastructuur, de vermindering van risico's en de verlaging van kosten door ontwikkeling in afvangtechniek, toezicht en handhavingbeleid kunnen meer CCU technieken immers sneller binnen bereik brengen. Tegelijk zullen CCS projecten, afhankelijk van de opbouw van contracten, vaak gekoppeld zijn aan langlopende contracten voor opslag. Als een partij eenmaal voor CCS heeft gekozen, kan het ook daarmee lang vast zitten aan een contract. De verwachting is dat deze zal zijn gekoppeld aan subsidiejaar; de verwachte duur voor de SDE++ voor CCS is 15 jaar. CCS als opstapje voor CCU kan dus in de praktijk lastig zijn vanwege financiële verplichtingen.

CO₂-reductie door CCU is soms minder eenvoudig te bepalen. Veel CCU routes om chemicaliën te produceren zorgen ervoor dat de gebruikte CO₂ uiteindelijk alsnog in de atmosfeer terecht komt. Bijvoorbeeld bij de verbranding van de producten in AVI's aan het einde van productlevensduur. Hoe Mede hierom wordt CCU vooralsnog onder ETS niet erkend als zijnde een CO₂-reducerende maatregel. In afwachting van vernieuwde richtlijnen binnen ETS zullen ontvangers van CO₂ bereid moeten zijn voor deze extra derving aan de kant van de emittenten te compenseren.

5.5 Directe toepassingen van CO₂

CO₂ vindt directe toepassing in veel verschillende sectoren. De belangrijkste is in voedselproductie. In Nederland is het bekendste voorbeeld het toevoeren van CO₂ aan broeikassen. Daarnaast wordt CO₂ in frisdrank en het brouwerijwezen gebruikt. CO₂ wordt ook beperkt toegepast in het produceren van elektronica. Tenzij anders aangegeven gaat deze paragraaf vooral over de kastuinbouw omdat daar de vraag naar CO₂ het grootst is.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Binnen 1 jaar.

Deze categorie van de toepassing van CO₂ in producten wordt al in Nederland toegepast op relatief grote schaal.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

In potentie tot 100%.

Bronnen van CO₂ die geschikt zijn voor CCS worden al ingezet voor directe toepassing van CO₂. Dit betref bronnen die al een zeer hoge concentratie CO₂ hebben zoals bijvoorbeeld in Chemelot (afvang bij OCI Nitrogen) voor de toepassing in frisdrank en in Rotterdam-Moerdijk voor de toepassing in broeikassen van het Westland (afvang bij Shell en Alco). De maximale behoefte naar CO₂ in de kastuinbouw ligt op 3 Mton in 2030.¹⁴ Hierbij moet aangemerkt worden dat deze CO₂ snel weer vrijkomt; uit de broeikas of na verteren van tuinbouwproducten. Het klimaatvoordeel van deze toepassing zit in het geval van toepassing in broeikassen in het vermijden van CO₂ uit ketels van tuinders. In de zomer, wanneer geen warmte nodig is, staan deze ketels toch aan om extra CO₂ in de kassen te brengen. De geprojecteerde CO₂-behoefte in 2030 ligt op een niveau van 67 tot 91% van de geprojecteerde CO₂-uitstoot in 2030 op basis van overeenkomstige scenario's, volgens dezelfde studie uit Wageningen. Dit betekent in het gunstigste geval dat 91% van de emissies in 2030 uit de tuinbouw vermeden kunnen worden door de toepassing van CO₂ uit de industrie. Het is echter waarschijnlijk dat daarvoor meer nodig is; de kastuinbouw heeft in de winter ook warmte nodig. Deze warmtebehoefte zal ook moeten worden gedecarboniseerd om de totale CO₂-uitstoot uit de kastuinbouw weg te nemen.

Het is technisch mogelijk om afgevangen CO₂ in de warmere maanden naar kassen te sturen en in koudere maanden ondergronds op te slaan. Dit kan echter wel betekenen dat de relatieve kosten voor offshore opslag stijgen: er kan immers maar de helft van het jaar gebruik worden gemaakt van deze voorzieningen, waardoor afschrijving verdisconteerd per opgeslagen ton CO₂ zal toenemen.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Hoge betrouwbaarheid.

Omdat deze categorie maatregelen al op grote schaal wordt toegepast is het een relatief betrouwbare maatregel; de bedrijfszekerheid is typisch hoog.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Lage onzekerheid: <10 €/tCO₂

De belangrijkste onzekerheid zit in de afvang- en comprimeerkosten van CO₂. CO₂ voor directe toepassingen wordt nu afgevangen bij installaties waar de concentratie al hoog is en de verdere verwerkingskosten dus relatief laag. Wanneer ook CO₂ uit meer diffuse bronnen wordt afgevangen bestaat er meer onzekerheid over de afvang- en inpaskosten.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Gemiddelde onzekerheid: afhankelijkheid van elektriciteitsprijs, gasprijs en ETS

Er is betrekkelijk weinig onzekerheid door veranderende marktomstandigheden op de kosten van dit type maatregelen. Bij de bestaande afvang bij hoge concentraties CO₂ zijn de afvangkosten beperkt en is er weinig externe invloed van bijvoorbeeld veranderende energiekosten.

Voor afnemers van CO₂ speelt er meer. De toepassing van CO₂ in de glastuinbouw is gevoelig voor de gasprijs. Hoe lager de gasprijs, hoe minder aantrekkelijk het extern betrekken van CO₂ wordt voor tuinders. Om kosten laag te houden kunnen tuinders dan beter hun eigen ketels inzetten. Het

¹⁴ N.J.A. van der Velden en P.X. Smit, 2019. *CO₂-behoefte glastuinbouw2030*. Wageningen, Wageningen Economic Research

omgekeerde geldt bij de elektriciteitsprijs. Hoe hoger de prijs waarop elektriciteit uit een WKK van een tuinder verkocht kan worden hoe aantrekkelijker het voor de tuinder wordt om de WKK inderdaad in te zetten ten koste van het innemen van externe CO₂.

Voor de kosteneffectiviteit van de directe toepassing van CO₂ is de boekhouding van CO₂-reductie relevant. Op dit moment wordt aan de toepassing van CCU, inclusief directe toepassing van CO₂, op industriële restgassen geen emissiereductie toegekend onder ETS. De implicatie hiervan is dat wanneer CCS beschikbaar is als alternatief voor CCU, het hierdoor voor emittenten relatief aantrekkelijker wordt om CCS toe te passen – deze route van permanente CO₂ opslag wordt onder ETS immers wel als emissiereductie erkend. In afwachting van vernieuwde richtlijnen binnen ETS zullen ontvangers van CO₂ bereid moeten zijn voor deze extra derving te compenseren. Hoe hoger de CO₂ prijs, hoe hoger deze compensatie zal moeten zijn en hoe minder aantrekkelijk de CCU route relatief wordt ten opzichte van CCS.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Lage risico's

Het gebruik van CO₂ vereist beschikbare infrastructuur om deze gassen te transporteren. Deze is voor een deel al beschikbaar (OCAP in Rotterdam beheert een CO₂ pijpleiding naar broeikassen). Deze vereiste is er ook bij CCS.

Inpassen van nieuwe CO₂-afvanginstallaties bij bronnen met een lagere CO₂ concentratie vereist het stilleggen van (een deel van) de installatie en voldoende beschikbaarheid van ruimte. Deze vereiste is er ook bij CCS.

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

Er zijn geen andere omstandigheden bekend die verdere implementatie in Nederland niet haalbaar maken.

Conclusie

Directe toepassing van CO₂ kan een mogelijk alternatief zijn voor CCS. Dit gebeurt nu al op enige schaal in Nederland.

Grootschalige afvang van CO₂ die nodig is voor CCS, is ook nodig voor de directe toepassing van CO₂. In die zin wordt CCS door sommige partijen voorgesteld als een goede transitietechnologie. In afwachting van de grootschalige directe afname van CO₂ met een bewezen positieve impact op het klimaat, kan CCS alvast zorgen voor de beschikbaarheid van grote volumes relatief pure CO₂ en de infrastructuur om dit te transporteren. In deze redenering zal CCS de toepassing van CO₂ elders niet in de weg zitten, maar versterken. Feit blijft dat een molecuul CO₂ ofwel ondergronds opgeslagen kan worden, ofwel gebruikt worden voor een nieuw product.

CCS wordt wel genoemd als een opstapje voor CCU. De aangelegde infrastructuur, de vermindering van risico's en de verlaging van kosten door ontwikkeling in afvangtechniek, toezicht en handhavingbeleid kunnen meer CCU technieken immers sneller binnen bereik brengen. Tegelijk zullen CCS projecten, afhankelijk van de opbouw van contracten, vaak gekoppeld zijn aan langlopende contracten voor opslag. Als een partij eenmaal voor CCS heeft gekozen, kan het ook daarmee lang vast zitten aan een contract. De verwachting is dat deze zal zijn gekoppeld aan subsidieduur; de verwachte duur voor de SDE++ voor CCS is 15 jaar. CCS als opstapje voor CCU kan dus in de praktijk lastig zijn vanwege financiële verplichtingen.

CO₂-reductie door CCU, inclusief de directe toepassing van CO₂, is soms minder eenvoudig te bepalen. Directe toepassing van CO₂ zorgt ervoor dat de gebruikte CO₂ relatief snel alsnog in de atmosfeer terecht komt, al is er (vaak) wel sprake van het vermijden van CO₂ emissie elders. Bij het invoeren van CO₂ in broeikasen wordt bijvoorbeeld vermeden dat hiervoor apart ketels worden ingezet door tuinders. Door deze complexiteit wordt CCU vooralsnog onder ETS niet erkend als zijnde een CO₂-reducerende maatregel. In afwachting van vernieuwde richtlijnen binnen ETS zullen ontvangers van CO₂ bereid moeten zijn voor deze extra derving aan de kant van de emittenten te compenseren.

5.6 Groene waterstof als feedstock

Groene waterstof wordt geproduceerd door met elektrolyse water te splitsen in zuurstof en waterstof. Voor dit proces is veel elektriciteit nodig. Omdat het hier groene waterstof betreft, zal dit met duurzaam opgewekte elektriciteit moeten gebeuren. Waterstof is voor de industrie een interessante energiedrager, omdat het de mogelijkheid biedt het surplus aan duurzaam opgewekte elektriciteit op te slaan.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Gerekend vanaf een investeringsbeslissing kost implementatie 4 tot 7 jaar in het meest optimistische scenario. Het is waarschijnlijker dat dit langer duurt.

Groene waterstof kan worden gebruikt in industriële processen waar het fossiele (grijze) waterstof vervangt. Met name voor productie van kunstmest en voor de chemische industrie kan groene waterstof direct worden gebruikt in plaats van grijze waterstof. Dit vergt geen implementatietijd. Het produceren van groene waterstof (elektrolyse) op deze schaal vergt dat wel. Elektrolyse kan, afhankelijk van de schaal, 4 jaar na een investeringsbeslissing worden geïmplementeerd. De aanname is dan dat er voldoende duurzame elektriciteit wordt opgewekt. Hierbij is ook geen tijd meegenomen voor verzwinging van het elektriciteitsnet; deze is locatieafhankelijk. Er kan aangenomen worden dat waterstof op deze schaal geproduceerd wordt op of dichtbij de plaats waar de elektriciteit wordt opgewekt.

Dat vereist wel de aanleg van waterstofinfrastructuur. Deze is goed te vergelijken met bestaande gasinfrastructuur en waterstofpijpleidingen zijn bestaande technologie. Het aanleggen van een nieuw waterstofnet kan een lang voortraject eisen door de benodigde vergunningen. Dit kost minimaal 3 jaar.

Hiermee komt de verwachte totale tijdlijn uit op 4-7 jaar, afhankelijk van hoeveel overlap er haalbaar is tussen aanvraag van vergunningen voor waterstofinfrastructuur en het nemen van de finale investeringsbeslissing voor het gehele project.

Deze schets van een implementatietijdlijn is optimistisch. Ter indicatie; H2.50 is een groene-waterstofproject waarvan de haalbaarheid wordt onderzocht door BP, Nouryon en Havenbedrijf Rotterdam.¹⁵ Dit betreft een elektrolyser van 250 MW die maximaal 45.000 ton H₂ per jaar kan produceren. De partners verwachten in 2022 een investeringsbeslissing te kunnen nemen. Implementatie volgt hierna.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

In potentie tot 100%.

Wanneer uitgegaan wordt van het scenario dat deze groene waterstof bestaande waterstofproductie vervangt, kan het tot 100% van de emissies van waterstofproductie-installaties vervangen. Dit kan alleen als de schaal van elektrolyse voldoende groot is. Dit maakt deze technologie in potentie extra relevant omdat de CCS projecten die het eerste zouden kunnen gaan draaien ook betrekking hebben op fossiele

¹⁵ <https://industrielinqs.nl/waterstofproject-bp-in-rotterdam-heeft-naam-h2-50/>

waterstofproductie. Er bestaan veel potentiële toepassingen van waterstof. Deze studie doet geen uitspraak over de beschikbaarheid van groene waterstof op systeemniveau.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Gemiddelde betrouwbaarheid.

Elektrolyse is een relatief goed schaalbare (modulaire) technologie. Echter, elektrolyse op de schaal die nodig is voor het vervangen van bestaande waterstofinstallaties bestaat nog nergens op de wereld. De grootste elektrolyser van Europa is 10 MW (Nouryon, Noorwegen) en in Delfzijl zijn verregaande plannen voor een 20 MW elektrolyser.^{16,17} Hoewel dit veelbelovende ontwikkelingen zijn, zijn deze installaties nog minstens een orde van grote kleiner dan nodig om bestaande waterstofinstallaties te vervangen.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Grote onzekerheid: niet kwantitatief te bepalen bij de gehanteerde emissiefactor voor elektriciteit

De onzekerheid van technologiekosten is erg groot bij elektrolyse. Inschattingen van investeringskosten verschillen sterk en ook de geschatte hoeveelheid vollasturen op jaarbasis hebben invloed op de kostprijs voor groene waterstof. Wanneer uitgegaan wordt van de verwachte gemiddelde marginale emissiefactor voor elektriciteit in 2030 zoals gedaan is in alle cases van deze gevoeligheidsanalyse, vermijdt deze route geen CO₂ en heeft daarmee een niet te bepalen kosteneffectiviteit.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Grote onzekerheid: niet kwantitatief te bepalen bij de gehanteerde emissiefactor voor elektriciteit

Dit is onder andere afhankelijk van onzekerheid in elektriciteitsprijzen en de verkoopprijs van waterstof en zuurstof. Doorslaggevende factor is de beschikbaarheid van additionele duurzame elektriciteit. Wanneer uitgegaan wordt van de verwachte gemiddelde marginale emissiefactor voor elektriciteit in 2030 zoals gedaan is in alle cases van deze gevoeligheidsanalyse, vermijdt deze route geen CO₂ en heeft daarmee een niet te bepalen kosteneffectiviteit.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Gemiddelde risico's

Wanneer waterstof eenmaal is geproduceerd, is de inzet ervan niet wezenlijk anders dan momenteel gebruikelijk is. De grote schaalvergroting die nodig is introduceert wel risico's doordat de schaalvergroting ook doorwerkt in de gehele keten van toeleveranciers. De hele waardeketen van toeleveranciers, producenten en afnemers ook steeds schaalessprongen moeten maken.¹⁶ Daarnaast moet er veel additionele capaciteit aan duurzame elektriciteitsopwekking beschikbaar zijn.

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

Er zijn geen andere omstandigheden bekend die deze technologie niet haalbaar maken.

Conclusie

Groene waterstof inzetten als feedstock kan veel CO₂ uit bestaande waterstofproductie vermijden wanneer er voldoende additionele duurzame elektriciteit beschikbaar komt. Elektrolyse is echter nog onvoldoende geschaald om deze potentie op korte termijn in te vullen. Wanneer uitgegaan wordt van de

¹⁶ <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/energietransitie-doet-veel-waterstof-opwaaien>

¹⁷ <https://www.nouryon.com/nl-nl/company/locations/netherlands/media-berichten/2019/nouryon-en-de-gasunie-onderzoeken-uitbreiding-van-groen-waterstofproject-voor-vliegtuigbrandstof/>

gemiddelde marginale emissiefactor voor elektriciteit in 2030 zoals gedaan is in alle cases van deze gevoeligheidsanalyse, vermijdt deze route geen CO₂.

5.7 Groene waterstof inzet voor warmte

De technologie om warmte met waterstof te produceren is vergelijkbaar met warmteproductie met aardgas. Aangezien waterstof anders brandt dan aardgas is het nodig de branders aan te passen of te vervangen. Bovendien is er een waterstofinfrastructuur nodig is om de waterstof te transporteren als het niet ter plekke wordt opgewekt. Warmteproductie met waterstof kan worden gebruikt als duurzaam alternatief voor de productie van hoge temperatuur warmte. Daarmee zou warmteproductie met waterstof conventionele warmteproductie met aardgas kunnen vervangen/verdringen. Deze inzet van groene waterstof is nu nog erg duur door de hoge elektriciteitsprijs. Dit kan veranderen. Het lijkt niet direct alternatief, maar dit is wel een relevante concurrent voor CCS op termijn. Omdat de projecties over kosten zeer sterk uiteenlopen, komt dit alternatief door de voorselectie als *testcase*.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

In 4 jaar in het meest optimistische scenario.

Het produceren van groene waterstof (elektrolyse) op deze schaal vergt tijd. Elektrolyse kan, afhankelijk van de schaal, in 4 jaar worden geïmplementeerd. De aanname is dan dat er voldoende duurzame elektriciteit wordt opgewekt. Hierbij is ook geen tijd meegenomen voor verzwaring van het elektriciteitsnet; deze is locatieafhankelijk. Er kan aangenomen worden dat waterstof op deze schaal geproduceerd wordt op of dichtbij de plaats waar de elektriciteit wordt opgewekt.

Dat vereist wel de aanleg van waterstofinfrastructuur. Deze is goed te vergelijken met bestaande gasinfrastructuur en waterstofpijpleidingen zijn bestaande technologie. Het aanleggen van een nieuw waterstofnet kan een lang voortraject eisen door de benodigde vergunningen. Dit kost minimaal 3 jaar.

Daarnaast moeten branders worden aangepast. Dit zou parallel met de implementatie van grootschalige elektrolyse kunnen worden uitgevoerd en vergt minder dan 4 jaar.

Hiermee komt de verwachte totale tijdlijn uit op 4-7 jaar, afhankelijk van hoeveel overlap er haalbaar is tussen aanvraag van vergunningen voor waterstofinfrastructuur en het nemen van de finale investeringsbeslissing voor het gehele project.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

In potentie tot 100%.

Wanneer uitgegaan wordt van het scenario dat deze groene waterstof bestaande waterstofproductie vervangt, kan het tot 100% van de emissies van waterstofproductie-installaties vervangen. Dit kan alleen als de schaal van elektrolyse voldoende groot is. Dit maakt deze technologie in potentie extra relevant omdat de CCS projecten die het eerste zouden kunnen gaan draaien ook betrekking hebben op fossiele waterstofproductie. Er bestaan veel potentiële toepassingen van waterstof. Deze studie doet geen uitspraak over de beschikbaarheid van groene waterstof op systeemniveau.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Gemiddelde betrouwbaarheid.

Elektrolyse is een relatief goed schaalbare (modulaire) technologie. Echter, elektrolyse op de schaal die nodig is voor het vervangen van bestaande waterstofinstallaties bestaat nog nergens op de wereld. De grootste elektrolyser van Europa is 10 MW (Nouryon, Noorwegen) en in Delfzijl zijn verregaande plannen

voor een 20 MW elektrolyser.^{18,19} Hoewel dit veelbelovende ontwikkelingen zijn, zijn deze installaties nog minstens een orde van grote kleiner dan nodig om bestaande waterstofinstallaties te vervangen.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Grote onzekerheid: niet kwantitatief te bepalen bij de gehanteerde emissiefactor voor elektriciteit

De onzekerheid van technologiekosten is erg groot bij elektrolyse. Dit werkt door in de kosten voor toepassing voor verwarming in industrie. Wanneer uitgegaan wordt van de verwachte gemiddelde marginale emissiefactor voor elektriciteit in 2030 zoals gedaan is in alle cases van deze gevoeligheidsanalyse, vermijdt deze route geen CO₂ en heeft daarmee een niet te bepalen kosteneffectiviteit.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Grote onzekerheid: niet kwantitatief te bepalen bij de gehanteerde emissiefactor voor elektriciteit

Dit is onder andere afhankelijk van onzekerheid in elektriciteitsprijzen en de verkoopprijs van waterstof en zuurstof. Doorslaggevende factor is de beschikbaarheid van additionele duurzame elektriciteit. Wanneer uitgegaan wordt van de verwachte gemiddelde marginale emissiefactor voor elektriciteit in 2030 zoals gedaan is in alle cases van deze gevoeligheidsanalyse, vermijdt deze route geen CO₂ en heeft daarmee een niet te bepalen kosteneffectiviteit

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Gemiddelde risico's

De inzet van waterstof als alternatieve brandstof vereist andere branders, maar hier ontstaan geen grote verwachte risico's. De grote schaalvergroting die nodig is voor elektrolyse introduceert wel risico's doordat de schaalvergroting ook doorwerkt in de gehele keten van toeleveranciers. De hele waardeketen van toeleveranciers, producenten en afnemers ook steeds schaalspongen moeten maken.¹⁶ Daarnaast moet er veel additionele capaciteit aan duurzame elektriciteitsopwekking beschikbaar zijn.

Voor productieprocessen waarbij de vlam het product beïnvloedt moet eerst worden onderzocht wat de impact is op de kwaliteit van het product. Dit is relevant voor bijvoorbeeld mineralogische processen. Dit vereist pilots die de implementatietijd voor dit type processen aanzienlijk kunnen verlengen.

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

Er zijn geen andere omstandigheden bekend die deze technologie niet haalbaar maken.

Conclusie

Groene waterstof inzetten voor verwarming kan veel CO₂ uit bestaande waterstofproductie vermijden. Elektrolyse is echter nog onvoldoende geschaald om deze potentie op korte termijn in te vullen. Wanneer uitgegaan wordt van de verwachte gemiddelde marginale emissiefactor voor elektriciteit in 2030 zoals gedaan is in alle cases van deze gevoeligheidsanalyse, vermijdt deze route geen CO₂.

¹⁸ <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/energietransitie-doet-veel-waterstof-opwaaien>

¹⁹ <https://www.nouryon.com/nl-nl/company/locations/netherlands/media-berichten/2019/nouryon-en-de-gasunie-onderzoeken-uitbreiding-van-groen-waterstofproject-voor-vliegtuigbrandstof/>

5.8 Biomassa inzet voor warmte

Conversie van biomassa in andere energiedragers. Hiervoor zijn verschillende technieken beschikbaar, waaronder de biomassaketel en biogasketel. Deze technologie valt al gedeeltelijk onder de SDE+.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Binnen 1 jaar.

Biomassa wordt in de industrie al breed ingezet om warmte mee op te wekken. Zowel biomassaketels als biogasketels zijn bewezen technologieën welke al tientallen jaren wordt toegepast.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

Laag

Biomassa en CCS gaat goed samen en de combinatie kan resulteren in negatieve emissies. CCS mag dus de inzet van biomassa niet uitsluiten maar ook niet andersom. Echter, negatieve emissies kunnen op dit moment onvoldoende verwaard worden omdat deze niet meetellen in het EU ETS systeem. Negatieve emissies zijn theoretisch en technisch gezien daarom wel mogelijk, maar de huidige regelgeving is hierop nog niet ingesteld. Hierdoor zullen bedrijven in de praktijk vooralsnog geneigd zijn om slechts één van beide maatregelen zal nemen, ofwel CCS danwel biomassa voor warmte.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Hoge betrouwbaarheid

De technologie heeft een zeer hoge betrouwbaarheid en is niet minder betrouwbaar dan bijvoorbeeld ondervering met aardgas. Hierdoor is het een zeer aantrekkelijke technologie voor industrie om te verduurzamen.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Gemiddelde onzekerheid: 54 €/tCO₂

De kosten voor het gebruik van biomassa zijn redelijk bekend binnen de industrie. Het effect van de aangenomen onzekerheid in investeringskosten maakt dat de totale endogene onzekerheid in kosten gemiddeld is.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Lage onzekerheid: 46 €/tCO₂

De veranderende marktomstandigheden betreffen hier voornamelijk de kosten voor de ingezette biomassa en de gasprijs. Een verandering van de prijs van biomassa heeft hierbij de grootste invloed op de kosteneffectiviteit. Over de afgelopen jaren is de biomassaprijs relatief stabiel gebleken. De kosteneffectiviteit zou wel kunnen stijgen in het komende decennium wanneer de vraag naar biomassa sterk toeneemt en er een krapte ontstaat op de biomassamarkt.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Hoge risico's

De inzet van biomassa voor warmteopwekking is een bewezen technologie. Er is daarom een laag technologisch risico voor deze technologie. Ook financieel gezien zijn de risico's relatief laag, omdat de brandstofkosten (de ingezette van biomassa) en investeringskosten welbekend zijn binnen de industrie en niet dusdanig meer zullen veranderen in de nabije toekomst dat de kosteneffectiviteit sterk zal veranderen. Er bestaat bij sommige partijen wel de perceptie dat er mogelijk onvoldoende duurzame biomassa beschikbaar zal zijn op termijn, waardoor investeringen in deze technologie in gevaar kunnen

komen. De IPCC noemt overigens een bandbreedte van 50-1000 EJ biomassa potentieel wereldwijd uit literatuur en komt tot de conclusie dat de meeste onderzoekers uitgaan van de beschikbaarheid van een duurzaam biomassa potentieel van 100 EJ.²⁰ Vertaald naar Nederland op basis van bevolkingsaantallen komt dit voor Nederland neer op 200 PJ in 2030. Ter vergelijking: in 2018 werd bijna 75 PJ aan biomassa ingezet voor productie van elektriciteit en warmte.²¹

Daarnaast is de publieke perceptie op deze vorm van duurzame brandstof een risicofactor. In de energiesector zijn plannen voor de inzet van biomassa al vaker onderwerp geweest van protest door omwonenden en andere belanghebbenden. Hierbij spelen onderwerpen als de uitstoot van fijnstof maar worden ook de duurzaamheid van de inzet van biomassa in het licht van klimaatverandering betwijfeld.^{22,23}

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

De technologie wordt al tientallen jaren in Nederland toegepast en valt als deels onder de SDE+ regeling. Er zijn geen omstandigheden bekend die verdere inzet van deze technologie niet haalbaar maken.

Conclusie

Biomassa-inzet voor warmte is een bewezen en breed toegepaste technologie binnen de industrie. In theorie zou het samen met CCS kunnen worden toegepast, hetgeen kan leiden tot negatieve emissies. In de praktijk worden beide technologieën echter veelal nog los van elkaar toegepast (en vormen het de facto nog alternatieven). De inzet van biomassa is niet onomstreden door dat partijen bang zijn voor de beperkte beschikbaarheid en door publieke oppositie.

5.9 Alternatieve routes voor staalproductie

De enige staalfabrikant in Nederland, Tata Steel Europe in IJmuiden, produceert nu staal via het hoogoven oxystaalproces. Hierbij wordt cokes gebruikt om ijzererts, in de vorm van pellets en sinter, te reduceren tot ruwijzer, dat vervolgens in de staalfabriek wordt omgezet in ruw staal. Het gas dat wordt geproduceerd in de hoogoven bevat CO₂ en wordt nu geleverd aan een elektriciteitscentrale van Vattenfall. De 4 Mton CO₂-emissies tellen mee bij de elektriciteitsproductie en niet bij de opgave van de industrie om de broeikasgasemissie terug te dringen.

Tata Steel overweegt CCS om deze emissie terug te dringen. Reductie van de emissie is essentieel voor Tata Steel, omdat de koolstofheffing een groot deel van de marge op de productie van staal teniet doet.

Tata Steel heeft andere mogelijkheden om de emissie van CO₂ terug te dringen. Deze vragen echter ingrijpende wijzigingen in het proces. Bovendien maken CCS en CCU integraal onderdeel uit van deze plannen. Tata Steel werkt met DOW aan een oplossing om CO uit procesgassen om te zetten in synthetische producten. Tata Steel ziet CCS als een tussenoplossing

Tata heeft een pilotplant waarin de reductie van ijzererts plaatsvindt in een gesmolten bad reactor. Het erts wordt op een hoge temperatuur vloeibaar gemaakt in een cycloon en dat druppelt dan op de bodem

²⁰ IPCC 2014, Working group III – Mitigation of climate change - Chapter 11 Agriculture Forestry and Other Land Use – Appendix Bioenergy

²¹ CBS Statline, Elektriciteit en warmte; productie en inzet naar Energiedrager, <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/80030ned/table?fromstatweb>

²² Zie ter illustratie: Tegenstanders biomassacentrale Diemen gaan naar de rechter, Het Parool, september 2019 <https://www.parool.nl/es-b6632f8a>

²³ Zie ter illustratie: Commentary by the European Academies' Science Advisory Council (EASAC) on Forest Bioenergy and Carbon Neutrality, juni 2018

van de reactor waar koelstofpoeder wordt geïnjecteerd. Dit proces heet HISarna. De voordelen zijn niet alleen lagere investeringskosten en een lager energiegebruik, maar ook dat HISarna een gas uitstoot met een zeer hoge concentratie CO₂. HISarna is daarmee uitermate geschikt voor CCS. De volgende fase in de ontwikkeling van HISarna vindt plaats in India. Dat neemt niet weg dat het proces in IJmuiden kan worden geïmplementeerd. Tata Steel overweegt op termijn (na 2030) een van de hoogovens uit gebruik te nemen en te vervangen door een HISarna installatie.

Een andere route om ijzererts te reduceren is via het Direct Reduced Iron (DRI) proces. Dit is een commercieel proces dat op enkele plaatsen in de wereld al tientallen jaren wordt toegepast. Daarbij wordt aardgas gebruikt als reductant en als energiedrager. DRI kan ook op waterstof draaien, maar daar is nog weinig ervaring mee. Momenteel wordt dit proces getest, of zijn er plannen daartoe, bij enkele staalbedrijven, onder meer SSAB in Zweden en ThyssenKrupp in Duitsland. Ook voor Tata Steel is DRI op waterstof, ter plekke geproduceerd met windenergie, een optie. Maar implementatie wordt niet verwacht voor 2040.

Het ijzer dat in de DRI wordt geproduceerd kan worden omgezet in staal in een Electric Arc Furnace (EAF). In een EAF wordt ijzer en schroot gesmolten met een elektrische boog en wordt chemie toegepast om de gewenste staalkwaliteit te krijgen.

Voor CCS werkt Tata Steel samen met Athos. Dit consortium is, onder meer, op zoek naar een geschikt opslagveld. De huidige verwachting is dat de opslag niet voor 2027 kan starten. Aangezien de opslag moet starten maximaal 5 jaar na de subsidietoekenning, heeft het geen zin voor Tata Steel eerder subsidie aan te vragen dan in 2022.

Wanneer kan het alternatief geïmplementeerd zijn?

Tussen 10 en 30 jaar.

Het alternatief zoals hierboven beschreven is een integrale visie op de staalproductie in IJmuiden. Realisatie hangt af van vele factoren, zoals de marktontwikkeling van staal, technologieontwikkelingen van bijvoorbeeld waterstof DRI en HISarna, beleidsontwikkelingen bijvoorbeeld over hoe de toepassing van CCU om producten te maken wordt gezien in koolstofbeprijzingsmechanismen.

Wat is de omvang van de CO₂ reductie door het alternatief op de bron waarop ook CCS zou kunnen worden toegepast?

In potentie tot 100%.

Op lange termijn (denk aan 2050) kan de integrale visie op staalproductie CCS volledig vermijden. Alle CO/CO₂ die dan geproduceerd wordt, kan dan worden omgezet in synthetische producten. Of dit ook leidt tot een volledige CO₂-reductie hangt sterk af van de producten die worden gemaakt, en welke internationale afspraken er worden gemaakt hoe deze reductie moet worden gezien over de levenscyclus.

Wat is de betrouwbaarheid van de maatregel?

Lage betrouwbaarheid.

Het gaat hier om innovatieve technieken die nog niet bewezen zijn om commerciële schaal. Niet apart en zeker nog niet gezamenlijk in een complex productieproces als een staalfabriek.

Wat is de onzekerheid in kosteninschatting van de maatregel?

Grote onzekerheid (geen kwantitatieve inschatting)

Gezien de vroege status van ontwikkeling is er nog geen goed gefundeerde inschatting te maken van de kosten.

Wat is de invloed van veranderende marktomstandigheden op de kostprijs van de maatregelen?

Grote onzekerheid (geen kwantitatieve inschatting)

De staalproductie verkeert wereldwijd in een crisis. Er heerst grote onzekerheid over hoe de markt zich gaat ontwikkelen. Dit is een slecht klimaat voor investeringen.

De kostprijs voor alternatieve staalproductie routes is sterk afhankelijk van de ontwikkeling van de prijs voor staal en schroot, elektriciteit, groene waterstof en voor de uitstoot van koolstof.

Wat is de perceptie van risico's door de industrie?

Hoge risico's

Is het alternatief haalbaar in Nederland?

Ja

Er is geen reden om aan te nemen dat de technieken in ontwikkeling op termijn niet beschikbaar zullen zijn in Nederland. HISarna wordt door Tata zelf ontwikkeld, waterstof DRI wordt door meerdere bedrijven onderzocht, Tata werkt al nauw samen met DOW aan de ontwikkeling van CCU.

Conclusie

Alhoewel er andere manieren om staal te maken in ontwikkeling zijn, zullen deze routes CCS niet in de weg staan. Integendeel, CCS valt goed te combineren met deze routes, en kan deze routes zelfs aantrekkelijker maken vanwege het vermijden van koolstofkosten.

Aangezien de alternatieve staalroutes niet op korte termijn beschikbaar zijn en CCS wel, kan geconcludeerd worden dat ze CCS niet blokkeren.

6. ANALYSE EN DISCUSSIE

In dit hoofdstuk worden de resultaten uit de beoordeling van de technische alternatieven voor CCS in voorgaande hoofdstukken geanalyseerd en van kanttekeningen voorzien.

De genoemde criteria kunnen helpen bepalen wat kosteneffectieve alternatieven voor CCS zijn.

- De uitwerking van het beoordelingskader voor alternatieven op CCS in deze studie laat zien dat er voor een industriële partij meer criteria zijn dan slechts kosteneffectiviteit om voor een bepaalde technologie te kiezen die emissies kan reduceren.
- Een zeef moet dus meer beoordelen dan kosteneffectiviteit alleen om te kunnen selecteren op CCS projecten waarvoor geen kosteneffectief *alternatief* bestaat.

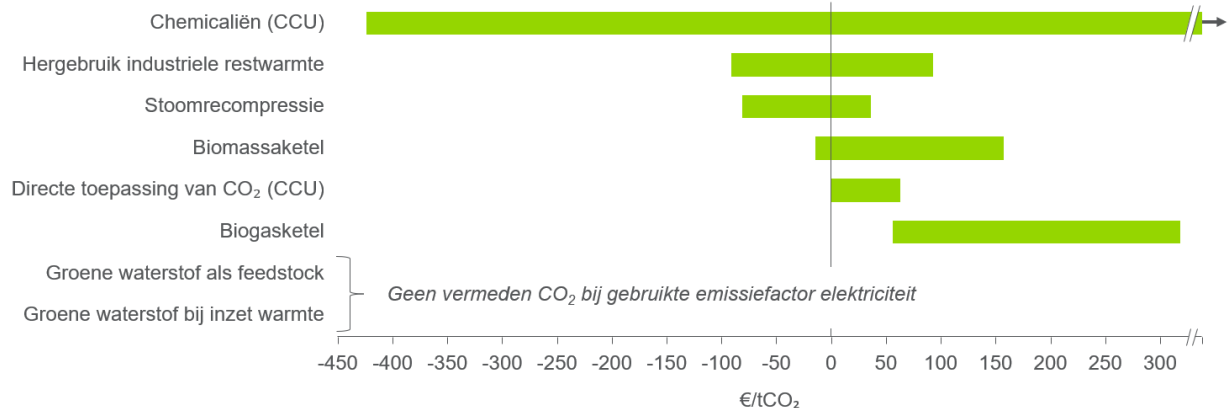
De inzet van biomassa voor warmte en de directe toepassing van CO₂ vormen een mogelijk alternatief op CCS in 2021, maar hun inzet komt met risico's.

- Biomassa-inzet voor warmte is een bewezen en breed toegepaste technologie binnen de industrie. De inzet van biomassa is echter niet onomstreden doordat sommige partijen (terecht of onterecht) bang zijn voor de beperkte beschikbaarheid en door publieke oppositie.
- De directe toepassing van CO₂ gebeurt nu al op enige schaal in Nederland. Directe toepassing van CO₂ zorgt ervoor dat de gebruikte CO₂ relatief snel alsnog in de atmosfeer terecht komt, al is er vaak wel sprake van het vermijden van CO₂ emissie elders. De verwachting is dat op dezelfde bron industriële bron van CO₂ CCS meer CO₂ kan vermijden dan directe toepassingen van CO₂.
- Alle andere onderzochte technologieën zijn op korte termijn geen alternatief voor CCS. Dit kan zijn omdat:
 - De geassocieerde CO₂ volumes te klein zijn;
 - De technologie nog niet snel genoeg op voldoende schaal te implementeren is;
 - De technologie nog te duur is;of door een combinatie van deze redenen.

De kostenanalyse is echter wel gevoelig voor onzekerheden in de inschatting van energieprijzen, technologie- en inpassingskosten en andere aannames.

- Figuur 5 geeft een gevoeligheidsanalyse voor de voorgeselecteerde alternatieven op CCS op basis van variatie in onderliggende parameters zoals uiteengezet in Tabel 2. Dit laat zien dat er zeker voor de minder volwassen technologieën grote onzekerheden bestaan.
- Een zeef die (mede) op kosteneffectiviteit selecteert is dus gevoelig voor onzekerheden in onderliggende parameters en aannames.

Figuur 5. Kosteneffectiviteit o.b.v. gevoeligheidsanalyse van voorgeselecteerde maatregelen



Bron: Navigant analyse. Parameters voor gevoeligheidsanalyse te vinden in Tabel 4. Voor Chemicaliën (CCU) is slechts de meest kosteneffectieve technologie (polyolenproductie) maatgevend voor de minimale waarde; aangegeven bandbreedte hier is indicatief voor een grotere groep technologieën die niet zijn doorgerekend. Procesintensificatie en alternatieve routes voor staalproductie zijn niet doorgerekend.

Op termijn kunnen meer technologieën een alternatief vormen voor CCS, waardoor een zeef relevanter kan worden.

- Door technologische ontwikkeling komen meer technologieën beschikbaar op voldoende schaal. Met name CCU routes die chemicaliën produceren zijn pas tegen het einde van 2030 of erna voldoende ontwikkeld om op schaal te kunnen toepassen.
- Technieken met een langere implementatietijd kunnen later in het komend decennium een grotere rol gaan spelen. Alternatieve routes voor staalproductie kunnen bijvoorbeeld pas over tien jaar een grote rol spelen in het verminderen van CO₂ emissies, waar deze technologie in de eerste helft van het decennium nog niet geïmplementeerd kan zijn.
- Al deze ontwikkelingen maken het inzetten van een zeef op termijn relevanter; er komen immers steeds meer kosteneffectieve alternatieven voor CCS beschikbaar.

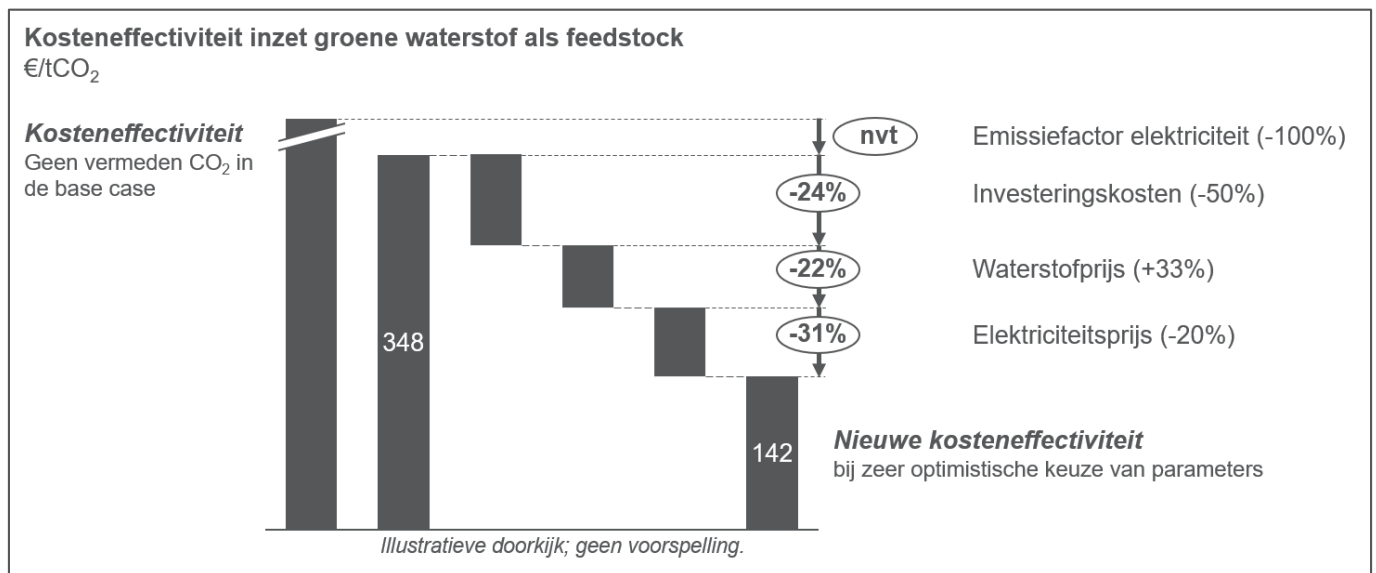
Door deze ontwikkeling in technologie en markt, kunnen alternatieven voor CCS nog binnen de subsidietermijn van bestaande CCS-projecten worden verdrongen. Dit kan wanneer het beoordelen van criteria gebeurt op het niveau van het jaar van aanvraag.

- Naar verwachting wordt subsidie vanuit de SDE++ voor een periode van 15 jaar verstrekt.
- Doordat binnen een termijn van 15 jaar meer technologieën een alternatief kunnen vormen op CCS, is het niet ondenkbaar dat er na toezegging van subsidie voor CCS toch technologieën beschikbaar komen die een alternatief hadden kunnen zijn.
- Figuur 6 laat ter illustratie de kostenreductie van de inzet van groene waterstof als feedstock zien onder steeds optimistischer aannames. De figuur laat zien dat, gerekend vanaf de base case kosteneffectiviteit maar uitgaand van volledig additionele duurzame elektriciteit (emissiefactor elektriciteitsproductie is dan nul) het niet volledig valt uit te sluiten dat de inzet van groene waterstof nog binnen deze termijn aanzienlijk goedkoper kan worden.
- Door te werken met betrouwbare projecties van de kostenontwikkeling van alternatieven op CCS kan het risico op verdringing van alternatieven worden verminderd. Echter, het werken met projecties van kostenontwikkeling in de zeef betekent dat de zeef het een bedrijf mogelijk niet

toestaat nu al emissies te reduceren middels CCS; het bedrijf moet immers wachten op het goedkoper worden van een alternatieve technologie. Hierbij ontstaat een risico dat de technologie niet of minder snel goedkoper wordt dan verwacht en de zeef dus mogelijk 'onterecht' een CCS subsidieaanvraag blokkeert, waarmee de klimaatdoelstelling voor 2030 in gevaar komt.

- De afweging om te werken met projecties bij de beoordeling van criteria op het jaar van aanvraag is dus een afweging tussen enerzijds een grotere kans hebben dat alternatieven niet worden verdrukt en anderzijds een grotere kans hebben dat de klimaatdoelstelling voor 2030 niet gehaald wordt.

Figuur 6. Afname van CO₂ vermijdingskosten door inzet groene waterstof als feedstock onder steeds optimistischer aannames



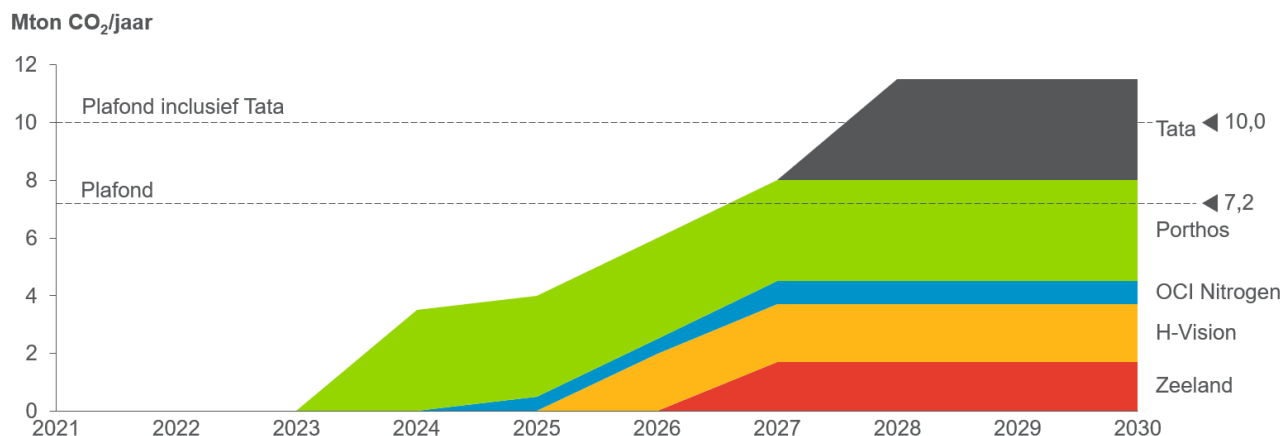
Bron: Navigant analyse. Base case parameters voor gevoeligheidsanalyse te vinden in Tabel 2 met een belangrijk verschil dat hier uitgegaan wordt van duurzame elektriciteit met een emissiefactor gelijk aan 0 kgCO₂/kWh. Navigant doet geen uitspraak over de waarschijnlijkheid van deze doorkijk.

De zeef is als aanvulling op het plafond nodig om te voorkomen dat alternatieven voor CCS worden verdrongen door CCS.

- Om te voorkomen dat de zeef als staatsteun kan fungeren (of als zodanig gezien kan worden) is het van belang om aan te tonen dat de zeef nodig is ter aanvulling van het reeds ingestelde plafond op CCS. Dit aantonen is nodig omdat de instelling van het plafond, net als het instellen van een zeef, reeds is gedaan op basis van het argument dat moet worden voorkomen dat duurzame alternatieven worden verdrukt door toepassing van CCS. Een Europese staatsteuntoets zal nagaan of het plafond alleen onvoldoende bescherming biedt om verdrinking van alternatieven te voorkomen.
- Figuur 7 laat een optimistisch ingroei-scenario zien van CCS projecten in Nederland. Dit laat zien dat het plafond in dit scenario bereikt wordt medio 2026. In dit scenario zal er mogelijk al sprake zijn van verdringing van alternatieven op CCS, vóórdat het plafond in werking treedt. Dat wil zeggen: voordat er niet langer aanvullende CCS projecten zullen worden toegekend binnen de SDE++ doordat het plafond bereikt is.

- Daarmee is niet gesteld dat er gegarandeerd alternatieven beschikbaar zijn voor CCS voordat het plafond bereikt is. Het is echter ook niet uitgesloten, waardoor de zeef als aanvulling zou kunnen fungeren op het plafond.
- Daarnaast kan de zeef additioneel op het plafond differentiëren tussen CCS projecten die wel alternatieven verdringen en projecten die dat niet doen, terwijl het plafond blind blijft voor deze verschillen.
- Een staatsteuntoets op de 'zeef' zal moeten aantonen dat het plafond alleen dit onvoldoende kan waarborgen dat verdrukking van alternatieven op CCS wordt voorkomen. Met deze observaties kan gesteld worden dat de zeef inderdaad nodig is als aanvulling op het plafond.

Figuur 7. Optimistisch ingroeienscenario van bekende CCS projecten in Nederland.



Bron: Navigant analyse. Appendix A geeft meer informatie per project. De emissiereductie door CCS op staalproductie (Tata) valt in de energiesector en wordt dus niet tot het plafond van de industrie gerekend.

APPENDIX A. CO₂-AFVANG PROJECTONTWIKKELING IN NEDERLAND

| Sector | Project | CO ₂ afvang per jaar (in MtCO ₂) | Start project | Beschrijving | Bron |
|---------------|--------------|---|---------------|--|-------------------------------|
| Staal | Tata Steel | 4 | 2027 | Tata Steel is van plan CO ₂ uit de hoogovengassen te halen middels een water-gas shift en amine wasstap. Een deel van de gassen (~0,5 Mt) zal worden ingezet om met Dow nafta van te produceren. | a |
| Chemie | Porthos | 2-5 | 2023 | Porthos, wat primair een infrastructureel project is voor een CO ₂ hub, zal naar verwachting gebruikt worden door verschillende industriële spelers uit de Rotterdamse haven actief in waterstofproductie en petrochemische industrie. | Deltalings |
| | OCI Nitrogen | 0,5-0,8 | 2024 | OCI heeft in totaal circa 0,8 Mt zuivere CO ₂ beschikbaar (waarvan 0,3 Mt nog tot 2026 op basis van een overeenkomst geleverd wordt aan een frisdrank industrie). Plan is om dit per boot naar Rotterdam te verscheppen, moeilijkheid is wel dat dit vloeibare CO ₂ is. | TKI Industrie |
| | H-vision | 2 > | 2025 | Dit project voorstel voorziet de bouw van nieuwe waterstofinstallaties op basis van aardgas en CCS met een productiecapaciteit van 700 kton H ₂ . Het voorstel kent verschillende CO ₂ afvang scenario's variërend van 2 tot 10 MtCO ₂ , deze laatste neemt ook aan dat energiecentrales overschakelen op H ₂ brandstof. Het 2 Mt scenario kijkt alleen naar raffinaderijen. Na 2030 kan dit verder opschalen. | Deltalings |
| | Alco Energy | 0,25 | 2017 | Deze bio-ethanolfabriek levert momenteel samen met Shell via | OCAP |

| OCAP 500 ktCO ₂ per jaar aan tuinders. | | | | | |
|---|----------------------|------|-----------|--|-----------------------------------|
| | Shell | 0,25 | 2017 | Shell vangt gemiddeld 0,25 MtCO ₂ af per jaar van hun waterstof productie-unit (o.b.v. gasification). Dit wordt echter allemaal in de zomermaanden geleverd, dus met een capaciteit van 0,5 Mt. | OCAP |
| | Zeeland CCS | 1,7 | 2025-2030 | Zeeland Refinery en Yara kunnen momenteel 1,7 MtCO ₂ leveren, wat kan groeien naar 3,1 in 2040. | TKI Industrie |
| Waste-to-Energy | AVR Duiven/Rozenburg | 0,36 | 2019 | In Duiven wordt momenteel 60 ktCO ₂ afgevangen voor de glastuinbouw. Momenteel wordt gekeken of hetzelfde gedaan kan worden in de Rozenburg installatie, die vijf keer groter is (~300 kton). | AVR |
| | AEB Amsterdam | 0,45 | 2027 | In het kader van het Athos project sluit mogelijk AEB ook aan. CO ₂ zou voornamelijk ingezet worden voor de glastuinbouw in samenwerking met OCAP. | Port of Amsterdam |
| | Twence | 0,1 | 2014 | Momenteel vangt Twence 4 kton CO ₂ af voor de productie van natriumbicarbonaat maar wil dit opschalen naar 100 kton per jaar. | Twence |
| | HVC | 0,08 | 2018 | HVC vangt momenteel 75 kton CO ₂ af uit haar bio-energiecentrale voor de glastuinbouw à €87,50/tCO ₂ . | HVC |