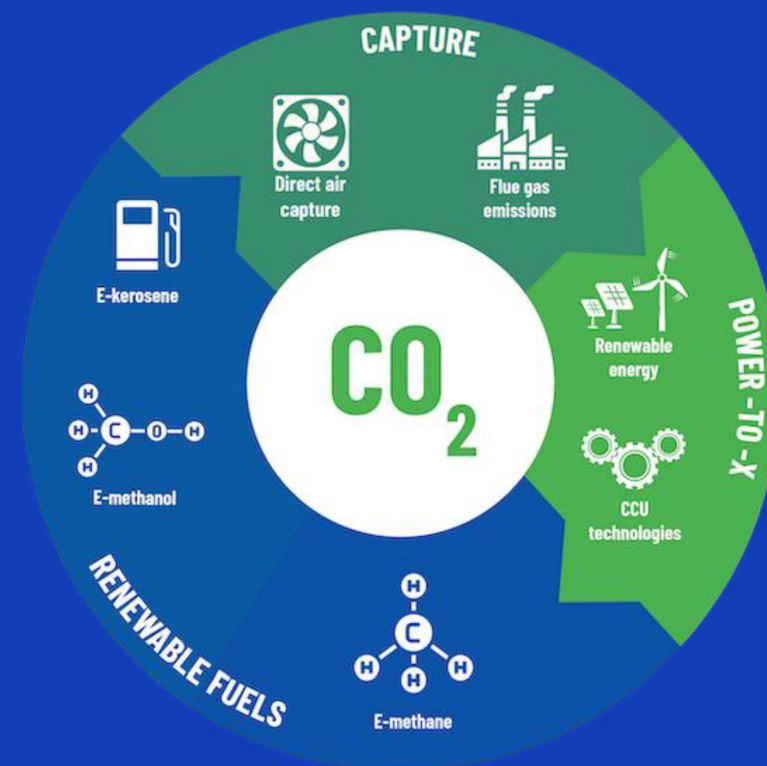


Quickscan CCU

Analyse van kansrijke routes van Carbon Capture & Utilisation voor Nederland

TNO 2025 R11963

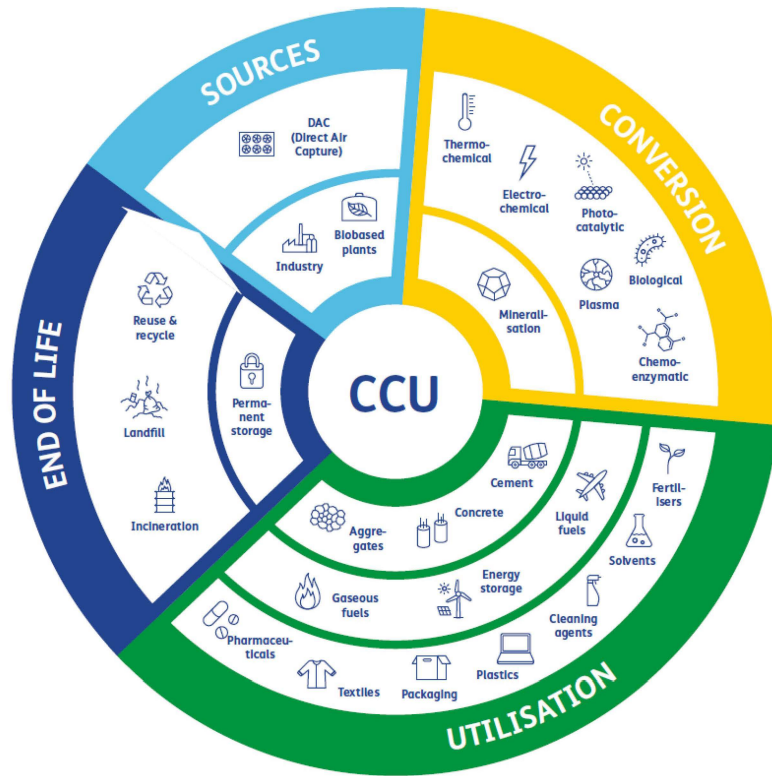
September 2025



Projectteam: Nicole van Klaveren (projectleider), Benjamin Schoemaker, Rebecca Dowling

Deze studie is tot stand gekomen in nauwe samenwerking met het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (Mark Schmets), ChemistryNL (Peter Berben) en FutureCarbonNL (Martijn de Graaff).

Inhoudsopgave



Afbeelding: CO₂ Value Europe (2024)

1. Inleiding	p. 3
2. Huidige staat van CCU landschap in Nederland	p. 7
3. Stakeholderanalyse	p. 10
4. Kansrijke CCU-routes voor Nederland	p. 13
5. Conclusies en aanbevelingen	p. 17
Bijlagen	p. 21
Bronnenlijst	p. 31

1.1 Context & aanleiding: De noodzaak van een koolstoftransitie in de industrie

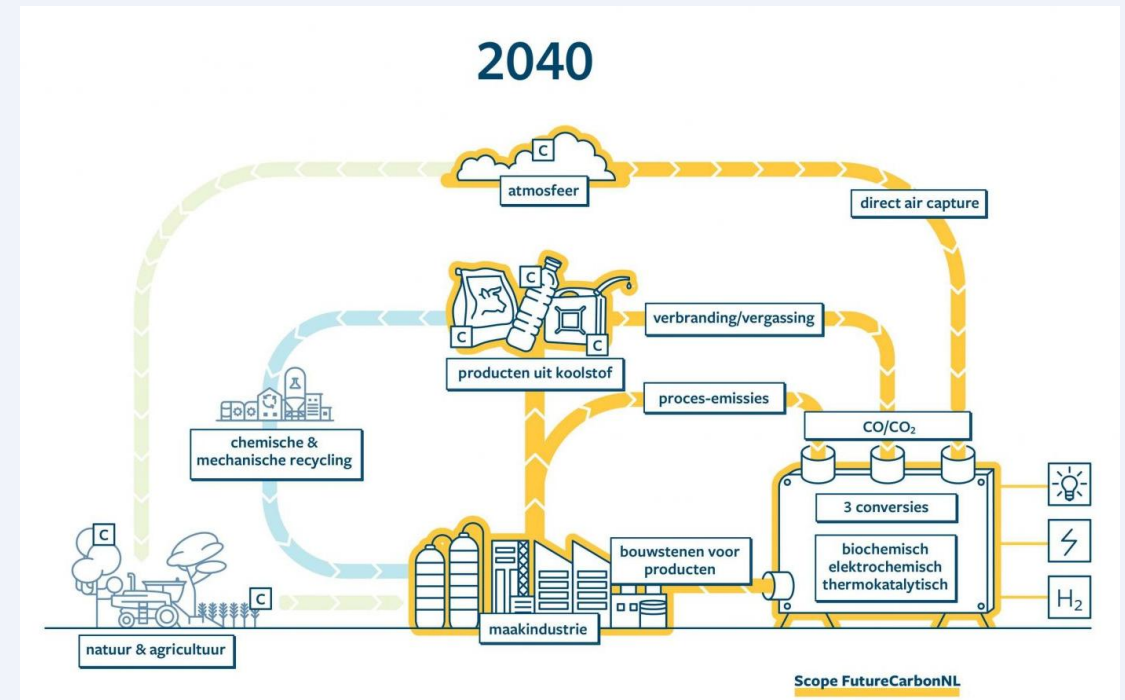
De Nederlandse industrie staat voor de opgave om klimaatneutraal te worden in 2050, een doelstelling die in de wet is vastgelegd. In 2030 dient de industrie al 67% CO₂-reductie ten opzichte van 1990 te bereiken. Daarnaast heeft Nederland de ambitie in 2050 een circulaire economie te hebben; een economie waarin “zoveel mogelijk duurzame hernieuwbare grondstoffen worden gebruikt, producten en grondstoffen worden hergebruikt en nauwelijks afval bestaat” (Rijksoverheid, n.d.).

Koolstof zal een belangrijke rol blijven spelen. Op de langere termijn met name voor de productie van materialen. Momenteel draait de industrie nog grotendeels op de inzet van fossiele koolstoffen. Om aan de doelstelling van klimaatneutraliteit te voldoen, zal de industrie moeten omschakelen naar alternatieve, niet-fossiele koolstofbronnen. Om daarnaast circulair te worden, is het van belang dat koolstoffen ook uit afval worden teruggewonnen. Op deze manier worden koolstofkringlopen gesloten, dit wordt ook wel de koolstoftransitie genoemd.

Er wordt algemeen aangenomen dat voor de koolstoftransitie van de chemie/materialen- en brandstoffensector drie routes een rol zullen spelen :

1. Biograndstoffen
2. Recyclaat (uit afval)
3. CO₂ (via carbon capture and utilization, CCU)

CCU kan het gebruik van fossiele grondstoffen terugdringen en een bijdrage leveren aan CO₂ reductie (net zero) en circulariteit.



Illustratie van het sluiten van koolstofkringlopen in de koolstoftransitie. Bron: FCNL (2023)

1.2 Motivatie: Waarom nu een CCU-innovatieagenda nodig is

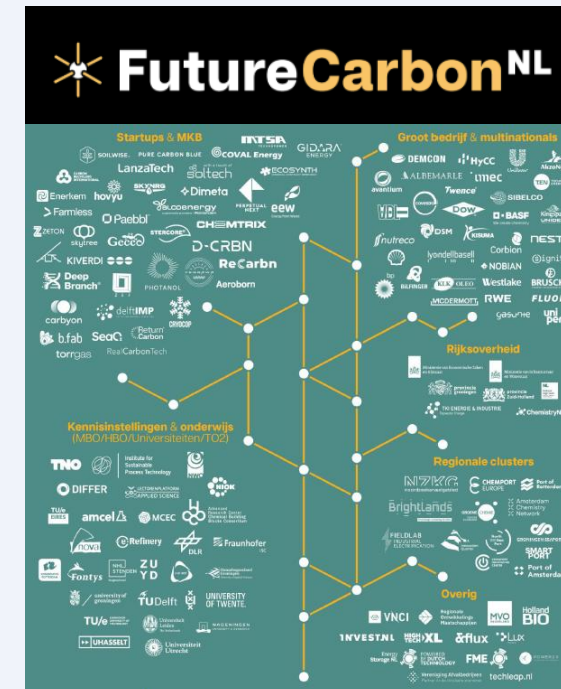
Knelpunten CCU: Er liggen nog de nodige uitdagingen en knelpunten met betrekking tot de verdere ontwikkeling van CCU in Nederland.

- Coördinatie tussen verschillende organisaties: er zijn veel lopende initiatieven, maar het veld is versnipperd.
- Er is budget nodig voor onderzoek, ontwikkeling en demonstratie om technologieën in een volgend stadium te brengen.
- De business case is nog niet aantrekkelijk, vergeleken met fossiele en andere duurzame alternatieven.
- CCU is afhankelijk van de ontwikkeling van infrastructuur, elektriciteitsnetuitbreidingen, het waterstofnetwerk en CO₂-pijpleidingen.

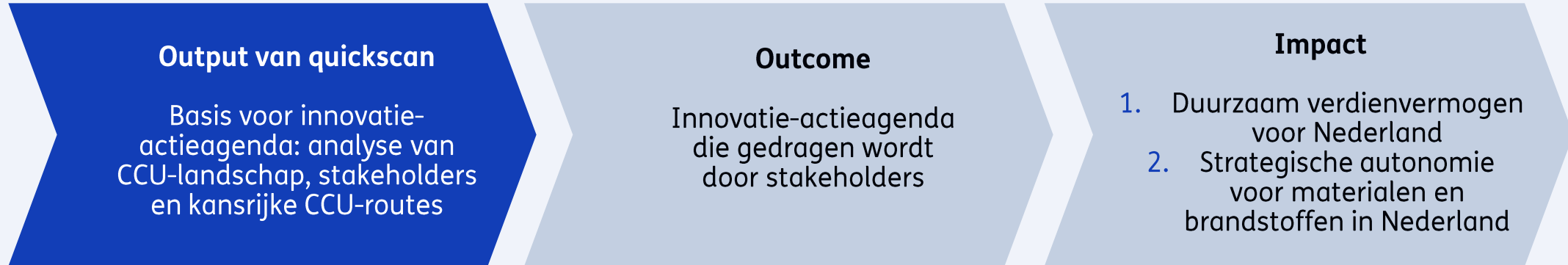
Voor CCU is er via FutureCarbonNL (FCNL) al een basis gelegd voor een agenda en programma, maar enige vorm van coördinatie op CCU in Nederland is, vanwege het uitvallen van nieuwe rondes in het Nationaal Groeifonds, stil komen te liggen. Daardoor ontbreekt nu de versnelling die nodig is in de ontwikkeling van CCU, terwijl CCU (onder andere qua TRL) minder ver ontwikkeld is dan de biograndstoffen- en recyclaat-routes.

Een CCU-innovatieagenda is nodig om:

- Prioriteiten te stellen
- Initiatieven te verbinden
- Opschaling van CCU-technologieën te versnellen



1.3 Doel & afbakening: Wat beoogt deze quickscan te bereiken?



Doel: Deze quickscan moet gezien worden als een opmaat naar een innovatie-actieagenda rondom CCU. Deze actieagenda is nodig om CCU in Nederland te ontwikkelen en draagt zo bij aan het ontwikkelen van duurzaam verdienenvermogen voor Nederland en strategische autonomie op het gebied van duurzame materialen en brandstoffen. Daarnaast draagt CCU ook bij aan het behalen van CO₂-reductiedoelstellingen.

Elementen van deze studie:

Huidige staat van het CCU-landschap in Nederland

Stakeholderanalyse

Identificatie van kansrijke CCU-routes voor Nederland*

* Vanwege de twee geïdentificeerde impactdoelen van CCU, onderscheiden we kansrijke routes voor technologieontwikkeling en –export (duurzaam verdienenvermogen) enerzijds en toepassing in Nederland (strategische autonomie) anderzijds.

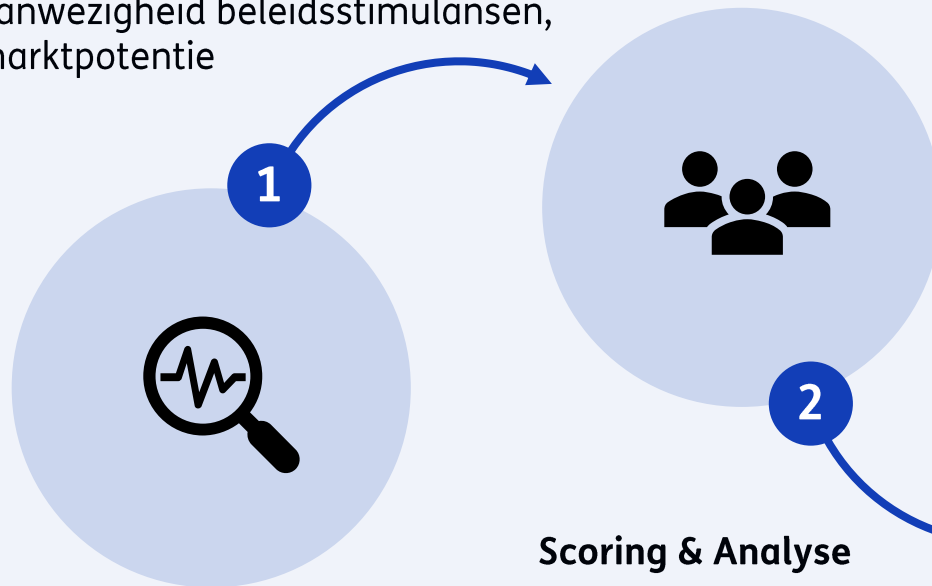
Afbakening:

- We bestuderen CCU “an sich” en maken geen vergelijking van CCU-routes ten opzichte van andere bronnen voor duurzame koolstof: biogroundstoffen of recycalaat.
- We maken een vergelijking op basis van de CO₂-conversiestap.

1.4 Methodologie: Van technologie-longlist naar strategische shortlist

Longlist CCU-routes

- Gebaseerd op literatuuronderzoek en expertinput
- Selectiecriteria: TRL, energiebehoefte, aanwezigheid stakeholders in Nederland, aanwezigheid beleidsstimulansen, marktpotentie

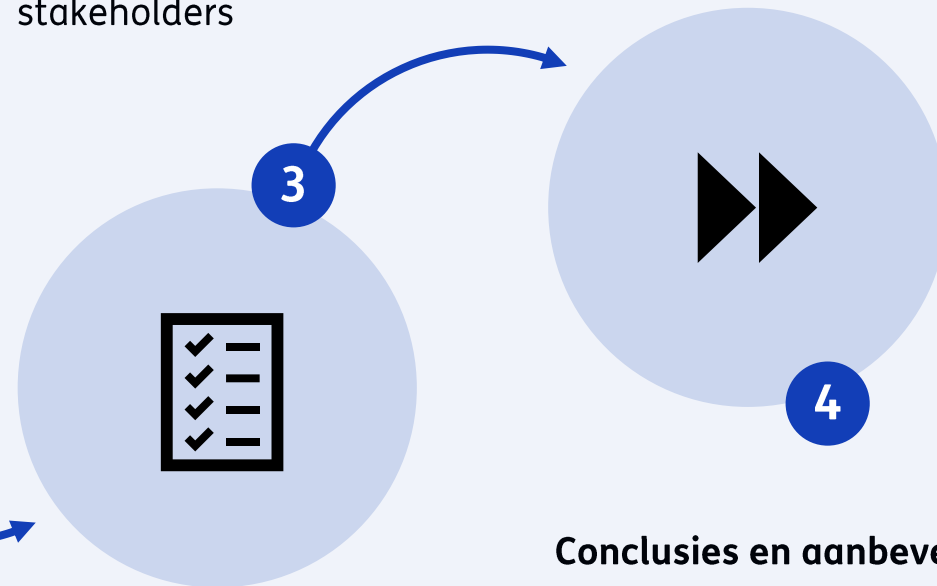


Scoring & Analyse

Kwalitatieve scoring van technologie longlist op basis van literatuur review

Shortlists CCU-routes

- Selectie van routes op basis van uitkomst scoring
- Toetsing van selectie aan de hand van gesprekken met stakeholders



Conclusies en aanbevelingen

- Kansrijke CCU-routes voor Nederland
- Kansen en barrières per route

2.1 De rol van CCU in Nederland

Momenteel werken de ministeries van IenW en KGG aan een visie op duurzame koolstof (publicatie volgt in najaar 2025), ondersteund door een scenario studie (Tauw, 2025) en een expertadvies (Akerboom, et.al, 2025). TNO heeft reeds een visie gepubliceerd op circulaire koolstof (TNO, 2025), in samenwerking met onder andere VNCI, VEMOBIN en een analyse van de invloed van energieprijzen op de competitiviteit van CCU in NL tov andere (buur)landen. Daarnaast voorspellen TNO's energiesysteem scenario's ADAPT en TRANSFORM (TNO, 2024) de inzet van CCU, binnen een bepaalde bandbreedte. Al deze stukken **erkennen CCU als een noodzakelijke route** binnen de bredere transitie naar klimaat neutrale en circulaire productie van chemicaliën en brandstoffen, naast andere routes gebaseerd op biograndstoffen en afvalstromen.

Echter, er zijn in bovenstaande stukken **grote verschillen wat betreft de snelheid en schaal** waarop CCU een significante rol kan spelen in Nederland richting 2050. Deze onenigheid zien we ook terug in de internationale literatuur. In hun analyse van 16 toekomstscenario's constateert Renewable Carbon Initiative (2024) een hoge heterogeniteit in energiesysteemscenario's: sommige modellen laten CCU nauwelijks van de grond komen, terwijl andere het als dominante grondstof zien.

De belangrijkste **kansen** voor CCU ontwikkeling in Nederland:

- **Geografisch voordeel:** geïntegreerde industriële clusters (ARRRA-regio), korte afstanden, nabijheid van zeehavens.
- **Sterke kennis- en innovatiebasis** op gebied van katalyse, elektrochemie en procestechnologie (universiteiten, onderzoeksinstituten, startups).
- **Europese markttoegang en exportpotentieel** voor CO₂-gebaseerde brandstoffen en chemicaliën.
- **Beschikbaarheid van CO₂-puntbronnen** met hoge concentraties en bestaande CCS-infrastructuur als basis.

De belangrijkste **barrières** voor CCU ontwikkeling in Nederland:

- **Hoge energiebehoefte** ten opzichte van alternatieve routes op basis van biograndstoffen en recycalaat. Afhankelijkheid van (schaarse) duurzame elektriciteit en waterstof. In Nederland zijn energiekosten relatief hoog ten opzichte van Europa en de wereld, wat de Nederlandse concurrentiepositie voor CCU verzwakt.
- **Ruimtegebrek** in Nederland, o.a. in industriële clusters en havengebieden.
- Zeer beperkte **marktvraag** en stimulering vooralsnog alleen voor toepassing in brandstoffen
- **Faciliteiten**, inclusief nutsvoorzieningen en milieuruimte (regelgeving), om te kunnen experimenteren en op te schalen.
- **Concurrentie om CO₂ bronnen** met CO₂ afvang en opslag (CCS) en koolstof verwijdering (CDR).

2.2 Relevante beleidsinstrumenten voor CCU

Europese beleidsinstrumenten



Europese kaders, zoals de **Industrial Carbon Management Strategy** en de **Net-Zero Industry Act** erkennen CCU als een belangrijke technologie voor industriële decarbonisatie. Daarnaast onderkent de **Clean Industrial Deal** het belang van CCU voor de vervaardiging van meerdere producten. Uit deze deal zal eind 2025 de **EU Industrial Decarbonisation Accelerator Act** volgen, die verduurzaming van de Europese energie-intensieve industrie moet stimuleren, hand in hand met een grotere concurrentiekracht. (Europese Commissie, 2025a, b, c; Carbon Gap, 2025).

Ook wordt CCU in het **European Chemicals Industry Action Plan** (juli 2025) genoemd als “fundamentele *net-zero*-technologie voor het reduceren van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen en het vergroten van de weerbaarheid van Europese industrieën” (Europese Commissie, 2025d). De Commissie kondigt in dit plan onder meer aan te kijken naar hoe tijdelijk afgevangen CO₂ (bijvoorbeeld in CCU-brandstoffen) het best kan worden beloond.

Binnen Europees beleid bestaan al mandaten die het gebruik van CO₂ als grondstof stimuleren voor de productie van **brandstoffen**. Dit betreft:

- **Renewable Energy Directive III**: minimaal 1% RFNBO (hernieuwbare brandstoffen van niet-biologische oorsprong) in 2030.
- **ReFuelEU Aviation**: Verplichte inzet van duurzame vliegtuigbrandstoffen (SAF), met subtargets voor e-SAF: 0,7% in 2030, oplopend naar 35% in 2050.
- **FuelEU Maritime**: Doelstellingen voor verlaging van emissie-intensiteit (–2% in 2025 → –80% in 2050) in scheepvaart. Subtarget van 2% RFNBO vanaf 2034 als ondergrens niet gehaald wordt.

Voor **materialen** zijn er nog geen vergelijkbare mandaten.

Nederlandse beleidsinstrumenten



In Nederland worden de Europese instrumenten vertaald naar nationaal beleid. Daarnaast zijn er nationale instrumenten die de ontwikkeling van CCU stimuleren.

- Het **Nationaal Plan Energiesysteem** (2023) zet in op het “maximaal ontsluiten van het aanbod aan duurzame koolstofdragers” en voorziet een substantiële rol voor CCU. Het voorziet echter nog niet in concrete uitwerking.
- Eind 2025 wordt het **Actieplan Aanbod Duurzame Koolstofdragers** verwacht, dat dient om “om het aanbod aan duurzame koolstofdragers op te schalen en de leveringszekerheid zo goed mogelijk te borgen” (MinKGG, 2024).
- Het innovatiethema Circulaire Economie (TKI Groene Chemie & Circulariteit) stimuleert samenwerking tussen bedrijven, kennisinstellingen en overheden om innovaties te ontwikkelen. CCU maakt onderdeel uit van de **Kennis- en innovatieagenda Chemie en Materialen** (najaar 2025 verwacht) die onder het thema Circulaire Economie is verankerd. Ook in het **Meerjarige Missiegedreven Innovatie Programma 6 Grondstoffen en producten voor circulariteit van koolstof (MMIP6)** heeft CCU een plek onder het innovatiethema Energie en Klimaat. TKI Groene Chemie & Circulariteit is verantwoordelijk voor MMIP6. In deze innovatieagenda’s zijn doelen gesteld met betrekking tot CCU. Innovatieopgaven betreffen o.a. CO₂-zuivering, het opschalen van waardeketens voor bouwmaterialen en platformchemicaliën en het realiseren van benodigde randvoorwaarden voor de realisatie van duurzame waardeketens. In **instrumenten zoals MOOI, DEI+, EKOO en VEKI** kunnen aanvragen worden ingediend voor onderzoek, demonstratie en opschaling van CCU technieken.
- In de Stimuleringsregeling Duurzame Energieproductie en Klimaattransitie (**SDE++**) is nog nauwelijks een plek voor CCU. Alleen direct gebruik van CO₂ in de glastuinbouw kan momenteel rekenen op subsidie binnen de SDE++.

2.3 Het belang van CO₂-afvangtechnologieën: DAC en DOC

Deze quickscan gaat over CO₂ conversietechnologieën. Hoewel CO₂-afvangtechnologieën buiten de scope van de analyse vallen, erkennen we het belang van deze technologieën om CO₂ uit verschillende bronnen beschikbaar te maken voor CCU.

De herkomst van CO₂ is van belang: op korte termijn staat de overheid nog toe om geconcentreerde CO₂ uit fossiele puntbronnen (*Point Source Carbon Capture* of PSCC) te gebruiken, maar op langere termijn is het streven om zoveel mogelijk niet-fossiele CO₂ te benutten (MinIenW & MinKGG, 2024). Dit kan ófwel biogene CO₂ zijn óf CO₂ uit de atmosfeer en zeewater. Biogene CO₂ kan worden afgevangen bij productie-installaties voor biograndstoffen en biobrandstoffen (PBL, 2024). *Direct air capture* (DAC) en *direct ocean capture* (DOC) zijn technologieën die CO₂ afvangen uit respectievelijk de atmosfeer en zeewater. Daarmee wordt het mogelijk om netto-CO₂ neutrale of zelfs negatieve emissie CCU-ketens te realiseren, mits aangedreven door hernieuwbare elektriciteit. Zowel DAC als DOC kennen nog belangrijke uitdagingen, zoals hoge energievraag en ruimtegebruik, wat in de Nederlandse context een knelpunt kan vormen. Vanwege hoge kosten wordt in energiesysteemstudies van PBL (2024) en TNO (2024) tot 2050 geen of een zeer beperkte rol voor DAC voorzien, en is de CO₂ voor CCU routes vooral afkomstig van biogene puntbronnen. (DOC is in deze studies niet meegenomen.)

- **DAC** maakt gebruik van chemische of fysische processen om CO₂ uit de atmosfeer te halen (met een concentratie van ~420 ppm). Het huidige Technology Readiness Level (TRL) van DAC ligt wereldwijd tussen 3 en 8, afhankelijk van het type technologie (Bisotti et al, 2024). Partijen als Climeworks, Global Thermostat en Carbon Engineering hebben de meest volwassen technologie. In Nederland werken startups Skytree, Carbyon en Zero Emission Fuels aan DAC-technologie.
- **DOC** haalt CO₂ uit zeewater met elektrochemische processen (zuur of basisch). De technologie heeft potentie, aangezien de concentratie van CO₂ in zeewater ongeveer 140 keer hoger is dan in de atmosfeer (Li et al, 2025). DOC bevindt zich in een vroeger ontwikkelstadium dan DAC (Karunarathne et al, 2025). In Nederland werken startups SeaO2 en Brineworks aan DOC-technologie.

3.1 Stakeholderanalyse: doel en aanpak

Doel. Deze quickscan vormt een eerste stap richting een gedragen innovatie-actieagenda voor CCU in Nederland. Deze agenda kan alleen gevormd worden in samenwerking met de belangrijkste spelers in het CCU-veld. Om erachter te komen wie de belangrijkste spelers zijn hebben we een analyse van het stakeholderveld uitgevoerd.

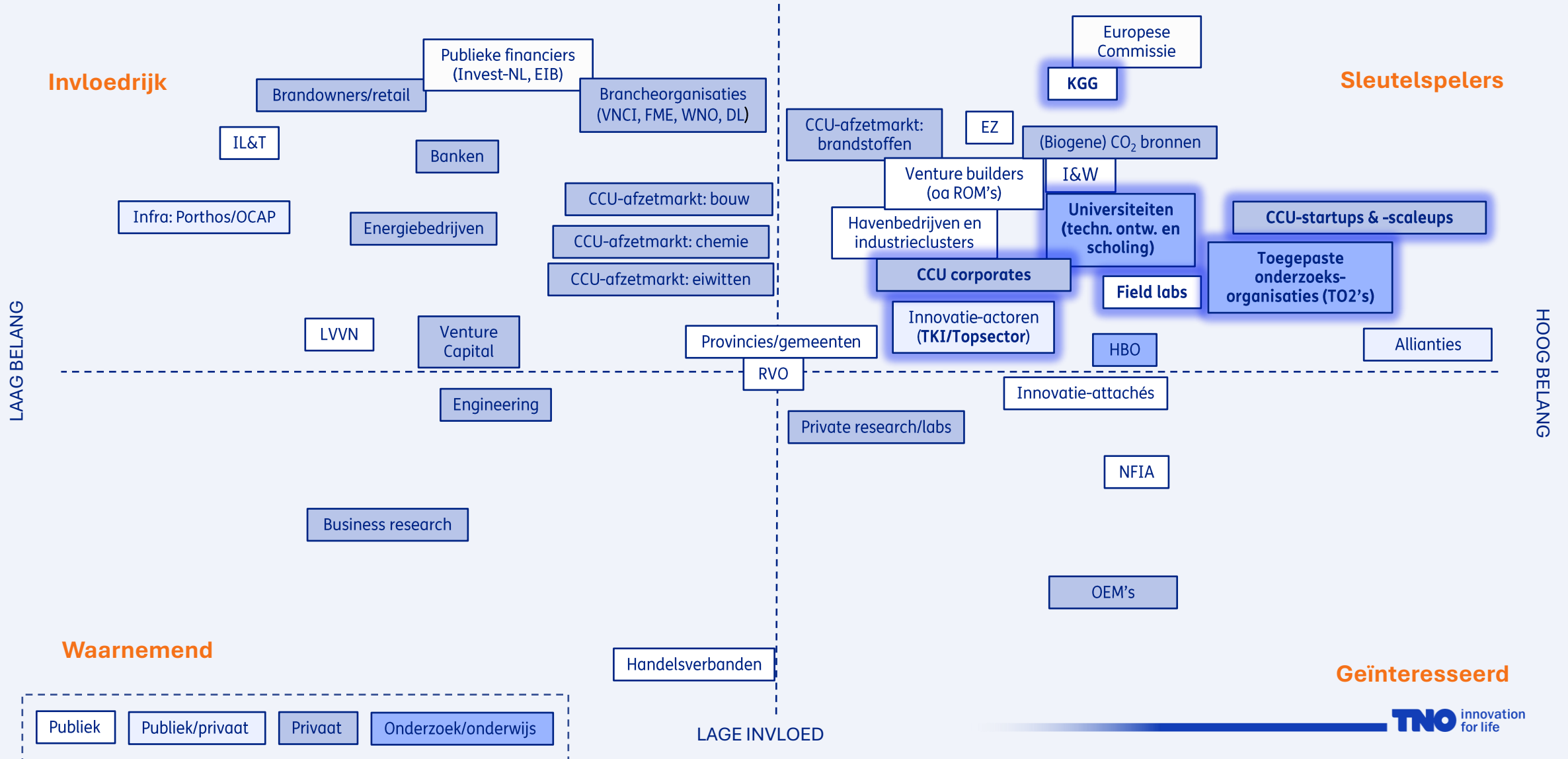
Aanpak. Op basis van het FutureCarbonNL-voorstel (FCNL, 2023) en onderzoek van &flux (2024) hebben we alle spelers in het CCU-veld weergegeven op een Mendelow-matrix (invloed versus belang). Deze matrix hebben we volgens doorontwikkeld in samenspraak met TNO-experts en externe stakeholders. Zie de volgende slide.

Sleutelspelers. Van de stakeholders met de hoogste invloed op en belang in ontwikkeling van CCU hebben we zeven categorieën sleutelspelers geïdentificeerd: stakeholders die cruciaal zijn voor technologieontwikkeling, opschaling, financiering en regulering met betrekking tot CCU in Nederland (zie slide [13](#)). Deze sleutelspelers zouden actief betrokken moeten zijn bij de opzet en uitvoering van de innovatie-actie agenda.

Twee spelers die hoog scoren wat betreft invloed en belang rekenen we bewust niet onder de sleutelspelers: de Europese Commissie en CO₂-bronnen (hiermee bedoelen we industriepartijen die kunnen dienen als CO₂-puntbron). De Europese Commissie rekenen we niet tot de sleutelspelers omdat we met een innovatie-actieagenda niet beogen Europees beleid direct te beïnvloeden. CO₂-bronnen rekenen we nu nog niet tot de sleutelspelers omdat zij zich op dit moment vooral richten op CCS; immers, in het huidige beleid staat vooral CO₂-reductie centraal. Mocht het beleid zich in de toekomst meer gaan richten op de grondstoffentransitie, zullen zij wel degelijk centrale partners worden.

3.2 Stakeholderanalyse: matrix

HOGE INVLOED OP
ONTWIKKELING CCU IN NL



3.3 Stakeholder-analyse: wie zijn de sleutelspelers?



Ministerie van K&GG

De invloed van K&GG op de ontwikkeling is hoog doordat het ministerie klimaatbeleid mede bepaalt, EU-richtlijnen en -verplichtingen implementeert en duurzame innovaties financiert. Ook kan K&GG middels normering marktvraag creëren en middels regulering een *level playing field* scheppen. CCU is voor K&GG van belang vanwege klimaatdoelstellingen en strategische autonomie.



Topsector ChemistryNL

In de 10 topsectoren werken bedrijven, overheid en kennisinstellingen samen aan het uitvoeren van het missiegedreven topsector- en innovatiebeleid (MTIB). ChemistryNL is verantwoordelijk voor MMIP6 en een aantal actieagenda's waarin CCU nadrukkelijk een plek heeft (zie sectie 2.2). Deze bestaande programma's en agenda's bieden aanknopingspunten voor de ontwikkeling van een innovatie-actieagenda voor CCU.



Universiteiten

Universiteiten (o.a. RUG en TUD) houden zich bezig met fundamenteel onderzoek naar CCU en kunnen disruptieve technologieën voortbrengen, die spin-outs en mogelijkheden voor technologie-export kunnen creëren. Het belang van universiteiten kan hoog zijn, maar CCU is voor hen onderdeel van een breder portfolio van onderzoek naar verduurzamingstechnologieën.



Toegepaste onderzoeksorganisaties (TO2's)

De TO2's houden zich bezig met doorontwikkeling van CCU-innovaties naar hogere TRL's en integratie in industriële processen en systemen. Ook TO2's kunnen nieuwe CCU-bedrijven voortbrengen in de vorm van spin-outs. CCU is onderdeel van het Nationaal Groeifonds-programma GroenvermogenNL (HyCARB). TO2's hebben een groot belang bij CCU maar zijn ook bezig met andere technologieën.



Field labs

CCU field labs (FLIE en Chemport Innovation Centre) zijn proeftuinen voor het demonstreren van CCU-technologieën in een industriële context. Deze gedeelde faciliteiten kunnen het proces van opschaling versnellen. Hun invloed is dus vooral in demonstratiefase hoog. De GCNE-monitor (Otto & Van Maurik, 2024) noemt ook de noodzaak van deze fieldlabs.



Corporates actief op het gebied van CO₂-conversie

Corporates als Dow, DSM en LyondellBasell kunnen grote invloed hebben op de ontwikkeling van CCU door hun toegang tot kapitaal, arbeid, infrastructuur en faciliteiten. Ze hebben de potentie om de marktcapaciteit te boosten maar werken vaak ook aan andere routes naast CCU. Het belang van deze corporates is dus afhankelijk van hoe vergevorderd hun CCU-activiteiten zijn.



Startups & scaleups in CO₂-conversie

CCU-startups en -scaleups vormen een belangrijke schakel tussen demonstratie en grootschalige toepassing van CCU dan wel technologie-export. Ze hebben groot belang bij CCU want ze zijn hiervan vaak geheel afhankelijk. Hun invloed kan hoog zijn, hoewel hun initiële slagkracht beperkt zal zijn door gebrek aan marktmacht of überhaupt beperkte marktvraag.

4.1 Van een longlist naar een shortlist van CCU-routes



Identificatie routes. Middels een literatuurstudie hebben we eerst zo veel mogelijk CO₂-conversietechnologieën in kaart gebracht. Dit heeft uiteindelijk geleid tot een lijst van 29 CO₂-conversietechnologieën. Deze routes hebben we onderverdeeld in 8 categorieën.

Conventionele CO₂-conversie en directe CO₂-toepassing hebben we buiten scope gelaten; dit zijn routes met volwassen technologieën en markten en horen dus niet thuis in een innovatieagenda.

Beoordeling. Vervolgens hebben we de routes kwalitatief gescoord (driepuntsschaal) op vijf indicatoren op basis van literatuuronderzoek en consultatie van TNO-experts.

CO₂-reductiepotentieel hebben we niet beoordeeld; dit vergt casusspecifieke *life cycle analyses* (LCA's), wat buiten scope van deze studie is.

Shortlist. Het resultaat van de scoring van de CCU-routes zijn twee shortlists (zie slide [14](#)). Deze zijn gevalideerd middels gesprekken met TNO-experts en externe stakeholders (overheid, bedrijven en kennisorganisaties). Uit deze validatiegesprekken (alsmede literatuuronderzoek) zijn ook kansen en barrières voor elk van de routes naar voren gekomen.

4.2 Longlist CCU-routes: illustratie van scoring

Hieronder een fragment uit de longlist van CCU-routes waarin de beoordeling van twee mineralisatie-routes is te zien. Voor de volledige longlist: zie [Bijlage 2](#).

Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market
Mineralisation		CO ₂ mineralization means the process of chemically binding CO ₂ ("carbonation") in calcium carbonate (CaCO ₃) or other metal carbonates, e.g. MgCO ₃ . Benefit: permanent sequestration of carbon. Currently most mature CCU market. IEA: "Building materials produced from CO ₂ and minerals or waste can be competitive today."	9 (Nova, 2023)				Near-term opportunity for CCU
	Waste carbonation (construction aggregates)	Construction aggregates (small particulates used in building materials) can be produced by reacting CO ₂ with waste materials from power plants or industrial processes, e.g., iron slag and coal fly ash, which would otherwise be stockpiled or stored in landfill. Can be competitive as it offsets the cost associated with conventional waste disposal (Lux, 2022; Nova Institute, 2023).	6-9 (Hanifa, 2023)	Exothermic reaction. Overall energy demand will depend on pretreatment and transport; may be similar to energy demand of conventional aggregates production (IEAGHG, 2021).	Paebbl	Emissions converted to stable materials through mineralization for example, are already exempt from ETS in Europe. Several countries have landfill taxes and 100% of new buildings must be net zero by 2030. Landfill tax rates are important because they make can make it more expensive to discard waste streams than to utilize them (BCG, 2024). Norms on CO ₂ footprint for buildings and construction materials could stimulate demand. Product specifications can act as a barrier (IEAGHG, 2021).	Current global market: 1 Gt/y (IEAGHG, 2021). CO ₂ -based aggregates are on average 5 times as expensive as conventional ones (Lux). economic viability of CO ₂ -derived construction aggregates is especially challenging due to the low cost of conventional construction aggregates: CO ₂ -derived construction aggregates are between four to five times more expensive without landfill tax rates. (BCG, 2024). EU market value calcium carbonate: 27.98 billion euros (European Commission, 2021).
	Carbonation during concrete mixing (CO ₂ as curing agent in concrete)	CO ₂ -cured concrete is one of the most mature and promising applications of CO ₂ . Reduces emissions by 40% and improves cement strengthening time from 28 days to less than 24 hours. (Lux, 2022)	8 (Hanifa, 2023), 9 (IEAGHG, 2021)	Low energy requirement because of exothermic process and reduction in cement consumption (IEAGHG, 2021).	-	No significant barriers but limited support. Norms on CO ₂ footprint for buildings and construction materials could stimulate demand (IEAGHG, 2021).	Current global market: 30 Gt/y (IEAGHG, 2021). CO ₂ -cured concrete can usually only be used in the non-structural precast market. CO ₂ -cured concrete is estimated to be 1.3 to 1.5 times more expensive. (BCG, 2024) However, IEAGHG (2021) states cost reductions result from lower cement requirements and improved efficiencies (quicker curing times).

4.3 Longlist CCU-routes: observaties

Vergelijking complex. Het onderling vergelijken van CO₂-conversietechnologieën is complex omdat deze technologieën onderdeel zijn van langere ketens. Het is dan ook waarschijnlijk dat het eindproduct – niet het product van de CO₂-conversie zelf – de potentie van de CO₂-conversietechnologie voor toepassing in Nederland zal bepalen. Bij de indicatoren *Aanwezigheid van beleidsstimulansen* en *Marktpotentie* hebben we hier rekening mee kunnen houden door ook te kijken naar EU-mandaten en de marktpotentie van eindproducten. Echter, het beoordelen van de *Energiebehoefte* bleek lastiger. Het ontbreekt aan goede data wat betreft de energie-efficiëntie van CO₂-conversietechnologieën. Bovendien is de beschikbare data voor verschillende routes niet goed onderling vergelijkbaar.

Ook verschilt per route de verdeling van de energie-intensiteit over de keten. Voor sommige routes is de CO₂-afvang het meest energie-intensief vanwege de vereiste zuiverheid (elektrochemische routes), terwijl andere routes weer waterstof (thermochemisch) of energie-intensieve separatie vergen (thermochemisch en biotechnologisch). Het beoordelen van de energiebehoefte op al deze aspecten was niet haalbaar binnen de scope van deze studie. Daardoor hebben we de routes niet kwantitatief kunnen beoordelen op energiebehoefte (Interviews, 2025).

CO₂-reductiepotentieel. Het CO₂-reductiepotentieel van CCU is al lang een onderwerp van discussie. Hoe verhouden materialen (waar CO₂ langdurig wordt opgeslagen) zich tot brandstoffen (waar CO₂ uiteindelijk weer wordt uitgestoten?) En wat is de impact van de CO₂-bron: industriële puntbron, biogeen of afvang uit lucht/zee? (Interviews, 2025)

De beoordeling van het CO₂-reductiepotentieel vergt toegespitste *life cycle analyses* (LCA's). Hierbij zijn onder andere de aannames rondom systeemgrenzen, referentiecassus, CO₂-bron en elektriciteitsbron bepalend voor het resultaat. Deze verschillen per product en casus. Een uitgebreide analyse van het CO₂-reductiepotentieel per technologie (en product) viel daarom buiten de scope van deze studie. In de innovatie-actie agenda moet hier ruimte voor worden opgenomen.

4.4 Shortlist kansrijke CCU-routes voor Nederland

	Technologie-ontwikkeling en -export	Toepassing in Nederland	Waarom op shortlist	Kansen	Barrières
Mineralisatie			Hoge TRL, grote markt	- Langdurige en grootschalige vastlegging van CO₂. - Geen hoge CO₂-zuiverheidsgraad vereist (gebruik industriële restgassen mogelijk).	- Complexe logistiek: bouwmaterialen zijn bulkproducten. - Beperkt aantal partijen actief in Nederland.
HT-elektrolyse: syngas		*	Elektro-chemische routes met hoogste aantal actieve partijen, EU-mandaat ReFuelEU aviation (syngas)	- Potentie te kunnen omgaan met variabiliteit van hernieuwbare elektriciteit. - Oxaalzuur kan polymerenmarkt bedienen: bestaande markt en veel industriële activiteit en kennis aanwezig in Nederland. - Nederland heeft een groot ecosysteem rondom elektrochemie. - Oxaal- en mierenzuur: zuurstofrijke moleculen (vergen relatief minder energie-input voor conversiestap). - Syngas is niet verplaatsbaar dus zekere productiecapaciteit gewenst voor productie Fischer-Tropschbrandstoffen (ReFuelEU Aviation).	- Hoge CO₂-zuiverheidsgraad vereist; CO₂-zuivering vergt veel energie. - Laag TRL. - Gebrek aan marktvraag/stimulerend kader voor toepassing in materialen
LT-elektrolyse: mierenzuur					
LT-elektrolyse: oxaalzuur					
Thermochemisch: cyclische carbonaten			Veel actieve partijen, veel verschillende (toekomstige) markten	- Kunnen toegepast worden als elektrolyt in batterijen van elektrische voertuigen (groeimarkt). - Telt als een <i>energy material</i> in de Nationale Technologiestrategie.	- Lage conversie-efficiëntie voor bepaalde producten (water is vaak een bijproduct). - Gebrek aan marktvraag/stimulerend kader voor toepassing in materialen
Thermochemisch: DME			Hoog TRL, veel actieve partijen, grote markten door EU-mandaten voor hernieuwbare brandstoffen	- Commercieel beschikbare CO₂-conversietechnologieën. - Sluiten aan bij huidige industriële praktijk.	- Hoge internationale competitie. - Beschikbaarheid van groene waterstof (en daarmee hernieuwbare elektriciteit). - Minder geschikt voor omgaan met variabiliteit van hernieuwbare elektriciteit. <i>Separation-enhanced conversion</i> (noodzakelijk om de conversie-efficiëntie te vergroten) heeft nog een laag TRL. (+ water is bijproduct)
Thermochemisch: methaan					
Thermochemisch: methanol		*		- Groot aantal toepassingen. - Methanol is een platformmolecuul van belang voor strategische autonomie.	

* Een zekere productiecapaciteit in Nederland is waarschijnlijk wenselijk vanuit het oogpunt van beperkte verplaatsbaarheid (syngas) en strategische autonomie (methanol). Hierin kan CCU voorzien, naast op biograndstoffen en recycleerbare routes.

Bronnen: [bronnen voor longlist](#) en expert-interviews (zie [Bijlage 1](#) voor de geïnterviewde experts).

4.5 Shortlist kansrijke CCU-route: eindtoepassingen en actieve stakeholders

	Technologie-ontwikkeling en -export	Toepassing in Nederland	Waarom op shortlist	Eindtoepassingen	Stakeholders actief in Nederland
Mineralisatie			Hoge TRL, grote markt	Cement, beton, aggregaten/granulaten	Paebbl, Carbon8, C2CA
HT-elektrolyse: syngas		*	Elektro-chemische routes met hoogste aantal actieve partijen, EU-mandaat ReFuelEU aviation (syngas)	Fischer-Tropschkoolwaterstoffen, zoals synthetische diesel, kerosine, nafta, waxen, methanol. Producten uit microbiële fermentatie.	Circonica, Bosal, TNO, Rijksuniversiteit Groningen
LT-elektrolyse: mierenzuur				Veevoer, schoonmaakmiddelen, producten uit fermentatie, brandstof, vloeibaar energieopslagmedium.	Avantium, Gaft (met technologie van Coval Energy), (E2C Project) - Zeus, TNO, TU Delft, DENSE (afnemer van mierenzuur van Amerikaanse partij RenewCO ₂)
LT-elektrolyse: oxaalzuur				Polymeren	Avantium, TNO, Universiteit van Amsterdam
Thermochemisch: cyclische carbonaten			Veel actieve partijen, veel verschillende (toekomstige) markten	Smeer- en oplosmiddelen, weekmakers, batterijelektrolyten, uithardingsmiddelen voor cement en beton, thermohardende harsen, oppervlakteactieve stoffen, polymeren	Alta Carbon Technologies, Westlake (thermoset harders), LyondellBasell maakt propyleencarbonaat op conventionele manier
Thermochemisch: DME			Hoog TRL, veel actieve partijen, grote markten door EU-mandaten voor hernieuwbare brandstoffen	LPG-bijmengstof, dieselalternatief, chemicaliën (methylacetaat, azijnzuur, olefinen)	HyCC, TNO, L'Oreal, RealCarbonTech
Thermochemisch: methaan				Aardgasalternatief	Eemsgas (joint venture Power-to-Gas via torrefactie van bio afval naar syngas, gevolgd door Sabatier-methanatie), Hanzehogeschool (EnTranCe project), Bright Renewables, Power to Power, Adsensys
Thermochemisch: methanol		*		Scheepsbrandstof, brandstof voor zwaar wegtransport, chemicaliën (o.a. olefinen, formaldehyde en MBTE), synthetische kerosineproductie	TANDEM (Bright Renewables, HyGear, Utwente), RealCarbonTech, Host/UT, ZEF, HyCC, Huntsman (methanol to aromatics), LyondellBasell/FLIE (methanol to olefins), Twence, BlueCircle Olefins, Ketjen, Shell, Nobian Metafuels, EVOS, Power2X en Advorio: ontwikkelen methanol-to-jet

* Een zekere productiecapaciteit in Nederland is waarschijnlijk wenselijk vanuit het oogpunt van verplaatsbaarheid (syngas) en strategische autonomie (methanol). Hierin kan CCU voorzien, naast op biograndstoffen en recycalaat gebaseerde routes.

5.1 Conclusies (1/3)

Kansrijke CCU-routes voor toepassing in Nederland

- Vanuit het oogpunt van verdienvermogen ligt het voor productie in Nederland voor de hand om in te zetten op **hoogwaardige toepassingen**: zuurstofrijke moleculen en moleculen met lange ketens. Echter, voor sommige minder hoogwaardige platformmoleculen (zoals syngas en methanol) is het waarschijnlijk wenselijk om een **strategische productiecapaciteit** in Nederland te ontwikkelen. Hierin kan CCU voorzien, naast op biograndstoffen en recycleert gebaseerde routes.
- **De lage-temperatuur-elektrolyseroutes naar oxaalzuur en mierenzuur** zijn kansrijk. Nederland heeft hierin een sterke kennispositie en deze routes hebben potentie te kunnen omgaan met de variabiliteit van hernieuwbare elektriciteit. Oxaalzuur dient bovendien als grondstof voor polymerenproductie, een aanzienlijke bestaande markt.
- Ook de **hoge-temperatuur-elektrolyseroute naar syngas** staat op de shortlist. Syngas is weliswaar geen hoogwaardig product. Echter, omdat syngas moeilijker verplaatsbaar is, is een zekere productiecapaciteit in Nederland waarschijnlijk gewenst vanwege de productie van Fischer-Tropsch brandstoffen, die nodig zijn voor de verduurzaming van de luchtvaart en waarvoor het EU-mandaat ReFuelEU Aviation geldt.
- **Thermochemische routes naar cyclische carbonaten, DME, methaan en methanol** scoren daarnaast goed. Deze routes zijn technologisch vergevorderd en sluiten aan bij de huidige industriële praktijk. Het marktperspectief is bovendien goed voor deze routes vanwege EU-mandaten voor hernieuwbare brandstoffen (RFNBO's).
- **Mineralisatie** (oftewel de vastlegging van CO₂ in bouwmaterialen en beton) is een kansrijke route voor toepassing in Nederland. Mineralisatie biedt een manier om CO₂ op grote schaal en langdurig vast te leggen, is technologisch vergevorderd en bedient een bestaande markt. Bovendien is voor mineralisatie geen hoge CO₂-zuiverheidsgraad vereist. Echter, er is in Nederland een beperkt aantal spelers actief.
- **Single-cell proteïnen vormen een veelbelovende downstream-toepassing** (op basis van ethanol, methanol of mierenzuur). SCP's zijn een hoogwaardig product, Nederland heeft op dit vlak een sterke kennispositie en SCP's bieden kansen voor het terugdringen van land- en watergebruik in de voedselproductie.

5.1 Conclusies (2/3)

Energiebehoefte

- **Energiebehoefte is één van de belangrijkste overwegingen** (zo niet de belangrijkste) voor industriële clusters bij het uitrollen van CCU. Niet alleen de beschikbaarheid van hernieuwbare elektriciteit is hierbij van belang, maar ook van hernieuwbare waterstof, hetgeen vooral bij de thermochemische routes een rol speelt. Daarnaast hebben de energieprijzen in NL een belangrijke invloed op de competitiviteit tov andere landen.
- **Data over de energie-efficiëntie** van CO₂-conversietechnologieën is beperkt en lastig onderling te vergelijken.
- Het **onderling vergelijken van de energiebehoefte van CCU-routes vereist een ketenbenadering** omdat per route de verdeling van de energievraag over de keten verschilt. Voor sommige routes is de CO₂-afvang het meest energie-intensief vanwege de vereiste CO₂-zuiverheid (elektrochemische routes), terwijl andere routes weer waterstof (thermochemisch) of energie-intensieve separatie vergen (thermochemisch en biotechnologisch).
- Energiebehoefte is een relevante factor maar hoeft **niet per se een belemmering** te vormen voor de Nederlandse CCU-inzet. Voor routes met een hoge energiebehoefte maar anderszins een hoge potentie kan ingezet worden op technologieontwikkeling en –export naar landen met een overvloed aan hernieuwbare elektriciteit.

CO₂-bronnen en hernieuwbare elektriciteit

- Het is wenselijk CCU zo veel mogelijk **in te zetten dichtbij CO₂-bronnen en af te stemmen op de CO₂-zuiverheid van de betreffende bron**. Vanuit het oogpunt van CO₂-zuiverheid kan het best ingezet worden op mineralisatie of biotechnologische conversie. Aan de andere kant leveren bronnen als biogasinstallaties vrij zuivere CO₂, die mogelijk kan dienen voor thermochemische of elektrochemische routes.
- Het is van belang om in te zetten op technologieën die kunnen inspelen op de **variabiliteit van hernieuwbare elektriciteit**. Met name elektrochemische, maar ook thermocatalytische routes lijken kansrijk hiervoor. Echter, om deze routes op te schalen zijn **verdere innovaties nodig op het gebied van CO₂-zuivering**, zowel voor als na conversie; CO₂-zuivering is momenteel energie-intensief en kostbaar. Ook moet productie wel van voldoende omvang zijn voor een positieve business case.

5.1 Conclusies (3/3)

CCU:
klimaatdoelen en
de grondstoffen-
transitie

- De inzet van CCU dient in de eerste plaats als een **nieuwe bron van koolstof** om het gebruik van fossiele koolstof te reduceren (middels afvang van industriële CO₂) of te vervangen door duurzame koolstof (biogene CO₂ of CO₂ afgevangen uit de atmosfeer of zeewater). Mits gebruik wordt gemaakt van hernieuwbare elektriciteit leidt CCU tevens tot CO₂-reductie. Als de CO₂ bron biogeen of DAC is, kunnen CCU routes naar klimaat neutraal gaan. Voor materialen die langdurig CO₂ kunnen opslaan, kunnen CCU routes zelfs negatieve CO₂ emissie opleveren.
- Echter, het kwantificeren van het CO₂-reductiepotentieel per CCU-route vergt **casusspecifieke life cycle analyses** (LCA's). Het uitvoeren van zulke LCA's valt buiten de scope van deze studie.
- Het **huidige publieke instrumentarium is zeer beperkt geschikt** voor de ondersteuning van CCU, omdat het instrumentarium vooral gericht is op de reductie van broeikasgasemissies en minder op de grondstoffentransitie. Bovendien is het beschikbare instrumentarium vooralsnog alleen gericht op toepassing van CCU voor brandstoffen. Marktcreatie voor toepassing in materialen is cruciaal voor de opschaling van CCU.

5.2 Aanbevelingen voor vervolgstappen (1/2)

Creëer juiste
condities voor
mineralisatie

Overheid,
kennis-
organisaties

Mineralisatie lijkt een veelbelovende route voor toepassing in Nederland. Echter, er is een beperkt aantal spelers actief in Nederland. Onderzoek hoe we in Nederland de **juiste condities** kunnen creëren zodat mineralisatie wél van de grond komt.

Krijg zicht op
volledige
waardekets

Bedrijven,
kennis-
organisaties

Ons advies is om **voor de geïdentificeerde kansrijke routes een aantal waardekets uit te werken**. Om het verdienmodel van CCU in kaart te brengen, is het van belang perspectief te krijgen op de volledige waardekets. De CO₂-conversiestap (upstream in de keten) is namelijk het meest kostenintensief terwijl de meeste waarde downstream wordt gecreëerd. Bovendien vereist de inzet van CCU vaak een herziening van het ontwerp van bestaande waardekets.

Maak keuzes voor
strategische
productie-
capaciteit

Overheid

Sommige CCU-routes zijn in Nederland niet competitief maar leveren essentiële producten op waarvoor een zekere **strategische productiecapaciteit** wenselijk is vanuit het oogpunt van strategische autonomie. Denk aan platformmoleculen zoals methanol en syngas. Deze strategische productiecapaciteit kan ingevuld worden door CCU of door biograndstoffen of recyclaat. De overheid dient een keuze te maken welke (tussen)producten dit zijn om vervolgens gericht productieroutes te stimuleren, rekening houdend met de beschikbaarheid van duurzame energie. Kijk daarbij nadrukkelijk naar brandstoffen en materialen.

5.2 Aanbevelingen voor vervolgstappen (2/2)

Richt CO₂-
reductiedoel-
stellingen slim in

Overheid,
kennis-
organisaties

CCU leidt in veel gevallen alleen tot CO₂-reductie als gebruik wordt gemaakt van hernieuwbare elektriciteit. Echter, dit is wellicht niet in voldoende mate voorhanden in NL in de eerste fase van opschaling van CCU. Daardoor kan toepassing van CCU aanvankelijk tot extra CO₂-emissies leiden, terwijl op de lange termijn wel een besparing optreedt. Daardoor loopt CCU wellicht publieke financiering mis, omdat CCU hierdoor minder goed scoort op CO₂-besparing, maar wel een rol kan spelen als grondstof voor de toekomst. De overheid, ondersteund door kennisorganisaties, dient na te denken hoe slim hiermee om te gaan.

Nederland als
ontwikkelaar en
exporteur van
CCU-technologie

Kennis-
organisaties,
bedrijven

Ten aanzien van een aantal CCU-routes loopt Nederland voorop wat betreft kennis en innovatie. Voor deze routes zou technologieontwikkeling en –export een mogelijk verdienmodel kunnen vormen. Een dergelijk model biedt kansen voor routes waar Nederland in vooroploopt, maar die niet voor de hand liggen voor toepassing in Nederland vanwege de hoge energiebehoefte. Het is aan te bevelen het **verdienmodel van technologieontwikkeling en –export verder te onderzoeken en te kwantificeren**.

Gedragen
innovatie-
actieagenda

Kennis-
organisaties,
overheid,
bedrijven

Om de ontwikkeling van CCU in Nederland van de grond te krijgen is een innovatie-actieagenda nodig die breed wordt gedragen en wordt uitgevoerd door de belangrijkste spelers in het veld: het Ministerie van KGG, ChemistryNL, universiteiten, toegepaste onderzoeksorganisaties, field labs en bedrijven actief op het gebied van CO₂-conversie (corporates, startups en scaleups). Deze agenda dient **richting te geven** aan het versnipperde CCU-landschap en **acties te formuleren** voor publieke en private spelers en kennisorganisaties.

Bijlage 1: Geraadpleegde experts

Tijdens dit project hebben meerdere TNO-experts input geleverd op de aanpak, de inzichten en de analyse van KPI's voor verschillende CO₂-conversietechnologieën. Daarnaast zijn interviews gehouden met experts van universiteiten en met stakeholders uit het bedrijfsleven en de overheid.

We willen alle betrokkenen hartelijk danken voor de bereidheid om hun tijd en kennis met ons te delen. Hun inzichten hebben bijgedragen aan de scherpte en relevantie van deze quickscan. Hoewel hun inbreng zorgvuldig is meegenomen in onze analyse, weerspiegelt de inhoud van dit rapport niet noodzakelijkerwijs de standpunten van de geraadpleegde personen of hun organisaties.

TNO	Academische wereld	Bedrijfsleven	Overheid
Remko Detz	Matthias Heineman (Rijksuniversiteit Groningen)	Yannick Wevers (VNCI)	Martijn van de Sande (RVO)
Zoe Kapetaki	Andrea Ramirez (TU Delft)	Fiona van den Brink (LyondellBasell)	Elisa Vandermeer (Ministerie van K&GG)
Jurriaan Boon		Matthijs Ruitenbeek (Dow Chemicals)	Mark Schmets (Ministerie van K&GG)
Martijn de Graaff		Yap Chie Cheung en Annelie Jongerius (Avantium)	Peter Berben (ChemistryNL)
Yvette Veninga		Melle Sijbrandij (InnovationQuarter)	
Monalisa Goswami		Felien van Kooij (Groningen Seaports)	
Lotte de Groen			
Hugo Gelevert			

Bijlage 2: Longlist

De longlist is opgesteld op basis van een combinatie van studies en wetenschappelijke literatuur over CCU (zie [Bronnen voor samenstellen longlist](#) voor de geraadpleegde literatuur). Gezien de beschikbare tijd en middelen en beperkte literatuur over bepaalde technologieën is het niet gelukt om de lijst volledig en in alle gevallen gedetailleerd in te vullen.

Desondanks biedt de longlist een eerste indicatief overzicht van relevante CO₂-conversieroutes. Voor de beoordeling is gewerkt met een kwalitatieve inschatting (laag, midden, hoog) op basis van de beschikbare informatie. Deze inschattingen zijn bedoeld om richting te geven aan een CCU innovatie-actieagenda.

De lijst is gereviewed en aangevuld door experts binnen TNO en door externe stakeholders.

Op de volgende pagina's is per categorie de invulling van de longlist weergegeven.

Bijlage 2: Longlist – Mineralisatie

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
Mineralisation		CO ₂ mineralization means the process of chemically binding CO ₂ ("carbonation") in calcium carbonate (CaCO ₃) or other metal carbonates, e.g. MgCO ₃ . Benefit: permanent sequestration of carbon. Currently most mature CCU market. IEA: "Building materials produced from CO ₂ and minerals or waste can be competitive today."	9 Nova Institut (2023)				Near-term opportunity for CCU	Nova Institut (2023), Lux Research & Global CO ₂ Initiative (2022)
	Waste carbonation (construction aggregates)	Construction aggregates (small particulates used in building materials) can be produced by reacting CO ₂ with waste materials from power plants or industrial processes, e.g., iron slag and coal fly ash, which would otherwise be stockpiled or stored in landfill. Can be competitive as it offsets the cost associated with conventional waste disposal (Lux Research & Global CO ₂ Initiative, 2022; Nova Institut (2023), 2023).	6-9 (Hanifa, 2023)	Exothermic reaction. Overall energy demand will depend on pretreatment and transport; may be similar to energy demand of conventional aggregates production (IEAGHG, 2021).	Paebbl, Carbon8, C2CA	Emissions converted to stable materials through mineralization for example, are already exempt from ETS in Europe. Several countries have landfill taxes and 100% of new buildings must be net zero by 2030. Landfill tax rates are important because they make it more expensive to discard waste streams than to utilize them (BCG, 2024). Norms on CO ₂ footprint for buildings and construction materials could stimulate demand. Product specifications can act as a barrier (IEAGHG, 2021).	Current global market: 1 Gt/y (IEAGHG, 2021). CO ₂ -based aggregates are on average 5 times as expensive as conventional ones (Lux Research & Global CO ₂ Initiative). economic viability of CO ₂ -derived construction aggregates is especially challenging due to the low cost of conventional construction aggregates: CO ₂ -derived construction aggregates are between four to five times more expensive without landfill tax rates. (BCG, 2024). EU market value calcium carbonate: 27.98 billion euros (European Commission, 2021).	Lux Research & Global CO ₂ Initiative (2022), IEA (2019); BCG (2024) ; Hanifa et al (2023); Driver et al (2024)
	Carbonation during concrete mixing (CO ₂ as curing agent in concrete)	CO ₂ -cured concrete is one of the most mature and promising applications of CO ₂ . Reduces emissions by 40% and improves cement strengthening time from 28 days to less than 24 hours. (Lux Research & Global CO ₂ Initiative, 2022)	8 (Hanifa, 2023), 9 (IEAGHG, 2021)	Low energy requirement because of exothermic process and reduction in cement consumption (IEAGHG, 2021).	Carbon Cure (no longer active in the Netherlands)	No significant barriers but limited support. Norms on CO ₂ footprint for buildings and construction materials could stimulate demand (IEAGHG, 2021).	Current global market: 30 Gt/y (IEAGHG, 2021). CO ₂ -cured concrete can usually only be used in the non-structural precast market. CO ₂ -cured concrete is estimated to be 1.3 to 1.5 times more expensive. (BCG, 2024) However, IEAGHG (2021) states cost reductions result from lower cement requirements and improved efficiencies (quicker curing times).	IEA (2019); BCG (2024); Hanifa (2023)
	Production of inorganic salts (Na ₂ CO ₃ , MgCO ₃)	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD

Bijlage 2: Longlist – Copolymerisatie

Low	Medium	High					
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market
Copolymerisation		Benefit: long-term sequestration of carbon. IEA: "CO ₂ -derived polymers could be produced at lower cost than their fossil counterparts, but the market is relatively		Low compared to other routes. [No detailed information could be found.]			Polymers have high market value.
	Direct chemical conversion to aliphatic polycarbonates	Copolymerisation of CO ₂ and epoxide, producing aliphatic polycarbonates (APCs): polyethylene carbonates (PEC), polypropylene carbonates (PPC) or polylimonene carbonates. Using a catalyst. Polycarbonate already exists as an engineering thermoplastic and the CCU product acts as a direct substitute (IEAGHG, 2021).	7-9 Nova Institut (2023), 6 (Lux Research & Global CO ₂ Initiative, 2022)	Lower energy demand than conventional route. Better energy performance due to high yields and improved selectivity according to developers (IEAGHG, 2021).	LyondelBasell is developing it, details unknown	No significant barriers. No dedicated support (IEAGHG, 2021).	Current global market: 4 Mt/y (IEAGHG, 2021). Biomedical, adhesives, composites, foams. Thermoset/thermoplastic applications. EU market value polycarbonate (BisA-PC): 2.84 billion euros (EU Commission, 2021).
	Direct chemical conversion to polycarbonates polyols	The most advanced route to synthesise CO ₂ based polyurethane is using polycarbonate polyols. Nova Institut (2023) Commercially produced by Covestro (IEAGHG, 2021). These are a precursor for polyurethane (PUR). CCU polyols are reported to have superior properties compared to conventional polyols (Ecofys, 2017, Assessing the potential of CO ₂ utilisation in the UK).	7-9 Nova Institut (2023)	Lower energy demand than conventional route. Reductions possible, "dependent on the balance between energy for CO ₂ capture and for the epoxide feedstock." (IEAGHG, 2021).	Covestro (plans were announced, but current status unclear), Econic Technologies (considered deploying activities in NL, but not active at present)	No significant barriers. No dedicated support (IEAGHG, 2021).	Current global market: 12 Mt/y (IEAGHG, 2021). EU market value polyols for polyurethane: 5.74 billion euros (EU Commission, 2021). Biomedical, adhesives, composites, foams. Thermoset/thermoplastic applications.

Bijlage 2: Longlist – Thermochemische conversie (1/2)

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
Thermochemical		Conversion of CO ₂ into products using heterogeneous catalysts, renewable hydrogen, heat and pressure. Most mature CO ₂ conversion route, with TRL6-9 for most products. No widespread industrial adoption yet due to high energy needs, with requires further process in Nova Institut (2023) tions.	5-8 (Ministerie van KGG en Ministerie van I&W), 6-9 (Voltachem TNO (2025))	Considerable. Highest among CCU routes mentioned in Ministerie van KGG en Ministerie van I&W.				
	Reverse WGS to CO/syngas	Reaction is called reverse water-gas shift (RWGS) because CO ₂ and H ₂ are converted to CO and H ₂ O. With excess H ₂ as input, the product will be syngas. RWGS requires high heat demand. Fischer-Tropsch processes can convert syngas into chemicals and fuels.	6-7 (Voltachem TNO (2025)); Fischer-Tropsch is TRL 9	High due to high process temperature (900 degC). Separation enhancement can reduce the required temperature to 300 degC but remains at TRL4. Requires H ₂ : may compete with other H ₂ demand sectors.	Synkero: 50 ktpa jet fuel (2027), unclear whether this project is still going through. Other parties active in syngas to jet fuel: LyondellBasell, Shell, SCW Systems.	ReFuel EU Aviation: mandate for e-kerosene.	Current global syngas market: 31 EJ (12 as pure H ₂ , 15 CO for iron production, and 4 for synthesis of hydrocarbon fuels and chemicals). 2050 market scenario: 29 EJ to supply 24 EJ of carbon based products (Detz, Beerse et al, 2024). Via FT synthesis, various hydrocarbons can be made (e.g. diesel, kerosene, naphtha, waxes). Methanol can be produced from syngas. Also, CO/syngas can be used as feedstock for microbial fermentation. Nova Institut (2023). IEA: "currently ~15 Mtonne CO ₂ /y that will be captured into value-added products, 8 Mtonne/y of which is for synfuels". E-kerosene production with FT process features a high commercial activity, account for 28% of overall landscape	Nova Institut (2023), VoltaChem TNO (2025) (2025)
	Methane (Sabatier synthesis/methanation)	Makes use of Sabatier reaction, which hydrogenates CO ₂ to methane using a nickel catalyst. Demo plants in e.g. Germany and Australia, 5 kW-6 MW. Most mature pathway, along with methanol production.	7-8 (Voltachem TNO (2025)) 8 (TNO, 2019)	High, 20 times the conventional route due to large amount of renewable electricity required for hydrogen production (IEAGHG, 2021). Max energy efficiency to methane is 83% at 100% carbon conversion efficiency (LHVout/LHVin). The carbon conversion efficiency ranges typically between 90 and 100% in literature. (TNO, 2019)	Eemsgas (vh. Torrgas) joint venture Power-to-Gas via torrefactie van biomassawaste naar syngas, gevolgd door Sabatier-methanatie. Hanzehogeschool (EnTranCe project), Bright Renewables, Power to Power, Adsensys.	As e-methane (also called e-SNG or e-NG) can be used as a replacement for natural gas, the RFNBO mandate for industry and the Energy Performance of Buildings Directive act as incentives for e-methane adoption in industry and built environment.	Current global natural gas demand: 2 Gt/y (IEAGHG, 2021). Main use: alternative to natural gas, can be fed into existing natural gas infrastructure. Most pilots use CO ₂ from biogas to increase purity of bio-methane and improve overall methane yield (Pinter, 2024). Easier to handle than H ₂ Nova Institut (2023). EU market value: 73.5 billion euros (European Commission, 2021)	Nova Institut (2023), VoltaChem TNO (2025), IEA (2019)

Bijlage 2: Longlist – Thermochemische conversie (2/2)

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
	Methanol (hydrogenation)	First commercial-scale plant operational in China since 2022 owned by Carbon Recycling International, an Icelandic company (CRI, 2024). One of the most promising CCU pathways to produce fuels and platform chemicals. Most mature pathway, along with methane production.	9 (Voltachem TNO (2025))	High. Energetically efficient and exothermic (Nova Institut (2023)), low temperatures (TNO (2025)). However, large amount of H ₂ required (Nova Institut (2023)). Water by-product results in low single-pass conversion and therefore requires downstream separation.	TANDEM (Arnhem, 5kt, Bright Renewables, HyGear, Utwente). RealCarbonTech, Host/UT, ZEF, HyCC, Huntsman (and to aromatics), LyondellBasell/FLIE (MeOH to olefins), Twence, BlueCircle Olefins, Ketjen, Shell, Nobian. Metafuels, Power2X, Advanor, EVOS: developing methanol-to-jet so important stakeholders.	FuelEU maritime provides incentive for green methanol production as fuel (and indirectly ReFuel EU Aviation in case of methanol-to-jet). No incentive for green methanol as chemical.	Current global market: 80 Mt/y as chemical intermediate, of which 25 Mt/y for methanol-to-olefins/MTO. EU market value: 1.20 billion euros (EU Commission, 2021). Methanol can be applied as a direct fuel in marine sector (200 Mtoe globally) and heavy-duty trucks (600 Mtoe). (IEAGHG, 2011). Methanol can be used as feedstock for chemicals (incl. olefins (-> polymers), formaldehyde, acetic acid, formic acid, MBTE), as direct (shipping) fuel or as precursor for synfuels like synthetic kerosene. Methanol market expected to increase as demand for commodity chemicals will rise (Lux Research & Global CO ₂ Initiative). However, costs of CCU-based methanol need to reduce significantly, currently at least twice of fossil methanol (IEAGHG,	FCNL (2023), Lux Research & Global CO ₂ Initiative (2022), IEA (2019), Carbon Recycling International (2022)
	DME	Direct synthesis of DME entails the conversion of CO and/or CO ₂ with hydrogen into DME in a single reactor.	7-8 / 5-6 for separation enhanced (Voltachem TNO (2025)) Conventional synthesis of DME is from methanol, at TRL 9	High volumes of water as by-product; therefore, downstream separation is required.	HyCC, TNO, L'Oreal, RealCarbonTech (considering deploying activities)	EU RED-III mandates the use of 1% RFNBO in transport by 2030; this acts as an incentive for DME as diesel substitute.	Current global market 500 Mt/y (IEAGHG, 2021). Applications: blending with LPG, feedstock for chemicals and drop-in substitute for diesel. Derived chemicals: methyl acetate, acetic acid, olefins.	European Commission (2023)
	Cyclic carbonates	Cycloaddition of CO ₂ to epoxide.	Ethylene/propylene carbonate: TRL 10 (mature pathway). Others cyclic carbonates, e.g. glycerol carbonate, not yet efficient due to production of water Nova Institut (2023)		Alta Carbon Technologies, Westlake (thermoset resins, TRL 4). Conventional process: LyondellBasell (propylene carbonate)	No dedicated policy support.	80-100 kt/a production. Used for lubricants, plasticisers, solvents, electrolytes (used in Li-ion batteries, strong growth due to EV market), curing agent in cement and concrete, thermoset resin. Indirect: surfactants, chemical intermediate, polymer building block.	FCNL (2023), Nova Institut (2023), Pescarmona (2021)
	Ethylene		<4 (Voltachem TNO (2025))		ArcelorMittal, DOW	No dedicated policy support.	EU market value: 12.34 billion euros (EU Commission, 2021).	
	Acrylates	genoemd door Nova Institut (2023) 2023			None	No dedicated policy support.	Applications: polymer precursor for a.o. textiles, adhesives, paints.	Nova Institut (2023)

Bijlage 2: Longlist – Elektrochemische conversie (1/2)

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
Electrochemical		Conversion of CO ₂ into chemicals by using electricity directly in an electrochemical cell. Becoming leading technology of choice globally, according to Lux Research & Global CO ₂ Initiative, 2022. Challenges: instability of catalysts and high-cost separation of products.		High compared to other routes [No detailed information could be found.]				
	High-temperature (CO)	High-temperature solid oxide electrolysis of CO ₂ . Only CO ₂ electrolysis technology close to commercialization.	8	High process temperature (600-850 degC).	TNO	CO can be used to produce syngas (see below). EU RED-III mandates the use of 1% RFNBO in transport by 2030; this acts as an incentive for FT-fuels based on syngas. Specifically for aviation there is a ReFuel EU Aviation mandate for e-kerosene.	CO can be used to produce syngas (see below).	TNO (2025)
	High-temperature (syngas)	High-temperature solid oxide co-electrolysis of CO ₂ and water. MW-scale demo currently ongoing (MegaSyn project).	5-6	High process temperature (600-850 degC). However, syngas production is single step with high efficiency.	TNO, Rijksuniversiteit Groningen, Circonica, Bosal	EU RED-III mandates the use of 1% RFNBO in transport by 2030; this acts as an incentive for FT-fuels based on syngas. Specifically for aviation there is a ReFuel EU Aviation mandate for e-kerosene.	Current global syngas market: 31 EJ (12 as pure H ₂ , 15 CO for iron production, and 4 for synthesis of hydrocarbon fuels and chemicals). So ~31 Gt syngas order of magnitude (calculation not exact as syngas composition and thus LHV varies). 2050 market scenario: 29 EJ to supply 24 EJ of carbon based products (Detz, Beerse et al, 2024). Via FT synthesis, various hydrocarbons can be made (e.g. diesel, kerosene, naphtha, waxes). Methanol can be produced from syngas. Also, CO/syngas can be used as feedstock for microbial fermentation. Nova Institut (2023). IEA: "currently ~15 Mtonne CO ₂ /y that will be captured into value-added products, 8 Mtonne/y of which is for synfuels". E-kerosene production with FT process features a high commercial activity, account for 28% of overall landscape	TNO (2025)

Bijlage 2: Longlist – Elektrochemische conversie (2/2)

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
	Low-temperature (ethylene)	tbd	tbd	tbd	University of Twente, TU Delft, Brucse, E-ethylene, Dioxycle	No dedicated policy support.	tbd	
	Low-temperature (CO)	Low-temperature electrolysis of CO ₂ .	5-6	Low single-pass conversion, so separation required.	TNO	CO can be used to produce syngas (see up). EU RED-III mandates the use of 1% RFNBO in transport by 2030; this acts as an incentive for FT-fuels based on syngas. Specifically for aviation there is a ReFuel EU	CO can be used to produce syngas (see up).	TNO (2025)
	Low-temperature (formic acid)	Low-temperature co-electrolysis of CO ₂ and water.	5-6	Separation of unconverted CO ₂ from liquid product is easier than from gaseous product.	Avantium, E2C Project - Zeus, TNO, TU Delft, Gaft (with technology Coval Energy), DENSE (offtake formic acid for downstream application, conversion done by RenewCO ₂)	No dedicated policy support.	Current global market: 1 Mt/y (IEAGHG, 2021). Formic acid is an important commodity chemical: e.g. livestock feed preservative and cleaning products additive. Potential new uses: fuel, liquid storage medium, fermentation feedstock.	Nova Institut (2023), FCNL, TNO (2025), Lux Research & Global CO ₂ Initiative
	Low temperature (oxalic acid)	Electrocatalytic reduction of CO ₂	TRL<4 (Detz, 2022)	tbd	Avantium, TNO, University of Amsterdam	No dedicated policy support.	Applications: further downstream processing in to glycolic acid and ethylene glycol, monomers for (bulk) polyester production.	FCNL (2023), Schuler et al. (2021)

Bijlage 2: Longlist – Plasmaconversie & fotokatalytische conversie

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
Plasma		Conversion of CO ₂ into syngas and hydrocarbons (ethylene and acetylene) by creation of highly reactive plasma, at ambient temperature. Extremely complex. Benefits: integration with renewable electricity and no critical raw materials required for catalysts. Products: CO, syngas, methanol, formaldehyde, formic acid.	Mostly 1-3, although startup D-CRBN has a prototype at TRL 6 according to Longo et al., 2024.		PlasmaLab, Brightsite (TNO, Maastricht University and Sitech Services), D-CRBN (BE)	EU RED-III mandates the use of 1% RFNBO in transport by 2030; this acts as an incentive for FT-fuels based on syngas. Specifically for aviation there is a ReFuel EU Aviation mandate for e-kerosene. No dedicated policy support for chemicals.	Current global syngas market: 31 EJ (12 as pure H ₂ , 15 CO for iron production, and 4 for synthesis of hydrocarbon fuels and chemicals). So ~31 Gt syngas order of magnitude (calculation not exact as syngas composition and thus LHV varies). 2050 market scenario: 29 EJ to supply 24 EJ of carbon based products (Detz, Beerse et al, 2024). Via FT synthesis, various hydrocarbons can be made (e.g. diesel, kerosene, naphtha, waxes). Methanol can be produced from syngas. Also, CO/syngas can be used as feedstock for microbial fermentation. Nova Institut (2023). IEA: "currently ~15 Mtonne CO ₂ /y that will be captured into value-added products, 8 Mtonne/y of which is for synfuels". E-kerosene production with FT process features a high commercial activity, account for 28% of overall landscape	TNO (2025), Longo et al. (2024)
Photocatalytic		CO ₂ and H ₂ are converted into products using catalysts and/or photo-electrodes and sunlight. Products: CO, methane, methanol. Also called artificial photosynthesis or photoelectrochemistry.	1-4; significant progress but catalyst efficiency not yet sufficient for commercial application. Moreover, capacity factor is low (~20%).		TNO, TUD, Utwente, TU/e, UU	CO can be used to produce syngas (see up). EU RED-III mandates the use of 1% RFNBO in transport by 2030; this acts as an incentive for FT-fuels based on syngas. Specifically for aviation there is a ReFuel EU Aviation mandate for e-kerosene. Moreover, the FuelEU Maritime mandate provides an incentive for methanol.	CO can be used to produce syngas (see up).	Ministerie van KGG en Ministerie van I&W, Fu et al. (2019), Detz et al. (2018)
	(CO ₂ + H ₂ O)	tbd	tbd	tbd	tbd	tbd	tbd	
	Photocatalytic hydrogenation (CO ₂ + H ₂)	tbd	tbd	tbd	tbd	tbd	tbd	

Bijlage 2: Longlist – Biotechnologische conversie

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
Biotechnological conversion (biocatalysis)		Benefit: low energy process, diverse product range.						
	Photosynthetic microorganisms (polymer compounds like glycolic acid, lactic acid)	Involves crops, microalgae and cyanobacteria to convert CO ₂ for the production of polymer compounds.	5-7	tbd	Photanol (failliet 2025)	No dedicated policy support.	tbd	Nova Institut (2023), FCNL (2023), de Barros Gallo et al. (2025)
	Non-photosynthetic microorganisms (ethanol, methane, lactic acid)	Options: bacterial fermentation or bioelectrochemistry (electrofermentation). CO/syngas can be used as a feedstock for microbial fermentation to produce ethanol, butanol and other chemical building blocks.	9	tbd	LanzaTech	No dedicated policy support.	tbd	Nova Institut (2023), Lux Research & Global CO ₂ Initiative (2022), de Barros Gallo et al. (2025)
	Single-cell proteins	Various routes: H ₂ -oxidizing bacteria, syngas fermentation with acetogenic bacteria, photoautotrophic cyanobacteria, microalgae. Hurdles: technical challenges and stringent food safety regulations. With formic/electrochemical product as input for bacteria/microbes.	5-7	tbd	DSM (via ethanol), Aerbio (via methanol of ethanol), Kiverdi, Framless, GAFT (via formic)/Twence, DeepBranch	No dedicated policy support.	EU market value: 260 billion euros (EU Commission, 2021). Application areas: animal feed, aquaculture, and/or human consumption.	de Barros Gallo et al. (2025)
	Direct biotechnological conversion to PHA	Fermentation with adapted microorganisms to carbon-based feedstocks, such as sugars/starch/oils. Technology uses acetogenic bacteria, photoautotrophic cyanobacteria or microalgae to produce PHA's.	tbd	tbd	R&D bij Avans Hogeschool, Wageningen Universiteit	No dedicated policy support.	tbd	Nova Institut (2023)

Bijlage 2: Longlist – Carbon additives

Low	Medium	High						
Category	Pathway	Description	TRL	Energy need	Stakeholders in NL	Policy	Market	source
Carbon additives		Benefit: long-term sequestration of carbon. No production process validated at scale, lack of players, technical challenges and high capital costs.	6					Lux Research & Global CO2 Initiative (2022), IEA (2019)
	Carbon nanotubes & nanofibers	Catalytic conversion of CO2 using iron-based catalyst or CO2 electrolysis using carbonate-based electrolyte.	tbd		COtoZero (tech enabler, researching potential capture technology as feedstock for nanomaterials), Bergen Carbon Solutions	No dedicated policy support.		Lux Research & Global CO2 Initiative (2022)
	Graphene	Mechanochemical exfoliation using oxidizing gas, catalyst or acid.	tbd		Aeroborn (combined capture & conversion)	No dedicated policy support.		Lux Research & Global CO2 Initiative (2022)

Bronnen (1/2)

- Akerboom, S. et al. (2025). *De toekomst van duurzame koolstofchemie in Nederland – Expertadvies*.
- BCG & OGCi (2024). *Carbon capture and utilization as a decarbonization lever*.
- Bisotti, F., Hoff, K. A., Mathisen, A., & Hovland, J. (2024). *Direct Air Capture (DAC) deployment: A review of the industrial deployment*. *Chemical Engineering Science*, 283, 119416.
- Bollen, Faaij, de Graaff, Hers en Kramer (2025). 'Haalbaarheid van de Clean Industrial Deal, Wetenschappelijke factsheet' (kamerstuk 2025Z08099)
- Carbon Gap (2025). *Industrial Decarbonisation Accelerator Act (IDAA)*.
- CO₂ Value Europe (2024). *The Contribution of Carbon Capture and Utilisation (CCU) towards Climate Neutrality in Europe (Part 2)*
- Detz, R. J., Reek, J. N. H., & Van Der Zwaan, B. C. C. (2018). *The future of solar fuels: when could they become competitive?* *Energy & Environmental Science*, 11(7), 1653–1669.
- Detz, R., Beerse, M. et al. (2024). *Towards the Use of Renewable Syngas for the Decarbonization of Industry*.
- Driver (2024). *Global decarbonization potential of CO₂ mineralization in concrete materials*. *PNAS*, 121(29), e2313475121.
- European Commission (2021). *Identification and analysis of promising carbon capture and utilisation technologies, including their regulatory aspects*. CE_Delft_EC_3N33_Final_report.pdf.
- European Commission (2024). *Guidance on the use of renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) to meet the transport targets of the Renewable Energy Directive*. Communication C(2024) 5042 final.
- European Commission. (2025a). *Industrial carbon management*.
- European Commission. (2025a). *Industrial carbon management*.
- European Commission. (2025c). *The Net-Zero Industry Act*.
- European Commission. (2025d). *A European Chemicals Industry Action Plan*.
- FCNL (2023). *De koolstofkringloop sluiten met carbontech. Voorstel incl. feedback commissie en antwoorden*.
- Fu, Z., Yang, Q., Liu, Z., Chen, F., Yao, F., Xie, T., ... & Zeng, G. (2019). *Photocatalytic conversion of carbon dioxide: From products to design the catalysts*. *Journal of CO₂ Utilization*, 34, 63–73.
- Hanifa (2023). *A review on CO₂ capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies*.
- IEAGHG (2021). *CO₂ as a Feedstock: Comparison of CCU Pathways*.
- IEA (2019). *Putting CO₂ to Use*.

Bronnen (2/2)

- Interviews (2025). *Interviews met verschillende experts uit overheid, bedrijfsleven en kennisorganisaties*. Zie [Bijlage 1](#).
- Karunarathne, S. et al. (2025). *Review on CO₂ removal from ocean with an emphasis on direct ocean capture (DOC) technologies*. *Separation and Purification Technology*, 353, 128598.
- Li, Z. et al. (2025). A mini-review for direct air capture (DAC) and direct ocean capture (DOC) using electrochemical technologies. *Future Batteries*, 5, 100020.
- Longo (2024). CO₂ utilisation with plasma technologies.
- Lux Research & Global CO₂ Initiative (2022). Implementing CO₂ capture and utilization at scale and speed.
- MinEZK & MinIenW (2025). Conceptvisie duurzaam koolstofgebruik in de chemie. Intern document.
- MinIenW & MinKGG (2025). Consultatie nationale visie duurzame koolstof in de chemische industrie. Overheid.nl.
- MinKGG (2024). *Bijlage A Beleidsagenda 2024 met aanvullende inzet ter operationalisering van ontwikkelpaden NPE*.
- Nova Instituut (2023). Carbon Dioxide (CO₂) as Feedstock for Chemicals, Advanced Fuels, Polymers, Proteins and Minerals. Niet publiek.
- Otto, D. & Van Maurik, R. (2024). GCNE Monitor 2024.
- PBL (2024). Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050.
- Pescarmona, P. P. (2021). Cyclic carbonates synthesised from CO₂: Applications, challenges and recent research trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100457.
- Pinter (2024). The development of global power-to-methane potentials between 2000 and 2020: A comparative overview of international projects.
- Renewable Carbon Initiative (2024). Evaluation of recent reports on the future of a Net-Zero chemical industry in 2050.
- Sapart, C.; Arning, K.; Bardow, A.; Breyer, C.; Dibenedetto, A.; Erkman, S.; Hills, C. D.; Léonard, G.; Reis-Machado, A. S.; Mertens, J.; Nizoul, S.; Pant, D.; Vente, J. (2022). Climate Change Mitigation: The contribution of Carbon Capture and Utilisation (CCU). 16th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-1623rd -27th October 2022, Lyon, France.
- Schuler, E., Demetriou, M., Shiju, N. R., & Gruter, G. J. M. (2021). Towards sustainable oxalic acid from CO₂ and biomass. *ChemSusChem*, 14(18), 3636–3664.
- TNO (2019). Technology fact sheet – methane production from CO₂. [Link](#).
- TNO (2024). Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050. Zie ook: [TNO Energy Scenarios](#) – Carbon Flows.
- TNO & Smartport (2025). Circulaire koolstof voor de Nederlandse chemie- en brandstoffensector. [kranenburg-2025-circulaire.pdf](#).
- Tauw, Rebel, DRIFT (2025). Transitiepaden naar een duurzame koolstofchemie. Overheid.nl.
- &flux (2024). Harbour Industrial Complex as CCU hub: dream or reality? A regional perspective.

Bronnen voor samenstellen longlist (1/2)

Author	Year	Title	Link
Ministerie van KGG en Ministerie van I&W	2025	Conceptvisie duurzaam koolstofgebruik in de chemie	Concept, not yet published
de Barros Gallo, A., Fossa, A.J., Liaw, C., Moutinho dos Santos, E.	2025	CCU-Based Products and Their Technological Routes. In: Pereira, E.G., Fossa, A.J., Muinzer, T.L. (eds) Carbon Capture Utilization and Storage. Sustainable Development Goals Series. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81272-9_6	CCU-Based Products and Their Technological Routes SpringerLink
TNO	2025	VoltaChem Whitepaper	Concept, not yet published
BCG, OGC	2024	Carbon capture and utilization as a decarbonization lever	CCU-Report-vf.pdf
J.G. Driver, E. Bernard, P. Patrizio, P.S. Fennell, K. Scrivener, & R.J. Myers	2024	Global decarbonization potential of CO2 mineralization in concrete materials. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121(29), e2313475121.	Global decarbonization potential of CO2 mineralization in concrete materials PNAS
Detz, R.; Beerse, M; Meulendijks, N.; Buskens, P.; Van der Zwaan, B. Pinter	2024	Towards the Use of Renewable Syngas for the Decarbonization of Industry	Towards the Use of Renewable Syngas for the Decarbonization of Industry
	2024	The development of global power-to-methane potentials between 2000 and 2020: A comparative overview of international projects	The development of global power-to-methane potentials between 2000 and 2020: A comparative overview of international projects - ScienceDirect
Longo, V., Centi, G., Perathoner, S., & Genovese, C.	2024	CO2 utilisation with plasma technologies	
European Commission	2024	Guidance on the use of renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) to meet the transport targets of the Renewable Energy Directive. Communication C(2024) 5042 final.	0c574279-b71d-4aa0-9403-daf9ea5a8491_en
Hanifa	2023	A review on CO2 capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies	A review on CO2 capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialised technologies
FCNL	2023	De koolstofkringloop sluiten met carbontech. Voorstel incl feedback commissie en antwoorden.	
Nova institut	2023	Carbon Dioxide (CO2) as Feedstock for Chemicals, Advanced Fuels, Polymers, Proteins and Minerals.	Not public

Bronnen voor samenstellen longlist (2/2)

Author	Year	Title	Link
Lux Research & Global CO2 Initiative	2022	Implementing CO2 capture and utilization at scale and speed	Implementing CO2 capture and utilization at scale and speed(2022).pdf
Carbon Recycling International	2022	WORLD'S LARGEST CO ₂ -TO-METHANOL PLANT STARTS PRODUCTION	World's Largest CO2-to-Methanol Plant Starts Production
IEAGHG	2021	CO ₂ as a Feedstock: Comparison of CCU Pathways	CO₂ as a Feedstock: Comparison of CCU Pathways - IEAGHG
EU Commission	2021	Identification and analysis of promising carbon capture and utilisation technologies, including their regulatory aspects	CE_Delft_EC_3N33_Final_report.pdf
Schuler, E., Demetriou, M., Shiju, N. R., & Gruter, G. J. M.	2021	Towards Sustainable Oxalic Acid from CO2 and Biomass. ChemSusChem, 14(18), 3636-3664. https://doi.org/10.1002/cssc.202101272	Towards Sustainable Oxalic Acid from CO2 and Biomass.pdf
Pescarmona, P. P.	2021	Cyclic carbonates synthesised from CO2: Applications, challenges and recent research trends. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 29, 100457.	Cyclic carbonates synthesised from CO2: Applications, challenges and recent research trends - ScienceDirect
IEA	2019	Putting CO2 to Use	Putting CO2 to Use
TNO	2019	Technology fact sheet - methane production from CO2	https://energy.nl/wp-content/uploads/technology-factsheets-methane-from-co2-and-h2-7.pdf
Fu, Z., Yang, Q., Liu, Z., Chen, F., Yao, F., Xie, T., Zhong, Y., Wang, D., Li, J., Li, X., & Zeng, G.	2019	Photocatalytic conversion of carbon dioxide: From products to design the catalysts. Journal of CO ₂ Utilization, 34, 63–73. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.05.032	Photocatalytic conversion of carbon dioxide: From products to design the catalysts - ScienceDirect
Detz, R. J., Reek, J. N. H., & Van Der Zwaan, B. C. C.	2018	The future of solar fuels: when could they become competitive?. Energy & Environmental Science, 11(7), 1653-1669.	c8ee00111a.pdf