

*Achtergrondrapport
CO₂-verwijdering:*

Definitie, methoden, noodzaak en potentiëlen



WKR Wetenschappelijke
Klimaatraad

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
1 Definitie en rollen van CO₂-verwijdering	4
1.1 Definitie van CO ₂ -verwijdering	4
1.2 Definitie van tijdelijke en permanente CO ₂ -verwijdering	4
1.3 Rollen van CO ₂ -verwijdering	5
1.4 CO ₂ -verwijdering en emissiereductie zijn niet equivalent	5
2 Methoden voor CO₂-verwijdering	7
2.1 Overzicht van CO ₂ -verwijderingsmethoden	7
2.2 Categorisering	9
2.3 Positieve en negatieve bijeffecten	9
3 Noodzaak voor CO₂-verwijdering	11
3.1 De omvang van de wereldwijde en Europese CO ₂ -verwijderingsopgave	11
3.2 Definitie van restemissies	13
3.3 Ramingen van Nederlandse restemissies in 2050	13
3.4 Noodzaak van CO ₂ -verwijdering voor Nederland na klimaatneutraliteit	15
4 CO₂-verwijderingspotentiëlen in Nederland	16
4.1 Het bepalen van potentiëlen	16
4.2 Raming van CO ₂ -verwijderingspotentiëlen en -kosten in Nederland	16
5 Geologische opslagpotentiëlen	20
5.1 Nederland	20
5.2 Europa	22
Afkortingen	23
Referenties	24

Voorwoord

Dit achtergrondrapport hoort bij het advies 'De lucht klaren?' van de Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR).¹ Het geeft een beknopt overzicht van de wetenschappelijke stand van zaken op het gebied van CO₂-verwijdering. Het behandelt onder andere definities van CO₂-verwijdering, de verschillende methoden en hun eigenschappen. Het rapport wordt gepubliceerd door de Wetenschappelijke Klimaatraad en is opgesteld door Rens Baardman, Tiny van der Werff en Daan van Herpen van het stafbureau van de WKR en door Kiane de Kleijne van de Technische Universiteit Eindhoven.

¹ Wetenschappelijke Klimaatraad (2024).

1 Definitie en rollen van CO₂-verwijdering

1.1 Definitie van CO₂-verwijdering

Er zijn verschillende definities van CO₂-verwijdering in omloop. Het *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) definieert CO₂-verwijdering als: “menselijke activiteiten die koolstofdioxide uit de atmosfeer verwijderen en langdurig opslaan in geologische, aardse, of oceanische reservoirs, of in producten. Het omvat bestaande en potentiële door de mens versnelde biologische of geochemische CO₂-opname en directe afvang en opslag van CO₂ uit de lucht (DACCS), maar sluit natuurlijke CO₂-opname die niet direct veroorzaakt is door menselijke activiteiten uit”².

Tanzer en Ramírez hebben vier criteria opgesteld waaraan een maatregel moet voldoen om te worden beschouwd als CO₂-verwijdering:^{3,4}

1. CO₂ is fysiek uit de atmosfeer verwijderd.
2. De verwijderde CO₂ is buiten de atmosfeer opgeslagen op een manier die beoogt permanent te zijn.
3. Alle uitstoot van broeikasgassen die gepaard gaat met het verwijderings- en opslagproces, inclusief de toevoerketens, is meegenomen in de uitstootbalans.
4. De totale hoeveelheid CO₂ die uit de atmosfeer is verwijderd en opgeslagen, is groter dan de totale uitstoot van broeikasgassen in de keten.

1.2 Definitie van tijdelijke en permanente CO₂-verwijdering

Er bestaan verschillende interpretaties van de minimale opslagduur die vereist is voordat CO₂-opslag⁵ als ‘permanent’ (zie criterium 2) kan worden beschouwd. Het IPCC specificeert niet wat wordt verstaan onder langdurige (*‘durable’*) CO₂-opslag, maar houdt wel een ondergrens van minstens enkele decennia aan. Vanuit het uitgangspunt dat de opslagduur minstens gelijk moet zijn aan de tijd waarin (een deel van) de uitgestoten CO₂ nog in de atmosfeer blijft, is een opslagduur van minstens 1000 jaar vereist.⁶ Ramírez et al. hanteren een periode van 500 jaar, waarbij zij redeneren dat klimaatverandering dan ofwel onder controle zal zijn, of dat het potentieel vrijkomen van eerder opgeslagen CO₂ tegen die tijd geen significant verschil meer maakt.⁷ In een informatienota van de UNFCCC Subsidiary Body wordt 100 jaar genomen als meest gangbare en algemeen geaccepteerde ondergrens, hoewel ook 200 of 300 jaar worden genoemd als alternatief.⁸ Dit is in lijn met de ‘meerdere eeuwen’ genoemd door de Europese Commissie.⁹

Op basis hiervan definiëren we in ons advies CO₂-opslag als *permanent* als sprake is van een minimale opslagduur van meerdere eeuwen, met de voorwaarde dat er een zeer geringe kans is op vroegtijdig vrijkomen van opgeslagen CO₂.¹⁰ Dit betekent dat alleen opslag in geologische formaties (via bioCCS en DACCS), opslag in gesteentes, en opslag in mariene sedimenten kan worden beschouwd als permanente

² “Anthropogenic activities removing carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere and durably storing it in geological, terrestrial, or ocean reservoirs, or in products. It includes existing and potential anthropogenic enhancement of biological or geochemical CO₂ sinks and direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS), but excludes natural CO₂ uptake not directly caused by human activities.” (IPCC, 2021b, p. 2221)

³ Tanzer & Ramirez (2019).

⁴ Deze criteria zijn ook omarmd door een aantal NGO's en andere organisaties. Zie bijvoorbeeld Aragonès et al. (2020) en Natuur & Milieu (2023).

⁵ Wij gebruiken de term ‘CO₂-opslag’ of ‘opslag van CO₂’ voor het gemak ook voor situaties waarbij de koolstof uit de verwijderde CO₂ niet daadwerkelijk in de vorm van CO₂ wordt opgeslagen. Dat is bijvoorbeeld het geval bij opslag in bossen en bodems, waar de koolstof uit de CO₂ wordt omgezet in organische verbindingen.

⁶ Meyer-Ohlendorf (2023).

⁷ Ramírez Ramirez et al. (2022).

⁸ Article 6.4 Supervisory Body (2023).

⁹ “‘permanent carbon storage’ means a carbon removal activity that, under normal circumstances and using appropriate management practices, stores atmospheric or biogenic carbon for several centuries”, European Commission (2022).

¹⁰ Zie ook Höglund (2022).

1 Definitie en rollen van CO₂-verwijdering

CO₂-verwijdering.¹¹ Daarnaast is er een categorie van *tijdelijke* CO₂-verwijdering, waarbij de opslag wel langdurig is (minstens meerdere decennia) maar niet permanent. Opslag in de biosfeer (onder andere in bossen en bodems) is doorgaans van kortere duur en met een kans dat de opgeslagen CO₂ vroegtijdig vrijkomt, en is daarom een vorm van tijdelijke CO₂-verwijdering.

1.3 Rollen van CO₂-verwijdering

Het algemene doel van CO₂-verwijdering is het tegengaan van klimaatverandering door het stabiliseren en verlagen van de concentratie CO₂ in de atmosfeer. CO₂-verwijdering kan hierbij drie rollen vervullen:¹²

- 1) Op korte termijn: verlagen van netto emissies;
- 2) Compenseren van resterende emissies om netto neutraliteit (voor CO₂ of alle broeikasgassen) te bereiken;
- 3) Op lange termijn: bereiken van netto negatieve emissies, waarbij er meer CO₂-verwijdering dan uitstoot plaatsvindt.

Aangezien er nog geen praktische manieren zijn voor het verwijderen van de overige broeikasgassen, zal het moment van netto nul CO₂-emissies eerder worden bereikt dan het moment van netto nul broeikasgasemissies. Op kleinere schaal (bijvoorbeeld in Nederland of Europa) kan het moment van netto negatieve emissies eerder worden bereikt dan op wereldschaal (zowel van CO₂- als totale broeikasgasemissies). Sommige landen kunnen dan al netto negatieve emissies bereiken terwijl op dat moment op wereldschaal nog meer wordt uitgestoten dan verwijderd.

Een temperatuuroverschrijding (*temperature overshoot*) is de overschrijding van een temperatuurdoelstelling van wereldwijde opwarming, zoals 1,5 °C. Om de atmosferische CO₂-concentratie weer te laten dalen tot onder het niveau dat overeenkomt met de temperatuurdoelstelling, zijn wereldwijd netto negatieve emissies nodig. Het verlagen van netto emissies (rol 1 van CO₂-verwijdering) is een manier om een temperatuuroverschrijding te voorkomen of in hoogte te beperken, met netto negatieve emissies (rol 3) kan een temperatuuroverschrijding worden teruggedrongen. In theorie is het mogelijk om met netto negatieve emissies op lange termijn ook historische emissies te compenseren en de CO₂-concentratie te laten dalen naar pre-industriële niveaus. De haalbaarheid hiervan hangt af van verschillende factoren, zoals de beschikbaarheid, schaalbaarheid, kosten en milieu-impacts van CO₂-verwijderingsmethoden.

1.4 CO₂-verwijdering en emissiereductie zijn niet equivalent

Vaak wordt verondersteld dat het uitstoten van een ton CO₂ en op een later moment verwijderen daarvan gelijk staat het *niet* uitstoten van die ton CO₂. Om verschillende redenen is dit echter niet het geval, zelfs als CO₂ permanent wordt vastgelegd en emissies in de keten zijn verrekend:

- **Onzekerheid en omkeerbaarheid:** hoewel uitgestoten CO₂ in de atmosfeer terecht komt, is het niet gegarandeerd dat die op een later tijdstip CO₂-verwijderd kan worden. De garantie ontbreekt ook bij natuurlijke opslag van CO₂ in bossen of bodems, waar er een aanzienlijke kans is dat de opgeslagen CO₂ later weer vrijkomt. Vermeden uitstoot van CO₂ komt daarentegen nooit in de atmosfeer.
- **Tijds mismatch:** als CO₂-verwijdering wordt ingezet voor compensatie van emissies in het verleden, dan heeft de in het verleden uitgestoten CO₂ al tijdelijk een opwarmend effect gehad, tijdens de verblijfsduur in de atmosfeer. Bij compensatie die niet gelijktijdig is, is er dus alsnog een klimaat-effect van de gecompenseerde uitstoot.
- **Onomkeerbare gevolgen:** het terugdringen van een temperatuuroverschrijding heeft geen effect op onomkeerbare gevolgen van klimaatverandering (zoals het uitsterven van diersoorten) en langdurige gevolgen (zoals oceaanzuuriging en zeespiegelstijging). Daarnaast is er een kans dat er al

¹¹ In theorie kan ook via bijvoorbeeld *biochar* eeuwenlange CO₂-opslag plaatsvinden, alleen is daarbij een hoger risico dat de opslag verstoord wordt en CO₂ weer vrijkomt.

¹² Cross-Chapter Box 8 in IPCC (2022).

1 Definitie en rollen van CO₂-verwijdering

kantelpunten in het klimaatsysteem zijn bereikt, die het beperken van de gevolgen nog moeilijker maken.

- **Asymmetrie van opwarming:** Het IPCC schat dat CO₂-verwijdering tot 10% minder effectief is in het omlaag brengen van de atmosferische CO₂-concentratie dan CO₂-uitstoot is in het verhogen ervan, afhankelijk van de totale hoeveelheid CO₂-verwijdering.¹³ Verklaringen voor die asymmetrie zijn de inertie van het klimaatsysteem, niet-lineaire terugkoppelingsmechanismen in de klimaat- en de koolstofcyclus, en pad- en toestandsafhankelijke effecten.^{14,15}

¹³ IPCC (2021c) D.1.5. Er zijn echter maar weinig studies die dit hebben onderzocht en het vertrouwen in de bevindingen is dus nog laag.

¹⁴ Kim et al. (2022), Zickfeld et al. (2023).

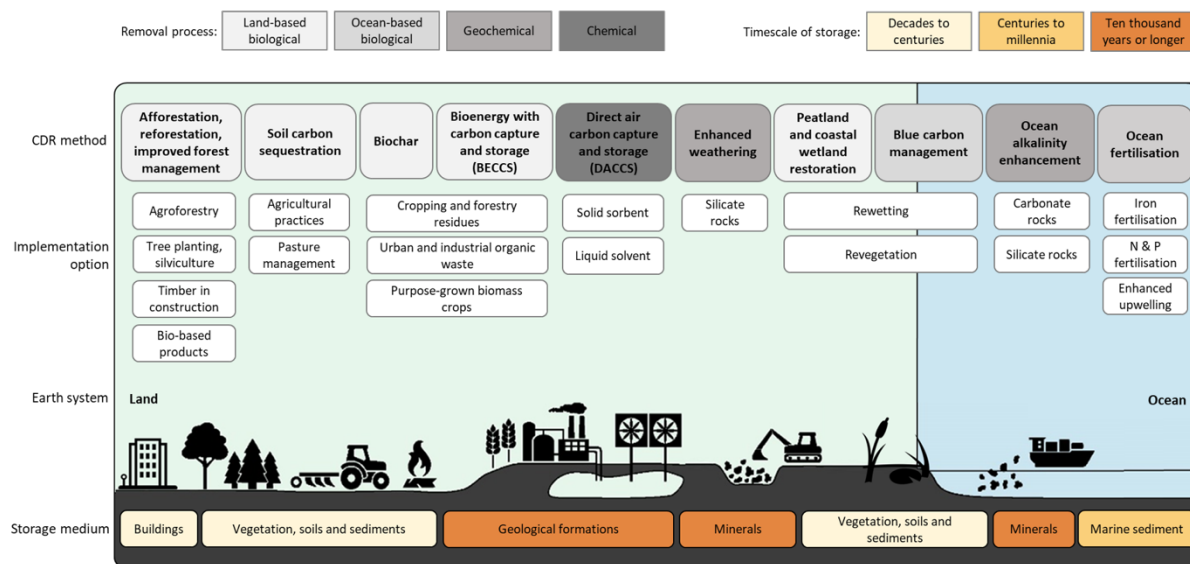
¹⁵ Koven et al. (2023) laten zien dat de vrijwel lineaire relatie tussen temperatuur en cumulatieve CO₂-emissies standhoudt onder zowel positieve als negatieve emissiescenario's, mits een bescheiden correctie wordt gemaakt. IPCC (2021a) 4.7.1 geeft een conservatieve schatting van deze correctie van $0 \pm 0,3$ °C.

2 Methoden voor CO₂-verwijdering

Dit hoofdstuk geeft een korte uitleg van de verschillende methoden voor CO₂-verwijdering die in de Nederlandse context van belang zijn. Paragraaf 0 gaat in op de manieren om deze methoden te categoriseren, en paragraaf 2.3 behandelt de bijeffecten van de methoden.

2.1 Overzicht van CO₂-verwijderingsmethoden

Er zijn diverse methoden voor CO₂-verwijdering, en per methode bestaan diverse implementatie-opties. Figuur 1 geeft een overzicht hiervan.



Figuur 1. Overzicht van verschillende methoden voor CO₂-verwijdering en implementatieopties, gecategoriseerd naar CO₂-verwijderingsproces, opslagduur en opslagmedium. Overgenomen uit IPCC (2022a)¹⁶ (Cross-Chapter Box 8, Figure 1), gebaseerd op Minx et al. (2018).

De verschillende methoden zijn:¹⁷

- **(Her)bebouwing (afforestation & reforestation):** Het vastleggen van koolstof in bomen en bodem door het (opnieuw) aanplanten van bos en door bijgroei in bestaand bos. Het overgrote deel van de huidige wereldwijd gerealiseerde CO₂-verwijdering gaat via deze route. Deze vorm van koolstofopslag wordt al meegeteld in de nationale emissieboekhoudingen, als onderdeel van de sector 'Landgebruik' (Land Use, Land Use Change, and Forestry, LULUCF).
- **Koolstofopslag in de bodem (soil carbon sequestration):** Het verhogen van het gehalte organische stof in de bodem. Dat kan door andere landbouwtechnieken toe te passen, zoals het beperken van bodemverstoring door minder (diep) te ploegen en te 'scheuren', het verbeteren van gewasrotaties, en het achterlaten van gewasresten op het land. Het herstellen van veenweidegebieden (onder andere door het waterpeil in deze gebieden te verhogen) kan uiteindelijk leiden tot aangroei van veen en daarmee tot extra opslag van koolstof.
- **Beheer van blauwe koolstof (blue carbon management):** Het vergroten van de koolstofopslag in kustgebieden ("blauwe koolstof"). Voor Nederland gaat het bijvoorbeeld om het opslaan van extra koolstof in zeegrasen en -wieren, en in kwelders. In andere landen is het aanleggen en herstellen van mangroves een belangrijke implementatieoptie.

¹⁶ IPCC (2022a).

¹⁷ Deze indeling is gebaseerd op CE Delft (2023).

2 Methoden voor CO₂-verwijdering

- **Biochar:** Het door middel van pyrolyse omzetten van biomassa in *biochar* ('biokool'), een soort houtskool. *Biochar* kan dienen als bodemverbeteraar en kan daarbij koolstof in de bodem opslaan. Ook kan het aan beton of ander bouw materiaal worden toegevoegd waardoor koolstof wordt vastgelegd. Voor het produceren van biochar kunnen ook reststromen worden gebruikt.
- **Houtbouw:** Het tijdelijk vastleggen van koolstof in hout door het hout toe te passen in bouwmaterialen.
- **Biomaterialen:** Het tijdelijk vastleggen van koolstof in langlevende producten en materialen door gebruik te maken van biograndstoffen in plaats van fossiele grondstoffen. Een andere optie is het gebruiken van biomassa (zoals miscanthus, 'olifantsgras') als vulstof in beton.
- **Biomassa met CO₂ afvang- en opslag (bioCCS)**¹⁸: Hier gaat het om alle routes waarbij biomassa wordt omgezet en de vrijgekomen CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen in geologische reservoirs. De afvang kan plaatsvinden bij elektriciteits- en warmteproductie in **biomassa- of biogas-centrales**,¹⁹ bij verbranding van materiaal van biogene oorsprong in **afvalverbrandingsinstallaties (AVI's)**,²⁰ bij biomassaketels voor **hogetemperatuurwarmte** in de industrie en bij de productie van **biobrandstoffen** door middel van biomassavergassing. Ook kan biomassa als vervanging voor kolen worden ingezet bij staalproductie zoals in het alternatieve **Hlsarna**-proces, waar CO₂-afvang en -opslag kan worden toegepast.
- **Directe afvang en opslag van CO₂ uit de lucht (direct air carbon dioxide capture and storage; DACCS):** Dit omvat een groep van technologieën die CO₂ direct uit de lucht halen. Meestal gebeurt dit met ventilatoren die lucht door een medium (een vloeistof of een poreuze vaste stof, al dan niet via een membraan) geleiden, waarbij de CO₂ achterblijft in het medium. De geconcentreerde CO₂-stroom die na bewerking van het medium ontstaat, wordt vervolgens opgeslagen in geologische reservoirs. Ook kan de CO₂ worden gebruikt in producten, al is dit in de meeste gevallen geen CO₂-verwijdering (men spreekt dan van *direct air carbon dioxide capture and utilisation*, DACCU).
- **Mineralisatie:** Het verwijderen van CO₂ via processen waarbij natuurlijke gesteentes (zoals basalt en olivijn) reageren met CO₂ waardoor CO₂ wordt vastgelegd in carbonaatmineralen. Dit proces vindt van nature plaats bij verweering van gesteentes en kan worden versneld door gesteente te vermalen en over een groot oppervlak te verspreiden (*enhanced weathering*). Als het wordt verspreid in zee of kustgebieden, spreekt men van *ocean alkalinity enhancement*.²¹ Daarbij bindt het CO₂ dat is opgelost in zeewater. Om het evenwicht van CO₂ in het zeewater te herstellen, wordt dezelfde hoeveelheid CO₂ uit de lucht weer opgenomen in het zeewater. Vermalen gesteente kan ook in contact worden gebracht met geconcentreerde CO₂, bijvoorbeeld afkomstig van *direct air capture*. Het resulterende carbonaatmateriaal kan bijvoorbeeld worden gebruikt als ophoogzand of in beton.

¹⁸ Wij kiezen in dit rapport voor de term 'bioCCS' (omzetting van biomassa gecombineerd met CO₂-afvang en ondergrondse opslag, in het Engels: *biomass with carbon dioxide capture and storage*), om duidelijk te maken dat het gaat om alle vormen van biomassaomzetting in combinatie met CCS. Het gaat dus niet alleen over verbranding in biomassacentrales, waar de term 'BECCS' (*bioenergy with carbon dioxide capture and storage*) vaak mee wordt geassocieerd. Een vergelijkbare term is 'BiCRS' (*biomass carbon removal and storage*), die is geïntroduceerd om ook verwijderingsmethoden die wel biomassa maar geen CCS gebruiken, te omvatten (Sandalow et al., 2020). De nadruk ligt hier op CO₂-verwijdering in plaats van op bio-energie.

¹⁹ RWE heeft al concrete plannen om in Nederland twee van hun kolencentrales – waar al biomassa wordt bijgestookt – om te bouwen tot biomassacentrales met CCS, om zo CO₂-verwijdering te realiseren (RWE, 2022).

²⁰ Alleen het biogene deel van het afval (ongeveer de helft tot tweederde) leidt tot CO₂-verwijdering,

²¹ Er zijn andere implementatieopties voor *ocean alkalinity enhancement* die geen gebruik maken van mineralisatie, zoals het direct toevoegen van alkalische materialen aan zeewater of door middel van elektrochemische processen, maar deze bevinden zich nog in vroeg stadium van ontwikkeling.

2 Methoden voor CO₂-verwijdering

2.2 Categorisering

Zoals besproken in paragraaf 1.2 is de duur van de CO₂-opslag een essentieel kenmerk van de verschillende CO₂-verwijderingsmethoden. We maken daarbij onderscheid tussen tijdelijke en permanente methoden. Naast het indelen naar opslagduur, zijn er diverse andere categorisering van CO₂-verwijderingsmethoden. Een overzicht staat in Tabel 1. Sommige categorisering laten een sterk 'frame' zien, zoals 'nature-based' versus 'technological'.

Tabel 1. Overzicht van verschillende categorisering van CO₂-verwijderingsmethoden. Voor de opslagduur onderscheiden we tijdelijk (minstens enkele decennia), en permanent (minstens enkele eeuwen, met geringe kans op vroegtijdig vrijkomen).

Method	Verwijderingsproces	Opslagmedium	Technologie	Status	Opslagduur
(Her)bebossing	Biologisch (land)	Vegetatie & bodem	Nature-based	Conventioneel	Tijdelijk
Koolstofopslag in de bodem	Biologisch (land)	Vegetatie & bodem	Nature-based	Conventioneel	Tijdelijk
Beheer van blauwe koolstof	Biologisch (oceaan)	Vegetatie & bodem	Nature-based	Conventioneel	Tijdelijk
Biochar	Biologisch (land)	Bodem	Nature-based/ hybride	Nieuw	Tijdelijk ²²
Houtbouw	Biologisch (land)	Producten	Nature-based	Conventioneel	Tijdelijk
Biomaterialen	Biologisch (land)	Producten	Technological	Nieuw	Tijdelijk ²³
BioCCS	Biologisch (land)	Geologisch	Technological/ hybride	Nieuw	Permanent
DACCS	Chemisch	Geologisch	Technological	Nieuw	Permanent
Mineralisatie	Geo-chemisch	Mineralen	Technological	Nieuw	Permanent

2.3 Positieve en negatieve bijeffecten

De methoden voor CO₂-verwijdering hebben verschillende positieve bijeffecten (mits goed uitgevoerd) en negatieve bijeffecten (waarvan sommigen te voorkomen zijn bij zorgvuldige implementatie). Tabel 2 vat deze bijeffecten samen.

Verschiedende methoden zijn afhankelijk van de productie van biomassa: (her)bebossing, biochar, houtbouw, biomaterialen en bioCCS. Deze productie kent ook belangrijke bijeffecten: zowel positief (mogelijke verbetering biodiversiteit; lokale werkgelegenheid) als negatief (ruimtebeslag met mogelijke competitie met voedselproductie; risico van niet duurzame bosbouw of zelfs ontbossing; risico op verlies van biodiversiteit bij aanleg nieuwe bossen; risico op verstoring van het natuurlijk bodem- en watersysteem; emissies in aanleverketen bij cultiveren, oogsten en vervoeren). Naast de in tabel 2 genoemde bijeffecten, zijn deze bijeffecten dus ook van toepassing voor de methoden die van biomassa afhankelijk zijn.

²² Door biochar te verwerken in beton kan de opslag mogelijk wel permanent worden gemaakt.

²³ Als de opslag korter is dan een aantal decennia, beschouwen we het niet als CO₂-verwijdering.

2 Methoden voor CO₂-verwijdering

Tabel 2. Overzicht van de belangrijkste mogelijke positieve en negatieve bijeffecten (co-benefits en trade-offs).²⁴

	Positieve bijeffecten	Negatieve bijeffecten
(Her)bebossing	Positieve bijeffecten biomassa, recreatie en volksgezondheid	Negatieve bijeffecten biomassa, mogelijke lachgasemissies bij bemesting, ²⁵ mogelijke opwarmende effecten door lagere albedo (afhankelijk van breedtegraad) ²⁶
Koolstofopslag in de bodem	Verbeterd vochtvasthoudend vermogen van bodem, verbeterde bodemvruchtbaarheid, betere infiltratie bij stevige regenbuien, meer biodiversiteit en minder erosie	Mogelijk negatief effect op voedselopbrengst van landbouwgrond, extra methaanemissies bij aangroei van veen in veenweidegebied
Beheer van blauwe koolstof	Herstel van ecosystemen, kustbescherming, verbetering biodiversiteit	-
Biochar	Positieve bijeffecten biomassa, bodemverbeteraar, verbeterde waterhuishouding en verhoogde opbrengst gewassen	Negatieve bijeffecten biomassa, mogelijke verontreiniging door gebruik vervuild rioolslib, emissie van fijnstof
Houtbouw	Positieve bijeffecten biomassa, Veelal lagere milieudruk en uitstoot dan conventionele bouwmaterialen	Negatieve bijeffecten biomassa
Biomaterialen	Positieve bijeffecten biomassa, economische waarde	Negatieve bijeffecten biomassa
BioCCS	Positieve bijeffecten biomassa, productie van hernieuwbare energie en brandstoffen	Negatieve bijeffecten biomassa N.B. de bijeffecten zijn sterk afhankelijk van het gebruikte type biomassa (bv. houtig of niet, reststroom of voor dit doel geteeld)
DACCS	Potentiële bron van synthetische koolstof ²⁷	Hoog energiegebruik, mogelijk hoog watergebruik
Mineralisatie	Economische waarde (bv. als ophoogzand of in bouw materiaal), vermindering bodemerosie en bodemverzuring, verbeterde waterhuishouding	Energiegebruik (bij winnen, vermalen, transporteren en verspreiden), impact van mijnbouw, mogelijk vrijkomen van schadelijke metalen en fijnstof

²⁴ CE Delft (2023), IPCC (2022a).

²⁵ Lugato et al. (2018), Guenet et al. (2021).

²⁶ Mykleby et al. (2017), Rohatyn et al. (2022).

²⁷ Als de afgevangen CO₂ wordt gebruikt voor bijvoorbeeld brandstoffen (DACCU), dan is het geen CO₂-verwijdering.

3 Noodzaak voor CO₂-verwijdering

Paragraaf 3.1 geeft een indicatie van de wereldwijde omvang van de benodigde CO₂-verwijdering. Om de behoefte aan CO₂-verwijdering in te schatten, is het belangrijk om een beeld te krijgen van de 'restemissies' die overblijven ten tijde van klimaatneutraliteit (zie paragraaf 3.2). Dit zijn de emissies die moeten worden gecompenseerd om klimaatneutraal te worden: er is dan een balans tussen uitstoot en CO₂-verwijdering, zodat er netto geen opwarmend klimaateffect meer is. Paragraaf 3.3 geeft een inschatting van de Nederlandse restemissies. Ook na klimaatneutraliteit is er behoefte aan CO₂-verwijdering om de atmosferische CO₂-concentratie te verlagen. Zo kan een eventuele temperatuuroverschrijding worden teruggedrongen (zie paragraaf 0).

3.1 De omvang van de wereldwijde en Europese CO₂-verwijderingsopgave

3.1.1 Wereldwijd

Momenteel wordt naar schatting 3 gigaton²⁸ CO₂ per jaar (GtCO₂/j) aan tijdelijke CO₂-verwijdering (in bossen of bodems) gerealiseerd. Met permanente CO₂-verwijderingsmethoden wordt momenteel slechts 0,0021 GtCO₂/j gerealiseerd.²⁹ De omvang van de opgave wordt duidelijk als we dit vergelijken met de benodigde schaal van CO₂-verwijdering later deze eeuw.

Voor de inzet van bioCCS komen scenario's op basis van *Integrated Assessment Modellen* (IAM's) uit op gemiddeld 2,75 GtCO₂/j (5–95% bandbreedte: 0,52–9,45) in 2050.³⁰ Om dit te bereiken, is elke 2,7 jaar (2,3–3,4 jaar voor de hele bandbreedte) tot 2050 een verdubbeling nodig van de bioCCS-capaciteit.³¹ Ter vergelijking: dat is sneller dan de groei van het wereldwijd geïnstalleerd vermogen van windenergie tussen 2000 en 2022 (verdubbelingstijd: 3,8 jaar), en vergelijkbaar met de groeisnelheid van zonne-energie (verdubbelingstijd: 2,3 jaar).³² De beperkende factor voor de opschaling van bioCCS is echter niet zozeer technologische innovatie maar het aanbod van biomassa. De huidige investeringen in permanente CO₂-verwijderingstechnieken blijven met zo'n 1,7 miljard US-dollar nog steken op ongeveer 10% van het investeringsniveau van zonne-energie in de opstartfase destijds.³³

De door IAM's gemodelleerde inzet in 2050 van DACCS in 2 °C-scenario's varieert sterk, van 0 tot 1,74 GtCO₂/j (gemiddeld: 0,02 GtCO₂/j). Dat komt onder andere doordat DACCS in veel IAM's nog niet (goed) is meegenomen.³⁴ De inzet loopt op naar gemiddeld 1,02 GtCO₂/j in 2100 (5–95% bandbreedte: 0–12,6). Om dat in perspectief te zetten: het jaarlijks verwijderen van 1 GtCO₂ door middel van DACCS vraagt rond de 1% van het huidige wereldwijde energieverbruik.³⁵

Uit een analyse van de ingediende *nationally determined contributions* en *long-term strategies* blijkt dat wereldwijd de beoogde hoeveelheid CO₂-verwijdering zowel in 2030 als 2050 tekortschiet, met name voor permanente CO₂-verwijderingsmethoden. De bestaande beleidsplannen komen uit op 1,5–1,9

²⁸ Een gigaton (Gt) is een miljard ton, oftewel duizend megaton.

²⁹ Lamb, Roman-Cuesta et al. (2024).

N.B. Bij tijdelijke verwijderingen gaat hier om de vastlegging op beheerde bosgronden (exclusief indirecte klimaateffecten zoals CO₂-bemesting). Dit is niet hetzelfde als de wereldwijde bijdrage van LULUCF, want daar wordt nog steeds meer uitgestoten dan vastgelegd.

³⁰ IPCC (2022a), met de belangrijke kanttekening dat dit al mogelijk (ver) boven het beschikbare bioCCS-potentieel ligt. Fuss et al. (2018) schatten het potentieel voor bioCCS in op 0,5–5 GtCO₂/j, waarbij ze rekening houden met onder andere duurzaamheid.

³¹ Eigen berekening op basis van Smith et al. (2023).

³² Eigen berekening op basis van Ember (2024).

³³ Mistry et al. (2023).

³⁴ IPCC (2022a)

³⁵ Eigen berekening op basis van Bergman & Rinberg (2021).

3 Noodzaak voor CO₂-verwijdering

GtCO₂/j aan additionele CO₂-verwijdering in 2050, waarvan 0,7–0,96 GtCO₂/j van permanente methoden.³⁶ Dit volstaat hooguit voor die IAM-scenario's (voor zowel het beperken van de opwarming tot 1,5 °C of 2 °C) die zich aan de onderkant van de bandbreedte van de benodigde CO₂-verwijdering bevinden.

3.1.2 Kritiek op hoogte van CO₂-verwijdering in IAM-scenario's

IAM's zijn complexe modellen die worden gebruikt om de interactie tussen economische en maatschappelijke ontwikkeling, en klimaatverandering te begrijpen. De meeste IAM's proberen de totale economische kosten te minimaliseren van het bereiken van bepaalde mitigatie-uitkomsten, zoals het beperken van de wereldwijde opwarming tot 1,5°C of 2°C.

Op het grootschalige gebruik van CO₂-verwijdering in IAM's (zie paragraaf 3.1.1) is kritiek vanuit zowel de wetenschappelijke als NGO-hoek.³⁷ Ten eerste gaan veel IAM-scenario's ervan uit dat CO₂-verwijdering op grote schaal kan worden gerealiseerd. Er zijn echter grote onzekerheden over de snelheid van technologische innovatie en de ontwikkeling van de kosten. Daarnaast houden de IAM's maar beperkt rekening met duurzaamheidsgrenzen en factoren zoals sociale acceptatie. Een tweede, meer technische factor is dat de aannames waarop IAM's zijn gebouwd ervoor zorgen dat kosten op korte termijn zwaarder wegen dan die in de toekomst.³⁸ Hierdoor, wordt in de IAM's de last verder achteruitgeschoven, in plaats van een grotere focus op vergaande emissiereductie in de nabije toekomst. Tot slot worden bepaalde maatregelen en effecten niet of slechts beperkt meegenomen in IAM's, zoals duurzame keuzes en gedragsverandering, versneld afbouwen van de uitstoot van overige broeikasgassen zoals methaan, en verduurzamingstechnieken met nog onzekere kosten. Scenario's die deze factoren wel meenemen, laten een sterk verminderde afhankelijkheid van CO₂-verwijdering zien.³⁹

3.1.3 Europees

In de scenario's voor een klimaatneutraal Europa van de European Scientific Advisory Board on Climate Change (ESABCC) liggen de restemissies in 2050 in de EU tussen de 390–1165 megaton CO₂-equivalent per jaar (MtCO₂e/j).⁴⁰ Dit is echter hoger dan wat de ESABCC mogelijk acht om te compenseren met CO₂-verwijdering. De ESABCC hanteert een bovengrens van 400 MtCO₂/j voor tijdelijke CO₂-verwijdering. Ter vergelijking, het EU-doel voor tijdelijke CO₂-verwijdering ligt op 310 MtCO₂/j in 2030.⁴¹ Voor bioCCS en DACCS samen is de bovengrens 425 MtCO₂/j, op basis van de haalbare CCS-capaciteit. In scenario's die binnen deze bovengrenzen blijven, zit 70–336 MtCO₂/j aan bioCCS en 0–22 MtCO₂/j aan DACCS.

In de basisscenario's uit het impact assessment van de Europese Commissie voor het 2040-doel, liggen de restemissies tussen de 411–416 MtCO₂e/j.⁴² Er wordt dan 332–341 MtCO₂/j aan tijdelijke CO₂-verwijdering ingezet en zo'n 120 MtCO₂/j aan permanente CO₂-verwijdering. Van de permanente CO₂-verwijdering komt ongeveer de helft van bioCCS en de andere helft van DACCS. Opgeteld leidt dit tot netto negatieve emissies. In het LIFE-scenario dat zich richt op duurzame keuzes en gedragsverandering dalen de restemissies naar 360 MtCO₂e/j. Er wordt 389 MtCO₂/j aan tijdelijke CO₂-verwijdering ingezet. Hierdoor is er minder permanente CO₂-verwijdering nodig is: zo'n 40 MtCO₂/j, grotendeels afkomstig van bioCCS. Ook dit scenario komt uit op netto negatieve emissies.

³⁶ Lamb, Gasser et al. (2024).

³⁷ Zie bijvoorbeeld Anderson & Peters (2016), Anderson et al. (2023), Bednar, Obersteiner & Wagner (2019), en van Beek et al. (2022).

³⁸ Dit heeft te maken met de gekozen hoogte van de disconteringsvoet (*discounting rate*).

³⁹ Van Vuuren et al. (2018), Edelenbosch et al. (2024).

⁴⁰ ESABCC (2023).

⁴¹ Het gaat hier om het doel voor de *Land Use, Land Use Change and Forestry*-sector (LULUCF).

⁴² European Commission (2024).

3 Noodzaak voor CO₂-verwijdering

3.2 Definitie van restemissies

In navolging van Schenuit et al.⁴³ definiëren we 'restemissies' simpelweg als de resterende broeikasgasemissies op en na het moment van CO₂- of broeikasgasneutraliteit. Deze emissies moeten op dat moment dus worden gecompenseerd door CO₂-verwijdering om neutraliteit te bereiken. We koppelen het daarmee expliciet los van termen als 'moeilijk te vermijden', 'onvermijdbare', of 'hard-to-abate' emissies, omdat de mate van vermijdbaarheid geen vaststaand gegeven is. Er zijn drie categorieën van broeikasgasemissies die vaak als zodanig worden gekwalificeerd:⁴⁴ i) emissies die inherent zijn aan bepaalde productieprocessen, zoals methaanemissies uit de veeteelt of CO₂ die vrijkomt bij de omzetting van kalksteen naar calciumoxide bij cementproductie; ii) emissies die alleen te vermijden zijn met grote maatschappelijk of economische consequenties (zoals emissies die samenhangen met militaire doeleinden of strategische infrastructuur); en iii) emissies van activiteiten waarvoor nog geen geschikte alternatieve technologieën ontwikkeld zijn, zoals voor internationale lucht- en scheepvaart en resterende emissies die bij CO₂-afvang en -opslag (CCS) alsnog vrijkomen.

3.3 Ramingen van Nederlandse restemissies in 2050

Tabel 3 geeft een overzicht van processen waarbij restemissies verwacht kunnen worden.

Tabel 3. Overzicht van belangrijke moeilijk-te-verduurzamen processen, die daarom verantwoordelijk kunnen zijn voor restemissies, samen met de belangrijkste mitigerende maatregelen. Voor alle sectoren (behalve landgebruik) geldt dat vraagvermindering een essentiële mitigerende maatregel is.

Sector	Processen	Mitigerende maatregelen
Landbouw ⁴⁵	Methaanemissies van pensfermentatie koeien	Fokken op lage methaanemissie, laag methaanrantsoen, voeradditieven
	Methaanemissies uit mestopslag en -bewerking bij varkenshouderij	Mestvergisting, drijfmest koelen, methaanoxidatie, verhoging weidegang
	Lachgasemissies door bemesting	Grasklaver en vlinderbloemige gewassen, stikstofbemesting verlagen, nitrificatieremmers
Landgebruik	Veenweidegebieden (als gevolg van ontwatering) ⁴⁶	Verhogen waterpeil
Industrie ⁴⁷	Cementproductie	Verbeteren van energie-efficiëntie, alternatieven voor klincker, CCS
	Staalproductie	Nieuwe productieprocessen (elektrolyse, Hlsarna), recycling, CCS
Luchtvaart ⁴⁸	Uitstoot van vliegtuigen	Alternatieve brandstoffen (bio- en synthetisch, mogelijk waterstof), verbeteren efficiëntie nieuwe vliegtuigen, oude vliegtuigen sneller afschrijven
Scheepvaart ⁴⁹	Uitstoot van schepen	Alternatieve brandstoffen (bio- en synthetisch), verbeteren efficiëntie nieuwe schepen, hybride motoren, gebruik windenergie (vliegers en zeilen), routes optimaliseren, langzamer varen

⁴³ Schenuit et al. (2023).

⁴⁴ Schenuit et al. (2023).

⁴⁵ Lesschen et al. (2023).

⁴⁶ CE Delft (2023).

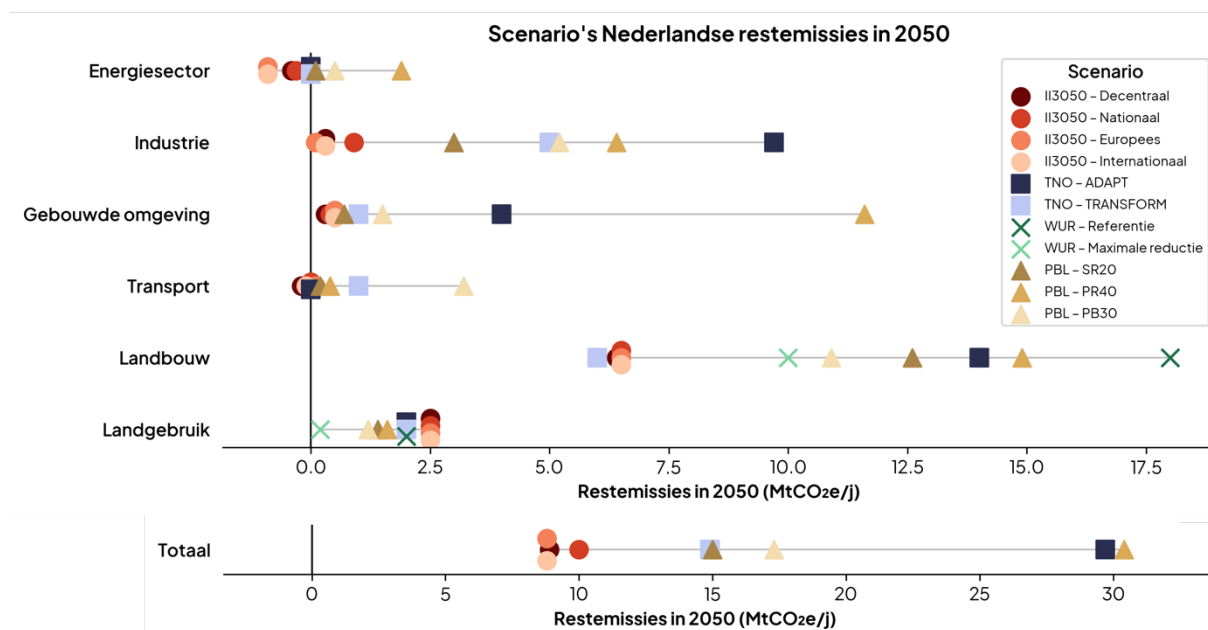
⁴⁷ PBL (2022).

⁴⁸ PBL (2022).

⁴⁹ PBL (2022).

3 Noodzaak voor CO₂-verwijdering

CE Delft heeft ramingen gepubliceerd van Nederlandse restemissies op basis van drie scenariostudies, die allen aansturen op broeikasgasneutraliteit in 2050. De ramingen voor 2050 zijn gevisualiseerd per sector in Figuur 2. In deze figuur is te zien dat de verwachte restemissies sterk uiteenlopen tussen de verschillende scenario's: in totaal van zo'n 9 MtCO₂e/j (scenario II3050 – Europees en scenario II3050 – Internationaal) tot 30 MtCO₂e/j (scenario PBL – PR40). Voor alle scenario's geldt dat de sector landbouw verantwoordelijk is voor een aanzienlijk deel (6–14 MtCO₂e/j) van de restemissies. Het wel belangrijk om erop te wijzen dat de scope van de scenario's verschilt. Zo focussen de II3050-scenario's zich op het energiesysteem, en beperken ze zich tot CO₂-emissies. Ook omvatten de gerapporteerde cijfers niet de emissies van bunkerbrandstoffen bestemd voor de internationale lucht- en zeevaart. Bij de energiesector omvatten de II3050-cijfers ook al enige bioCCS (meegeteld als CCS).



Figuur 2. Overzicht van scenario's voor Nederlandse restemissies in 2050, per sector en totaal. De data met betrekking op de scenario's II3050 (herziening 2023) (Netbeheer Nederland, 2023), ADAPT/TRANSFORM (herziening 2022) (TNO, 2022) en van Wageningen University & Research (Lesschen et al, 2023) komen uit CE Delft (2023). Ook zijn de drie integrale trajecten uit de Trajectverkenning Klimaatneutraliteit (TVKN) meegenomen (PBL, 2024).

Het gaat hier om de restemissies ten tijde van klimaatneutraliteit, dus de bruto emissies na eventuele toepassing van fossiele CCS, maar voor het meetellen van CO₂-verwijdering.⁵⁰ In de II3050-scenario's is CO₂-verwijdering in de vorm van bioCCS wel meegenomen binnen de energiesector, die komt daarmee netto negatief uit (op basis van de beschikbare data was het niet mogelijk dit te scheiden). In deze scenario's zijn er echter wel degelijk restemissies in de energiesector.

⁵⁰ In het ADAPT-scenario is de gerapporteerde toepassing van CCS niet uitgesplitst naar de energiesector en de industrie. Deze hebben we daarom naar eigen inzicht zo toebedeeld dat de energiesector netto neutraal is (1 MtCO₂/j aan CCS). De resterende hoeveelheid CCS (8,3 MtCO₂/j) is toebedeeld aan de industrie. Voor de TVKN-scenario's hebben we voor de uitsplitsing van emissies naar landbouw en landgebruik de aanname gemaakt dat de verhouding hetzelfde is als in het 'Klimaat Basis'-scenario van de TVKN. De hoeveelheid CO₂-verwijdering in de TVKN-scenario's hebben we afgetrokken van de gerapporteerde netto-uitstoot voor de industrie, om zo de restemissies te kunnen berekenen. Om de hoeveelheid CO₂-verwijdering te berekenen, hebben we aangenomen dat bioCCS wordt gerealiseerd bij de productie van biobrandstoffen en bij AVI's. We hebben daarbij aangenomen dat gedeelte van de koolstof die niet terecht komt in de synthetische brandstoffen wordt opgeslagen en dat de helft van de afvangen koolstof bij AVI's van biogene oorsprong is, zie figuur 6.17 in PBL (2024).

3 Noodzaak voor CO₂-verwijdering

3.4 Noodzaak van CO₂-verwijdering voor Nederland na klimaatneutraliteit

Schattingen voor de wereldwijde behoefte aan netto negatieve emissies ná 2050 hangen sterk samen met het gevolgde emissiereductiescenario, omdat dit bepaalt hoeveel het koolstofbudget voor de 1,5 °C wordt overschreden.⁵¹ Het IPCC maakt onderscheid tussen verschillende scenario-categorieën voor het 1,5 °C-doel: scenario's met geen of beperkte temperatuur-overschrijding (C1) – met daarin onderscheid tussen scenario's die wel netto-nul broeikasgassen halen (C1a) of niet (C1b) – en scenario met overschrijding groter dan 0,1 °C (C2).

Een verdeling van het mondiale koolstofbudget naar land of regio leidt ook tot een verdeling van de bijdrage aan netto negatieve emissies. De moeilijkheid is dat er geen algemeen geaccepteerde methode bestaat om dat koolstofbudget naar landen te verdelen. Voorbeelden van verdeelsleutels zijn op basis van capita, aandeel huidige uitstoot, bruto binnenlands product, emissiereductiepotentieel of historische uitstoot. Tabel 4 toont de inschatting van CE Delft voor behoefte aan netto negatieve emissies van Nederland op basis van het aandeel in de huidige uitstoot voor de periode 2050–2100.

Tabel 4. Cumulatief nationaal koolstofbudget (tot 2050) en de jaarlijkse behoefte aan netto negatieve emissies (tot 2100) voor vier wereldwijde 1,5°C-opwarmingsscenario's, toegerekend naar Nederland volgens het 'aandeel huidige uitstoot'-principe (CE Delft, 2023, tabel 17).

Scenario	Behoefte aan negatieve emissies tussen 2050–2100 (MtCO ₂ /j)
1,5°C-scenario met geen of beperkte temperatuur-overschrijding (C1)	-20,2
... met netto-nul (C1a)	-33
... zonder netto-nul (C1b)	-5,5
1,5°C-scenario met grote overschrijding (C2)⁵²	-33

⁵¹ Zie bijvoorbeeld IPCC (2022b) SPM.2.

⁵² De waardes voor C2-scenario's komen toevalligerwijs overeen met die voor C1a-scenario's, omdat de cumulatieve behoefte aan CO₂-verwijdering in beide categorieën gemiddeld even groot is.

4 CO₂-verwijderingspotentiëlen in Nederland

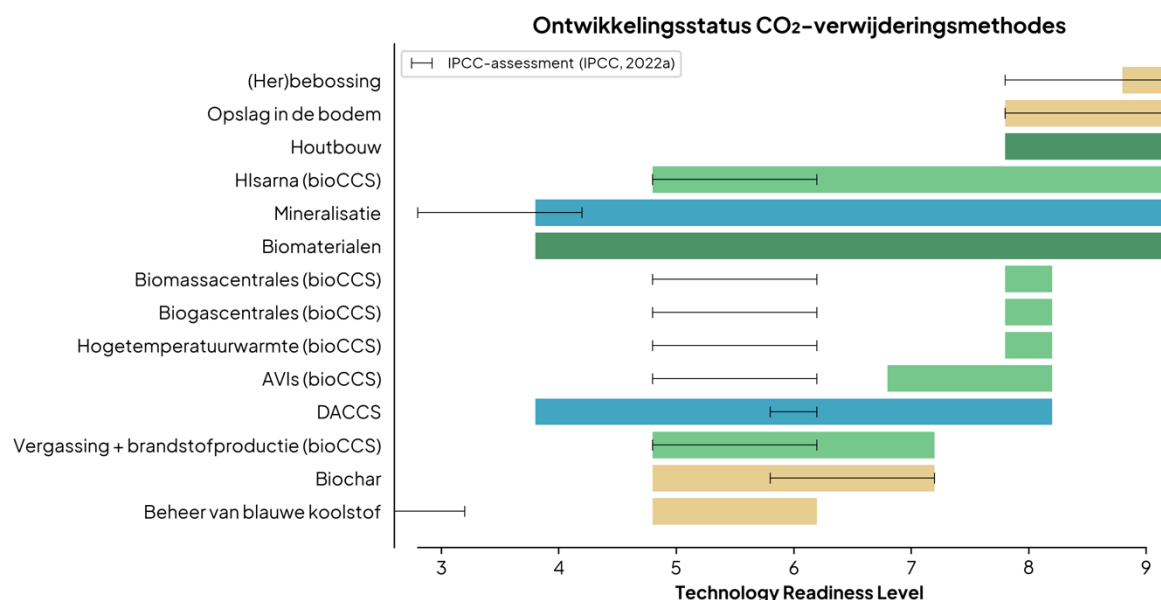
Hoofdstuk 0 besprak de noodzaak van CO₂-verwijdering. Om de mogelijke inzet van verschillende CO₂-verwijderingsmethoden te kunnen bepalen, is daarnaast een inschatting nodig welke methoden kansrijk zijn. Daarvoor is het relevant om de *potentiëlen* van de verschillende methoden te kennen: een inschatting van de mate waarin methoden kunnen worden toegepast. Voor CO₂-verwijdering is (afhankelijk van de methode) onder andere landoppervlak, energie, water, biomassa en geologische opslagruimte nodig. Het bepalen van de potentiëlen moet dus met deze dimensies rekening houden (zie paragraaf 4.1). Paragraaf 4.2 bespreekt de potentiëlen en kosten voor de Nederlandse context. Hoofdstuk 5 gaat dieper in op de geologische opslagpotentiëlen, die voor bioCCS en DACCS een beperkende factor kunnen zijn.

4.1 Het bepalen van potentiëlen

De studie van CE Delft uit 2023 kijkt naast het Nederlandse technisch potentieel van CO₂-verwijderingsmethoden ook naar het *realistisch* potentieel, "dat ook rekening houdt met verwachtingen over toekomstige marktomstandigheden, beleid en maatschappelijk draagvlak".⁵³ Het realistisch potentieel houdt dus onder meer rekening met de huidige en verwachte stand van: beleidskaders voor duurzame biomassa, subsidies en vergunningstrajecten voor CCS-installaties, ontwikkeling van CO₂-verwijderingstechnieken, investeringen in CO₂-infrastructuur, hoogte van de CO₂-prijs, ruimtelijke inrichting en landgebruik, energiemix en beschikbaarheid van verschillende vormen van duurzame energie (waterstof, biomassa, restwarmte), en maatschappelijke opinie. De verwachte stand van al die zaken is inherent onzeker. Dat betekent ook dat de inschatting van de realistische potentiëlen "inherent onzeker [is], met name voor de lange termijn".⁵⁴

4.2 Raming van CO₂-verwijderingspotentiëlen en -kosten in Nederland

Zoals in hoofdstuk 2 is uitgelegd, zijn er diverse methoden voor CO₂-verwijdering in Nederland, met voor elk verschillende implementatieopties. Sommige van deze opties bevinden zich al in een hogere status van ontwikkeling (zie Figuur 3), en daarvoor is ook meer zekerheid over de (toekomstige) kosten en het potentieel (zie Figuur 4 en Figuur 5).



Figuur 3. Huidig stadium van technologische ontwikkeling (Technology Readiness Level) voor verschillende CO₂-verwijderingstechnieken in Nederland. Data (in kleur) op basis van CE Delft (2023).

⁵³ CE Delft (2023).

⁵⁴ CE Delft (2023).

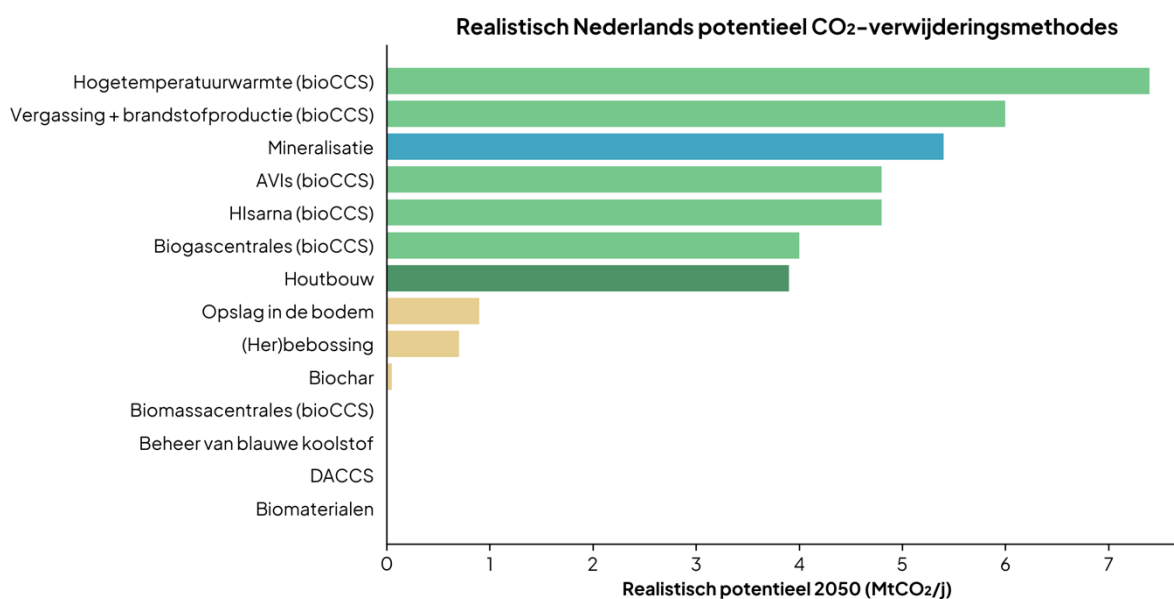
4 CO₂-verwijderingspotentiëlen in Nederland

Ter vergelijking is de inschatting door het IPCC toegevoegd van het wereldwijde ontwikkelingsstadium (IPCC, 2022a). Voor de interpretatie van Technology Readiness Levels, zie Tabel 5.

Tabel 5. Omschrijving van Technology Readiness Levels (TRL's).⁵⁵

TRL	Omschrijving
1	Basisprincipes geobserveerd en gerapporteerd
2	Technologisch concept of toepassing geformuleerd
3	Experimenteel bewijs van het concept
4	Technologie gevalideerd in een laboratorium
5	Technologie gevalideerd in een relevante (industriële) omgeving
6	Technologie gedemonstreerd in een relevante (industriële) omgeving
7	Prototype gedemonstreerd in een operationele omgeving
8	Product klaar voor toepassing en goedgekeurd
9	Product wordt commercieel toegepast in een operationele omgeving

Het verschil in Figuur 3 tussen de waarden voor Nederland en die van het IPCC is deels te verklaren door een andere scope en context. Zo kan beheer van blauwe koolstof worden uitgevoerd met bestaande technieken, maar is er nog weinig bekend over de effectiviteit van de koolstofvastlegging. Voor mineralisatie kijkt het IPCC vooral naar toepassing op land (die nog in de onderzoeksfase zit), terwijl CE Delft meeneemt dat olivijn al wordt toegepast als ophoogzand en voor bestrating. Voor bioCCS geeft het IPCC slechts één inschatting van de TRL, voor de Nederlandse situatie is deze verder uitgesplitst per implementatieoptie.



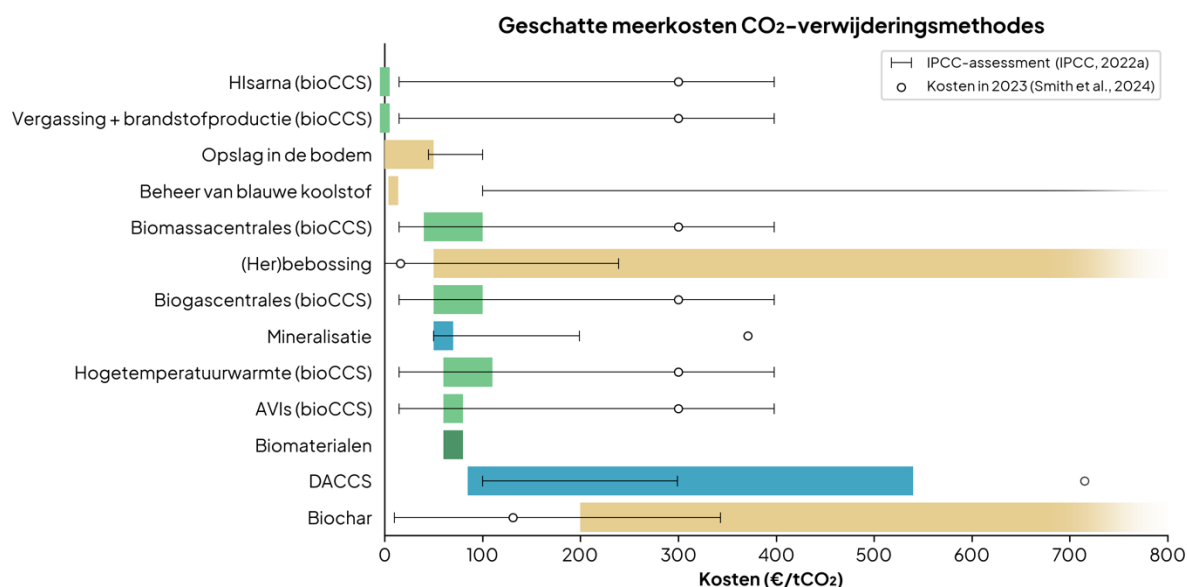
Figuur 4. Realistische potentiëlen voor verschillende CO₂-verwijderingstechnieken in Nederland. Data op basis van CE Delft (2023). N.B. de potentiëlen van de verschillende biomassaroutes kunnen niet zomaar bij elkaar opgeteld worden, aangezien ze beperkt worden door het aanbod aan biomassa.

Het potentieel voor het Hlsarna-proces is zeer afhankelijk van de verduurzamingsroute die Tata Steel kiest. Met de huidige keuze van Tata Steel voor waterstof en schrootsmelten (en dus niet voor de Hlsarna-route),

⁵⁵ Europese Commissie (2014), vertaling overgenomen uit PBL (2018).

4 CO₂-verwijderingspotentiëlen in Nederland

is er geen CO₂-verwijderingspotentieel meer voor Hlsarna in Nederland. Andersom staat hier het potentieel van bioCCS in biomassacentrales op 0, omdat er binnen het huidige beleidskader geen ruimte voor is.⁵⁶ Technisch is er echter wel potentieel, bijvoorbeeld als kolencentrales worden omgebouwd. Ook voor DACCS geldt dat er aanzienlijk technisch potentieel is (17 MtCO₂/j in Nederland in 2050), maar CE Delft acht deze methode vanwege de hoge geschatte kosten niet realistisch. Het potentieel van biomaterialen wordt ingeschat op 0, op basis van de aanname dat de Nederlandse economie in 2050 circulair is, en er dus geen netto toename van biomaterialen in de economie is. Dat betekent dus niet dat er geen biomaterialen meer worden geproduceerd, maar dat er dan via die route geen netto CO₂-verwijdering meer plaatsvindt. Als biomaterialen aan het einde van hun levensfase worden verbrand in een AVI uitgerust met CCS, dan levert dat alsnog CO₂-verwijdering op via de bioCCS-route.



Figuur 5. Geschatte meerkosten van verschillende CO₂-verwijderingstechnieken. De bandbreedtes omvatten zowel de huidige kosten, als de mogelijke toekomstige kostendaling, en gaan waar mogelijk uit van de Nederlandse context. De kosten bij bioCCS-routes en DACCS zijn inclusief de kosten voor het afvangen van CO₂, maar exclusief de kosten voor transport en opslag van de afgevangen CO₂ (ordegrootte: enkele tientallen euro's per ton CO₂, maar dat is afhankelijk van transportafstand en -methode). Data op basis van CE Delft (2023), aangevuld met PBL (2018) voor de route 'Biomaterialen'. Kosten voor 'Hlsarna' en 'Biobrandstofproductie' worden geschat op €0/tCO₂ (t.o.v. referentie), de bijbehorende balken zijn dik gemaakt voor de zichtbaarheid.

Ter vergelijking is de inschatting door het IPCC toegevoegd (IPCC, 2022a), en de huidige kosten op de vrijwillige koolstofmarkten (Smith et al., 2024). Voor bioCCS zijn deze data geaggregeerd gerapporteerd, voor de Nederlandse situatie is deze verder uitgesplitst per implementatieoptie.

Figuur 5 laat zien dat ook het inschatten van de (meer)kosten van CO₂-verwijderingsopties sterk van scope en aannames afhankelijk is. Zo worden de meerkosten voor de bioCCS-routes Hlsarna en brandstofproductie door CE Delft geschat op €0/tCO₂,⁵⁷ op basis van de aanname dat staal- en biobrandstofproductie sowieso via deze route zullen verlopen. Het gaat dan alleen om de (geringe) kosten van het afvangen van de zuivere stromen CO₂ die hierbij vrijkomen. De geraamde kosten zijn exclusief de transport en injectiekosten. Ook is bij verschillende routes (in het bijzonder bij (her)bebossing, DACCS en biochar) een duidelijk verschil te zien tussen de geschatte kosten voor de Nederlandse context en de schattingen van het IPCC. Dat kan onder andere liggen aan de verschillende implementatieopties die zijn meegenomen, aannames over

⁵⁶ Nederlandse kolencentrales moeten uiterlijk 2030 worden gesloten, en er worden momenteel geen nieuwe subsidies meer afgegeven voor elektriciteitsproductie in biomassacentrales. Het is wel een optie dat daar in de toekomst een uitzondering op wordt gemaakt specifiek voor biomassacentrales die regelbaar vermogen of CO₂-verwijdering leveren (Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat & Minister voor Klimaat en Energie, 2023).

⁵⁷ Op basis van PBL (2018).

4 CO₂-verwijderingspotentiëlen in Nederland

kostendaling door verdere innovatie (specifiek voor DACCS geldt dat die zeer afhankelijk zijn van aannames over bijvoorbeeld de leercurves) en de kosten voor (hoge kwaliteit) biomassa.

5 Geologische opslagpotentiëlen

Voor methoden waar CO₂ in geologische reservoirs kan worden opgeslagen (bioCCS-routes en DACCS), is het relevant om niet alleen te kijken naar het *afvang*potentiëel, maar ook naar het *opslag*potentiëel. De capaciteit van geologische reservoirs is eindig en wordt ook gebruikt voor CO₂ afkomstig van fossiele CCS. Er is dus sprake van schaarste, en dit kan een beperking vormen voor de hoeveelheid permanente CO₂-verwijdering die kan worden gerealiseerd. Paragraaf 5.1 gaat in op de Nederlandse situatie en paragraaf 5.2 schetst de Europese context. Tekstbox 1 gaat in op de permanentie van geologisch opgeslagen CO₂.

5.1 Nederland

Nederlandse ondergrondse opslag kan plaatsvinden in oude gasvelden of in aquifers (watervoerende lagen). Opslag is zowel onder land (onshore) als onder de Noordzee (offshore) mogelijk. Met name van de Nederlandse offshore locaties is veel bekend over de capaciteit van gasvelden en van één specifieke aquifer (die is gebruikt voor oliewinning).⁵⁸ Onder land is met name het Groningenveld erg groot, alhoewel dat in opslagscenario's meestal buiten beschouwing wordt gelaten. Rond 2008 zou Shell een proef met ondergrondse CO₂-opslag onder land doen in een gasveld in de buurt van Barendrecht. Vanwege de maatschappelijke controverse die volgde, is dat project niet doorgegaan. Sindsdien heeft de overheid geen plannen meer voor opslag onder land.⁵⁹ Zie Tabel 6 voor een overzicht van de verwachte/geschatte Nederlandse ondergrondse opslagcapaciteit.

Tabel 6. Overzicht van verwachte ondergrondse capaciteit in Nederland van verschillende types geologische reservoirs.⁶⁰

Type reservoir	Verwachte capaciteit (MtCO ₂)
Offshore: lege gasvelden	1700
Offshore: aquifers	100 (> 1300 mogelijk te ontwikkelen)
Onshore: lege gasvelden & aquifers (excl. Groningen)	> 1000
Onshore: Groningenveld	± 6500

Voor het inschatten van realistische potentiëlen is niet alleen de totale opslagcapaciteit (in MtCO₂) op een bepaald moment relevant, maar ook de dan beschikbare injectiecapaciteit (in MtCO₂/j). Deze is mede afhankelijk van de beschikbare infrastructuur. Gasvelden moeten namelijk eerst vrijkomen nadat exploitatie is beëindigd, en daarna duurt het enkele jaren voordat de eerste CO₂-injectie kan beginnen. Begin 2024 is de aanleg gestart van Porthos, het eerste Nederlandse offshore CO₂-opslagproject. Naar verwachting kan in de loop van 2026 worden gestart met de opslag van zo'n 2,5 MtCO₂/j (totaal 37 MtCO₂) afkomstig uit het Rotterdamse havengebied.⁶¹ De verwachting is dat tot 2030 alleen Aramis daarbij komt, eveneens met CO₂ afkomstig uit het Rotterdamse havengebied. Aramis zou in 2028 kunnen starten met 5 MtCO₂/j, met vanaf 2030 een uitbreiding tot 22 MtCO₂/j, voor een totaal van meer dan 400 MtCO₂.⁶²

De vraag naar injectiecapaciteit komt vanuit verschillende bronnen: van fossiele CCS en van CO₂-verwijdering, en zowel uit Nederland als mogelijk ook uit het buitenland. De vraag vanuit het buitenland is onzeker, omdat die afhangt van internationale ontwikkelingen. Er zijn plannen om in Antwerpen een CO₂-afvangpro-

⁵⁸ Tabel 4.2 in EBN & Gasunie (2018).

⁵⁹ Akerboom et al. (2021).

⁶⁰ CE Delft (2023).

⁶¹ Porthos (2023).

⁶² Aramis (2023).

5 Geologische opslagpotentiëlen

ject op te zetten, waarbij de afgevangen CO₂ onder andere via een pijpleiding naar Rotterdam wordt vervoerd.⁶³ Ook in het Ruhrgebied zou er CO₂-afvang plaats kunnen vinden, waarbij de CO₂ naar Nederland wordt getransporteerd.⁶⁴

Tabel 7 laat verschillende scenario's zien voor de vraag naar Nederlandse injectiecapaciteit. De hoeveelheid fossiele CCS hangt daarbij af van de verwachte CO₂-prijs en van de snelheid waarop beleid en overeenkomsten voor bilaterale CO₂-transport tot stand komen. De scenario's laten zien dat de benodigde vraag mogelijk al in 2030 de injectiecapaciteit van Porthos en Aramis overschrijdt. Ook wordt duidelijk dat het belangrijk is om ook op lange termijn zorgvuldig om te gaan met de beschikbare opslagcapaciteit: bij bijvoorbeeld een hoog scenario van injectie van 50 MtCO₂/j, raken de bekende offshore reservoirs in 36 jaar vol.

Tabel 7. Ramingen voor vraag naar Nederlandse geologische opslag van CO₂ uit verschillende bronnen. Scenario's voor fossiele CCS komen van Royal HaskoningDHV.⁶⁵ Scenario's voor CO₂-verwijdering komen van CE Delft⁶⁶, waarbij we het meest ambitieuze scenario weglaten omdat dit door CE Delft zelf als onhaalbaar wordt geacht.

	2030	2035	2050	Cumulatief tot 2035
	MtCO ₂ /j	MtCO ₂ /j	MtCO ₂ /j	MtCO ₂
Fossiel CCS (NL)	13 – 24	13 – 32	N/A	120 – 270
Fossiel CCS (BE + DE)	0 – 10	0 – 20	N/A	0 – 92
CO₂-verwijdering (geologisch, NL)	3	5 – 6	11 – 13	± 20 – 23
Totaal	16 – 37	18 – 58	N/A	± 140 – 385

Tekstbox 1. Hoe permanent is geologische opslag?

Opslag in lege gasvelden en aquifers heeft de potentie om CO₂ permanente uit de atmosfeer te verwijderen. Of dat lukt is van verschillende factoren afhankelijk, zoals de keuze voor een geschikte geologische formatie, de samenstelling van het gasmengsel dat wordt geïnjecteerd, de stabiliteit van de ondergrond, en de gebruikte materialen voor het afdekken van de injectieput.⁶⁷ Het lekrisico bij geologische opslag is doorgaans klein, en nihil als een locatie goed wordt gemonitord en gemanaged.⁶⁸ In Noorwegen wordt al ruim twee decennia succesvol CO₂ opgeslagen in een diepe zandsteenformatie, waardoor al enige ervaring is opgedaan met CO₂-opslag onder de Noordzee en de risico's daarbij. Een belangrijke kanttekening is dat door het gebrek aan ervaring over de lange-termijneffecten van CO₂-opslag in de diepe ondergrond nog niets bekend is, en bovendien van de lokale context afhankelijk.⁶⁹

⁶³ Port of Antwerp-Bruges (z.d.).

⁶⁴ Dat zou onderdeel zijn van de Delta Rhine Corridor, zie Ministerie van Economische Zaken en Klimaat & Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (2023).

⁶⁵ Royal HaskoningDHV (2021).

⁶⁶ CE Delft (2023).

⁶⁷ EBN (2022).

⁶⁸ Alcalde et al. (2018).

⁶⁹ CDRmare (2022).

5 Geologische opslagpotentiëlen

5.2 Europa

CO₂ die in Nederland is afgevangen, hoeft niet per se in Nederland te worden opgeslagen. Binnen Europa is er een aanzienlijke opslagcapaciteit, waarvan een deel vanuit Nederland bereikbaar is via transport met pijpleidingen of per schip. Zo is de Yara Sluiskil van plan om CO₂ die vrijkomt bij ammoniaproductie af te vangen, vloeibaar te maken en per schip te transporteren naar het Noorse opslagproject Northern Lights, waar het in een aquifer wordt geïnjecteerd.⁷⁰ Ook bij plannen voor CO₂-afvang in het Eemshavengebied ligt transport per schip voor de hand, en is transport naar Noorwegen een optie. Tabel 8 geeft een overzicht van de opslagcapaciteit van enkele naburige landen.

Tabel 8. Overzicht van CO₂-opslagcapaciteit van naburige landen en de totale Europese opslagcapaciteit op basis van Geological Survey of Denmark and Greenland (2021). Het is een conservatieve schatting, zo zijn voor Nederland alleen de offshore reservoirs meegenomen. De schatting voor Nederland wijkt iets af van die in Tabel 6, omdat ook opslag in steenkoolbedden (300 Mt) is meegenomen, en er een andere schatting voor capaciteit in aquifers is genomen.

Land	Gasvelden en steenkoolbedden		Totaal
	Aquifers		
	MtCO ₂	MtCO ₂	MtCO ₂
Noorwegen	26 031	3 157	29 188
Duitsland	14 900	2 180	17 080
Verenigd Koninkrijk	7 100	7 300	14 400
Frankrijk	7 922	770	8 692
Denemarken	2 553	203	2 756
Nederland	340	2 000	2 340
België	199	0	199
Overige Europese landen	62 710	8 858	71 568
Totaal Europa	95 724	21 311	117 035

⁷⁰ Yara International (2023).

Afkortingen

AVI	afvalverbrandingsinstallatie
BECCS	<i>bioenergy with carbon dioxide capture and storage</i>
BICRS	<i>biomass carbon removal and storage</i>
bioCCS	<i>biomass with carbon dioxide capture and storage</i>
CCS	<i>carbon dioxide capture and storage</i>
CCU	<i>carbon dioxide capture and utilisation</i>
CO₂e	CO ₂ -equivalenten
DAC	<i>direct air capture</i>
DACCS	<i>direct air carbon dioxide capture and storage</i>
DACCU	<i>direct air carbon dioxide capture and utilization</i>
ESABCC	<i>European Scientific Advisory Board on Climate Change</i>
Gton	gigaton
IAM	<i>integrated assessment model</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LULUCF	<i>land use, land-use change and forestry</i>
Mton	megaton
TRL	technology readiness level
TVKN	Trajectverkenning Klimaatneutraal
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

Referenties

- Akerboom, S., Waldmann, S., Mukherjee, A., Agaton, C., Sanders, M., & Kramer, G. J. (2021). Different This Time? The Prospects of CCS in the Netherlands in the 2020s. *Frontiers in Energy Research*, 9, 644796. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.644796>
- Alcalde, J., Flude, S., Wilkinson, M., Johnson, G., Edlmann, K., Bond, C. E., Scott, V., Gilfillan, S. M. V., Ogaya, X., & Haszeldine, R. S. (2018). Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation. *Nature Communications*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04423-1>
- Anderson, K., Buck, H. J., Fuhr, L., Geden, O., Peters, G. P., & Tamme, E. (2023). Controversies of carbon dioxide removal. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00493-y>
- Anderson, Kevin, en Glen Peters. 'The Trouble with Negative Emissions'. *Science* 354, nr. 6309 (14 oktober 2016): 182-83. <https://doi.org/10.1126/science.aah4567>.
- Aragonès, Mark Preston, Keith Whiriskey, Filip Neele, en Kristin Jordal. 'Europe needs a definition of Carbon Dioxide Removal'. Zero Emissions Platform, juli 2020. <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Europe-needs-a-definition-of-Carbon-Dioxide-Removal-July-2020.pdf>
- Aramis. 'FAQ'. Aramis, 2023. <https://www.aramis-ccs.com/faq>.
- Article 6.4 Supervisory Body. (2023). *Removal activities under the Article 6.4 mechanism. Version 04.0*. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/a64-sb005-aa-a09.pdf>
- Bednar, J., Obersteiner, M., & Wagner, F. (2019). On the financial viability of negative emissions. *Nature Communications*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09782-x>
- Van Beek, L., Oomen, J., Hajer, M., Pelzer, P., & van Vuuren, D. (2022). Navigating the political: An analysis of political calibration of integrated assessment modelling in light of the 1.5 °C goal. *Environmental Science & Policy*, 133, 193-202. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.024>
- Bergman, A., & Rinberg, A. (2021). The Case for Carbon Dioxide Removal: From Science to Justice. In *Carbon Dioxide Removal Primer*. <https://cdrprimer.org/read/chapter-1>
- CDRmare. (2022). *Carbon dioxide storage in geological formations below the German North Sea*. CDRmare. <https://doi.org/10.3289/CDRmare.19>
- CE Delft. (2023). *Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. Analyse van behoefte, aanbod en beleid voor negatieve emissies in Nederland*. CE Delft. <https://ce.nl/publicaties/koolstofverwijdering-voor-klimaatbeleid/>
- EBN. (2022). *CO₂-opslag in Nederland: Het is noodzakelijk en het kan veilig*. Energiebeheer Nederland. [https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/CO₂-opslag-in-nederland-het-is-noodzakelijk-en-het-kan-veilig/](https://www.ebn.nl/feiten-en-cijfers/kennisbank/CO2-opslag-in-nederland-het-is-noodzakelijk-en-het-kan-veilig/)
- EBN & Gasunie. (2018). *Transport en opslag van CO₂ in Nederland. Verkennende studie door Gasunie en EBN in opdracht van het ministerie van Economische Zaken*. [https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2022/10/Studie-Transport-en-opslag-van-CO₂-in-Nederland-EBN-en-Gasunie-1.pdf](https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2022/10/Studie-Transport-en-opslag-van-CO2-in-Nederland-EBN-en-Gasunie-1.pdf)
- Edelenbosch, O. Y., Hof, A. F., van den Berg, M., de Boer, H. S., Chen, H.-H., Daioglou, V., Dekker, M. M., Doelman, J. C., den Elzen, M. G. J., Harmsen, M., Mikropoulos, S., van Sluisveld, M. A. E., Stehfest, E., Tagomori, I. S., van Zeist, W.-J., & van Vuuren, D. P. (2024). Reducing sectoral hard-to-abate emissions to limit reliance on carbon dioxide removal. *Nature Climate Change*, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02025-y>
- Ember. (2024). *Yearly electricity data*. <https://ember-climate.org/data-catalogue/yearly-electricity-data/>
- ESABCC. (2023). *Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030-2050*. European Scientific Advisory Board on Climate Change. <https://climate-advisory-board.europa.eu/reports-and-publications/scientific-advice-for-the-determination-of-an-eu-wide-2040/scientific-advice-for-the-determination-of-an-eu-wide-2040-climate-target-and-a-greenhouse-gas-budget-for-2030-2050.pdf@@display=file/file>
- European Commission. (2022). Proposal for a regulation establishing a Union certification framework for carbon removals. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2022-11/Proposal_for_a_Regulation_establishing_a_Union_certification_framework_for_carbon_removals.pdf.
- European Commission. (2024). *Impact assessment report accompanying the document 'Securing our future'*. https://climate.ec.europa.eu/document/download/768bc81f-5f48-48e3-b4d4-e02ba09faca1_en?filename=2040%20Climate%20Target%20Impact%20Assessment_en_0.pdf
- European Commissie. (2014). Technology readiness levels (TRL). In *Horizon 2020—Work Programme 2014-2015*. https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. de O., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., Dominguez, M. del M. Z., & Minx, J. C. (2018). Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9f>

- Geological Survey of Denmark and Greenland. (2021). *EU Geological CO₂ storage summary*. Geological Survey of Denmark and Greenland. [https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2021/10/20183953/EU-CO₂-storage-summary_GEUS-report-2021-34_Oct2021.pdf](https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2021/10/20183953/EU-CO2-storage-summary_GEUS-report-2021-34_Oct2021.pdf)
- Guenet, B., Gabrielle, B., Chenu, C., Arrouays, D., Balesdent, J., Bernoux, M., ... & Zhou, F. (2021). Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage?. *Global Change Biology*, 27(2), 237–256. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.15342>
- Höglund, R. (2022). Carbon can be temporarily stored for a long time. *Marginal Carbon*. <https://marginalcarbon.substack.com/p/carbon-can-be-temporarily-stored-for-a-long-time-4bd7f94e3156>
- IPCC. (2021a). Future Global Climate: Scenario-based Projections and Near-term Information. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- IPCC. (2021b). Annex VII: Glossary. In IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.022>
- IPCC. (2021c). Summary for Policymakers. In IPCC, *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2022a). Cross-sectoral Perspectives. In IPCC, *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>
- IPCC. (2022b). Summary for Policymakers. In IPCC, *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- Kim, S. K., Shin, J., An, S. I., Kim, H. J., Im, N., Xie, S. P., ... & Yeh, S. W. (2022). Widespread irreversible changes in surface temperature and precipitation in response to CO₂ forcing. *Nature Climate Change*, 12(9), 834–840. <https://www.nature.com/articles/s41558-022-01452-z>
- Koven, C. D., Sanderson, B. M., & Swann, A. L. (2023). Much of zero emissions commitment occurs before reaching net zero emissions. *Environmental Research Letters*, 18(1), 014017. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acabla/meta>
- Lamb, W. F., Gasser, T., Roman-Cuesta, R. M., Grassi, G., Gidden, M. J., Powis, C. M., Geden, O., Nemet, G., Pratama, Y., Riahi, K., Smith, S. M., Steinhauser, J., Vaughan, N. E., Smith, H. B., & Minx, J. C. (2024). The carbon dioxide removal gap. *Nature Climate Change*, 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-01984-6>
- Lamb, W., Roman-Cuesta, R. M., Smith, H. B., Gasser, T., Gidden, M. J., Powis, C. M., & Grassi, G. (2024). *The Carbon Dioxide Removal Gap dataset* (Versie 1) [dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10821849>
- Lesschen, J. P., Arets, E., Van Baren, S., Gonzalez-Martinez, A., Jongeneel, R., Reijs, J., Selten, M., Slier, T., Vellinga, T., & Vissers, L. (2023). *Beleidsscenario's voor klimaatmitigatie in landbouw en landgebruik: Resultaten voor de AFOLU-sector in 2035*. Wageningen Environmental Research. <https://doi.org/10.18174/630137>
- Lugato, E., Leip, A., & Jones, A. (2018). Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N₂O emissions. *Nature Climate Change*, 8(3), 219–223. <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0087-z>
- Meyer-Ohlendorf, N. (2023). *Making Carbon Removals a Real Climate Solution. How to integrate carbon removals into EU Climate Policies*. Ecologic Institute. <https://www.ecologic.eu/19290>
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat & Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (2023). *Ontwerp-Programma Energiehoofdstructuur. Ruimte voor een klimaatneutraal energiesysteem van nationaal belang*. <https://open.overheid.nl/documenten/b788594f-1818-414a-9861-fe509161d1ea/file>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., Garcia, W. de O., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., & Dominguez, M. del M. Z. (2018). Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>
- Mistry, K., Carroll, B., Baker, T., Leon, P. P. de, Dewar, A., & Sims, A. (2023). *The Time for Carbon Removal Has Come*. Boston Consulting Group. <https://web-assets.bcg.com/67/f7/0f41cd074a66b49cdb8baf5e59c0/bcg-the-time-for-carbon-removal-has-come-sep-2023-r.pdf>
- Mykleby, P. M., Snyder, P. K., & Twine, T. E. (2017). Quantifying the trade-off between carbon sequestration and albedo in midlatitude and high-latitude North American forests. *Geophysical Research Letters*, 44(5), 2493–2501. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016GL071459>
- Natuur & Milieu. (2023). *Koolstofmaatregelen: Hoe scheiden we het kaf van het koren? Ordening in definities en boekhouding van CO₂-opslag, hergebruik en verwijdering*. https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Natuur-en-Milieu_Koolstof-kaf-en-koren_rapport-DEFINITIEF.pdf
- Netbeheer Nederland. (2023). *Het energiesysteem van de toekomst: De IJ3050-scenario's. Integrale energiesysteemverkenning 2030-2050*. https://www.netbeheer Nederland.nl/_upload/Files/Rapport_IJ3050_Scenario's_280.pdf

- PBL. (2018). *Negatieve emissies—Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland* (2606). Planbureau voor de Leefomgeving. <https://www.pbl.nl/publicaties/negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland>
- PBL. (2022). *Mitigating greenhouse gas emissions in hard-to-abate sectors* (4901). PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/en/publications/mitigating-greenhouse-gas-emissions-in-hard-to-abate-sectors>
- PBL. (2024). *Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050*. Planbureau voor de Leefomgeving. <https://www.pbl.nl/publicaties/trajectverkenning-klimaatneutraal-2050>
- Port of Antwerp-Bruges. (z.d.). Antwerp@C. <https://www.portofantwerpbruges.com/nl/onze-haven/klimaat-en-energie/transition/antwerp>
- Porthos. (2023). Project. Porthos. <https://www.porthosCO2.nl/project/>
- Ramírez Ramírez, A., Khamlichi, A. E., Markowz, G., Rettenmaier, N., Baitz, M., Jungmeier, G., & Bradley, T. (2022). *Guidelines for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilisation*. European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/161308>
- Rohatyn, S., Yakir, D., Rotenberg, E., & Carmel, Y. (2022). Limited climate change mitigation potential through forestation of the vast dryland regions. *Science*, 377(6613), 1436-1439. <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.abm9684>
- Royal HaskoningDHV. (2021). *Nationale CO₂-opslagbehoefte tot 2035. Een inventarisatie van de CO₂-afvang en opslag (CCS) in Nederland*. Royal HaskoningDHV. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2021/12/Rapport-Nationale-CO2-opslagbehoefte-tot-2035-30-september-2021-Ruimtelijke-verkenning-CO2-transport-en-opslag.pdf>
- RWE. (2022). *RWE lanceert project BECCUS voor grootschalige afvang en opslag van CO₂*. <https://benelux.rwe.com/pers/2022-12-12-rwe-lanceert-project-beccus-voor-grootschalige-afvang-en-opslag-van-co/>
- Sandalow, D., Aines, R., Friedmann, J., McCormick, C., & Sanchez, D. (2020). *Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS) Roadmap* (LLNL-TR--815200, 1763937, 1024342; p. LLNL-TR--815200, 1763937, 1024342). <https://doi.org/10.2172/1763937>
- Schenuit, F., Böttcher, M., & Geden, O. (2023). "Carbon Management": Opportunities and risks for ambitious climate policy. *Stiftung Wissenschaft Und Politik (SWP)*. <https://www.swp-berlin.org/en/publication/carbon-management-opportunities-and-risks-for-ambitious-climate-policy>
- Smith, S., Geden, O., Nemet, G., Gidden, M., Lamb, W., Powis, C., Bellamy, R., Callaghan, M., Cowie, A., Cox, E., Fuss, S., Gasser, T., Grassi, G., Greene, J., Lueck, S., Mohan, A., Müller-Hansen, F., Peters, G., Pratama, Y., ... Minx, J. (2023). *State of Carbon Dioxide Removal—1st Edition*. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/W3B4Z>
- Smith, S. M., Geden, O., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Nemet, G. F., Minx, J. C., Buck, H., Burke, J., Cox, E., Edwards, M. R., Fuss, S., Johnstone, I., Müller-Hansen, F., Pongratz, J., Probst, B. S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I., & Vaughan, N. E. (Red.). (2024). *The State of Carbon Dioxide Removal 2024—2nd Edition*. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/F85QJ>
- Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat & Minister voor Klimaat en Energie. (2023). *Stand van zaken uitvoering duurzaamheidskader biograndstoffen*. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2023/12/22/kamerbrief-stand-van-zaken-uitvoering-duurzaamheidskader-biograndstoffen>
- Tanzer, S. E., & Ramírez, A. (2019). When are negative emissions negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 12(4), 1210-1218. <https://doi.org/10.1039/C8EE03338B>
- TNO. (2022). *Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 – Scenario update and analysis of heat supply and chemical and fuel production from sustainable feedstocks*. TNO. <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid%3A5c7f19fb-9e6d-4830-9ad6-1e83d1355ece>
- Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Gernaat, D. E. H. J., van den Berg, M., Bijl, D. L., de Boer, H. S., Daioglou, V., Doelman, J. C., Edelenbosch, O. Y., Harmsen, M., Hof, A. F., & van Sluisveld, M. A. E. (2018). Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change*, 8(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0119-8>
- Wetenschappelijke Klimaatraad. (2024). *De lucht klaren? Advies over uitgangspunten en beleid voor sturing op CO₂-verwijdering uit de atmosfeer, WKR-rapport 002*.
- Den Haag: WKR. Yara International. (2023). *Yara invests in CCS in Sluiskil and signs binding CO₂ transport and storage agreement with Northern Lights – the world's first cross-border CCS-agreement in operation*. <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-invests-in-ccs-in-sluiskil-and-signs-binding-co2-transport-and-storage-agreement-with-northern-lights--the-worlds-first-cross-border-ccs-agreement-in-operation2/>
- Zickfeld, K., Maclsaac, A. J., Canadell, J. G., Fuss, S., Jackson, R. B., Jones, C. D., Lohila, A., Matthews, H. D., Peters, G. P., Rogelj, J., & Zaehle, S. (2023). Net-zero approaches must consider Earth system impacts to achieve climate goals. *Nature Climate Change*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01862-7>

Achtergrondrapport CO₂-verwijdering: Definitie, methoden, noodzaak en potentiëlen
behorend bij WKR-rapport 002: *De lucht klaren? Advies over uitgangspunten en beleid voor sturing op CO₂-verwijdering uit de atmosfeer*

Samenstelling

Rens Baardman (staf WKR), Kiane de Kleijne (Technische Universiteit Eindhoven), Tiny van der Werff (staf WKR), Daan van Herpen (staf WKR)

Beeld omslag

Mischa Keijser

© Wetenschappelijke Klimaatraad, Den Haag 2024

De inhoud van deze publicatie mag (gedeeltelijk) worden gebruikt en overgenomen voor niet-commerciële doeleinden. De inhoud mag daarbij niet veranderen. Citaten moeten altijd aangegeven zijn, bij voorkeur als:

WKR. (2024). Achtergrondrapport CO₂-verwijdering: Definitie, methoden, noodzaak en potentiëlen. Den Haag, Wetenschappelijke Klimaatraad.