A photograph of a child flying a kite on a beach. The child is standing on the sand, holding a string that goes up to a colorful kite in the sky. The background shows the ocean and a distant shoreline under a cloudy sky. A large dark blue triangle is overlaid on the left side of the image, containing the title and subtitle.

De lucht klaren?

Advies over uitgangspunten en beleid voor sturing op CO₂-verwijdering uit de atmosfeer

10 juli 2024

WKR Wetenschappelijke
Klimaatraad

Navigeren door het rapport

De WKR heeft voor dit rapport bewust gekozen voor een digitale uitgave. Er zijn geen papieren versies van het rapport beschikbaar.



Met de voetnoten kan worden genavigeerd van en naar een uitgebreidere bronnenlijst aan het eind van elk hoofdstuk. De complete bron is te vinden in de bibliografie.

Met het menu rechtsboven kan worden genavigeerd van en naar de inhoudsopgave van het rapport.

Inhoud

Voorwoord	4	3. CO₂-verwijderingsbeleid: uitgangspunten en noodzaak	25	Afkortingen	44
Samenvatting	5	3.1 Beperkingen en onzekerheden bij CO ₂ -verwijdering benadrukken het belang van snelle emissiereductie	25	Referenties	45
1. Inleiding	10	3.2 Permanente CO ₂ -verwijdering biedt meer zekerheid dan tijdelijke CO ₂ -verwijdering	26	Colofon	50
1.1 Achtergrond	10	3.3 Overheidsinterventie is nodig om CO ₂ -verwijdering te realiseren	30		
1.2 Dit advies	14	4. Vormgeving van CO₂-verwijderingsbeleid	33		
2. Methoden voor CO₂-verwijdering: eigenschappen en aandachtspunten	16	4.1 Wat gebeurt er al voor CO ₂ -verwijdering en wat moet er nog gebeuren?	33		
2.1 Tijdelijke en permanente methoden voor CO ₂ -verwijdering	16	4.2 Sturen op rol en schaal van CO ₂ -verwijdering	35		
2.2 Eigenschappen van CO ₂ -verwijderingsmethoden	19	4.3 Beleidsinstrumenten voor vraagcreatie naar CO ₂ -verwijdering	36		
2.3 Grenzen aan het duurzaam potentieel	21				

Voorwoord

In het eerste advies van Wetenschappelijke Klimaatraad – ‘Met iedereen de transities in’ – adviseerden wij om zo snel mogelijk en op betekenisvolle schaal ervaring op te doen met CO₂-verwijdering uit de atmosfeer (WKR, 2023). Netto CO₂ verwijderen uit de atmosfeer is nodig om klimaatneutraal te worden en op lange termijn mogelijk de temperatuurstijging te beperken. Dit tweede advies gaat daar op in: we schetsen uitgangspunten en risico’s van CO₂-verwijdering en zetten uiteen hoe Nederland kan sturen op CO₂-verwijdering.

De titel van dit rapport is ‘De lucht klaren?’. Dat vraagteken staat er niet voor niets: CO₂-verwijdering uit de atmosfeer is weliswaar hard nodig, maar het is nog verre van zeker of het in voldoende omvang beschikbaar komt en of de nadelen kunnen worden ondervangen. In het beleid moet de prioriteit blijven liggen op het verminderen van de uitstoot. We hebben ons afgevraagd hoe je beleid voor CO₂-verwijdering kunt ontwerpen, in samenhang met emissiereductiebeleid. Nederland heeft belang bij goed beleid voor CO₂-verwijdering uit de atmosfeer, zowel op Europees als nationaal niveau. Met dit rapport wil de Wetenschappelijke Klimaatraad de overheid en het bedrijfsleven helpen om snel aan de slag te gaan met CO₂-verwijdering.

Een groot woord van dank gaat uit naar de collega’s die het advies hebben opgesteld. Dat zijn de raadsleden Heleen de Coninck (voorzitter commissie), Sanne Akerboom, Machiel Mulder en Wouter Peters, en stafmedewerkers Tiny van der Werff (projectleider), Rens Baardman, Daan van Herpen en Aniek Linssen.

Bij de voorbereiding van dit rapport hebben we gesproken met een groot aantal experts en beleidsmakers. We zijn hun veel dank verschuldigd voor hun tijd, kennis en suggesties. Het advies is voor review voorgelegd aan Maarten van Aalst (KNMI), Laura van Geest (AFM), Marc Londo (NVDE) en Guido van der Werf (VU). Wij danken hen voor hun nuttige commentaar.

Jan Willem Erisman

Voorzitter

Ruud van den Brink

Secretaris-directeur

Samenvatting

Snelle en vergaande vermindering van broeikasgasuitstoot is essentieel om de ernstigste klimaatgevolgen te voorkomen. Daarnaast is CO₂-verwijdering noodzakelijk. De gevolgen van klimaatverandering door menselijke uitstoot van broeikasgassen worden steeds merkbaarder en ernstiger. In het klimaatakkoord van Parijs uit 2015 hebben alle landen afgesproken de mondiale temperatuurstijging te beperken tot ruim onder de 2°C, en te streven naar 1,5°C. Deze temperatuurlimieten vereisen van rijke landen, zoals de lidstaten van de Europese Unie waaronder Nederland, dat ze uiterlijk in 2050 niet meer bijdragen aan broeikasgasuitstoot. Daarom is in de Europese Klimaatwet afgesproken om uiterlijk in 2050 'klimaatneutraal' te zijn, wat betekent dat er net zo veel broeikasgas wordt uitgestoten als uit de atmosfeer verwijderd. Nederland heeft dit doel overgenomen in de Nederlandse Klimaatwet van 2019, waarin ook staat dat Nederland na 2050 'negatieve emissies' heeft, oftewel dat we meer broeikasgas uit de lucht verwijderen dan we uitstoten. Van alle broeikasgassen kan vooralsnog alleen CO₂ uit de atmosfeer gehaald worden. Nederland kan de doelen in de Klimaatwet dus alleen realiseren met behulp van CO₂-verwijdering. Het onderwerp van dit advies is met welke uitgangspunten en met welk beleid de Nederlandse overheid kan sturen op CO₂-verwijdering.

Het verwijderen van CO₂ uit de atmosfeer heeft twee rollen: het terugdringen van de temperatuuroverschrijding en het compenseren van de overgebleven uitstoot. De broeikasgasuitstoot kan voor veel maar niet voor alle activiteiten naar nul. Bovendien zal de wereldwijde uitstoot naar verwachting niet snel genoeg dalen om de stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde te beperken tot 1,5°C. Naast uitstootvermindering is het daarom nodig om broeikasgassen uit de lucht te verwijderen:

- ▶ Om de CO₂-concentratie in de atmosfeer te verlagen zodat de temperatuur minder snel oploopt of de temperatuurstijging zelfs teruggedraaid wordt. Hierdoor kan een eventuele overschrijding van de 1,5°C beperkt blijven, en kan de wereldgemiddelde temperatuurstijging aan eind van de eeuw weer onder de 1,5°C komen.
- ▶ Om het bereiken van klimaatneutraliteit door de uitstoot van broeikasgassen die niet te voorkomen is, oftewel de resterende uitstoot, te compenseren.

CO₂-verwijdering omvat opzettelijke activiteiten die langdurig netto CO₂ uit de atmosfeer verwijderen. Voorbeelden van methoden voor CO₂-verwijdering zijn aanplant van nieuwe bossen, gebruik van hout als bouw materiaal, omzetting van biomassa in combinatie met CO₂-afvang en geologische opslag in de

diepe ondergrond, directe afvang van CO₂ uit de lucht gecombineerd met geologische opslag, mineralisatie van CO₂ doordat het met mineralen reageert naar ander gesteente of bouw materiaal, en landbouwmethoden die het koolstofgehalte van de bodem verhogen. Methoden waarbij de CO₂ voor minstens enkele eeuwen wordt vastgelegd beschouwen we als permanente CO₂-verwijdering. Daaronder vallen geologische opslag in de diepe ondergrond en mineralisatie van CO₂. Methoden zoals bosaanplant, vastlegging van CO₂ in landbouwbodems of gebruik van biomaterialen in bijvoorbeeld de bouw, leggen CO₂ tijdelijk vast, waarschijnlijk slechts voor decennia. Bovendien bestaat het risico dat de CO₂ nog vroeger vrijkomt door bijvoorbeeld bosbranden of droogte. Dit beschouwen we als tijdelijke CO₂-verwijdering. CO₂-afvang en opslag (*carbon dioxide capture and storage*, oftewel CCS) of hergebruik (*carbon dioxide capture and utilisation*, oftewel CCU) van fossiele CO₂-uitstoot verminderen alleen de uitstoot en zijn geen CO₂-verwijdering.

CO₂-verwijdering kent beperkingen en risico's, zowel op het niveau van individuele methoden als voor het klimaatsysteem. Vrijwel alle nu bekende CO₂-verwijderingsmethoden vergen veel (duurzame) energie, veel land, of allebei. Hierdoor hebben veel methoden een

beperkt potentieel. Sommige methoden hebben ongewenste bijeffecten, zoals een negatieve invloed op natuur, wat het maatschappelijk draagvlak kan verminderen. Methoden die CO₂ permanent vastleggen worden nu nog niet op de benodigde schaal toegepast, onder meer omdat ze nog niet voldoende ontwikkeld of te duur zijn. Dit alles maakt het onzeker of CO₂-verwijdering in de praktijk op grote schaal zal worden toegepast.

Als uitstoters teveel vertrouwen op CO₂-verwijdering en het valt tegen, dan krijgen toekomstige generaties te maken met meer klimaatverandering. Gegeven de onzekerheden en risico's is er een kans dat CO₂-verwijdering niet in de vereiste omvang van de grond komt. Bovendien is er, ondanks de onzekerheden, een reële mogelijkheid dat uitstoters een verlaging van hun broeikasgasuitstoot uitstellen omdat ze erop rekenen dat de CO₂ later weer uit de atmosfeer wordt verwijderd. Dit alles zou ertoe leiden dat volgende generaties met meer klimaatverandering te maken krijgen. En zelfs als deze risico's en beperkingen te omzeilen zijn, kunnen er in het klimaatsysteem onomkeerbare gevolgen optreden als de temperaturen stijgen als CO₂-verwijdering te laat wordt toegepast.

Het vermijden van uitstoot is effectiever en biedt meer zekerheid voor het verminderen van klimaatrisico's dan CO₂-verwijdering. Beide zijn echter nodig, wat reden geeft om terughoudend te zijn met uitruil. Broeikasgassen waarvan de uitstoot is vermeden leveren zeker geen bijdrage aan klimaatverandering. De meeste maatregelen voor het verminderen van de uitstoot, zoals energiebesparing of zonne-energie, hebben minder negatieve bijeffecten dan de meeste CO₂-verwijderingsmethoden. Er zal een balans gevonden moeten worden tussen een snelle opschaling van (nieuwe) methoden van CO₂-verwijdering en uitstootvermindering. Het beleid voor CO₂-verwijdering moet niet of zo weinig mogelijk ten koste gaat van de inspanningen voor vermindering van de uitstoot.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om maximaal in te zetten op het beperken van de uitstoot. Zo wordt de afhankelijkheid van CO₂-verwijdering om klimaatneutraliteit te bereiken klein gehouden. De Raad adviseert daarnaast om CO₂-verwijdering vooral in te zetten voor het beperken en terugdringen van een temperatuuroverschrijding.

Om de inzet van CO₂-verwijdering op grote schaal mogelijk te maken is overheidsingrijpen nodig. CO₂-verwijdering is een publiek goed: iedereen heeft er baat bij, niet alleen degene die het uitvoert. Bedrijven kunnen de voordelen van CO₂-verwijdering in de huidige situatie niet te gelde maken, waardoor er nu nog maar weinig wordt geïnvesteerd in de ontwikkeling en opschaling van permanente CO₂-verwijderingsmethoden. Er is beleid van de overheid nodig om te zorgen dat er vraag komt naar CO₂-verwijdering, zodat opschaling tijdig op gang komt. Vervolgens moet nationaal en Europees beleid ervoor zorgen dat CO₂-verwijdering op grote schaal en verantwoord wordt toegepast.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de Nederlandse overheid om, in samenhang met Europees beleid, CO₂-verwijderingsbeleid te voeren.

Om te zorgen dat de uitstoot zoveel mogelijk daalt, is het verstandig limieten te stellen aan de hoeveelheid CO₂-verwijdering die gebruikt mag worden om resterende uitstoot te compenseren. CO₂-verwijdering zou zo weinig mogelijk moeten worden ingezet voor de compensatie van restemissies. Te grote inzet van CO₂-verwijdering kan ertoe leiden dat uitstoters vermijdbare uitstoot niet verminderen. Om de prikkel voor uitstootvermindering te houden, helpt het om vast te leggen hoeveel resterende uitstoot er in 2050 mag zijn. Daarmee ligt ook vast hoeveel CO₂-verwijdering er maximaal ter compensatie ingezet mag worden. Dit kan op Europees en nationaal niveau en per sector waarin de uitstoot plaatsvindt. De hoogte van de limiet zou met enige regelmaat moeten worden geëvalueerd en indien nodig herzien bij nieuwe ontwikkelingen, bijvoorbeeld als er nieuwe maatschappelijke of technologische mogelijkheden komen op het gebied van uitstootvermindering.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de inzet van CO₂-verwijdering voor de compensatie van restemissies te beperken door daarvoor limieten te stellen op Europees, nationaal en sectoraal niveau.

Voor de compensatie van fossiele CO₂-uitstoot en andere broeikasgassen die lang in de atmosfeer blijven is alleen permanente CO₂-verwijdering geschikt. De wereld kent een korte koolstofcyclus van bijvoorbeeld planten die CO₂ opnemen en indirect weer uitstoten, en een lange, van bijvoorbeeld koolstof in fossiele brandstoffen die al miljoenen jaren geleden is vastgelegd. Door menselijke activiteiten zoals gebruik van die fossiele brandstoffen of kappen van oerbos, wordt de koolstof uit de lange cyclus vermengd met die van de korte. CO₂, dat lang in de atmosfeer blijft, hoopt zich dan op, wat leidt tot opwarming. Het minimaliseren van het vermengen van koolstof uit de lange met koolstof in de korte koolstofcyclus beperkt daarom klimaatrisico's. Daarnaast is een zeer lange opslagduur belangrijk voor sommige andere broeikasgassen, zoals lachgas of fluorverbindingen, die meerdere eeuwen of millennia in de atmosfeer blijven. De compensatie van deze broeikasgassen vereist een evenredige hoeveelheid permanente verwijdering van CO₂.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om fossiele broeikasgasuitstoot en de uitstoot van broeikasgassen met een lange verblijftijd in de atmosfeer alleen te compenseren met permanente CO₂-verwijdering.

Vooral voor permanente methoden voor CO₂-verwijdering is beleid nodig voor opschaling en marktontwikkeling.

In tegenstelling tot tijdelijke CO₂-verwijderingsmethoden, wordt permanente CO₂-verwijdering nog niet op grote schaal toegepast. Daarom is er met name beleid nodig voor opschaling en marktontwikkeling voor permanente methoden voor CO₂-verwijdering.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert het Nederlandse CO₂-verwijderingsbeleid te richten op permanente methoden.

Ondanks de beperkte bijdrage aan de klimaatdoelen zijn er goede redenen om tijdelijke CO₂-verwijdering te stimuleren als onderdeel van beleid voor bijvoorbeeld natuurherstel of verduurzaming van bos- en landbouw.

Methoden voor tijdelijke CO₂-verwijdering, zoals (her)bebossing en vastlegging van CO₂ in landbouwbodems, zijn vaak verder ontwikkeld en goedkoper dan permanente methoden. De tijdelijke methoden hebben in Nederland echter een beperkt potentieel. Beleid dat tijdelijke CO₂-verwijdering in de land- en bosbouw bevordert, kan ongewenste effecten hebben op andere terreinen

zoals voedselproductie, biodiversiteit en ruimtegebruik. Bij beleid gericht op duurzaam bouwen, verduurzaming van de landbouw, natuurherstel en beperking van de bodemdaling kan vastlegging van CO₂ wel een positief bijeffect hebben.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om tijdelijke CO₂-verwijdering in Nederland te stimuleren, maar alleen als onderdeel van ander beleid.

Er zijn verschillende mogelijke beleidsinstrumenten voor de realisatie en opschaling van permanente CO₂-verwijdering. Er bestaat een vrijwillige koolstofmarkt, waarop ook handel in CO₂-verwijderingscertificaten plaatsvindt. Maar de huidige vrijwillige markt is niet geschikt om de benodigde schaal en kwaliteit van CO₂-verwijdering te realiseren. Ten eerste is het onvoldoende duidelijk of die markt leidt tot langdurige, duurzame en daadwerkelijk extra CO₂-verwijdering. Het accent ligt op het compenseren van vooral fossiele uitstoot met relatief goedkope, tijdelijke CO₂-verwijdering. Ten tweede blijft de vrijwillige markt waarschijnlijk klein omdat de prikkel voor bedrijven om in CO₂-verwijdering te investeren beperkt en kwetsbaar is. De

overheid heeft diverse mogelijkheden om op andere manieren de vraag naar CO₂-verwijdering te ontwikkelen, bijvoorbeeld door CO₂-verwijderingscertificaten in te kopen, uitstoters te verplichten tot CO₂-verwijdering of door CO₂-verwijdering op te nemen in een emissiehandelssysteem. Een belangrijke voorwaarde voor de inzet van deze instrumenten is een betrouwbare certificering van CO₂-verwijdering. Europees beleid voor certificering is al in een vergevorderd stadium.

Nederland heeft er belang bij dat duurzame methoden voor permanente CO₂-verwijdering snel grootschalig beschikbaar komen.

Als rijk land, met een hoge huidige en historische uitstoot van broeikasgassen per hoofd van de bevolking, zal Nederland moeten bijdragen aan het terugdringen van een temperatuuroverschrijding. Ook heeft Nederland belang bij compensatie van waarschijnlijk moeilijk te reduceren resterende uitstoot van bijvoorbeeld een deel van de landbouw, industrie en luchtvaart. De Nederlandse overheid zou dus gericht beleid moeten voeren om de implementatie van verschillende methoden voor permanente CO₂-verwijdering te bevorderen. Om de klimaatdoelen te halen, zou dat al voor 2035 flink op gang moeten zijn gebracht. Een verplichting voor alleen Nederlandse uitstoters zou het Europese gelijke speelveld beïnvloeden.

Gerichte overheidsinkoop van CO₂-verwijderingscertificaten is op dit moment een geschikt instrument, omdat het relatief snel kan worden ingevoerd, niet ten koste gaat van uitstootvermindering en Nederlandse uitstoters niet benadeelt.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert een door de Nederlandse overheid geleid inkoopprogramma voor permanente CO₂-verwijdering te starten, om voor 2035 ervaring op te doen met diverse methoden van CO₂-verwijdering in Nederland.

Het is belangrijk dat naast Nederlands beleid ook Europees beleid voor CO₂-verwijdering snel van de grond komt.

Voor Nederland, als lidstaat met een relatief grote behoefte aan permanente CO₂-verwijdering, is het belangrijk dat er Europees beleid voor CO₂-verwijdering komt. Met Europees beleid kunnen meer mogelijkheden voor CO₂-verwijdering worden gebruikt, wat de kosten beperkt. Europees beleid kan ook wegkopen en een gelijk speelveld voor uitstoters creëren. Het is dus in het belang van Nederland om in Europees verband snel goede afspraken te maken. Dat kan door als Nederland het voortouw te nemen voor de ontwikkeling van een Europese

strategie voor het creëren van vraag naar CO₂-verwijdering.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de Nederlandse regering het initiatief te nemen om met andere lidstaten Europese beleidsinstrumenten voor het creëren van een vraag naar CO₂-verwijdering te onderzoeken, en hun invoering te stimuleren.

Aan eventuele opname van CO₂-verwijdering in het Europese emissiehandelssysteem (ETS) moeten scherpe voorwaarden worden gesteld. Uitstel van het moment van integratie vermindert de risico's op uitruil tussen CO₂-verwijdering en uitstootvermindering. Fossiele uitstoot van CO₂ die onder het ETS valt, gaat volgens het huidige beleid tussen 2040 en 2045 naar nul. Helemaal geen CO₂ meer uitstoten is echter voor sommige strategisch of economische belangrijke activiteiten op die termijn vrijwel onmogelijk. De resterende uitstoot vereist dan compensatie binnen het ETS om op nul uit te komen. Maar een te vroege integratie van CO₂-verwijdering in het ETS zou de prikkel voor om minder uit te stoten kunnen verkleinen. Om dit te

beperken zou CO₂-verwijdering alleen onder strenge voorwaarden in het ETS moeten worden ingezet: alleen als het gaat om permanente CO₂-verwijdering (want de uitstoot die het ETS reguleert bestaat geheel uit fossiele uitstoot) en als het echt niet anders kan, bijvoorbeeld als het ETS niet langer goed werkt omdat er beperkte mogelijkheden voor uitstootvermindering zijn. Als bovendien de inbreng van CO₂-verwijderingscertificaten in het ETS via de overheid verloopt kan de Europese Unie zorgen voor meer sturing op de inzet van CO₂-verwijdering in het ETS.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om CO₂-verwijdering zo lang mogelijk uit het ETS te houden, om zo de prikkel voor emissiereductie zo lang mogelijk te behouden. Verder adviseert de Raad dat, als CO₂-verwijdering onderdeel wordt van het ETS, alleen de overheid CO₂-verwijderingscertificaten op de markt kan brengen.

Om de kosten van CO₂-verwijdering niet af te wentelen op toekomstige generaties is het redelijk dat de huidige uitstoters meebetalen aan CO₂-verwijdering die in de toekomst nodig is. Permanente CO₂-verwijdering die nu wordt gerealiseerd en

niet wordt ingezet voor compensatie van resterende uitstoot helpt mee met het beperken van temperatuuroverschrijding. Maar er is nu nog weinig permanente CO₂-verwijdering beschikbaar. Dus is het niet mogelijk huidige uitstoters te verplichten om al hun resterende CO₂ uit de atmosfeer te verwijderen. De meeste kosten voor CO₂-verwijdering worden daarmee doorgeschoven naar toekomstige generaties, die de uitstoot zelf niet hebben veroorzaakt. Om te voorkomen dat die onevenredig grote lasten van CO₂-verwijdering dragen, zouden er nu al voorzieningen moeten komen om de huidige uitstoters te laten bijdragen aan toekomstige CO₂-verwijdering. Dat kan op verschillende manieren. Voorbeelden zijn een fonds of extra investeren in het reduceren van de uitstoot. Er is meer onderzoek nodig om te bepalen wat de beste manier is.

Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de overheid om ervoor te zorgen dat uitstoters vanaf nu bijdragen aan de toekomstige kosten van het beperken en terugdringen van de temperatuuroverschrijding, door hiervoor manieren te ontwerpen en in te voeren.

De lucht klaren?

Advies over uitgangspunten en beleid voor sturing op CO₂-verwijdering uit de atmosfeer

Wat is CO₂-verwijdering?

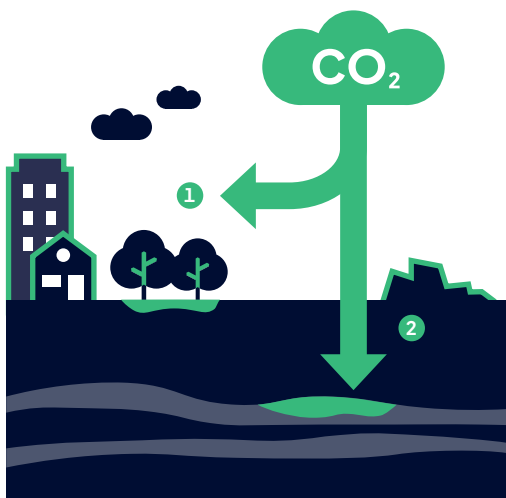
Het uit de atmosfeer halen en langdurig vastleggen van CO₂

Waar is het voor nodig?

- ▶ Voor het beperken en terugdringen van een temperatuuroverschrijding
- ▶ Om uitstoot te compenseren

Waar leg je CO₂ vast?

- 1 Tijdelijk in bossen, bodems en producten
- 2 Permanent diep onder de grond en in gesteenten



Welke uitgangspunten zijn belangrijk voor CO₂-verwijderingsbeleid?

- ▶ Zet maximaal in op het beperken van uitstoot
- ▶ Gebruik CO₂-verwijdering vooral voor het beperken en terugdringen van een temperatuuroverschrijding
- ▶ Richt CO₂-verwijderingsbeleid op permanente methoden
- ▶ Stimuleer tijdelijke CO₂-verwijdering als onderdeel van ander beleid
- ▶ Compenseer fossiele uitstoot met permanente CO₂-verwijdering

Wat is nodig voor CO₂-verwijdering?

- ▶ Nu starten
- ▶ Een actieve rol voor de overheid
- ▶ Nederlands én Europees beleid

Wat moet de overheid doen?

- ▶ Stel een limiet aan de hoeveelheid CO₂-verwijdering die mag worden ingezet voor compensatie
- ▶ Start een Nederlands inkoop-programma voor permanente CO₂-verwijdering
- ▶ Neem als Nederland samen met andere lidstaten het initiatief voor Europese beleidsinstrumenten die vraag naar CO₂-verwijdering creëren
- ▶ Houd CO₂-verwijdering zo lang mogelijk uit het Europese emissiehandelssysteem
- ▶ Zorg dat uitstoters vanaf nu bijdragen aan de toekomstige kosten voor het verminderen van een temperatuuroverschrijding

1. Inleiding

1.1 Achtergrond

In het Klimaatakkoord van Parijs hebben vrijwel alle landen in de wereld afgesproken om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder de 2°C, en te streven naar maximaal 1,5°C opwarming. De aarde is nu al 1,2°C opgewarmd ten opzichte van het pre-industriële niveau (gedefinieerd als de periode tussen 1850–1900). De klimaatwetenschap geeft aan dat bij elk beetje extra opwarming de wereldwijde gevolgen, risico's, schade en verlies door klimaatverandering verder toenemen.¹ Als elk land de uitstoot van broeikasgassen snel vermindert, is het mogelijk om de opwarming aan het einde van de eeuw te beperken tot 1,5°C.² Ook voor Nederland is dit van belang: de kans op bijvoorbeeld waterschaarste, extreme zomerhitte en stortregens neemt toe bij verdergaande klimaatverandering, zeker in een hoog opwarmingsscenario.³ Een stijging van de zeespiegel zorgt ervoor dat de rivieren in ons land moeilijker kunnen afwateren. Ook maakt deze het risico op overstromingen in onze dichtbevolkte delta groter, zeker in combinatie met heviger regen.

De kans op een overschrijding van de 1,5°C is aanzienlijk. Er is een vrijwel één-op-één verband tussen de totale historische uitstoot van CO₂ en de opwarming van de aarde. Die relatie

gebruiken wetenschappers om in te schatten hoeveel CO₂ er nog mag vrijkomen om de opwarming van de aarde eind deze eeuw te beperken tot 1,5°C. Dit is het koolstofbudget. Op basis van het laatste rapport van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mag de wereld nog zo'n 250 GtCO₂⁴ uitstoten om de opwarming van de aarde aan het eind van de eeuw met een 50%-kans te beperken tot 1,5°C. Dit is zesmaal de huidige jaarlijkse mondiale CO₂-uitstoot, en de mondiale uitstoot daalt nog niet. Omdat het overblijvende koolstofbudget om onder de 1,5°C te blijven zo klein is, bestaat er een reële kans dat de 1,5°C ergens deze eeuw voor een periode overschreden wordt.⁵ Dan is er sprake van een temperatuuroverschrijding: een situatie waarin de wereldwijde temperatuur meer dan 1,5°C is gestegen ten opzichte van het pre-industriële niveau.⁶ Extra gevolgen, risico's, schade en leed door het overschrijden van de 1,5°C zijn te vermijden door de hoogte en duur van de temperatuuroverschrijding te beperken. Daarom laten alle scenario's van het IPCC die de opwarming eind deze eeuw beperken tot 1,5°C of 2°C snelle emissiereducties zien, maar ook CO₂-verwijdering uit de atmosfeer. Het terugdringen van de temperatuuroverschrijding kan zelfs alleen maar met CO₂-verwijdering, mits dat gebeurt samen met een maximale reductie van de broeikasgasuitstoot.

CO₂-verwijdering omvat verschillende activiteiten die netto CO₂ uit de atmosfeer halen en langdurig opslaan.⁷

Een voorbeeld van zo'n activiteit is het aanplanten en herstellen van bossen. Planten en bomen leggen CO₂ uit de lucht vast bij de groei en kunnen op die manier zorgen voor een verlaging van de CO₂-concentratie in de atmosfeer. Er zijn ook bepaalde gesteenten die CO₂ uit de atmosfeer verwijderen wanneer zij verwerken, zoals olivijn en basalt, en bij het maken van cement kan CO₂ worden meegemineraliseerd. Ook zijn er landbouwmethoden die de vastlegging van organische stoffen in de bodem verhogen,

wat ook CO₂ uit de lucht verwijdert. Verder kan CO₂ direct uit de atmosfeer gefilterd worden door lucht over een materiaal te blazen dat de CO₂ in die luchtstroom aan zich bindt. De afgescheiden CO₂ kan vervolgens bijvoorbeeld in ondergrondse aardgasvelden worden opgeslagen (*Direct Air Carbon Dioxide Capture and Storage*, DACCS). Tenslotte kan het gebruik van biomassa in combinatie met CO₂-afvang en -opslag (*biomass with Carbon Dioxide Capture and Storage*, bioCCS) CO₂ uit de atmosfeer verwijderen. Tekstbox 1 geeft de definitie van CO₂-verwijdering die we in dit advies gebruiken.

Textbox 1 Definitie van CO₂-verwijdering

Het IPCC definieert CO₂-verwijdering⁸ als menselijke activiteiten die CO₂ uit de atmosfeer verwijderen en langdurig opslaan in de bodem, in diepe geologische reservoirs, in oceaansedimenten, of in producten.⁹ Het is belangrijk dat er sprake is van een netto verwijdering: de totale hoeveelheid CO₂ die uit de atmosfeer wordt verwijderd moet groter zijn dan de totale uitstoot van broeikasgassen uit de keten die hoort bij het CO₂-verwijderingsproces.¹⁰

Aangezien broeikasgassen minstens enkele decennia (bijvoorbeeld methaan), eeuwen (CO₂ en lachgas) of zelfs millennia (fluorhoudende gassen) in de atmosfeer verblijven, moet CO₂ langdurig worden opgeslagen om klimaatverandering te kunnen tegengaan. We onderscheiden daarom enerzijds tijdelijke CO₂-verwijdering die leidt tot vastlegging van minstens enkele decennia en waarbij een kans bestaat dat CO₂ vroegtijdig vrijkomt, en anderzijds permanente CO₂-verwijdering met een opslagduur van minstens enkele eeuwen en met een zeer geringe kans op vroegtijdig vrijkomen van opgeslagen CO₂.



CO₂-verwijdering is nodig voor twee doeleinden: om de hoogte en duur van een temperatuuroverschrijding te beperken, en om resterende uitstoot van broeikasgassen te compenseren.

Ten eerste willen de Europese Unie (EU) en Nederland in 2050 netto geen broeikasgassen meer uitstoten, oftewel klimaatneutraal zijn. Dit betekent dat de uitstoot van broeikasgassen op Europees grondgebied in evenwicht is met CO₂-verwijdering. Omdat niet alle uitstoot tot nul gereduceerd kan worden, moet een klein deel van de emissie in 2050, de restemissie, gecompenseerd worden met CO₂-verwijdering.¹¹

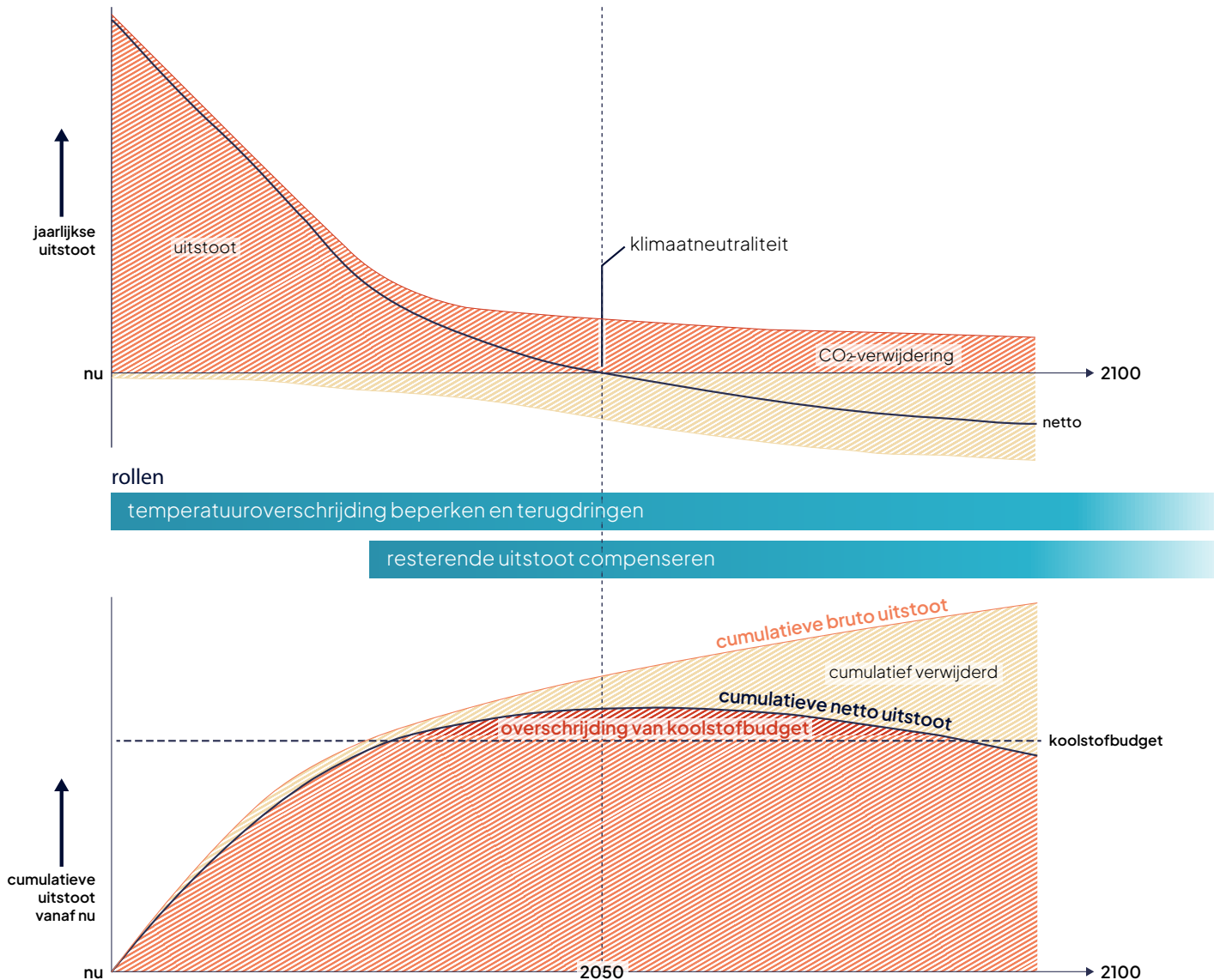
Ten tweede vereisen de Nederlandse en Europese klimaatwet dat na 2050 een situatie van 'negatieve emissies' gerealiseerd wordt: dan wordt op het grondgebied van de EU meer CO₂ verwijderd dan er broeikasgassen worden uitgestoten. In die situatie beginnen Nederland en de EU een deel van hun historisch uitgestoten CO₂ 'op te ruimen'. Op deze manier dragen ze bij aan een kortere overschrijding van de wereldwijde temperatuurgrens van 1,5°C. Figuur 1 illustreert de verschillende rollen van CO₂-verwijdering.

Er vindt al tijdelijke CO₂-verwijdering plaats, maar de omvang is beperkt, en methoden die permanent CO₂ verwijderen zijn nog nauwelijks beschikbaar.

(Her)bebossing levert wereldwijd vooralsnog de grootste bijdrage aan CO₂-verwijdering. De verwachting is echter dat door schaarste aan land hiervoor ongeveer halverwege deze eeuw het maximum wordt bereikt.¹² Bovendien staan bossen wereldwijd onder druk door menselijk handelen, en een bos kan afbranden, bomen kunnen ziek worden. De vastgelegde CO₂ komt in dat geval weer vrij.¹³ Weers-extremen als hitte en droogte worden door klimaatverandering verergerd, en vergroten dit risico op vrijkomen nog. Om de verwachte behoefte aan CO₂-verwijdering te realiseren zijn dus nieuwe methoden nodig die CO₂ permanent opslaan. De huidige toepassing van deze relatief nieuwe methoden is echter nog beperkt. In 2020 leverden ze wereldwijd nog maar een zeer beperkte bijdrage: 0,0025 GtCO₂/j, aanzienlijk minder dan de 3 GtCO₂/j die nu met bosbouw wordt vastgelegd (figuur 2).¹⁴ Voor het realiseren van de twee doelen voor CO₂-verwijdering is een grote opschaling nodig van de methoden voor permanente CO₂-verwijdering.

Overheidsinterventie is nodig omdat marktprikkels ontbreken voor de ontwikkeling en opschaling van permanente CO₂-verwijderingsmethoden. Er bestaat weliswaar een vrijwillige markt voor CO₂-verwijdering, maar die is ongeschikt voor het realiseren van de benodigde schaal en kwaliteit van CO₂-verwijdering.

De rol van CO₂-verwijdering verandert door de tijd



Figuur 1: Illustratie van de rollen van CO₂-verwijdering bij het beperken van klimaatverandering. CO₂-verwijdering is nodig om een temperatuuroverschrijding te beperken en terug te draaien, en om bij klimaatneutraliteit het kleine deel van de uitstoot dat nog resteert te compenseren. Het rode deel geeft de jaarlijkse (bovenste figuur) en cumulatieve (onderste) uitstoot van broeikasgassen aan, het gele deel de jaarlijkse (bovenste figuur) en cumulatieve (onderste) hoeveelheid CO₂ die uit de atmosfeer wordt verwijderd. De zwarte lijnen geven de netto uitstoot aan, dus de uitstoot van broeikasgassen verminderd met de hoeveelheid CO₂-verwijdering. Vanaf de eerste inzet van CO₂-verwijdering wordt de temperatuurstijging beperkt (bovenste blauwe balk). Vanaf het moment dat de uitstootvermindering moeilijk wordt, kan het ook worden ingezet voor compenseren van resterende uitstoot (onderste blauwe balk). In de onderste figuur is de gestippelde lijn die de overschrijding van het koolstofbudget aangeeft illustratief.

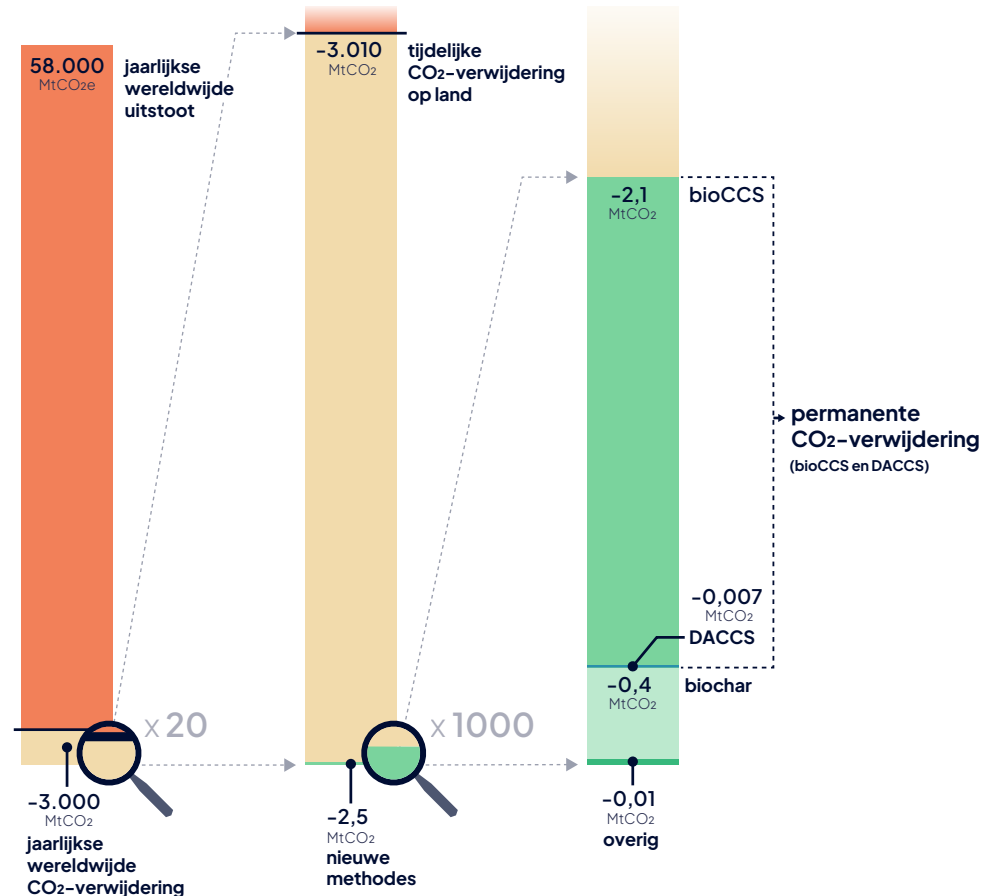
Het overgrote aanbod op deze markten bestaat uit goedkope tijdelijke verwijderingen terwijl er ook behoefte is aan permanente CO₂-verwijdering. Permanente CO₂-verwijdering heeft hoge kosten, die op dit moment niet kunnen worden terugverdiend, terwijl het wel nut oplevert voor de maatschappij. Hierdoor is CO₂-verwijdering een publiek goed. Daardoor komt kwalitatief hoogwaardige, permanente CO₂-verwijdering niet vanzelf van de grond. Het vergt interventie van de overheid om permanente CO₂-verwijdering te ontwikkelen en op voldoende schaal te realiseren.

Het verwijderen van CO₂ kent beperkingen en risico's, zowel op het niveau van individuele methoden als voor het klimaatstelsel. Het is dus zaak beleid voor CO₂-verwijdering met zorg vorm te geven. Vrijwel alle nu bekende CO₂-verwijderingsmethoden kosten ofwel veel (duurzame) energie, ofwel veel land, of allebei. Hierdoor zijn er bij veel methoden beperkingen in de inzetbaarheid. Technologieën die CO₂ permanent verwijderen worden nu nog niet op de benodigde schaal toegepast, onder meer omdat ze nog niet voldoende ontwikkeld of te duur zijn.

Ook zijn de opbouw van nationale en Europese instituties voor CO₂-verwijdering (in de zin van besluitvormingsregels, wetten, regelgeving en dergelijke),

het maatschappelijk draagvlak en het tijdig gereedkomen van de benodigde infrastructuur niet vanzelfsprekend. Dit maakt het onzeker of CO₂-verwijdering in de praktijk tijdig van de grond komt en op voldoende grote schaal zal worden toegepast. Ondanks al deze risico's, beperkingen en onzekerheden is er een reële kans dat uitstoters een verlaging van uitstoot uitstellen omdat ze erop rekenen dat de CO₂ later weer uit de atmosfeer kan worden verwijderd. Beleidsmakers moeten rekening houden met dit risico. En daarbij komt dat, zelfs als CO₂-verwijdering later wel grootschalig en duurzaam wordt gerealiseerd, er in het klimaatstelsel onomkeerbare gevolgen kunnen optreden als de temperaturen stijgen voordat CO₂-verwijdering wordt toegepast.

Slechts een fractie van alle huidige CO₂-verwijdering is permanent



Figuur 2: Wereldwijd worden er jaarlijks fors meer CO₂-equivalenten (CO₂e) uitgestoten dan verwijderd (links). Die huidige CO₂-verwijdering bestaat voor 99,9% uit tijdelijke verwijderingen, met name vastleggingen door bosbouw (midden). Permanente CO₂-verwijdering vindt nog nauwelijks plaats (rechts). Deze figuur is gebaseerd op Lamb et al. (2024b).

1.2 Dit advies

1.2.1 Adviesvraag

Met dit advies beoogt de WKR een bijdrage te leveren aan de beleidsontwikkeling van de Nederlandse overheid rondom CO₂-verwijdering. In het advies staat de volgende vraag centraal:

Met welke uitgangspunten en met welk beleid kan de Nederlandse overheid sturen op CO₂-verwijdering?

1.2.2 Afbakening

- **Focus:** In dit advies ligt de focus op overheidsbeleid voor CO₂-verwijdering. Dit beleid moet verder ontwikkeld en geïmplementeerd worden, op nationale en Europese schaal. In dit advies staan de volgende onderdelen van beleid centraal: uitgangspunten voor verantwoorde stimulering van CO₂-verwijdering en instrumenten voor het creëren van een vraag naar permanente CO₂-verwijdering.
- **Zichtperiode:** We kijken in dit advies zowel naar de periode tot aan het bereiken van klimaatneutraliteit als naar de periode daarna, waarin het doel is netto negatieve emissies te realiseren.

De beleidsadviezen zijn gericht op zaken die onmiddellijk gestart kunnen worden.

- **Beleidscontext:** We beperken ons in dit advies tot de Nederlandse en Europese beleidscontext. Volgens de Europese klimaatwet moet klimaatneutraliteit op Europees grondgebied gerealiseerd worden.
- **Generiek instrumentarium:** De instrumenten voor het creëren van een vraag naar CO₂-verwijdering die we in dit advies aanbevelen zijn breed inzetbaar en niet gericht op specifieke verwijderingsmethoden. Indien gewenst kan de overheid ook beleid voeren op specifieke CO₂-verwijderingsmethoden, bijvoorbeeld op methoden met minder ongewenste bijeffecten. Hier gaat dit advies niet verder op in.
- **Innovatiebeleid:** Vanwege de focus op uitgangspunten en instrumenten voor opschaling van CO₂-verwijdering, valt innovatiebeleid buiten de scope van dit advies. Desalniettemin is een verkenning van het Nederlandse innovatiesysteem voor CO₂-verwijdering nodig om de positie van Nederland in het mondiale speelveld rondom CO₂-verwijdering te bepalen. 15 Beleidsinstrumenten die de vraag naar CO₂-verwijdering stimuleren kunnen indirect ook innovatie bevorderen, zowel binnen als buiten Nederland.

1.2.3 Doelgroep

Dit advies is primair gericht aan de Nederlandse regering en het parlement ter ondersteuning van de gedachten- en beleidsvorming door de Nederlandse overheid. In het bijzonder levert het advies input voor het Klimaatplan 2025–2035 en de Routekaart Koolstofverwijdering. Het advies beoogt ook behulpzaam te zijn bij het formuleren van de Nederlandse inbreng op het thema CO₂-verwijdering in EU-verband. Daarnaast hoopt de WKR met dit advies de verdere gedachtenvorming ondersteunen in de wetenschap, bij maatschappelijke organisaties, en in het bedrijfsleven.

1.2.4 Werkwijze

Dit advies is gebaseerd op literatuurstudie, twee door de WKR georganiseerde internationale expertmeetings, uitwisselingen met de Europese Klimaatraad, beleidsmakers van de ministeries van Economische Zaken en Klimaat, Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en Infrastructuur en Waterstaat en van de Europese Commissie (EC), en commentaren van een groep experts.

CO₂-verwijdering is een zich snel ontwikkelend onderzoeksveld waarin regelmatig nieuwe inzichten, ideeën, analyses en overzichten worden gepubliceerd. In die zin is dit advies een momentopname wat betreft de wetenschappelijke stand van zaken.

1.2.5 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat een beknopt overzicht van verschillende CO₂-verwijderingsmethoden. Hoofdstukken 3 en 4 bevatten de aanbevelingen en geven samen antwoord op de centrale adviesvraag. Hoofdstuk 3 geeft belangrijke uitgangspunten voor CO₂-verwijderingsbeleid en onderstreept het belang van de overheid bij het creëren van een vraag naar permanente CO₂-verwijdering. Hoofdstuk 4 geeft een kort overzicht van belangrijke onderdelen van CO₂-verwijderingsbeleid en focust daarna op het stellen van limieten aan restemissies en op instrumenten voor het creëren van een vraag naar permanente CO₂-verwijdering.

Noten

- 1 IPCC (2022b, pp. 15–23).
- 2 UNEP (2023).
- 3 KNMI (2023).
- 4 Daarbij hoort een grote onzekerheidsmarge van -200 tot 830 GtCO₂ (17–83% betrouwbaarheidsinterval). Onzekerheden zijn groot omdat er nog veel wordt bijgeleerd over de precieze gevoeligheid van het klimaatsysteem voor onze uitstoot, en het mitigatiepotentieel van broeikasgassen zoals methaan en lachgas onduidelijk is.
- 5 Het resterende mondiale koolstofbudget moet bovendien over alle landen in de wereld verdeeld worden. Er is geen internationale consensus over hoe dit moet gebeuren, en op basis van welke haalbaarheids- en rechtvaardigheidsgronden. Zie verder tekstbox 8. Zie ook Lamboll et al. (2023).
- 6 Het gaat hier om een langdurige overschrijding van de 1,5°C, niet om een overschrijding van één of enkele jaren.
- 7 Een goed overzicht staat in het Smith et al. (2024).
- 8 In lijn met het IPCC gebruiken we in dit rapport de term 'CO₂-verwijdering' (in het Engels: *carbon dioxide removal*, CDR). Dat is synoniem met de term 'koolstofverwijdering'. De term 'negatieve emissies' gebruiken we in dit rapport alleen als er sprake is van netto CO₂-verwijdering op het niveau van een land of de wereld. Er vindt dan dus meer CO₂-verwijdering dan broeikasgasuitstoot plaats.
- 9 IPCC (2021b, p. 2221).
- 10 Zie de criteria van Tanzer & Ramírez (2019).
- 11 PBL (2024b).
- 12 Lamb et al. (2024a).
- 13 Das et al. (2023); Gatti et al. (2021); Wu et al. (2023).
- 14 Lamb et al. (2024b).
- 15 Zo zijn de VS en Canada leidend als het gaat om patenten gerelateerd aan DACCS en BECCS (Smith et al., 2024).

2. Methoden voor CO₂-verwijdering: eigenschappen en aandachtspunten

In dit hoofdstuk gaan we kort in op de belangrijkste eigenschappen van en aandachtspunten bij de verschillende methoden. Een uitgebreidere behandeling is opgenomen in het achtergrondrapport.¹

2.1 Tijdelijke en permanente methoden voor CO₂-verwijdering

Bij methoden voor tijdelijke CO₂-verwijdering wordt CO₂ vastgelegd in bossen, bodems of in producten. We onderscheiden methoden voor CO₂-verwijdering op basis van hun opslagduur: bij tijdelijke CO₂-verwijdering is opslag voor de duur van minstens enkele decennia, bij permanente CO₂-verwijdering is dat meerdere eeuwen of langer (zie tekstbox 1 en paragraaf 3.2). Het herstellen en/of aanplanten van bos is een voorbeeld van tijdelijke CO₂-verwijdering, want bomen leggen CO₂ vast bij de groei. Wereldwijd bestaat het overgrote deel van de huidige, door menselijk ingrijpen gerealiseerde CO₂-verwijdering uit aanplant en herstel van bossen, namelijk zo'n 3 GtCO₂/j.² Andere methoden die CO₂ tijdelijk verwijderen zijn het verhogen van het gehalte organische stof in de bodem met aangepast bodembeheer, bijvoorbeeld in de landbouw, en het herstellen van veenweiden. Ook *biochar* (een soort 'verkoelde' biomassa, die ook

uit reststromen kan worden geproduceerd) is een optie voor het tijdelijk vastleggen van CO₂ in bodems; bovendien speelt *biochar* een rol als bodemverbeteraar.³ Bij beheer van blauwe koolstof (*blue carbon management*) wordt in kustgebieden koolstof vastgelegd in kwelders en in zeegrassen en zeewieren. Tot slot vindt tijdelijke vastlegging plaats in producten en materialen. Dat kan bijvoorbeeld door hout als alternatief bouw materiaal te gebruiken, of door biomassa te gebruiken bij de productie van kunststoffen voor producten met een lange levensduur.

Voor permanente verwijdering zijn er drie belangrijke methoden: bioCCS, DACCS en mineralisatie. BioCCS⁴ is een overkoepelende term voor verschillende technieken en routes die CO₂ geologisch opslaan met biomassa als koolstofbron. Afhankelijk van de techniek, beschikbaarheid en kwaliteit van de biomassa wordt deze omgezet in elektriciteit, warmte, biobrandstof of biogrondstof.

Tekstbox 2 Enkele methoden voor bioCCS in Nederland

Er zijn verschillende methoden voor bioCCS. Een vaak genoemde is om biomassa (meestal houtpellets) te verbranden in een biomassacentrale of mee te stoken in een kolencentrale en vervolgens de CO₂ uit de rookgassen af te vangen en vast te leggen. Deze optie is ver ontwikkeld⁵ en in Nederland is er al een bedrijf dat plannen heeft gepresenteerd om twee kolencentrales om te bouwen tot bioCCS-centrales.⁶ Toch hebben scenariostudies van Netbeheer Nederland⁷, TNO⁸ en PBL⁹ als gemene deler dat bioCCS bij de elektriciteitsopwekking of warmteproductie niet of nauwelijks een rol speelt in het Nederlandse energiesysteem van de toekomst (of hooguit als transitieoptie). Bovendien is het voornemen in beleid om de toepassing van biomassa voor de elektriciteitsopwekking en warmteproductie in de komende jaren af te bouwen¹⁰ en noemt het Hoofdlijnenakkoord met name dat 'bio-energie gecombineerd met CO₂-opvang en opslag' niet zal worden gestimuleerd¹¹.

In de scenario's van PBL vindt bioCCS met name plaats bij de productie van geavanceerde biobrandstoffen, en daarnaast (maar in veel mindere mate) bij afvalverwerking en bij staal-, waterstof- en ammoniakproductie. Biomassa hoeft dus niet per definitie verbrand te worden om CO₂ af te vangen. CO₂-afvang en -opslag bij afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) verwijdert CO₂ als het afval (deels) biogeen is. Deze methode is ver ontwikkeld.¹² Afvang bij de productie van biobrandstoffen, bio-chemicaliën en bio-ethanol gebeurt niet of nauwelijks in Nederland, maar de CO₂ die vrijkomt bij de bioraffinage kan wel vanwege de hoge CO₂-concentratie in de restgassen relatief energie- en kosten-efficiënt worden afgevangen, en er bestaat al een bioraffinaderij in de Verenigde Staten die het doet. Dit betreft wel alleen de CO₂ die vrijkomt bij de raffinage of andere verwerking. Hoe veel van de koolstof in de biomassa die wordt verwerkt wordt verwijderd hangt deels af van de producten. Bij brandstofproductie, bijvoorbeeld voor de luchtvaart, komt het grootste deel van de koolstof vrij bij het gebruik en is er dus geen sprake van CO₂-verwijdering. Bij gebruik voor kunststoffen is de uitstoot vertraagd, en kan het tijdelijke CO₂-verwijdering zijn.

Methoden voor CO₂-verwijdering: eigenschappen en aandachtspunten

Bij elk van deze technieken wordt de CO₂ die vrijkomt in het proces afgevangen en ondergronds opgeslagen. Een aantal methoden voor bioCCS wordt nader toegelicht in tekstbox 2. Bij DACCS wordt directe afvang van CO₂ uit de lucht gecombineerd met ondergrondse opslag. CO₂ wordt dan rechtstreeks uit de atmosfeer gefilterd. Dat gebeurt door met grote ventilatoren lucht langs een chemische stof te blazen die CO₂ aan zich bindt. De chemische stof kan daarna worden behandeld (bijvoorbeeld verhit) zodat de CO₂ loslaat; de zuivere CO₂ kan dan worden geïnjecteerd in de diepe ondergrond (geologische opslag). Tot slot kan CO₂ worden gemineraliseerd, oftewel omgezet in carbonaatmineralen, het hoofdbestanddeel van gesteenten. Onder mineralisatie vallen diverse methoden. Zo hebben bepaalde gesteenten als basalt en olivijn de eigenschap dat zij bij verwerking CO₂ mineraliseren en daarmee aan de atmosfeer onttrekken. Dit proces van mineralisatie gaat in de natuur erg langzaam, maar kan aanzienlijk versneld

worden door de gesteenten te vermalen en uit te strooien, bijvoorbeeld over land of in water. In deze context wordt ook wel de term versnelde verwerking (*enhanced weathering*) gebruikt. Een ander voorbeeld is het aan zeewater toevoegen van gesteente, dat de in het zeewater opgeloste CO₂ absorbeert. Dit is ook een manier om verzuring¹³ tegen te gaan (*ocean alkalinity enhancement*). Daarnaast kan CO₂ worden toegevoegd aan cementproductie waarin het mineraliseert, waardoor het permanent wordt vastgelegd in bouw materiaal.

Er moet scherp onderscheid gemaakt worden tussen CO₂-verwijdering enerzijds en fossiele CO₂-afvang en -opslag (CCS) en CO₂-afvang en -gebruik (CCU) anderzijds. Omdat CO₂-afvang en -opslag ook bij andere toepassingen dan CO₂-verwijdering een rol speelt, en dit voor verwarring kan zorgen, gaat tekstbox 3 nader in op CCS en CO₂-afvang en -hergebruik (CCU). In figuur 3 worden de verschillen schematisch toegelicht.

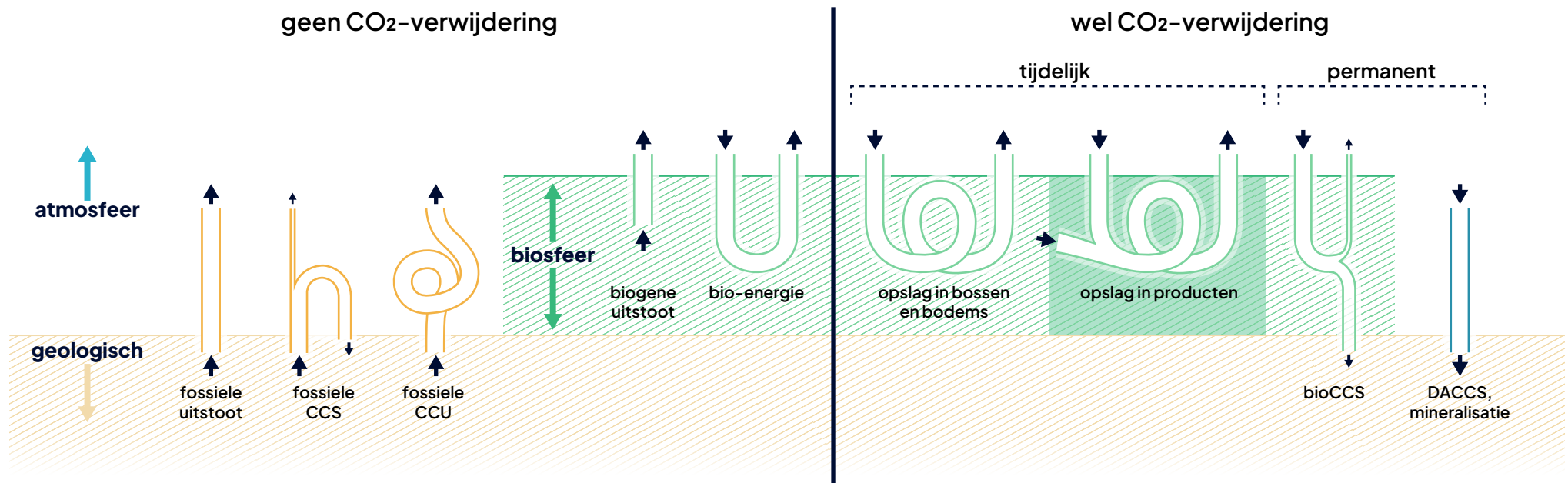
Tekstbox 3 Wanneer is CO₂-afvang ook CO₂-verwijdering?

Bij CO₂-afvang en -opslag (CCS) wordt de CO₂ die vrijkomt bij een industrieel proces afgevangen en ondergronds opgeslagen. Dan gaat het bijvoorbeeld om de CO₂ die vrijkomt bij de verwerking of verbranding van fossiele brandstoffen in de industrie. Als de CO₂ niet wordt opgeslagen maar wordt gebruikt als grondstof voor een nieuwe toepassing spreken we van CO₂-afvang en -gebruik (*carbon dioxide capture and utilisation*, oftewel CCU). Mogelijke toepassingen zijn CO₂-bemesting in kassen, of grondstof voor kunststoffen en synthetische brandstoffen.

CCS en CCU zijn CO₂-verwijdering als aan drie voorwaarden wordt voldaan (zie ook tekstbox 1): 1) de CO₂ is afkomstig uit de atmosfeer, 2) de CO₂ wordt voor minstens enkele decennia vastgelegd (ondergronds bij CCS, of in een product bij CCU), en 3) er moet netto meer vastgelegd zijn dan in de hele keten is uitgestoten. Als CO₂ bij de 'schoorsteen' wordt afgevangen bij bijvoorbeeld de raffinage van fossiele brandstoffen is dit op basis van het eerste criterium dus géén CO₂-verwijdering, omdat die CO₂ niet uit de atmosfeer komt. Dat ligt anders als afgevangen CO₂ afkomstig is uit biomassa of direct uit de lucht (*direct air capture*). Als deze CO₂ met CCS wordt afgevangen en ondergronds (en dus permanent) wordt opgeslagen, telt het als CO₂-verwijdering: dit is bioCCS en DACCS. Voor CCU geldt op grond van de tweede voorwaarde dat toepassingen zoals CO₂-bemesting in kassen en CO₂ als grondstof voor brandstoffen geen CO₂-verwijdering zijn. De CO₂ komt dan namelijk binnen uren tot weken weer vrij.¹⁴ Een voorbeeld van een toepassing die *wel* als CO₂-verwijdering te beschouwen is, is het gebruik van CO₂ uit biomassa om carbonaten te maken, die dan worden verwerkt in bouwmaterialen zoals beton.¹⁵

Methoden voor CO₂-verwijdering: eigenschappen en aandachtspunten

CO₂-verwijdering haalt CO₂ uit de atmosfeer en slaat het langdurig op



Figuur 3: CO₂-verwijdering haalt CO₂ uit de atmosfeer en slaat het langdurig op. Het is dus belangrijk om te kijken naar zowel de herkomst als de bestemming van de CO₂. Opslag in bossen, bodems en producten (de 'biosfeer') is in de regel tijdelijk, terwijl opslag in de diepe ondergrond (geologisch) of in gesteente (mineralisatie) CO₂ permanent uit de atmosfeer haalt. Fossiele CO₂-afvang en -opslag (CCS) of -gebruik (CCU) vermindert de uitstoot of stelt deze uit, maar deze CO₂ komt niet uit de atmosfeer en is dus geen CO₂-verwijdering (zie tekstbox 3). Een pijl die een extra lusje maakt geeft aan dat koolstof daar langer circuleert en dat de uitstoot daarmee dus wordt uitgesteld. De twee pijlen die binnenkomen bij 'opslag in producten', geven aan dat de koolstof zowel uit biomassa kan komen (pijl vanuit de biosfeer), als uit de lucht via directe afvang (*direct air capture*, oftewel DAC) (pijl vanuit de atmosfeer). Bij bioCCS komt er, afhankelijk van de techniek, meer of minder CO₂ vrij. In deze figuur zijn ketenemissies niet meegenomen. Wat ook niet weergegeven is, is dat een deel van de tijdelijk opgeslagen CO₂ permanent (gemaakt) zou kunnen worden, bijvoorbeeld door hout voor houtbouw aan het einde van de levensduur te verbranden in een AVI met CO₂-afvang en -opslag.



2.2 Eigenschappen van CO₂-verwijderingsmethoden

CO₂-verwijderingsmethoden verschillen in termen van opslagduur en -medium, ontwikkelingsstadium, potentieel en kosten. Een aantal methoden voor permanente CO₂-verwijdering, met name bioCCS, is al op schaal toegepast (tekstbox 2). Voor de overige methoden geldt echter dat ze niet voldoende ontwikkeld zijn om op schaal toe te passen, en/of er zijn hoge kosten mee gemoeid. DACCS en de meeste vormen van mineralisatie hebben bovendien een hoog energiegebruik.¹⁶ Methoden voor tijdelijke CO₂-verwijdering zijn relatief ver ontwikkeld en hebben vaak lage kosten, en worden in het geval van bosbouw al op grote schaal toegepast. Monitoring van de actuele voorraad tijdelijk opgeslagen CO₂ is essentieel maar ook lastig, wat niet of in veel mindere mate geldt bij methoden voor permanente opslag. Het potentieel voor opslag in bossen en bodems wordt in Nederland als klein ingeschat (tabel 1 en hoofdstuk 3.2).

Welke synergieën, negatieve bijeffecten en risico's CO₂-verwijdering met zich meebrengt hangt af van de methode.

BioCCS, (her)bebossing en materialen en producten op basis van biomassa gebruiken relatief veel land en bij irrigatie ook water. Dit kan leiden tot concurrentie

met voedselproductie en tot hogere voedselprijzen. Het planten van diverse, inheemse soorten bomen en gewassen kan bijdragen aan het vergroten van de biodiversiteit. Omgekeerd bestaat echter een kans dat de aanplant van monoculturen of niet-inheemse soorten (wat zou kunnen worden gedaan om CO₂-verwijdering per hectare te maximaliseren) de biodiversiteit juist aantast of een sterke wissel trekt op het natuurlijk bodem- en watersysteem. Mogelijkheden voor synergie hebben onder meer betrekking op adaptatie: het herstel van veenweidegebieden door vernatting kan zorgen voor meer CO₂-vastlegging, en ook helpen bij het tegengaan van bodemdaling en het voorkomen van uitdroging.¹⁷ In tegenstelling tot DACCS leveren bioCCS-methoden naast CO₂-verwijdering ook producten en diensten met een economische waarde, zoals energie, biobrandstoffen en biograndstoffen.

Tabel 1 geeft een overzicht van enkele eigenschappen van de genoemde methoden. Het achtergrondrapport bevat een uitgebreider overzicht van methoden en hun eigenschappen.¹⁸

Methoden voor CO₂-verwijdering: eigenschappen en aandachtspunten

Tabel 1: Overzicht van de voor Nederland belangrijkste methoden voor CO₂-verwijdering en hun eigenschappen. Op basis van gegevens uit CE Delft (2023). 'Potentieel NL' gaat over het realistisch Nederlands potentieel in 2050, 'Kosten' gaat over de verwachte kosten in 2050. Ontwikkelingsstatus is op basis van technology readiness level (TRL): laag (TRL van 1 tot 5; verkennen/ontwikkelen), gemiddeld (TRL van 6 of 7; prototype op schaal/demonstratie) of hoog (TRL van 8 of 9; operationeel/commercieel), geeft een overzicht van enkele eigenschappen van de genoemde methoden.

Methode	Opslagduur	Potentieel NL MtCO ₂ /j	Ontwikkelingsstatus	Kosten €/tCO ₂ verwijderd	Belangrijkste synergieën	Belangrijkste negatieve bijeffecten
(Her)bebossing	Tijdelijk	0,7	Hoog	50-1000	+ Biodiversiteit	Ruimtegebruik en mogelijke competitie voedselproductie Risico op niet-duurzame bosbouw
Koolstofopslag in de bodem	Tijdelijk	0,5-0,9	Hoog	0-50	+ Verbeterde bodemkwaliteit en waterhuishouding	Risico op methaanemissies in veenweidegebieden
Beheer van blauwe koolstof	Tijdelijk	niet bekend	Laag-gemiddeld	9 ¹⁹	+ Biodiversiteit + Kustbescherming	
Biochar	Tijdelijk	0,05	Laag-gemiddeld	200-1500	+ Verbeterde bodemkwaliteit	
Houtbouw	Tijdelijk	3,9 ²⁰	Hoog	niet bekend ²¹	+ Lagere uitstoot dan conventionele bouwmaterialen	Risico op hoog ruimtegebruik en mogelijke competitie met voedselproductie
Biokunststoffen	Tijdelijk	niet bekend ²²	Laag-hoog	60-80	+ Bijproducten met economische waarde	Risico op inzet niet-duurzame biomassa
BioCCS	Permanent ²³	22,2 ²⁴	Gemiddeld-hoog	0-110	+ Energieproductie + Potentiële bron van koolstof ²⁵	
DACCS	Permanent	niet bekend ²⁶	Laag-hoog	85-540	+ Potentiële bron van synthetische koolstof ²⁷	Hoog energiegebruik
Mineralisatie	Permanent	5,4	Laag-hoog	50-70	+ Economische waarde (bv. als ophoogzand of in bouw materiaal) + Verminderde bodemerosie + Verbeterde waterhuishouding	Hoog energiegebruik (voor vermalen en transport) Mogelijke milieueffecten van mijnen en bij toepassing

2.3 Grenzen aan het duurzaam potentieel

Ondergrondse opslag is belangrijk voor permanente CO₂-verwijdering, maar het Nederlands potentieel is eindig en ook nodig voor fossiele CCS. Nederland heeft naar schatting zo'n 1700 MtCO₂ aan capaciteit voor ondergrondse opslag in oude gasvelden onder de Noordzee.²⁸ Daarnaast is er mogelijk nog meer dan 1300 MtCO₂ aan opslagcapaciteit in watervoerende lagen (aquifers) onder de Noordzee, maar die schatting is hoogst onzeker.²⁹ Daarnaast is er capaciteit in lege gasvelden en aquifers onder land (onshore), maar het beleid is op dit moment om geen geologische opslag onder land toe te staan.³⁰ Hoe lang Nederland met deze opslagcapaciteit kan doen is van verschillende factoren afhankelijk, namelijk van hoeveel CO₂ Nederland jaarlijks in de grond stopt, of Nederland ook nog gebruik maakt van geologische opslag in het buitenland, en of ook andere landen als België en Duitsland van deze opslagcapaciteit gebruikmaken. In scenario's waar Nederland ook CO₂ uit België en Duitsland opslaat, kan het in 2035 om in totaal 50 MtCO₂/j vanuit de chemie- en raffinagesector gaan.³¹ Het potentieel in oude gasvelden onder de Noordzee is dan binnen enkele decennia uitgeput. Als die opslagcapaciteit alleen door Nederland wordt gebruikt (en Nederland geen CO₂ in

het buitenland opslaat), kan Nederland in het gunstigste geval tot eind deze eeuw blijven opslaan onder het Nederlandse deel van de Noordzee.³² In andere Europese landen (o.a. Noorwegen en Denemarken) is er meer potentieel voor ondergrondse CO₂-opslag, maar daar is het opschalen van capaciteit voor transport en injectie mogelijk een beperkende factor.

Het duurzaam potentieel voor CO₂-verwijderingsmethoden is aanzienlijk kleiner dan het technisch of economisch potentieel. Het IPCC schat het wereldwijde technisch potentieel voor bioCCS in op maximaal 11,3 GtCO₂/j.³³ Dat maximum zou ongeveer 18 miljoen km² landoppervlak vergen, zo'n 13% van het huidige wereldwijde akkerbouwareaal of vier keer de oppervlakte van de Europese Unie. Als rekening wordt gehouden met milieu- en sociaaleconomische risico's ten aanzien van bijvoorbeeld de voedselproductie, biodiversiteit, de beschikbaarheid van water, biomassa, energie en land, dan resteert nog maar een wereldwijd 'duurzaam' potentieel voor bioCCS van 0,7–2,8 GtCO₂/j.³⁴ Die waarde hangt af van wat onder duurzame biomassa wordt verstaan, welke risico's daarbij acceptabel worden gevonden en van de verwachte productie per hectare. Zie ook tekstbox 4 over de beschikbaarheid van duurzame biomassa. Het duurzaam potentieel wordt verder beperkt door

institutionele, politieke en sociale barrières zoals een gebrek aan maatschappelijk draagvlak of trage besluitvorming. Daardoor zal het werkelijke mondiale potentieel voor bioCCS naar verwachting een stuk lager liggen dan dit duurzame potentieel. Deze beperkingen zullen deels ook voor de inschatting van het potentieel in Nederland opgaan.

Tekstbox 4 De beschikbaarheid van duurzame biomassa voor CO₂-verwijdering is om verschillende redenen beperkt en onzeker

Biomassa is nodig voor de transitie naar een duurzaam energiesysteem, een circulaire economie en voor het realiseren van CO₂-verwijdering, maar ook schaars. Nederland kan nu al niet genoeg biomassa produceren om aan de binnenlandse vraag te voldoen, en importeert dus biomassa.³⁵ Als een deel van de fossiele brandstoffen door biomassa wordt vervangen, neemt die import sterk toe. Daarbij is duurzaamheid van biomassa essentieel: het gaat dan zowel om de ecologische dimensie, zoals de impact op waterbeschikbaarheid, biodiversiteit en bodemkwaliteit, als om de sociaaleconomische dimensie waar het gaat om ongewenste effecten die kunnen optreden in de toeleveringsketen.³⁶ De structurele beschikbaarheid van duurzame biomassa voor Nederlandse import is erg onzeker: de genoemde transities creëren een groeiende vraag naar duurzame biomassa, waardoor er internationaal steeds meer om wordt geconcurrereerd.

Omdat duurzame biomassa schaars is, is het Nederlands beleid om biomassa zo beperkt en hoogwaardig mogelijk in te zetten.³⁷ Dit betekent onder meer een lagere inzet van biomassa voor directe energetische toepassingen zoals warmte en elektriciteit. In plaats daarvan wordt voorrang gegeven aan inzet van biomassa voor toepassingen waarvoor op de langere termijn alternatieven ontbreken, onvoldoende beschikbaar zijn of te duur zijn. Voorbeelden hiervan zijn brandstoffen voor zee- en luchtvaart, en grondstoffen voor de chemie.



Om schaal te bereiken, risico's te verkleinen en de negatieve effecten te spreiden heeft de inzet van een divers portfolio aan CO₂-verwijderingsmethoden voordelen.³⁸

Het inzetten op verschillende methoden leidt tot een hoger potentieel aan totale CO₂-verwijdering.³⁹ Er is op dit moment geen methode die op zichzelf kan voldoen aan de verwachte behoefte aan CO₂-verwijdering, zowel wereldwijd⁴⁰ als voor Nederland⁴¹. Een portfolio benadering vermindert de afhankelijkheid van specifieke methoden en verlaagt daarmee het risico dat bepaalde methoden niet op tijd en/of op schaal beschikbaar, betaalbaar en maatschappelijk geaccepteerd zijn. Door verschillende methoden tegelijk in te zetten, worden de negatieve bijeffecten mogelijk gespreid, zowel per categorie (zoals landgebruik, energiegebruik of milieueffecten)⁴² als per regio⁴³. De samenstelling van het portfolio is afhankelijk van (beleids)voorkeuren, toekomstige ontwikkelingen en de specifieke lokale context en mogelijkheden. Portfolio's kunnen daarom worden beheerd op verschillende niveaus (bijvoorbeeld zowel Europees als Nederland), en kunnen onderling verschillen.⁴⁴

Noten

- 1 WKR (2024). Daarnaast gaat een rapport van CE Delft (2023) dieper in op de noodzaak voor en het potentieel van CO₂-verwijdering in Nederland.
- 2 Lamb et al. (2024a).
- 3 Koolstofopslag met *biochar* is stabielere dan reguliere methoden om de koolstofopslag in de bodem te verhogen, maar er is onzekerheid over de stabiliteit op de lange termijn (NEGEM, 2024). Door *biochar* te verwerken in beton of andere bouwmaterialen kan de stabiliteit worden verhoogd, om zo mogelijk permanente CO₂-verwijdering te realiseren.
- 4 Wij kiezen in dit advies 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.
- 5 Een vergelijkbare term is 'BiCRS' (*biomass carbon dioxide removal and storage*), die is geïntroduceerd om ook verwijderingsmethoden die wel biomassa maar geen CCS gebruiken te omvatten, en de nadruk legt op CO₂-verwijdering in plaats van bio-energie (Sandalow et al., 2020).
- 6 CE Delft (2023).
- 7 RWE (2022).
- 8 Netbeheer Nederland (2023).
- 9 TNO (2022).
- 10 PBL (2024b).
- 11 Minister voor Klimaat en Energie & Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat (2022).
- 12 PVV, VVD, NSC & BBB (2024).
- 13 CE Delft (2023).
- 14 Oceanen nemen ongeveer 30% van de CO₂ op die de mens uitstoot. In dat proces verzuurt het oceaanwater met nadelige effecten voor zeeleven zoals koraal.
- 15 Bemesting met CO₂ uit biomassa kan wel zorgen voor een lager gebruik van fossiele brandstoffen in de glastuinbouw, bijvoorbeeld waar het de stook van fossiele brandstoffen in een gasketel vervangt.
- 16 de Kleijne et al. (2022).
- 17 Een kanttekening daarbij is dat een DAC-installatie flexibel is in de plaatsing, en dus zou kunnen komen op een plek waar laagwaardige (rest) warmte vrijkomt.
- 18 Van der Brugge & de Winter (2024).
- 19 WKR (2024).
- 20 NEGEM (2022). Kosten liggen in de Nederlandse context mogelijk (veel) hoger, zie Hoefsloot et al. (2020).
- 21 Dit is het potentieel als alle nieuwbouw in Nederland met hout wordt uitgevoerd.
- 22 Schattingen voor de meerkosten (ten opzichte van conventionele bouwmaterialen) lopen uiteen van +100% tot -20% (CE Delft, 2023).
- 23 CE Delft (2023). hanteert hier een realistisch potentieel van nul, omdat het beleidsdoel is dat de Nederlandse economie in 2050 volledig circulair is, en er dan geen toename van groene koolstof in de economie meer te verwachten is. Maar omdat dit erg afhankelijk van of dit doel gehaald wordt, en hoe de verwijdering wordt gealloceerd aan welke maatregel, kwalificeren wij het hier als onbekend.
- 24 Alleen het deel dat wordt afgevangen bij de verwerking van de biomassa tot grond- of brandstof leidt tot permanente CO₂-verwijdering; de rest komt in producten (tijdelijke CO₂-verwijdering) of brandstof (geen CO₂-verwijdering) terecht.
- 25 Dit is de optelsom van het potentieel voor CCS bij biogascentrales, hogetemperatuurwarmte, AVI's en productie van biobrandstoffen. Het is exclusief het ombouwen van kolencentrales tot biomassacentrales, en de optie om biomassa te gebruiken bij staalproductie. Het realistisch potentieel voor de bioCCS-routes samen is sterk afhankelijk van aannames over het aanbod van verschillende stromen duurzame biomassa.

Methoden voor CO₂-verwijdering: eigenschappen en aandachtspunten

- 25 Als de afgevangen CO₂ wordt gebruikt voor bijvoorbeeld brandstoffen (bioCCU), dan is het geen CO₂-verwijdering.
- 26 CE Delft (2023) hanteert hier een realistisch potentieel van nul, met de redenering dat de prijs voor DACCS nog lang hoog zal blijven ten opzichte van de CO₂-prijs (door zowel de kosten voor de technologie als voor energie). DAC(CS) speelt in diverse scenario's voor een klimaatneutraal Nederland en Europa wel een beperkte rol, zie bijvoorbeeld TNO (2024) (ca. 3 MtCO₂ in 2050 in het ADAPT-scenario) en Europese Commissie (2024b).
- 27 Als de afgevangen CO₂ wordt gebruikt voor bijvoorbeeld brandstoffen (DACCU), dan is het geen CO₂-verwijdering.
- 28 TNO & EBN (2018).
- 29 CE Delft (2023).
- 30 Akerboom et al. (2021).
- 31 Koop et al. (2021).
- 32 PBL (2024b).
- 33 IPCC (2022a, p. 776).
- 34 Deprez et al. (2024).
- 35 PBL (2024b).
- 36 Deze eisen zijn vastgelegd in de Europese REDII en het Nederlandse duurzaamheidskader biograndstoffen (Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat en Minister voor Klimaat en Energie, 2023).
- 37 Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat & Minister van Economische Zaken en Klimaat (2020).
- 38 Zie C.3.4 in IPCC (2018).
- 39 Nemet et al. (2018).
- 40 Zie figuur 7a in Rueda et al. (2021).
- 41 CE Delft (2023).
- 42 Werner et al. (2023).
- 43 Streffler et al. (2021).
- 44 Streffler et al. (2021).

3. CO₂-verwijderingsbeleid: uitgangspunten en noodzaak

In dit hoofdstuk geven we antwoord op een deel van de centrale adviesvraag: met welke uitgangspunten kan de Nederlandse overheid sturen op CO₂-verwijdering? We dragen een aantal uitgangspunten aan voor CO₂-verwijderingsbeleid, inclusief bijbehorende onderbouwing. Vervolgens onderbouwen we de noodzaak van overheidsbeleid gericht op permanente CO₂-verwijdering. Dit leidt tot vijf aanbevelingen.

3.1 Beperkingen en onzekerheden bij CO₂-verwijdering benadrukken het belang van snelle emissie-reductie

Snelle en forse emissiereductie moet om meerdere redenen voorop staan, waaronder het minder belasten van toekomstige generaties. In de eerste plaats is reductie nodig om de emissie op een niveau te brengen dat überhaupt te compenseren valt met CO₂-verwijdering.¹ Daarnaast geldt dat de schaarse CO₂-verwijderingscapaciteit nodig is voor meerdere doeleinden: voor het beperken en terugdringen van een temperatuuroverschrijding én voor het bereiken van klimaatneutraliteit (compensatie van resterende uitstoot). Emissiereductie zorgt voor minder cumulatieve emissies en voor minder restemissies. Dit heeft twee voordelen: de temperatuuroverschrijding blijft beperkt en er is minder CO₂-verwijdering nodig. Ook speelt mee dat bepaalde CO₂-

verwijderingsmethoden minder effectief worden door hitte en droogte, extremen die toenemen bij meer klimaatverandering. Dit maakt het lastiger om die CO₂ vast te houden en in de toekomst te verwijderen.² Alles bij elkaar zorgt het vooropzetten van snelle en forse emissiereductie voor minder afwenteling op toekomstige generaties.

Sommige effecten van klimaatverandering zijn onomkeerbaar, ondanks latere compensatie.

Zeespiegelstijging en oceaanzuivering zijn bijvoorbeeld de komende eeuwen tot millennia niet om te keren, ook als de CO₂-concentratie in de atmosfeer weer daalt.³ Plant- en diersoorten die tussentijds uitsterven komen ook niet meer terug.⁴ Bij een (tijdelijk) hogere mondiale opwarming komen dodelijke weersextremen als hittegolven vaker voor. Een tijdelijk verhoogde temperatuur verhoogt bovendien het risico dat het klimaatsysteem voorbij een kantelpunt geduwd wordt. Hierna

wordt het veel lastiger of zelfs onmogelijk om terug te keren naar een veiligere grens van opwarming.⁵

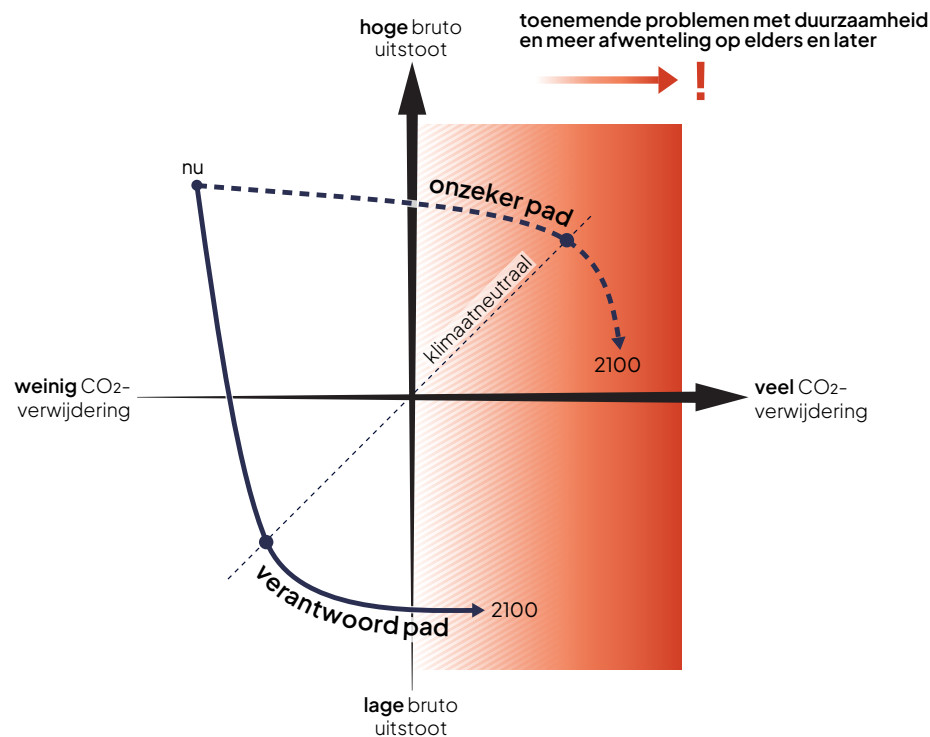
Het vooropzetten van snelle en forse emissiereductie sluit aan bij bestaande juridische kaders en (inter)nationale afspraken. Zwaar leunen op toekomstige en onzekere CO₂-verwijdering staat op gespannen voet met het voorzorgsbeginsel en met (de geest van) de nationale, Europese en internationale klimaatafspraken. Het belang van bruto emissiereductie volgt bovendien uit de beginselen van intergenerationele rechtvaardigheid, en uit het *no harm*-beginsel dat voorschrijft dat landen milieuschade voor andere landen moeten voorkomen.⁶ Ook staat in het Parijsakkoord dat de klimaatdoelen van een land 'een zo hoog mogelijk ambitieniveau' moeten weerspiegelen.⁷ Dat Europese wet- en regelgeving emissiereductie voorop zet blijkt onder meer uit de recente wettelijke verplichting voor grote uitstoters om een klimaattransitieplan op te stellen dat hun bedrijfsvoering in lijn brengt met de 1,5°C doelstelling.⁸ Alleen de emissies die na 90-95% bruto emissiereductie resteren, mogen ten tijde van klimaatneutraliteit gecompenseerd worden met CO₂-verwijdering.⁹

1. Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om maximaal in te zetten op het beperken van de uitstoot. Zo wordt de afhankelijkheid van CO₂-verwijdering om klimaatneutraliteit te bereiken klein gehouden. De Raad adviseert daarnaast om CO₂-verwijdering vooral in te zetten voor het beperken en terugdringen van een temperatuuroverschrijding.

Als maximaal wordt ingezet op het beperken van uitstoot gaat de bruto uitstoot sterk omlaag. Er blijven dan weinig restemissies over, de afhankelijkheid van CO₂-verwijdering voor het bereiken van klimaatneutraliteit wordt klein gehouden, en de duurzaamheidsgevolgen en afwenteling op toekomstige generaties worden beperkt. Dit wordt verbeeld in figuur 4.

Een verantwoord pad zet emissiereductie voorop en beperkt de afhankelijkheid van CO₂-verwijdering



Figuur 4: Er zijn verschillende paden van de huidige situatie (kwadrant linksboven, met een hoge uitstoot en weinig CO₂-verwijdering) naar het einde van de eeuw (kwadrant rechtsonder, met een lage uitstoot en veel CO₂-verwijdering). Het figuur licht er twee uit. De doorgetrokken pijl verbeeldt het verantwoorde pad. Kenmerken van dit pad zijn een snelle reductie van de uitstoot en daarbij een lage afhankelijkheid van CO₂-verwijdering voor het bereiken van klimaatneutraliteit. Bij het onzekere pad vindt er minder emissiereductie plaats en wordt zwaarder geleund op CO₂-verwijdering. Duurzaamheidsrisico's bij het terugdringen van de temperatuuroverschrijding zijn op dit pad groter dan bij het verantwoorde pad. Ook is er meer afwenteling op andere opgaven en op toekomstige generaties.

3.2 Permanente CO₂-verwijdering biedt meer zekerheid dan tijdelijke CO₂-verwijdering

Er is beleid nodig om permanente CO₂-verwijdering van de grond te krijgen.

In hoofdstuk 1 en 2 is beschreven dat methoden voor permanente CO₂-verwijdering nog veel minder worden toegepast dan tijdelijke CO₂-verwijdering. Methoden voor permanente CO₂-verwijdering slaan de CO₂ op in de lange koolstofkringloop, wat nodig is omdat verreweg de meeste Nederlandse uitstoot fossiel is.

In Nederland is het potentieel voor tijdelijke CO₂-vastlegging in bossen en bodems klein.

Redenen daarvoor zijn het kleine landoppervlak en de hoge bevolkingsdichtheid, en daarbij de aanwezigheid van (hoogproductieve) landbouw, het grote oppervlakte moerige gronden en veengronden¹⁰, en het kleine bosareaal. Uitbreiding van het bosareaal en/of natuur gaat ten koste van landbouwareaal en impliceert politieke keuzes over de toekomst van deze sector en de inrichting van het land. Daarbij geldt dat de natuur-, water- en bodemsystemen in Nederland in een slechte staat verkeren.¹¹ Het is al een hele uitdaging om de bestaande koolstofvoorraad in bos, bodem en natuur bij voortschrijdende klimaatverandering te handhaven, laat staan om de voorraad duurzaam te

vergroten. Mede vanwege dit beperkte potentieel (zie ook tabel 1 in hoofdstuk 2) is de conclusie dat het Nederlands CO₂-verwijderingsbeleid op permanente CO₂-verwijdering zou moeten worden gericht.

2. Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert het Nederlandse CO₂-verwijderingsbeleid te richten op permanente methoden.

Fossiele CO₂-uitstoot is onderdeel van de lange koolstofkringloop en kan daarom niet gecompenseerd worden met tijdelijke CO₂-verwijdering in de korte koolstofkringloop. Koolstof uit steenkool, olie, en gas heeft miljoenen jaren onder de grond gezeten, blijft na verbranding eeuwenlang in de atmosfeer als CO₂, en doet er vele duizenden jaren over om weer terug te komen in stabiele geologische reservoirs. Dit is de lange koolstofkringloop. Gedurende die tijd beweegt de fossiele koolstof zich nog tussen de atmosfeer, het oppervlaktewater van oceanen, en bossen of bodems, waar de verblijftijd vaak maar tientallen jaren is. Gedurende die tijd is de fossiele koolstof onderdeel van de korte koolstofkringloop. Door de verbranding van fossiele brandstoffen is er de afgelopen eeuwen veel koolstof verplaatst van de lange naar de korte koolstofkringloop. Dat proces is



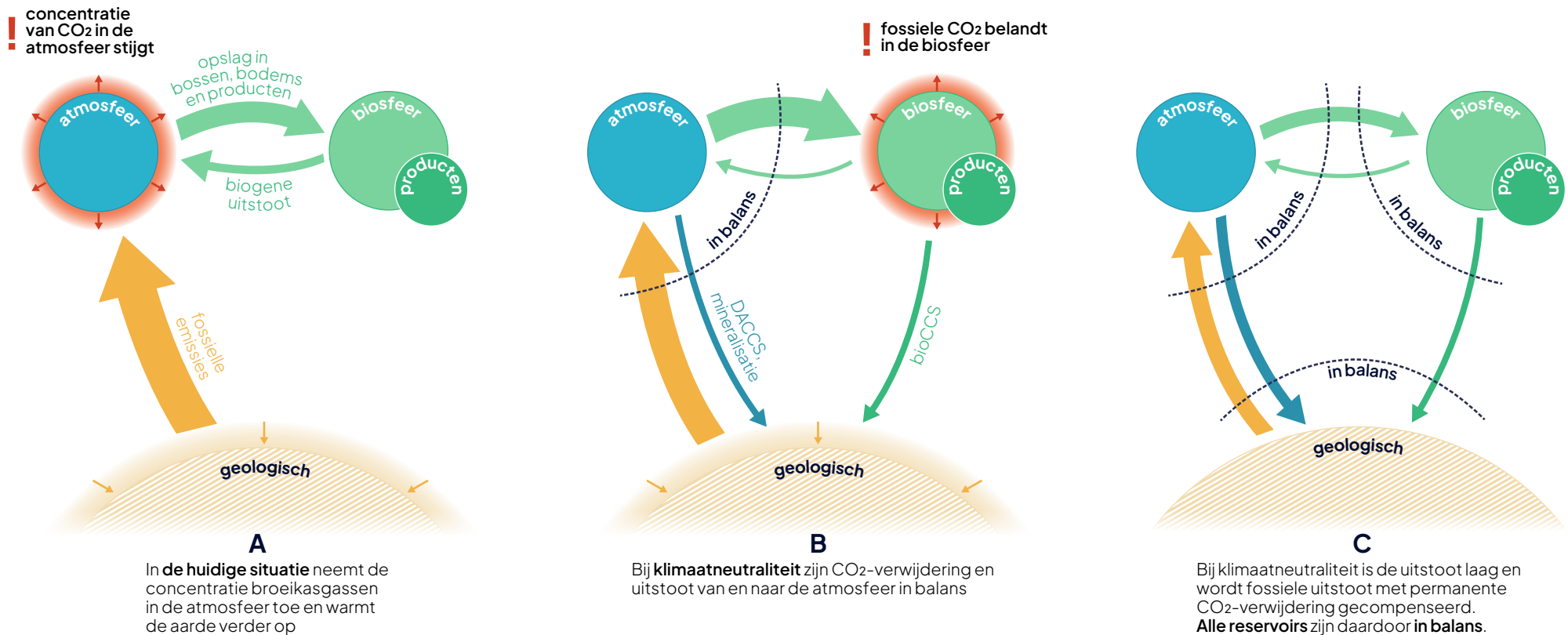
een van de belangrijkste veroorzakers van klimaatverandering en moet gestopt worden door de uitstoot maximaal te reduceren en het restant gelijkwaardig te compenseren.

Om uitstoot gelijkwaardig te compenseren met CO₂-verwijdering, moet het klimaateffect en de stabiliteit en duur van de vastlegging gelijk zijn aan die van de uitstoot.¹² Compensatie van fossiele CO₂-uitstoot met koolstofvastlegging in bossen, bodems of producten verplaatst koolstof van de lange naar de korte koolstofkringloop en geeft dus geen gelijkwaardige uitkomsten voor het klimaat. Permanente CO₂-verwijdering brengt de koolstof in de lange koolstofkringloop. Biogene CO₂-uitstoot kan onder strenge voorwaarden gecompenseerd worden met vastlegging in bossen en bodems, omdat deze CO₂ al onderdeel is van de korte koolstofkringloop en daar ook weer in opgenomen wordt. Figuur 5 laat het verschil zien tussen het behalen van klimaatneutraliteit bij het vermengen (B) en het scheiden (C) van de korte en lange koolstofkringloop.

Uitstoot van lachgas en de gefluoreerde broeikasgassen kunnen alleen gelijkwaardig worden gecompenseerd met permanente CO₂-verwijdering. Lachgas en de gefluoreerde broeikasgassen zijn zeer krachtige broeikasgassen die lang in de atmosfeer blijven. Voor lachgas is die verblijfsduur ruim honderd jaar; bij de gefluoreerde broeikasgassen kan die zelfs oplopen tot duizenden jaren. Omdat lachgas en gefluoreerde broeikasgassen in veel lagere concentraties in de atmosfeer voorkomen dan CO₂ is het technisch zeer moeilijk of erg duur om deze broeikasgassen uit de atmosfeer te verwijderen. Na maximale uitstootreductie moeten deze gassen gecompenseerd worden met permanente CO₂-verwijdering.

CO₂-verwijderingsbeleid: uitgangspunten en noodzaak

Een balans tussen uitstoot en CO₂-verwijdering kan op verschillende manieren worden bereikt



Figuur 5: Panel A toont de huidige situatie met veel uitstoot en weinig (permanente) CO₂-verwijdering. Panel B illustreert een situatie van klimaatneutraliteit met hoge uitstoot en veel CO₂-verwijdering, waarbij fossiele brandstoffen worden gecompenseerd met tijdelijke CO₂-verwijdering. Hierbij worden de korte en lange koolstofkringloop vermengd. Panel C illustreert klimaatneutraliteit bij lage uitstoot en daarbij een kleine afhankelijkheid van CO₂-verwijdering. Bovendien worden de lange en korte koolstofkringloop zo veel mogelijk van elkaar gescheiden door fossiele uitstoot permanent te compenseren. Dat zorgt ervoor dat niet alleen de atmosfeer maar ook de biosfeer in balans is. De figuur gebaseerd op Fankhauser et al. (2022).

Er is op dit moment geen wetenschappelijke consensus over de beste manier om methaan met CO₂-verwijdering te compenseren.¹³

Door de lage concentratie methaan in de atmosfeer is verwijdering technisch moeilijk haalbaar en zal het klimaateffect met CO₂-verwijdering moeten worden gecompenseerd.¹⁴ Als broeikasgas is methaan veel krachtiger dan CO₂, maar het blijft ook veel korter aanwezig in de atmosfeer: de atmosferische levensduur is 9,1 jaar. Het opwarmend effect van methaan ten opzichte van CO₂ hangt daarom sterk af van de gekozen tijdschikhorizon: over een periode van 20 jaar is methaan 81,2 keer zo sterk broeikasgas als CO₂, terwijl dit over een periode van 100 jaar nog 27,9 keer is.¹⁵ Na afbraak in de atmosfeer wordt methaan uiteindelijk omgezet in CO₂. Methaan heeft dus zowel een tijdelijk als een permanent effect op het klimaat.

Er is wel een verschil tussen methaan van biogene en fossiele oorsprong. Bij methaan van fossiele oorsprong moet de CO₂, die ontstaat bij afbraak van methaan in ieder geval worden gecompenseerd met permanente CO₂-verwijdering. Het doel van compensatie is om het opwarmende effect van methaan te compenseren om zo een temperatuurstijging te voorkomen. Als methaan wordt gecompenseerd met alleen permanente CO₂-verwijdering en er daarbij wordt gerekend met het opwarmende

effect van methaan op de *lange* termijn, dan wordt de opwarming op *korte* termijn onderschat. Dat zou zorgen voor een temperatuurstijging op de korte termijn. Bij compensatie met tijdelijke verwijdering wordt juist de opwarming op *lange* termijn niet goed gecompenseerd. Een mogelijke oplossing is daarom om methaan te compenseren met deels tijdelijke en deels permanente CO₂-verwijdering. Dit zou kunnen worden gebaseerd op het opwarmende vermogen van methaan door de tijd heen, met onderscheid naar of die methaan uit de korte (biogene) of lange (fossiele) koolstofkringloop komt.

3. Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om fossiele broeikasgasuitstoot en de uitstoot van broeikasgassen met een lange verblijftijd in de atmosfeer alleen te compenseren met permanente CO₂-verwijdering.

Tijdelijke CO₂-verwijdering kan klimaatwinst opleveren. Ten eerste kan tijdelijk verwijderde CO₂ (opslagduur van minstens enkele decennia) de klimaatopwarming op de korte termijn vertragen, waardoor er meer tijd is voor klimaatadaptatie. Ten tweede kan tijdelijke CO₂-verwijdering op het

moment van temperatuuroverschrijding zorgen voor een kleinere overschrijding van de 1,5°C.¹⁶ Tot slot kan een deel van de tijdelijk opgeslagen CO₂ op den duur alsnog permanent worden opgeslagen. Zo kan bouwhout aan het einde van de gebruiksduur worden verbrand, waarna de afgevangen CO₂ in de diepe ondergrond kan worden opgeslagen (bioCCS).

Tijdelijke CO₂-verwijdering kent echter risico's met implicaties voor rechtvaardigheid. Bij tijdelijke CO₂-opslag in bossen, bodems of in producten bestaat de kans dat de CO₂ vervoegd vrijkomt. De koolstof opgeslagen in bossen en bodems kan (mede door klimaatverandering) weer vrijkomen door verandering van landgebruik, ziekte en brand. Tijdelijke verwijderingen zijn vaak moeilijk te controleren op additionaliteit¹⁷ en relatief kostbaar en moeilijk om te monitoren. Directe metingen zijn lastig en hebben een grote onzekerheidsmarge omdat er, afhankelijk van plaats en tijd, grote variatie zit in de hoeveelheid CO₂-vastlegging. In de natuur fluctueert vastlegging bijvoorbeeld tussen de seizoenen en jaren. Dit alles heeft ook gevolgen voor rechtvaardigheid tussen generaties. Als verwijderde CO₂ vervoegd vrijkomt, is het in feite uitgestelde uitstoot en geen CO₂-verwijdering meer. Toekomstige generaties worden belast met het opnieuw vastleggen van die CO₂, of ze hebben meer klimaatgevolgen.

Tijdelijke CO₂-verwijdering in bossen en bodems en door landgebruik heeft een plek in het Nederlandse en Europese klimaatbeleid. De Europese Unie wil de netto koolstofopslag in bossen, bodems en landgebruik in de periode 2026–2030 verhogen van circa 230 MtCO₂/j nu naar 310 MtCO₂/j in 2030.¹⁸ Onder meer de Europese bossenstrategie¹⁹, bodemstrategie²⁰ en biodiversiteitsstrategie²¹ dragen bij aan dat doel. Daarnaast worden boeren en landeigenaren gestimuleerd om aan 'koolstoflandbouw' te doen. Daarbij gaat het om het toepassen van verbeterde landbeheerpraktijken die leiden tot meer koolstofvastlegging in biomassa en bodems.²² Bepaalde vormen van koolstoflandbouw worden al gestimuleerd als onderdeel van de eco-regeling uit het Europese Gemeenschappelijk landbouwbeleid.²³

Of beleid voor een circulaire economie en het verduurzamen van koolstofketens substantieel kan bijdragen aan tijdelijke CO₂-verwijdering, moet nog blijken. Het verduurzamen van koolstofketens en een hogere mate van circulariteit kunnen helpen bij de realisatie van tijdelijke CO₂-verwijdering. Een voorbeeld van een maatregel die de EU en Nederland overwegen is het verplichten van een oplopend percentage hernieuwbare (bio)grondstof in plastics, wat tijdelijk

CO₂ kan verwijderen als die plastics maar vaak genoeg worden gerecycled. Beleid op deze terreinen is echter nog volop in ontwikkeling, en de bijdrage aan en aangrijpingspunten voor CO₂-verwijdering zijn nog onzeker.

Tijdelijke CO₂-verwijdering zou geen onderdeel moeten zijn van het Nederlandse CO₂-verwijderingsbeleid, maar is een waardevol onderdeel van ander beleid. In beleid gericht op bijvoorbeeld natuurherstel, tegengaan van bodemdaling, stimulering van duurzame landbouw of van de (circulaire) bio-economie staan bodemkwaliteit, herstel van biodiversiteit of verduurzaming van de economie voorop. Hierbij kan ook tijdelijke CO₂-verwijdering plaatsvinden en dat is een positief neveneffect. Als tijdelijke CO₂-verwijdering een positieve bijdrage levert aan de hoofddoelen van beleid op andere terreinen, zou het gestimuleerd kunnen worden. Dat kan bijvoorbeeld door hier een vergoeding tegenover te stellen. Wanneer echter het CO₂-verwijderingsbeleid zich specifiek richt op het bevorderen van tijdelijke CO₂-verwijdering, is er een kans dat dit ten koste gaat van andere beleidsdoelen, bijvoorbeeld op het gebied van biodiversiteit, voedselproductie en ruimtelijke inrichting. Verder kan het leiden tot verminderde stimulering van permanente CO₂-verwijdering, terwijl daar juist opschaling nodig is.

4. Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om tijdelijke CO₂-verwijdering in Nederland te stimuleren, maar alleen als onderdeel van ander beleid.

3.3 Overheidsinterventie is nodig om CO₂-verwijdering te realiseren

De vrijwillige markt voor CO₂-verwijdering is ongeschikt om de benodigde schaal en kwaliteit van CO₂-verwijdering te realiseren. De groei van de vrijwillige CO₂-markt gaat gepaard met zorgen rondom de kwaliteit van de certificaten (zie tekstbox 5). Het overgrote deel van deze markten bestaat uit tijdelijke verwijderingen, omdat deze in het algemeen veel goedkoper zijn dan permanente verwijderingen (zie tabel 1). De betalingsbereidheid van consumenten voor CO₂-verwijdering is laag in vergelijking met de kosten van permanente verwijdering. In een vrijwillige markt kan er daardoor alleen voor goedkopere, en dus tijdelijke, verwijderingsmethoden een businesscase ontstaan. Het feit dat niet of onvoldoende gestuurd kan worden op de aard en omvang van de CO₂-verwijdering en op de optimale inzet van schaarse, hoogwaardige CO₂-verwijdering voor de compensatie van resterende emissies maakt de vrijwillige markten ongeschikt voor een effectieve opschaling van permanente CO₂-verwijdering.

Tekstbox 5 Vrijwillige koolstofmarkt: zorgen over de kwaliteit van de certificering en vastlegging

De vrijwillige koolstofmarkt is de laatste jaren sterk gegroeid omdat steeds meer bedrijven zeggen zich aan het Parijs-akkoord te willen houden. Op deze markt worden twee typen certificaten verhandeld: 1) certificaten voor het realiseren van een additionele verlaging van een specifieke uitstoot en 2) certificaten voor het verwijderen van CO₂ uit de atmosfeer. Met deze certificaten kunnen bedrijven klimaatclaims maken en hun eigen uitstoot of die van hun klanten compenseren. De markt heet 'vrijwillig' omdat uitstoters met deze certificaten niet aan hun formele verplichtingen kunnen voldoen.

Het aanbod van vrijwillige certificaten komt voort uit allerlei projecten voor emissiereductie en CO₂-verwijdering. Dit aanbod is in principe onbegrensd en daarmee ontstaat de mogelijkheid om ongelimiteerd te compenseren. Hierdoor wordt het mogelijk om uitstootvermindering die een bedrijf of consument ingewikkeld of kostbaar vindt langdurig uit te stellen. Soms is het immers makkelijker om te compenseren dan om te reduceren, omdat voor forse emissiereductie vaak ingrijpende veranderingen nodig zijn, bijvoorbeeld het aanpassen van productlijnen of verandering van gedrag.

De vrijwillige koolstofmarkt valt niet onder regelgeving of wettelijk toezicht. Hoewel er voor de beoordeling van deze certificaten verschillende internationale verificatie-organisaties bestaan, heeft dat meerdere recente schandalen rondom certificering niet kunnen voorkomen. Er zijn verschillende zorgen rondom vrijwillige certificaten. Allereerst is de vraag of ze daadwerkelijk van hoge kwaliteit zijn en dus extra en permanente klimaatmitigatie faciliteren. Ook is het onduidelijk of er geen dubbeltellingen in verschillende landen plaatsvinden.²⁴ Ten slotte zijn er zorgen over de gevolgen van compensatieprojecten voor mens en milieu. Recentelijk heeft een aantal EU-landen, waaronder Nederland, benadrukt dat deze certificering betrouwbaar en transparant moet zijn, zowel voor emissiereductie als voor CO₂-verwijdering.²⁵



Er zijn marktprikkels nodig voor de toepassing van permanente CO₂-verwijdering op grote schaal. De vraag naar CO₂-verwijdering is te vergelijken met die naar enig ander product. De vraag naar een product komt voort uit de baten die het voor de koper heeft, maar de baten van CO₂-verwijdering zijn niet exclusief voor de koper; iedereen profiteert ervan. Dit maakt CO₂-verwijdering een publiek goed, wat maakt dat private partijen, zonder aanvullend beleid, onvoldoende prikkels hebben om aan CO₂-verwijdering te doen, terwijl de maatschappij als geheel er wel bij gebaat is. Het is de rol van de overheid om dit aan te pakken. Hieruit volgt dat mitigatiebeleid dat alleen gericht is op emissiereductie incompleet is, want de overheid heeft ook een rol bij CO₂-verwijdering.

5. Aanbeveling

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de Nederlandse overheid om, in samenhang met Europees beleid, CO₂-verwijderingsbeleid te voeren.

Noten

- 1 Lamb et al. (2024a); Streffler et al. (2018).
- 2 Hughes et al. (2019); Terhaar et al. (2022); van der Woude et al. (2023).
- 3 IPCC (2021a, pp. 775–776).
- 4 Wudu et al. (2023).
- 5 Lenton et al. (2023).
- 6 Günther et al. (2024); Stuart-Smith et al. (2023).
- 7 Klimaatakkoord van Parijs Art 4.2 en 4.3
- 8 Europees Parlement (2024). Art. 22
- 9 Verordening (EU) 2023/2772
- 10 Lesschen (2021).
- 11 Het Nationaal Dashboard Biodiversiteit (z.d.); PBL (2023).
- 12 Allen et al. (2022).
- 13 Zie bijvoorbeeld Allen et al. (2018); Brazzola et al. (2021); Lauder et al. (2013); Meinshausen & Nicholls (2022).
- 14 Jackson et al. (2021).
- 15 IPCC (2021c, p. 1017).
- 16 In de literatuur wordt ook wel gesproken over *peak shaving* (Matthews et al., 2023).
- 17 CO₂-verwijdering is additioneel wanneer de verwijdering bovenop de gangbare praktijk en bestaande plannen komt.
- 18 Verordening (EU) 2023/839. Op basis van de Europese verdeelsleutel mag Nederland in 2030 nog een netto-emissie hebben van 4,5 MtCO₂e/j uit landgebruik, gezien de uitgangssituatie met weinig bos en veel veengronden. De verwachting is dat Nederland met het huidige beleid op 2,5–3,7 MtCO₂e/j in 2030 uitkomt – het Europese doel dus gaat halen – maar het eigen doel van maximaal 1,8 MtCO₂e/j niet gaat halen (PBL, 2024b).
- 19 Europese Commissie (2021b).
- 20 Europese Commissie (2021a).
- 21 Europese Commissie (2020).
- 22 Europese Commissie (2024a).
- 23 RVO (2024b).
- 24 AFM (2023).
- 25 Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (2023).



4. Vormgeving van CO₂-verwijderingsbeleid

In dit hoofdstuk beantwoorden we de vraag met welk beleid de Nederlandse overheid kan sturen op CO₂-verwijdering. Eerst geven we een overzicht van wat er al gebeurt en wat er nog moet gebeuren. Vervolgens gaan we in op maatregelen om resterende emissies zo veel mogelijk te beperken, en als laatste bespreken we verschillende beleidsinstrumenten die vraag naar permanente CO₂-verwijdering kunnen creëren. Dit hoofdstuk leidt tot vijf aanbevelingen.

4.1 Wat gebeurt er al voor CO₂-verwijdering en wat moet er nog gebeuren?

Certificering die borgt dat CO₂-verwijdering veilig en betrouwbaar plaatsvindt met zo min mogelijk afwenteling, is een noodzakelijke voorwaarde voor het voeren van effectief CO₂-verwijderingsbeleid. Het van belang dat een door overheden overeengekomen én gecontroleerd systeem van betrouwbare certificering operationeel is. Dit is een voorwaarde mochten CO₂-verwijderingscertificaten ooit op verplichte markten worden verhandeld.¹ Op EU-niveau heeft de Europese Commissie een, in eerste instantie vrijwillig, kader voor betrouwbare certificering van hoogwaardige CO₂-verwijdering (*Carbon Removal Certification Framework Regulation*, oftewel CRCF) voorgesteld.²

Volgens het CRCF dient certificering te gebeuren op basis van vier criteria: kwantificeerbaarheid, additionaliteit, duurzaamheid en langetermijnopslag (inclusief monitoringvereisten en aansprakelijkheid in geval van vroegtijdig vrijkomen van CO₂).

Het op grote schaal realiseren van CO₂-verwijdering vereist dat overheden initiatieven op verschillende terreinen ontplooiën. Tabel 2 geeft, op basis van verschillende bronnen uit de literatuur, een overzicht van dergelijke acties³ en de stand van zaken van beleid dat bij de Europese Unie en de Nederlandse overheid al in ontwikkeling of van toepassing is. Dit hoofdstuk richt zich op de eerste twee acties: het verschaffen van duidelijkheid over de rol van CO₂-verwijdering in het klimaatbeleid, en het creëren van vraag naar (permanente) CO₂-verwijdering.

Vormgeving van CO₂-verwijderingsbeleid

Tabel 2: Overzicht van zaken die geregeld moeten zijn om de vraag naar grootschalige, permanente CO₂-verwijdering te creëren en wat de Europese Unie en Nederlandse overheid al in gang hebben gezet.

Actie	Stand van zaken
<p>1 Verschaffen van duidelijkheid over de beoogde rol van CO₂-verwijdering in het klimaatbeleid overeenkomstig de Parijs-afspraken en nationale doelen, vooral wat betreft de schaal van CO₂-verwijdering en de uitwisselbaarheid van emissiereductie en CO₂-verwijdering.</p>	<p>EU en NL: na 2030 voorsnog alleen netto doelen. EU: EC heeft een voorstel⁴ gedaan voor een netto emissiereductiedoel (90% in 2040 t.o.v. 1990). Hiermee zou een CO₂-verwijderingsopgave tot 400 Mt CO₂ gepaard gaan.</p>
<p>2 Stimuleren van opschaling door vraag naar CO₂-verwijdering te creëren.</p>	<p>EU: nog geen beleid, in 2026 rapportage van EC over mogelijke integratie in EU-emissiehandelssysteem (EU ETS). NL: in Voorjaarsnota 2023⁵ is geld bestemd voor 'negatieve emissies door BECCS en andere technieken (0-3,5 Mton)', onder meer bij afvalverbranding. Inmiddels besloten om geen BECCS te subsidiëren; onduidelijk of afvalverbranding daar ook onder valt.⁶ Verder eerste ideeën voor vraagcreatie in 'Keuzewijzer Klimaat en Energie'.⁷</p>
<p>3 Stimuleren van innovaties gericht op nieuwe, permanente methoden voor CO₂-verwijdering zodat voldoende betaalbare methoden beschikbaar komen.</p>	<p>EU: innovatiegelden voornamelijk onderdeel van budgetten voor CCS-technologie.⁸ EC heeft voorstellen⁹ gedaan voor randvoorwaarden voor CCS, CCU, CO₂-verwijdering en CO₂-infrastructuur en financiering van onderzoek en innovatie. NL: CO₂-verwijdering is onderdeel van generiek innovatiebeleid¹⁰. De 'Routekaart voor negatieve emissies', die door de Tweede Kamer is gevraagd¹¹, moet een verdere invulling aan het R&D stimuleringsbeleid geven.</p>
<p>4 Zorg dragen voor een goed functionerende (internationale) markt voor CO₂-transport en -opslag zodat er voldoende capaciteit beschikbaar is.¹²</p>	<p>EU: EC-voorstel voor interne CO₂-markt in Europa.¹³ NL: beginnende markt met eerste aanbieder van offshore ondergrondse CO₂-opslag en transport via pijpleiding. Daarnaast internationaal transport mogelijk via schepen.</p>
<p>5 Ontwikkelen en implementeren van een systeem voor betrouwbare monitoring, rapportage en verificatie (MRV) van CO₂-verwijdering als basis voor certificering.</p>	<p>EU: komende jaren invulling van het kader voor betrouwbare certificering van hoogwaardige CO₂-verwijdering (<i>Carbon Removal Certification Framework Regulation, CRCF</i>).</p>
<p>6 Kaders stellen die afwenteling op andere duurzame ontwikkelingsdoelen zo veel mogelijk voorkomen en die eventuele positieve bijeffecten bevorderen.</p>	<p>EU: onderdeel van CRCF. NL: bestaande instrumenten zoals milieueffectrapportage en omgevingsvergunning.</p>
<p>7 Beleid ontwikkelen om risico's van onbedoeld vrijkomen van opgeslagen CO₂ te beheersen. Daarbij horen ook risicoaansprakelijkheid en regels voor langdurige veilige ondergrondse CO₂-opslag.¹⁴</p>	<p>EU: sinds 2009 geregeld voor permanente ondergrondse opslag in de CCS Directive.¹⁵ Deels ook in CRCF.</p>
<p>8 Aandacht voor publieke participatie en acceptatie als het gaat om 1) CO₂-verwijderingsbeleid in het algemeen, 2) specifieke vormen van CO₂-verwijdering en 3) CO₂-verwijderingsprojecten in hun specifieke context.¹⁶</p>	<p>NL: nog geen actief beleid op dit vlak. Wel algemeen participatiebeleid bij lokale besluitvorming (Omgevingswet en milieueffectrapportage).</p>

4.2 Sturen op rol en schaal van CO₂-verwijdering

Zowel aanbieders van CO₂-verwijderingsmethoden als uitstoters hebben baat bij duidelijkheid over de rol en schaal van toekomstige CO₂-verwijdering. Duidelijkheid over de verwachte schaal van CO₂-verwijdering, zowel voor het behalen van klimaatneutraliteit door compensatie van restemissies als voor het verminderen van een temperatuuroverschrijding, geeft toekomstige aanbieders van CO₂-verwijdering perspectief en geeft hen de tijd om de benodigde capaciteit op tijd te realiseren. Duidelijkheid over de hoeveelheid CO₂-verwijdering die de overheid maximaal nastreeft voor compensatie voorkomt bovendien dat uitstoters ten onrechte anticiperen op grootschalige mogelijkheden tot compensatie. Dat kan immers hun inspanningen voor emissiereductie verkleinen. Dit speelt ook op het niveau van landen, die hun netto-emissiedoelen kunnen invullen met CO₂-verwijdering in plaats van emissiereductie.

Een manier om duidelijkheid te verschaffen is limieten te stellen aan CO₂-verwijdering ter compensatie van restemissies. De huidige uitstootdoelen (Europees, nationaal en sectoraal, inclusief het doel van klimaatneutraliteit in 2050)

zijn netto-doelen, die niet specificeren welk aandeel moet worden geleverd door emissiereductie en welk deel maximaal door CO₂-verwijdering. Verschillende wetenschappelijke studies pleiten voor aparte doelen voor emissiereductie en limieten voor CO₂-verwijdering.¹⁷ Een manier om dat te realiseren is om naast de huidige netto-emissiedoelen ook een limiet aan CO₂-verwijdering te stellen.

Omdat sectoren sterk verschillen, zijn sectorale limieten te overwegen.

In bepaalde sectoren zijn emissies relatief gemakkelijk tot nul te reduceren; in andere sectoren is dat moeilijker. Hoeveel emissieruimte voor welke sectoren beschikbaar komt is een politiek verdelingsvraagstuk waarover in een vroeg stadium duidelijkheid moet komen. Idealiter is compensatie alleen beschikbaar voor activiteiten die een grote maatschappelijke waarde vervullen, die technisch en/of economisch moeilijk tot nul te reduceren zijn ('hard to abate'), of waarbij reductie naar nul emissies tot grote ongewenste effecten leidt en waarvoor geen goede alternatieven beschikbaar zijn. Nadeel van aparte CO₂-verwijderingslimieten voor sectoren is dat er ongelijke prikkels voor emissiereductie zullen ontstaan (of zullen blijven bestaan) tussen verschillende sectoren.

6. Aanbeveling:

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de inzet van CO₂-verwijdering voor de compensatie van restemissies te beperken door daarvoor limieten te stellen op Europees, nationaal en sectoraal niveau.

Hoe hoog de limieten voor compensatie van restemissies mogen zijn kent onzekerheden.

Het stellen van limieten aan CO₂-verwijdering voor compensatie van restemissies en het toedelen daarvan aan sectoren moet passen bij de realistische capaciteit voor CO₂-verwijdering, inclusief landgebruik en geologische opslag. Of er voldoende geologische opslagcapaciteit is hangt af van het gebruik van opslagcapaciteit door fossiele CCS uit binnen- en buitenland (zie paragraaf 2.3). Scenariostudies kunnen informatie geven over mogelijke emissiereducties in sectoren, al hangen die sterk af van de aannames. Ter illustratie: Recente Nederlandse emissiescenario's van PBL¹⁸ en TNO¹⁹ laten een bandbreedte van restemissies zien van respectievelijk 18–37 MtCO₂e en 15–30 MtCO₂e in 2050²⁰. Het potentieel voor gedragsverandering wordt bij deze scenario's niet of beperkt meegenomen; de restemissies kunnen derhalve lager uitvallen als daar wel beleid op wordt gevoerd.

Indicatieve limieten op CO₂-verwijdering voor compensatie kunnen in de vijfjarige klimaatplancycclus worden omgezet in bindende limieten.

Gegeven de eerder geschetste complexiteit om de juiste hoogte van de limieten te bepalen, is het verstandig om eerst nationaal ervaring op te doen met indicatieve limieten. Of de gestelde limieten met het gevoerde emissiereductiebeleid in zicht komen, kan jaarlijks worden gemonitord en gerapporteerd in de Klimaat- en Energieverkenning (KEV). Het herzien van de limieten kan elke vijf jaar, parallel met de cyclus van het Klimaatplan. Zodra er meer zicht is op de daadwerkelijke omvang van 'moeilijk vermijdbare' emissies, en de toekomstige CO₂-verwijderingscapaciteit, kunnen de limieten bindend worden gemaakt.

Als rekening wordt gehouden met duurzaamheidsaspecten, hoeft er geen limiet te worden gesteld aan de inzet van CO₂-verwijdering voor het beperken en terugdringen van een temperatuuroverschrijding.

Er vindt immers geen uitruil met emissiereductie plaats. Iedere inzet van CO₂-verwijdering in deze rol draagt bij aan vermindering van klimaatgevolgen en minder afwenteling op toekomstige generaties. Wel moet rekening gehouden worden met duurzaamheidsbeperkingen en -risico's bij grootschalige inzet van CO₂-verwijdering,

Vormgeving van CO₂-verwijderingsbeleid

zoals sociale en milieugevolgen van energie- en landgebruik.

4.3 Beleidsinstrumenten voor vraagcreatie naar CO₂-verwijdering

De wetenschappelijke literatuur beschrijft verschillende beleidsinstrumenten die vraag naar CO₂-verwijdering kunnen creëren.²¹ Ten eerste kan de overheid als koper optreden, ten tweede kan de overheid bedrijven te verplichten als koper op te treden en ten derde kan de overheid marktprikkels creëren om CO₂-verwijdering te stimuleren. Bij deze manieren, die elkaar niet uitsluiten, kan onderscheid gemaakt worden tussen instrumenten die zich richten op het creëren van vraag naar CO₂-verwijdering voor het compenseren van emissies en voor de terugdringing van temperatuuroverschrijding. Zie tabel 3 voor een schematisch overzicht van de typen instrumenten die in dit advies aan de orde komen. Uitgangspunt in deze paragraaf is dat het om permanente CO₂-verwijdering gaat.

Tabel 3: Overzicht van beleidsinstrumenten om CO₂-verwijdering te realiseren die dit advies behandeld worden en voor welke rol(len) voor het bereiken van klimaatdoelen ze kunnen worden ingezet.

Beleidsinstrumenten voor CO ₂ -verwijdering	Rol in bereiken klimaatdoelen	
	Beperken en terugdringen temperatuuroverschrijding	Compensatie (rest)emissies
Overheidsinkoop van CO ₂ -verwijdering	Ja	Ja
Verplichting tot inkoop van CO ₂ -verwijdering ▶ voor uitstoters ▶ voor producenten/importeurs van fossiele brandstoffen		Ja
(Gedeeltelijke) integratie van CO ₂ -verwijdering in emissiehandelssysteem		Ja
Overheidsvoorzieningen waarmee toekomstige overheidsinkoop van CO ₂ -verwijdering kan worden bekostigd	Ja	
Verplichting tot toekomstige inkoop van CO ₂ -verwijdering voor uitstoters vanaf moment van temperatuuroverschrijding	Ja	

4.3.1 CO₂-verwijdering vraagt om Europees beleid

Ontwikkeling en implementatie van beleid voor vraagcreatie naar CO₂-verwijdering kan op termijn op Europees niveau worden vormgegeven. Aangezien veel klimaatbeleid in de Europese Unie wordt vormgegeven, ligt het voor de

hand dat dit op termijn ook voor CO₂-verwijdering gebeurt. Als lidstaten hier niet geharmoniseerd in optrekken, kan in bepaalde gevallen een ongelijk speelveld ontstaan. Dit leidt mogelijk tot negatieve gevolgen voor de concurrentieposities van lidstaten, waaronder mogelijk Nederland, en tot weglek. Bovendien is een Europese markt voor CO₂-verwijdering efficiënter,

aangezien sommige lidstaten een overschot aan potentieel hebben om CO₂ te verwijderen en/of op te slaan en andere juist een tekort.

Europees beleid gericht op het creëren van een vraag naar permanente CO₂-verwijdering staat nog in de kinderschoenen. Alhoewel er nog geen Europees beleid voor CO₂-verwijdering is, zet de EU wel een aantal noodzakelijke stappen, zoals de ontwikkeling van het raamwerk voor certificering (zie paragraaf 4.1). Besluitvorming over de vormgeving van het Europese CO₂-verwijderingsbeleid ligt nog grotendeels open en de implementatie zal naar verwachting nog enige jaren vergen. Voor 2026 is een onderzoeksrapport van de Europese Commissie gepland over de mogelijkheid om CO₂-verwijdering te integreren in het EU ETS.

Lidstaten kunnen Europees beleid bespoedigen en beïnvloeden door samen te werken met gelijkgestemde landen. Dit kan bijvoorbeeld door samen verder onderzoek te doen naar beleidsinstrumenten voor vraagcreatie en hier een positie over in te nemen. Dit is een strategie die vaker wordt ingezet, en die Nederland bijvoorbeeld ook gebruikt voor het bevorderen van EU-beleid rondom duurzame koolstofkringlopen in de chemie.²²

Het is in het Nederlands belang om een actieve rol te spelen bij de vormgeving van Europees CO₂-verwijderingsbeleid.

De Nederlandse economie heeft een aantal sectoren met 'moeilijk vermijdbare' emissies, zoals de industrie, de luchtvaart en de landbouw.²³ Komt er een maximum aan de totale hoeveelheid CO₂-verwijdering die kan worden ingezet voor compensatie, dan heeft dat invloed op hoeveel restemissies elke sector mag compenseren. Daarnaast is Nederland één van de lidstaten die een relatief groot potentieel voor ondergrondse CO₂-opslag hebben, wat het belangrijk maakt om invloed te houden op de Europese regelgeving voor grensoverschrijdende CO₂-infrastructuur.

Er zijn meerdere beleidsinstrumenten die op Europees niveau kunnen worden ingezet voor het creëren van een vraag naar CO₂-verwijdering. Onderzoek naar instrumenten voor vraagcreatie levert informatie op over welke beleidsinstrumenten voor welke doeleinden het beste werken. Deze instrumenten kunnen bijvoorbeeld betrekking hebben op de opschaling van CO₂-verwijderingscapaciteit, het compenseren van restemissies en het terugdringen van een temperatuuroverschrijding. Voor al deze doeleinden is nu al (Europees) beleid nodig, ook wat zaken betreft die later pas

spelen, zoals de situatie dat het ETS naar nul uitstootrechten gaat.

7. Aanbeveling:

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de Nederlandse regering het initiatief te nemen om met andere lidstaten Europese beleidsinstrumenten voor het creëren van een vraag naar CO₂-verwijdering te onderzoeken, en hun invoering te stimuleren.

4.3.2 Beschouwing beleidsinstrumenten voor vraagcreatie

De wetenschappelijke literatuur beschrijft een drietal typen beleidsinstrumenten voor vraagcreatie richting klimaatneutraliteit:

- 1) verplichting tot CO₂-verwijdering,
 - 2) integratie van CO₂-verwijdering in een emissiehandelssysteem en
 - 3) overheidsinkoop van CO₂-verwijdering.²⁴
- Zie tekstbox 6 voor een korte beschrijving.

Tekstbox 6 Beleidsinstrumenten voor het creëren van een vraag naar CO₂-verwijdering

Verplichting tot CO₂-verwijdering

De overheid kan partijen verplichten om CO₂-verwijderingscertificaten in te kopen. Hiervan bestaan twee voorbeelden:

- *Californische Carbon Removal Development Act*: Dit wetsvoorstel houdt in dat uitstoters in het California ETS 'negative emissions credits' dienen te kopen, overeenkomstig een toenemend percentage van hun broeikasgasemissies: 1% in 2030, 8% in 2035, 35% in 2040 en 100% in 2045.²⁵ Uitstoters kunnen hier uiteindelijk alleen aan voldoen via permanente methoden van CO₂-verwijdering of 'negative emissions credits'. Dit gebeurt in twee fasen, waarbij uitstoters niet-permanente CO₂-verwijdering uiteindelijk moeten omzetten in permanente CO₂-verwijdering.
- *Carbon Take Back Obligation (CTBO)*: De overheid legt een verplichting op aan producenten en importeurs die fossiele brandstoffen op de markt brengen.²⁶ Ze moeten een percentage van de CO₂ die bij verbranding van deze brandstoffen vrij zou komen (hun zogenaamde 'scope 3 emissies') permanent opslaan. Dit percentage neemt toe na verloop van tijd en moet op het moment van netto-nul 100% zijn. In tegenstelling tot andere beleidsinstrumenten is hier, naast CO₂-verwijdering, ook fossiele *Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS)* toegestaan. De verplichting bestaat naast een emissiereductiebeleid.

Gedeeltelijke of volledige integratie van CO₂-verwijdering in het ETS

Bedrijven krijgen binnen het ETS de mogelijkheid om (gedeeltelijk) aan hun emissiereductie-verplichtingen te voldoen door CO₂-verwijderingscertificaten te overleggen.²⁷ Een deel van de netto reductie wordt dan gerealiseerd door CO₂-verwijdering. Daarmee maakt integratie in het ETS 'by design' uitruil van emissiereductie met CO₂-verwijdering mogelijk.

Volledige integratie houdt in dat er geen beperkingen zijn aan het type CO₂-verwijdering en aan de omvang van inzetbare CO₂-verwijdering. Bovendien kunnen ETS-deelnemers direct certificaten inkopen op een markt voor CO₂-verwijderingscertificaten.

Gedeeltelijke integratie houdt in dat er beperkingen gesteld worden.

Overheidsinkoop van CO₂-verwijdering

De overheid kan CO₂-verwijderingscertificaten inkopen door middel van bijvoorbeeld tendering. Dit is een type veiling waarbij aanbieders van CO₂-verwijdering bieden tegen welke prijs zij bereid zijn een bepaalde omvang van een gevraagd type CO₂-verwijdering te leveren. Dit is vergelijkbaar met hoe veilingen voor windenergie op zee in Nederland doorgaans worden georganiseerd.²⁸ De overheid kan ingekochte CO₂-verwijderingscertificaten zelf houden, in de toekomst aan andere landen of uitstoters verkopen, inbrengen in een emissiehandelssysteem of wellicht op de vrijwillige markt verkopen. Overheidsinkoop van CO₂-verwijderingscertificaten kan zowel nationaal als Europees worden georganiseerd. De kosten van overheidsinkoop kunnen op verschillende manieren worden verdeeld. Dit bepaalt uiteindelijk de verdelende rechtvaardigheid en de doelmatigheid van de vormgeving van dit instrument.

Hoewel verplichtingen een rol kunnen bij opschaling en compensatie, heeft de interactie met het bestaande emissie-reductiebeleid nadere aandacht.

De verplichtingen beschreven in de literatuur corresponderen met oplopend percentage van de emissies, waardoor de kosten van een ton CO₂-uitstoot in de tijd toenemen. Dit heeft een aantal gevolgen. Ten eerste leidt een verplichting tot extra kosten voor onder andere ETS-deelnemers: naast emissierechten moeten ze ook betalen voor een evenredig percentage CO₂-verwijdering (of betalen ze, bij een *Carbon Take Back Obligation*, indirect voor hogere brandstofkosten). De effecten daarvan zijn vergelijkbaar met een Europese CO₂-heffing bovenop de EU ETS-prijs. De ETS-prijs zal zakken ten opzichte van de situatie zonder verplichtingen, omdat meer ETS-deelnemers zelf emissiereducerende maatregelen gaan nemen. Nader onderzoek is nodig om te bepalen wat de precieze gevolgen hiervan zijn, ook rekening houdend met de mogelijkheid van het opsparen van emissierechten en de werking van de *Market Stability Reserve*. Ten tweede kan door een verplichting de som van de prijs van emissierechten en de kosten voor CO₂-verwijdering groter worden dan de maatschappelijke kosten van die emissies; dan is dit niet efficiënt en

Vormgeving van CO₂-verwijderingsbeleid

mogelijk ook niet rechtvaardig. Ook dit zou verder onderzocht moeten worden. Ten derde zou de invoering van verplichtingen kunnen leiden tot een ongelijk speelveld en tot weglek. De bovenstaande gevolgen zullen bij een Carbon Take Back Obligation deels pas later optreden, omdat naar verwachting eerst zal worden ingezet op fossiele CCS (dat in het ETS als emissiereductie wordt beschouwd), voordat het zal leiden tot CO₂-verwijdering.

Voor sectoren met emissies die moeilijk terug te dringen zijn en die niet onder een emissiehandelssysteem vallen is ander beleid nodig. De landbouwsector is hier een voorbeeld van. Op dit moment worden de maatschappelijke kosten van de broeikasgasemissies uit de landbouw niet in de prijzen van de producten meegenomen.²⁹ De overheid kan ervoor kiezen om de kosten voor CO₂-verwijdering ter compensatie van emissies uit de landbouw uit de algemene middelen op te brengen. Dit betekent wel dat de landbouw niet volledig zijn maatschappelijke kosten betaalt. Een andere optie is om, analoog met het Californische wetsvoorstel, bedrijven een verplichting op te leggen om hun uitstoot van broeikasgassen te compenseren met CO₂-verwijdering. Deze verplichting kan aan verschillende partijen in de keten worden opgelegd: aan producenten en importeurs van kunstmest en krachtvoer, aan boeren of aan de

melk- en vleesverwerkende industrie. Een verplichting tot CO₂-verwijdering is dan tevens te zien als een (gedeeltelijke) internalisering van de maatschappelijke kosten in de prijs van landbouwproducten. Ook hier geldt dat de invoering van een verplichting mogelijk tot een ongelijk speelveld kan leiden.

Een snelle integratie in het ETS heeft nadelen en risico's. Als de prijs van CO₂-verwijdering concurrerend is met de prijs van emissierechten, krijgen uitstoters die geen 'moeilijk vermijdbare' emissies hebben de mogelijkheid tot uitruil van emissiereductie met CO₂-verwijdering. In dat geval verdwijnt de prikkel voor emissiereductie. Als de prijs van CO₂-verwijdering niet concurrerend is met de prijs van emissierechten, kan de overheid ervoor kiezen de 'onrendabele top' te subsidiëren. Dit zou kunnen met 'carbon contracts for difference'. Dat betekent dat de overheid bedrijven subsidieert om CO₂-verwijdering toe te passen in plaats van emissies te reduceren, met alle klimaatgevolgen van dien (zie paragraaf 3.1).

Als integratie in het ETS toch onderdeel wordt van het beleid, bijvoorbeeld als er alleen nog moeilijk vermijdbare emissies over zijn, kan de overheid extra sturingsmogelijkheden creëren door de enige aanbieder van CO₂-verwijderingscertificaten in de ETS-markt te zijn. Door te fungeren als tussenpartij

kan de overheid sturen op zaken als de hoeveelheid in te brengen CO₂-verwijderingscertificaten, het tijdstip van inbrengen, het type CO₂-verwijdering en welke deelnemers of sectoren certificaten mogen kopen.³⁰ Het idee van een Europese Carbon Central Bank (zie tekstbox 7) is op deze gedachte gebaseerd.

Tekstbox 7 European Carbon Central Bank

Een voorstel dat veel aandacht in de literatuur³¹ krijgt, is de combinatie van overheidsinkoop met een (toekomstige) integratie van CO₂-verwijdering in het ETS. Het idee is dat een nieuwe European Carbon Central Bank CO₂-verwijderingscertificaten inkoopt en ergens na 2040 in het ETS integreert als de CO₂-prijs stijgt en excessieve prijsspielen optreden. Deze integratie zorgt voor prijsstabilisatie in het ETS, en kan bijdragen aan het behouden van draagvlak voor ETS als een van de centrale elementen van het klimaatbeleid.³² Een eventuele oprichting van zo'n bank heeft wel de nodige voeten in de aarde. Vooruitlopend daarop kunnen lidstaten nu alvast CO₂-verwijderingscertificaten kopen en deze later inbrengen.

Een eventuele gedeeltelijke integratie in het ETS vereist een goede timing, de juiste informatie, en moet zeker niet te vroeg plaatsvinden. Ten eerste moeten de mogelijkheden voor emissiereductie schaars worden, zodat emissies alleen worden gecompenseerd met CO₂-verwijdering waar dit echt nodig is. Deze schaarste zal tot uitdrukking komen in excessieve prijzen van emissierechten, maar om die situatie te zien aankomen en erop te kunnen anticiperen is onafhankelijke informatie over reductiemogelijkheden van sectoren noodzakelijk. Ten tweede is het voor de uitruil van emissiereductie met CO₂-verwijdering van belang dat ook in de prijs voor CO₂-verwijdering de externe maatschappelijke kosten zijn geïnternaliseerd (zoals risico's op biodiversiteitsverlies bij het gebruik van biomassa, emissies in de keten, en extra land- en energiegebruik door DACCS). Het certificeringsraamwerk CRCF moet daarvoor ingevoerd zijn en goed werken, naast de vergunningverlening en het duurzaamheidskader voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen.

8. Aanbeveling:

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert om CO₂-verwijdering zo lang mogelijk uit het ETS te houden, om zo de prikkel voor emissiereductie zo lang mogelijk te behouden. Verder adviseert de Raad dat, als CO₂-verwijdering onderdeel wordt van het ETS, alleen de overheid CO₂-verwijderingscertificaten op de markt kan brengen.

Overheidsinkoop via tendering is efficiënt en kent een grote flexibiliteit qua inkoop van het type certificaten, het verdelen van de kosten, en de toepassing daarvan. Bovendien kan het relatief snel worden opgezet ten opzichte van andere instrumenten zoals verplichtingen, die bovendien vooralsnog met onzekerheden gepaard gaan door hun interactie met emissiereductiebeleid. Om te voorkomen dat CO₂-verwijdering ten koste gaat van emissiereductie, is het wel van belang dat de overheid haar CO₂-certificaten voorlopig niet voor compensatiedoelinden inzet, bijvoorbeeld door verkoop aan marktpartijen of aan andere landen.

Nationale overheidsinkoop is, anders dan inkoop op EU-niveau, al op korte termijn te realiseren. Europees beleid zal een aantal jaar op zich laten wachten, terwijl opschaling van permanente CO₂-verwijderingsmethoden urgent is. Om CO₂-verwijdering rond 2035 op voldoende schaal te hebben gerealiseerd vervult nationale overheidsinkoop een belangrijke functie.

9. Aanbeveling:

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert een door de Nederlandse overheid geleid inkoopprogramma voor permanente CO₂-verwijdering te starten, om voor 2035 ervaring op te doen met diverse methoden van CO₂-verwijdering in Nederland.

Overheidsinkoop van CO₂-verwijderingscertificaten kan plaatsvinden via tenders.

Daarbij gaat de voorkeur uit om CO₂-verwijdering in Nederland te realiseren (in plaats van inkoop van CO₂-verwijdering in een ander land).³³ Op die manier kan in Nederland met de hele keten van CO₂-verwijdering ervaring worden opgedaan. Het is van belang om ervaring op te doen met diverse aspecten van CO₂-verwijdering: niet alleen technisch, maar ook institutioneel en maatschappelijk. Dit gebeurt ook in enkele andere lidstaten; zo heeft de Zweedse overheid een tender gestart voor bioCCS.³⁴

Bij een eventuele keuze voor bioCCS speelt een aantal overwegingen. Veel bioCCS-methoden bevinden zich nog in een relatief vroege fase van ontwikkeling en vergen speciale aandacht. Zo is het van belang rekening te houden met een eventuele inbedding in het toekomstige energiesysteem (zie tekstbox 2) en met de toekomstige industriële koolstofbehoefte. Een bioCCS-optie die in het huidige energiesysteem een goed idee lijkt, kan op langere termijn alsnog resulteren in een *lock-in*. Ook is het van belang dat de inzet van duurzame biomassa hoogwaardig plaatsvindt (zie ook tekstbox 4), en dat maatschappelijke inbedding op een procedureel rechtvaardige manier verloopt.

Naarmate de beleidsontwikkelingen in de EU in de toekomst vorderen, kan de overheid voortzetting van nationale overheidsinkoop herzien. Dat hangt ook samen met de doeleinden waarvoor de overheid CO₂-certificaten wil inzetten. De overheid kan ingekochte CO₂-verwijderingscertificaten zelf houden of in de toekomst verkopen aan andere landen of uitstoters. Als de overheid de CO₂-verwijderingscertificaten verkoopt, kunnen deze mogelijk worden benut voor compensatie en dus in de plaats van emissiereductie komen. Indien de EU kiest voor een route met een soort European Carbon Central Bank (zie tekstbox 7),

kunnen de certificaten wellicht ook aan een dergelijke bank verkocht worden.

Bekostiging van overheidsinkoop vergt aandacht voor rechtvaardigheid.

De overheid kan de inkoop van CO₂-certificaten op verschillende manieren bekostigen. Er valt bijvoorbeeld te denken aan een bekostiging uit algemene middelen, door de vervuilers (bv. via heffingen gerelateerd aan de broeikasgasuitstoot of uit de opbrengst uit geveilde emissierechten) of door een toeslag op de energiekosten van huishoudens. Als de overheid een heffing gerelateerd aan de broeikasgasuitstoot oplegt aan ETS-deelnemers, kan dit net als bij het opleggen van een verplichting gaan interacteren met emissiehandel, zie hiervoor. Daarnaast is bij de keuze voor bekostiging ook aandacht nodig voor de effecten van de bekostiging op de consumenten en een rechtvaardige verdeling daarvan.

4.3.3 Beleidsinstrumenten specifiek voor het terugdringen van temperatuuroverschrijding

Het terugdringen van temperatuuroverschrijding is een wereldwijd gedeelde verantwoordelijkheid en heeft rechtvaardigheidsaspecten. Deze opgave zal tussen landen moeten worden verdeeld (zie tekstbox 8). Omdat de omvangrijke CO₂-verwijdering die nodig is voor een beperking of terugdringing van een temperatuuroverschrijding voor een deel later in de tijd moet plaatsvinden, lopen volgende generaties het risico de kosten te moeten dragen.

De huidige generatie uitstoters kan voorzieningen treffen om te voorkomen dat toekomstige generaties alle lasten van CO₂-verwijdering moeten dragen.

Als de huidige uitstoters nu geen voorzieningen treffen voor toekomstige CO₂-verwijdering, betekent dat een forse opgave voor toekomstige generaties, in financiële, maatschappelijke en ecologische zin. Aangezien de grootte van de temperatuuroverschrijding afhankelijk is van het gevoerde beleid en de effectiviteit daarvan, is een inschatting van de kosten moeilijk te maken. Er wordt geraamd dat een temperatuurstijging van 0,1°C samenhangt met ongeveer 220 Gt CO₂.³⁵ De precieze kosten van CO₂-verwijdering in de toekomst zijn nog ongewis, maar het

is aannemelijk dat CO₂-verwijdering op die schaal toekomstige generaties bijloenen euro's zou kosten.

Een relatief nieuw idee in de wetenschappelijke literatuur is om uitstoters vanaf het moment van een koolstofbudgetoverschrijding te verplichten om financiële voorzieningen te treffen voor toekomstige CO₂-verwijdering. Deze financiële voorzieningen moeten ervoor zorgen dat in de toekomst een evenredige CO₂-verwijdering plaatsvindt (zie tekstbox 9). Net als bij de in paragraaf 4.3.2 besproken verplichtingen, is het hierbij nodig om interactie met emissiereductiebeleid en met name emissiehandel te onderzoeken. Er wordt zelfs gesteld dat bij invoering van dergelijke instrumenten emissiehandel zou kunnen komen te vervallen.³⁶ Verder speelt hier de vraag welke uitstoters hun emissies direct moeten compenseren, en welke uitstoters zich alleen hoeven te committeren aan toekomstige CO₂-verwijdering. Het potentieel voor CO₂-verwijdering is immers schaars, en wie dit mag gebruiken moet nog bepaald worden.

Tekstbox 8 Gevolgen van het overschrijden van het mondiale koolstofbudget voor verdeling CO₂-verwijderingsopgave

Het mondiale koolstofbudget om onder de 1,5°C te blijven is bij gelijkblijvende uitstoot rond 2030 opgebruikt.³⁷ Dat toont niet alleen het belang van snelle emissiereductie, maar impliceert ook dat een temperatuuroverschrijding zal moeten worden beperkt of teruggedraaid door CO₂ te verwijderen. Omdat temperatuuroverschrijding samenhangt met het koolstofbudget, is de verdeling tussen landen van de verantwoordelijkheid voor het overschrijden van het koolstofbudget een indicatie voor de verdeling van de inspanningen voor het terugbrengen van de temperatuuroverschrijding, oftewel wie er betaalt voor de vereiste CO₂-verwijdering.

In de literatuur zijn diverse voorstellen gedaan voor deze impliciete verdeling van de CO₂-verwijderingsopgave. De verdeelsleutels houden in meer of mindere mate rekening met wat maatschappelijk, economisch, institutioneel, en technisch haalbaar is, en wat daarbij rechtvaardig is. Bij rechtvaardigheid kan onder meer gedacht worden aan historische verantwoordelijkheid (inclusief koloniaal verleden), capaciteit en draagkracht. Als rechtvaardigheidscriteria worden meegenomen, mogen rijke en vroeg-geïndustrialiseerde landen als Nederland vaak nog maar weinig uitstoten³⁸ en moeten zij dus veel CO₂-verwijdering realiseren.

CE Delft heeft op basis van uitstootscenario's voor Nederland een informele schatting gemaakt van een overschrijding van het Nederlands koolstofbudget, gebaseerd op twee verdeelsleutels: één op basis van een toedeling per capita en één per aandeel in de CO₂-uitstoot (CO₂-intensiteit per inwoner). Dit geeft een bandbreedte van de benodigde CO₂-verwijdering van 1,6 tot 33 MtCO₂/j vanaf 2050.³⁹

Internationaal is er nog geen consensus over een eerlijke verdeling van de inspanningen en de aspecten die daarbij moeten worden meegewogen.⁴⁰ Wel is er consensus dat rijke landen als Nederland het voortouw moeten nemen bij het tegengaan van klimaatverandering.

De inzet van de overheid nu bepaalt of de toekomstige economie de kosten voor CO₂-verwijdering kan dragen.

In zeer brede zin kan de overheid de economie versterken om ervoor te zorgen dat de economie en overheidsfinanciën voldoende robuust blijven om voor toekomstige generaties de last van CO₂-verwijdering draagbaar te houden. Dit kan bijvoorbeeld in de vorm van een lage overheidsschuld of investeren in innovatie in CO₂-verwijderingstechnieken waardoor de kosten voor komende generaties lager zijn.

Dat de huidige generatie uitstoters moet bijdragen aan het minimaliseren van de kosten voor toekomstige CO₂-verwijdering is duidelijk, maar hoe dat naast snelle emissiereductie te doen moet nog worden bepaald.

Door via emissiereductiebeleid de toekomstige temperatuuroverschrijding zo klein mogelijk te houden neemt de afhankelijkheid van toekomstige CO₂-verwijdering af (zie aanbeveling 1 in hoofdstuk 3). Daarnaast zou de huidige generatie uitstoters kunnen bijdragen aan de kosten voor de CO₂-verwijderingsopgave van toekomstige generaties. De overheid kan er bijvoorbeeld voor kiezen om een fonds op te richten. Er zijn meerdere voorbeelden van fondsen die in het leven zijn geroepen om met vergelijkbare intergenerationale

verdelingsvraagstukken om te gaan, zoals pensioenfondsen en fondsen voor beheerskosten van radioactief afval. Voor dit fonds kunnen publieke middelen worden ingezet, bijvoorbeeld geormerkte belastingen op basis van de huidige uitstoot. Tegen de tijd dat CO₂-verwijdering echt een grote rol gaat spelen zullen deze uitstoters immers bijna niet meer bestaan, aangezien de emissies dan dicht bij nul zullen zijn. Hierbij zouden 'huidige uitstoters' in de ruimste zin van het woord moeten worden opgevat; afhankelijk van beleidskeuzes kunnen het consumenten of bedrijven zijn, als ze maar een verantwoordelijkheid hebben.

10. Aanbeveling:

De Wetenschappelijke Klimaatraad adviseert de overheid om ervoor te zorgen dat uitstoters vanaf nu bijdragen aan de toekomstige kosten van het beperken en terugdringen van de temperatuuroverschrijding door hiervoor manieren te ontwerpen en in te voeren.

Tekstbox 9 Carbon Removal Obligation / Atmospheric CO₂ Removal Deposits

Bednar et al. (2024) stellen voor dat uitstoters vanaf het moment van een overschrijding van het wereldwijde koolstofbudget verplicht een koolstofschuld ('*carbon debt*') aangaan die ze in de toekomst moeten aflossen. Die schuld is vergelijkbaar met een financiële lening waarbij ook risico's worden afgedekt.

Lyngfelt et al. (2024) stellen op basis van producentenverantwoordelijkheid voor dat uitstoters een borg (*deposit*) voor CO₂-verwijdering storten in een daarvoor bestemd beleggingsfonds. De borg, inclusief de daarmee gepaarde vermogenswinst, wordt teruggestort zodra is aangetoond dat de vereiste CO₂-verwijdering is uitgevoerd.

Noten

- 1 Burke & Schenuit (2023).
- 2 Verordening (EU) 2022/0394
- 3 Bellamy (2022); Burke & Schenuit (2023); Honegger et al. (2021).
- 4 Europese Commissie (2024d).
- 5 Tweede Kamer, vergaderjaar 2022–2023, 36 350, nr. 1
- 6 Hoofdlijnenakkoord (2024).
- 7 Formatiewerkgroep Klimaat en Energie (2024).
- 8 Carbon Gap (2023a), (2023b).
- 9 Verordening 2023/0081
- 10 Via CETPartnership (z.d.); RVO (2024a), (2024c).
- 11 Tweede Kamer, vergaderjaar 2022–2023, 32 813, nr. 1243.
- 12 Zie ook Mulder (2024), die aangeeft dat in de huidige Nederlandse situatie bepaalde partijen grote marktmacht bezitten. Zolang de markt voor CO₂-transportinfrastructuur en -opslag nog geen competitieve (internationale markt is, beveelt hij aan in ieder geval tijdelijk markt- en tarieventoezicht te introduceren. De minister van EZK heeft die aanbeveling overgenomen, zie: Tweede Kamer, vergaderjaar 2023–2024, 32 813, nr. 1375.
- 13 Europese Commissie (2024c).
- 14 Burke & Schenuit (2023).
- 15 Richtlijn (EU) 2009/31
- 16 Zie bijvoorbeeld Bellamy (2022).
- 17 Rickels et al. (2024).
- 18 PBL (2024b).
- 19 TNO (2024).
- 20 Dit komt overeen met een emissiereductie ten opzichte van 1990 van 92–84% en respectievelijk 93–87%. In de getallen wordt verondersteld dat de CO₂-opslagcapaciteit voor verwijderde CO₂ in Nederland beschikbaar is en dat er geen barrières bij de implementatie van beleid optreden.
- 21 Hickey et al. (2023); Meyer-Ohlendorf (2023); Meyer-Ohlendorf et al. (2023).
- 22 Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2024).
- 23 Edelenbosch et al. (2022).
- 24 Hickey et al. (2023); Meyer-Ohlendorf (2023); Meyer-Ohlendorf et al. (2023).
- 25 Meyer-Ohlendorf (2023). De behandeling van dit wetsvoorstel is inmiddels op een aantal punten aangepast en loopt nog, zie “Net zero greenhouse gas emissions goal: carbon dioxide removal: regulations” (2024).
- 26 De Gemeynyt et al. (2022); Jenkins et al. (2021).
- 27 Oxera (2022); Rickels et al. (2021); Theuer et al. (2021).
- 28 Jansen et al. (2022).
- 29 European Court of Auditors (2021).
- 30 Meyer-Ohlendorf (2023).
- 31 Rickels et al. (2022); Rickels & Rothenstein (2022).
- 32 Burke & Schenuit (2023).
- 33 Biomassa kan worden geïmporteerd, want Nederland kan niet genoeg zelf produceren.
- 34 Lundberg & Fridahl (2022).
- 35 Lamboll et al. (2023).
- 36 Bednar et al. (2023).
- 37 Climate Change Tracker (2024).
- 38 CE Delft (2023); PBL (2024c).
- 39 CE Delft (2023).
- 40 PBL (2024c).

Afkortingen

AFOLU	agriculture, forestry and other land use
AVI	afvalverbrandingsinstallatie
BECCS	bioenergy with carbon dioxide capture and storage
bioCCS	biomass with carbon dioxide capture and storage
bioCCUS	biomass with carbon dioxide capture, utilisation and storage
CCS	carbon dioxide capture and storage
CCU	carbon dioxide capture and utilisation
CDR	carbon dioxide removal
CO₂e	CO ₂ -equivalenten
CRCF	Carbon Removal Certification Framework
CTBO	Carbon Take Back Obligation
DAC	direct air capture
DACCS	direct air carbon dioxide capture and storage
ETS	emission trading system
EU ETS	European Union emission trading system
Gton	gigaton
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kton	kiloton
LULUCF	land use, land-use change and forestry
MRV	monitoring, reporting and verification
Mton	megaton
NDC	Nationally Determined Contribution
RD&D	research, development and demonstration
TRL	technology readiness level
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

Referenties

- AFM. (2023). Voluntary Carbon Markets. Supervisory issues. Amsterdam, The Dutch Authority for the Financial Markets.
- 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.
- Allen, M. R., Friedlingstein, P., Girardin, C. A. J., Jenkins, S., Malhi, Y., Mitchell-Larson, E., Peters, G. P. & Rajamani, L. (2022). Net Zero: Science, Origins, and Implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 849–887.
- Allen, M. R., Shine, K. P., Fuglestedt, J. S., Millar, R. J., Cain, M., Frame, D. J. & Macey, A. H. (2018). A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1), 1–8.
- Bednar, J., Baklanov, A. & Macinante, J. (2023). The carbon removal obligation: Updated analytical model and scenario analysis. Laxenburg, Oostenrijk, International Institute for Applied Systems Analysis.
- Bednar, J., Macinante, J., Baklanov, A., Hall, J., Wagner, F., Ghaleigh, N. & Obersteiner, M. (2024). Beyond emissions trading to a negative carbon economy: a proposed carbon removal obligation and its implementation. *Climate Policy*, 24(4), 501–514.
- Bellamy, R. (2022). Mapping public appraisals of carbon dioxide removal. *Global Environmental Change*, 76, 102593.
- Brazzola, N., Wohland, J. & Patt, A. (2021). Offsetting unabated agricultural emissions with CO₂ removal to achieve ambitious climate targets. *PLOS ONE*, 16(3), e0247887.
- Buck, H. J., Carton, W., Lund, J. F. & Markusson, N. (2023). Why residual emissions matter right now. *Nature Climate Change*, 13(4), 351–358.
- Burke, J. & Schenuit, F. (2023). Governing permanence of Carbon Dioxide Removal: a typology of policy measures. CO₂RE – The Greenhouse Gas Removal Hub.
- Carbon Gap. (2023a). Horizon Europe. Geraadpleegd op 27–6–2024.
- Carbon Gap. (2023b). Innovation Fund. Geraadpleegd op 27–6–2024.
- Carton, W., Hougaard, I.-M., Markusson, N. & Lund, J. F. (2023). Is carbon removal delaying emission reductions? *WIREs Climate Change*, 14(4), e826.
- CE Delft. (2023). Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. Analyse van behoefte, aanbod en beleid voor negatieve emissies in Nederland. Delft, CE Delft.
- CETPartnership. (z.d.). Clean Energy Transition Partnership. Geraadpleegd op 27–6–2024.
- Climate Change Tracker. (2024). Current Remaining Carbon Budget and Trajectory. Geraadpleegd op 27–06–2024.
- Das, R., Chaturvedi, R. K., Roy, A., Karmakar, S. & Ghosh, S. (2023). Warming inhibits increases in vegetation net primary productivity despite greening in India. *Scientific Reports*, 13(1), 21309.
- De Gemeeynt, Margriet Kuijper Consultancy & Royal HaskoningDHV. (2022). A carbon takeback obligation for fossil fuels. Feasibility study phase 2, final report.
- de Kleijne, K., Hanssen, S. V., van Dinteren, L., Huijbregts, M. A. J., van Zelm, R. & de Coninck, H. (2022). Limits to Paris compatibility of CO₂ capture and utilization. *One Earth*, 5(2), 168–185.
- Deprez, A., Leadley, P., Dooley, K., Williamson, P., Cramer, W., Gattuso, J.-P., Rankovic, A., Carlson, E. L. & Creutzig, F. (2024). Sustainability limits needed for CO₂ removal. *Science*, 383(6682), 484–486.
- Edelenbosch, O., van den Berg, M., de Boer, H.-S. & Chen, H. (2022). Mitigating greenhouse gas emissions in hard-to-abate sectors (4901). Den Haag, PBL.
- European Court of Auditors. (2021). Special Report 16/2021: Common Agricultural Policy and climate: Half of EU climate spending but farm emissions are not decreasing. Luxembourg, European Court of Auditors. Publications Office of the European Union.
- Europees Parlement. (2024). Corporate Sustainability Due Diligence Directive: European Parliament legislative resolution of 24 April 2024 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive (EU) 2019/1937.
- Europese Commissie. (2020). Biodiversiteitsstrategie voor 2030 – De natuur terug in ons leven brengen.
- Europese Commissie. (2021a). Bodemstrategie voor 2030: profiteren van de voordelen van een gezonde bodem voor mens, voedsel, natuur en klimaat.
- Europese Commissie. (2021b). Een nieuwe EU-bosstrategie voor 2030 – Duurzaam bosbeheer in Europa.

Europese Commissie. (2024a). Commission welcomes political agreement on EU-wide certification scheme for carbon removals. Geraadpleegd op 27-06-2024.

Europese Commissie. (2024b). Impact assessment report accompanying the document 'Securing our future', Part 1.

Europese Commissie. (2024c). Naar een ambitieuzer beheer van koolstof in de EU.

Europese Commissie. (2024d). Onze toekomst veiligstellen.

Fankhauser, S., Smith, S. M., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., Kendall, J. M., Khosla, R., Lezaun, J., Mitchell-Larson, E., Obersteiner, M., Rajamani, L., Rickaby, R., Seddon, N. & Wetzler, T. (2022). The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change*, 12(2021).

Formatiewerkgroep Klimaat en Energie. (2024). Keuzewijzer Klimaat en Energie. Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.

Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P. & Neves,

R. A. L. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867), 388–393.

Geden, O. & Schenuit, F. (2020). Unconventional Mitigation. Carbon Dioxide Removal as a New Approach in EU Climate Policy. SWP.

Günther, P., Garske, B., Heyl, K. & Ekardt, F. (2024). Carbon farming, overestimated negative emissions and the limits to emissions trading in land-use governance: the EU carbon removal certification proposal. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 72.

Het Nationaal Dashboard Biodiversiteit. (z.d.). Dashboard Biodiversiteit. Geraadpleegd op 27-06-2024.

Hickey, C. & Allen, M. (2021). Quantitative survey of commercialisation mechanisms. NEGEM.

Hickey, C., Fankhauser, S., Smith, S. M. & Allen, M. (2023). A review of commercialisation mechanisms for carbon dioxide removal. *Frontiers in Climate*, 4.

Hoefsloot, G., van der Jagt, H. A. & van Duin, W. E. (2020). Blue Carbon in Nederlandse kwelders. Kansen voor extra CO₂ vastlegging in kwelders. Culemborg, Bureau Waardenburg.

Honegger, M., Poralla, M., Michaelowa, A. & Ahonen, H.-M. (2021). Who Is Paying for Carbon Dioxide Removal? Designing Policy Instruments for Mobilizing Negative Emissions Technologies. *Frontiers in Climate*, 3.

Hughes, T. P., Kerry, J. T., Connolly, S. R., Baird, A. H., Eakin, C. M., Heron, S. F., Hoey, A. S., Hoogenboom, M. O., Jacobson, M., Liu, G., Pratchett, M. S., Skirving, W. & Torda, G. (2019). Ecological memory modifies the cumulative impact of recurrent climate extremes. *Nature Climate Change*, 9(1), 40–43.

IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Cambridge University Press.

IPCC. (2021a). Annex VII: Glossary. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang,

K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *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.

IPCC. (2021b). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *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.

IPCC. (2021c). Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *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.

IPCC. (2022a). Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Eds.), *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.

IPCC. (2022b). Summary for Policymakers. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Eds.), *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.

Jackson, R. B., Abernethy, S., Canadell, J. G., Cargnello, M., Davis, S. J., Féron, S., Fuss, S., Heyer, A. J., Hong, C., Jones, C. D., Damon Matthews, H., O'Connor, F. M., Pisciotta, M., Rhoda, H. M., de Richter, R., Solomon, E. I., Wilcox, J. L. & Zickfeld, K. (2021). Atmospheric methane removal: a research agenda. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2210), 20200454.

Jansen, M., Beiter, P., Riepin, I., Müsgens, F., Guajardo-Fajardo, V. J., Staffell, I., Bulder, B. & Kitzing, L. (2022). Policy choices and outcomes for offshore wind auctions globally. *Energy Policy*(167), 113000.

Jenkins, S., Mitchell-Larson, E., Ives, M. C., Haszeldine, S. & Allen, M. (2021). Upstream decarbonization through a carbon takeback obligation: An affordable backstop climate policy. *Joule*, 5(11), 2777–2796.

KNMI. (2023). KNMI '23-klimaatscenario's voor Nederland.

Koop, K., Jorna, N. & Croezen, H. (2021). Nationale CO₂-opslagbehoefte tot 2035. Een inventarisatie van de CO₂-afvang en opslag (CCS) in Nederland. Royal HaskoningDHV.

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., Steinhäuser, J., Vaughan, N. E., Smith, H. B. & Minx, J. C. (2024a). The carbon dioxide removal gap. *Nature Climate Change*, 1–8.

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., Steinhäuser, J., Vaughan,

N. E., Smith, H. B. & Minx, J. C. (2024b). The Carbon Dioxide Removal Gap dataset.

Lamboll, R., Nicholls, Z., Smith, C., Kikstra, J., Byers, E. & Rogelj, J. (2023). Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets. *Nature Climate Change*, 13(12), 1360–1367.

Lauder, A. R., Enting, I. G., Carter, J. O., Clisby, N., Cowie, A. L., Henry, B. K. & Raupach, M. R. (2013). Offsetting methane emissions — An alternative to emission equivalence metrics. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, 419–429.

Lenton, T. M., Armstrong McKay, D. I., Loriani, S., Abrams, J. F., Lade, S. J., Donges, J. F., Milkoreit, M., Powell, T., Smith, S. R., Zimm, C., Buxton, J. E., Bailey, E., Laybourn, L., Ghadiali, A. & Dyke, J. G. (2023). The Global Tipping Points Report 2023. Exeter, UK. University of Exeter.

Lesschen, J. P., Hendriks, C., Slier, T., Porre, R., Velthof, G. & Rietra, R. (2021). De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw. Wageningen, Wageningen University Research.

Lundberg, L. & Fridahl, M. (2022). The missing piece in policy for carbon dioxide removal: reverse auctions as an interim solution. *Discover Energy*, 2(1), 3.

Lyngfelt, A., Fridahl, M. & Haszeldine, S. (2024). FinanceForFuture: Enforcing a CO₂ emitter liability using atmospheric CO₂ removal deposits (ACORDs) to finance future negative emissions. *Energy Research & Social Science*, 107, 103356.

Matthews, H. D., Zickfeld, K., Koch, A. & Luers, A. (2023). Accounting for the climate benefit of temporary carbon storage in nature. *Nature Communications*, 14(1).

McLaren, D. P., Tyfield, D. P., Willis, R., Szerszynski, B. & Markusson, N. O. (2019). Beyond "Net-Zero": A Case for Separate Targets for Emissions Reduction and Negative Emissions. *Frontiers in Climate*, 1.

Meinshausen, M. & Nicholls, Z. (2022). GWP* is a model, not a metric. *Environmental Research Letters*, 17(4), 041002.

Meyer-Ohlendorf, N. (2023). Making Carbon Removals a Real Climate Solution. How to integrate carbon removals into EU Climate Policies. Berlin, Ecologic Institute.

Meyer-Ohlendorf, N., Kocher, D., Gores, S. & Graichen, J. (2023). EU 2040 Climate Target and Framework: The Role of Carbon Removals. Berlin, Ecologic Institute.

Minister voor Klimaat en Energie & Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat. (2022). Kamerbrief over beleidsinzet biograndstoffen.

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). COP28: Nederland en andere EU-landen doen voorstel tegen greenwashing op vrijwillige koolstofmarkten.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. (2024). Joint Statement on a European Sustainable Carbon Policy Package.

Mulder, M. (2024). Verkenning van de marktordening voor Carbon Capture and Storage. Een onderzoek op verzoek van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Groningen, Centre for Energy Business and Economics Research.

NEGEM. (2022). Literature assessment of ocean-based NETPs regarding potentials, impacts and trade-offs. NEGEM.

NEGEM. (2024). Factsheet Biochar.

Nemet, G. F., Callaghan, M. W., Creutzig, F., Fuss, S., Hartmann, J., Hilaire, J., Lamb, W. F., Minx, J. C., Rogers, S. & Smith, P. (2018). Negative emissions—Part 3: Innovation and upscaling. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063003.

California Senate (2024). Net zero greenhouse gas emissions goal: carbon dioxide removal: regulations, SB308.

Netbeheer Nederland. (2023). Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050. Den Haag, Netbeheer Nederland.

Oxera. (2022). Market design for negative emissions in the UK ETS. Oxera.

PBL. (2023). Balans van de Leefomgeving 2023. Toekomstbestendig kiezen, rechtvaardig verdelen. Den Haag, Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL. (2024a). Beschikbaarheid biograndstoffen in Nederland en de Europese Unie. Notitie bij studie Trajectverkenning Klimaatneutraal Nederland 2050. Den Haag, Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL. (2024b). Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. Trajecten naar een klimaatneutrale samenleving voor Nederland in 2050. Den Haag, Planbureau voor de Leefomgeving.

PBL. (2024c). Wat zijn rechtvaardige en haalbare klimaatdoelen voor Nederland? Den Haag, Planbureau voor de Leefomgeving.

PVV, VVD, NSC & BBB. (2024). HOOP, LEF ENTROTS - Hoofdlijnenakkoord 2024 - 2028.

Rickels, W., Fridahl, M., Rothenstein, R. & Schenuit, F. (2024). Build Carbon Removal Reserve to Secure Future of EU Emissions Trading.

Rickels, W., Proelß, A., Geden, O., Burhenne, J. & Fridahl, M. (2021). Integrating Carbon Dioxide Removal Into European Emissions Trading. *Frontiers in Climate*, 3, 690023.

Rueda, O., Mogollón, J. M., Tukker, A. & Scherer, L. (2021). Negative-emissions technology portfolios to meet the 1.5 °C target. *Global Environmental Change*, 67, 102238.

RVO. (2024a). Demonstratie Energie- en Klimaatinnovatie (DEL+). Geraadpleegd op 21-06-2024.

RVO. (2024b). Eco-activiteiten, punten en waarde 2024. Geraadpleegd op 21-06-2024

RVO. (2024c). TSE Industrie studies. Geraadpleegd op 21-06-2024.

RWE. (2022). RWE lanceert project BECCUS voor grootschalige afvang en opslag van CO₂.

Sandalow, D., Aines, R., Friedmann, J., McCormick, C. & Sanchez, D. (2020). Biomass Carbon Removal and Storage (BiCRS) Roadmap, LLNL-TR-815200.

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. (2024). The State of Carbon Dioxide Removal 2024 - 2nd Edition. The State of Carbon Dioxide Removal.

Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat & Minister van Economische Zaken en Klimaat. (2020). Kamerbrief over duurzaamheidskader biograndstoffen.

Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat & Minister voor Klimaat en Energie. (2023). Kamerbrief stand van zaken implementatie duurzaamheidscriteria biograndstoffen in regelgeving.

Strefler, J., Bauer, N., Humpenöder, F., Klein, D., Popp, A. & Kriegler, E. (2021). Carbon dioxide removal technologies are not born equal. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074021.

Strefler, J., Bauer, N., Kriegler, E., Popp, A., Giannousakis, A. & Edenhofer, O. (2018). Between Scylla and Charybdis: Delayed mitigation narrows the passage between large-scale CDR and high costs. *Environmental Research Letters*, 13(4), 044015.

Stuart-Smith, R. F., Rajamani, L., Rogelj, J. & Wetzer, T. (2023). Legal limits to the use of CO₂ removal. *Science*, 382(6672), 772–774.

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>

Terhaar, J., Frölicher, T. & Joos, F. (2022). Observation-constrained estimates of the global ocean carbon sink from Earth system models. *Biogeosciences*, 19, 4431–4457.

Theuer, S. L. H., Doda, B., Kellner, K. & Acworth, W. (2021). Emissions Trading Systems and Net Zero: Trading Removals. Berlin, ICAP.

TNO. (2022). Een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland. Den Haag, TNO.

TNO. (2024). Toekomst van het Nederlandse energiesysteem. Ontwikkeling energieintensieve industrie bepalend voor de energietransitie. Den Haag, TNO.

TNO & EBN. (2018). Ondergrondse Opslag in Nederland. Technische verkenning. Utrecht, TNO.

UNEP. (2023). Emissions Gap Report 2023. Nairobi, United Nations Environment Programme.

van der Brugge, R. & de Winter, R. (2024). Deltascenario's 2024—Zicht op Water in Nederland. Delft, Deltares.

van der Woude, A. M., Peters, W., Joetzjer, E., Lafont, S., Koren, G., Ciais, P., Ramonet, M., Xu, Y., Bastos, A., Botía, S., Sitch, S., de Kok, R., Kneuer, T., Kubistin, D., Jacotot, A., Loubet, B., Herig-Coimbra, P.-H., Loustau, D. & Lujikx, I. T. (2023). Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in Europe. *Nature Communications*, 14(1), 6218.

Werner, C., Braun, J., Lucht, W. & Gerten, D. (2023). Report on synoptic assessment of global theoretical NETP potentials. NEGEM.

WKR. (2023). Met iedereen de transities in. Richtinggevende keuzes voor een klimaatneutraal en klimaatbestendig Nederland (WKR-rapport 001). Den Haag, Wetenschappelijke Klimaatraad.

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

Wu, C., Coffield, S., Goulden, M., Randerson, J., Trugman, A. & Anderegg, W. (2023). Uncertainty in US forest carbon storage potential due to climate risks. *Nature Geoscience*.

Wudu, K., Abegaz, A., Ayele, L. & Ybabe, M. (2023). The impacts of climate change on biodiversity loss and its remedial measures using nature based conservation approach: a global perspective. *Biodiversity and Conservation*, 32, 1–21.



Colofon

De lucht klaren? *Advies over uitgangspunten en beleid voor sturing op CO₂-verwijdering uit de atmosfeer* is een advies aan de regering uit naam van de voltallige WKR.

WKR-rapport 002

De Wetenschappelijke Klimaatraad is ingesteld in november 2022. De WKR adviseert regering en parlement over de ontwikkeling van een klimaatneutrale en klimaatbestendige samenleving, op basis van brede wetenschappelijke inzichten en met oog voor andere maatschappelijke opgaven.

De Raad is als volgt samengesteld: prof. dr.ing. J.W. (Jan Willem) Erisman (voorzitter), prof.dr. H.C. (Heleen) de Coninck (plaatsvervangend voorzitter), dr. S. (Sanne) Akerboom, prof.dr. K. (Kornelis) Blok, prof.dr. M. (Marjolijn) Haasnoot, prof.dr. M. (Machiel) Mulder, prof.dr. W. (Wouter) Peters, dr. W.D. (Wieke) Pot, prof.dr. E.M. (Linda) Steg, prof. dr.ir. B. (Behnam) Taebi, dr. R.W. (Ruud) van den Brink (secretaris-directeur)

Voor de totstandkoming van dit advies is een expertmeeting belegd waaraan de volgende mensen hebben deelgenomen: Menno van Benthem (Ecorys), Holly Jean Buck (University at Buffalo), Mathias Fridahl (Linköping University), Conor Hickey (University of Oxford), Oliver Geden (Stiftung Wissenschaft und Politik), Bettina Kampman (CE Delft), Kiane de Kleijne (Eindhoven University of Technology), Margriet Kuijper (Independent consultant), Kenneth Möllersten (KTH Royal Institute of Technology en IVL Swedish Environmental Research Institute), Felix Schenuit (Stiftung

Wissenschaft und Politik), Samantha Eleanor Tanzer (TU Delft), Paul Zakkour (Carbon Counts). Ook is gesproken met beleidsmakers op het gebied van CO₂-verwijdering van de ministeries van Economische Zaken en Klimaat, Landbouw, Natuurbeheer en Voedselkwaliteit, en Infrastructuur en Waterstaat, en van de Europese Commissie. Dit advies weerspiegelt niet noodzakelijkerwijs de standpunten van geraadpleegde experts.

Ontwerp: OSAGE
Figuren: Studio TERP
Tekstredactie: Leene Communicatie

Foto's:
Omslag en colofon: Mischa Keijser
pagina 11: Bart van Vliet
pagina 19: Sean Roos
pagina 22: Victor
pagina 27: Ivo Vrancken
pagina 31: Mayabuns
pagina 33: Karsten Würth

© 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: 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.

