

Visie op koolstof- verwijdering

Een overzicht van de verschillende methodes en een scenario voor de ontwikkeling van koolstofverwijdering in Nederland



OKTOBER 2024

NATUUR
& MILIEU

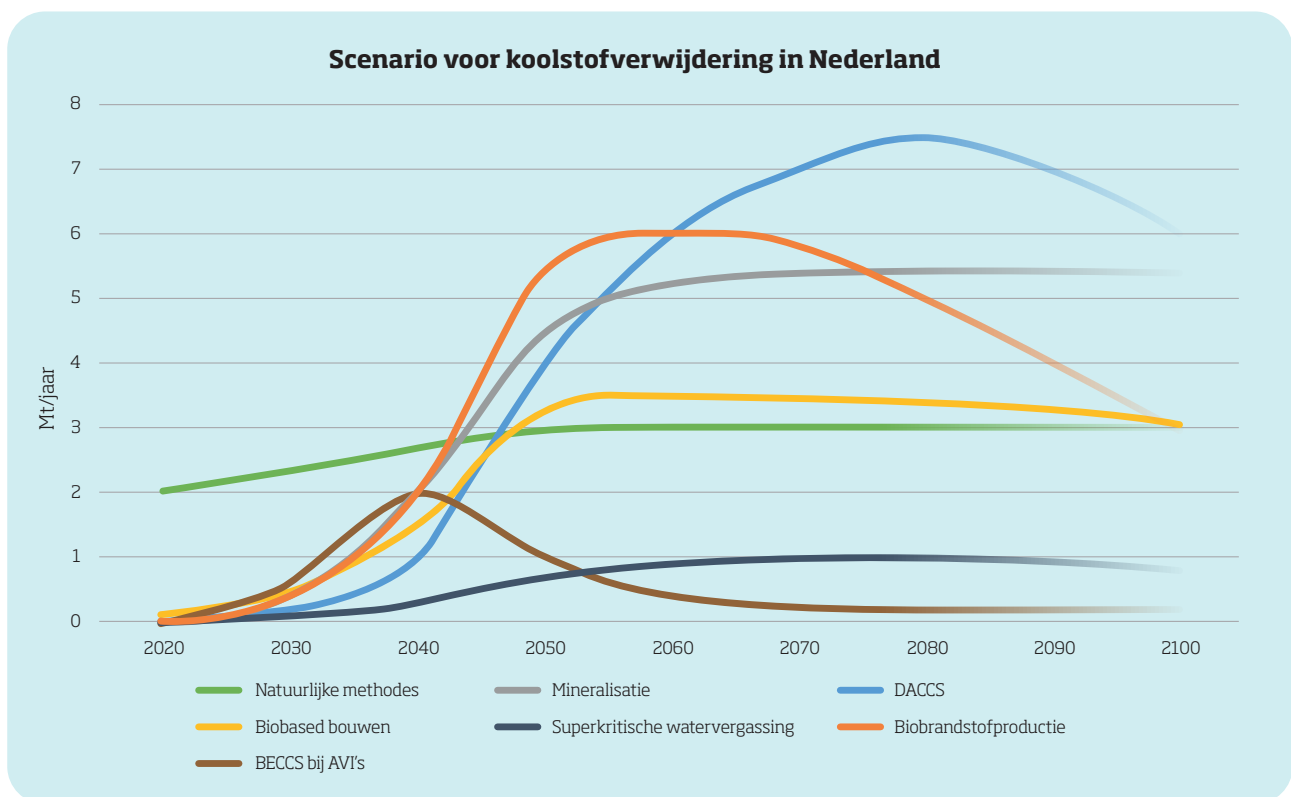
Samenvatting

Koolstofverwijdering - dat wil zeggen het actief uit de atmosfeer halen en langdurig opslaan van CO₂ - is noodzakelijk om de klimaatdoelen te halen. De komende jaren zal het beleid ontwikkeld moeten worden om te zorgen dat de verschillende methodes die hiervoor kunnen worden ingezet, van de grond kunnen komen. De Rijksoverheid heeft hier voor een groot deel de regie in. Natuur & Milieu heeft een aantal basisprincipes opgesteld die van belang zijn bij het opstellen van dit beleid:

- Maximale inzet op het verminderen van uitstoot blijft nodig, ook mét koolstofverwijdering
- Voor emissiereductie en koolstofverwijdering zijn aparte doelstellingen nodig
- Richt het koolstofverwijderingsbeleid alleen op methodes die effectief zijn voor het klimaat
- Bij het bepalen van de klimaatimpact moet de hele keten worden bekeken en meegerekend
- Beoordeel maatregelen voor koolstofverwijdering op hun totale impact op mens en milieu

De verschillende methodes kennen allemaal hun voor- en nadelen. Daarnaast zullen ze op verschillende momenten in de tijd ontwikkeld kunnen worden omdat dan bijvoorbeeld de techniek ver genoeg ontwikkeld is, er voldoende hernieuwbare energie beschikbaar is, of aan andere randvoorwaarden is voldaan.

Op basis van de kenmerken van de verschillende methodes stelde Natuur & Milieu een indicatief scenario op voor de ontwikkeling van koolstofverwijdering in Nederland. Eén van de uitgangspunten voor het scenario is dat koolstofverwijdering moet passen binnen de planetaire grenzen, vertaald naar Nederland. Dit betekent dat er rekening gehouden is met de schaarste van biograndstoffen, ruimte en energie. Dit scenario is weergegeven in de onderstaande figuur. Met gerichte inzet op een aantal verschillende methodes is het mogelijk om op de benodigde schaal koolstof uit de atmosfeer te verwijderen.



Op dit moment komt koolstofverwijdering bijna volledig van natuurlijke methodes. Dit is een combinatie van herbebossing en koolstofopslag in de bodem. Opslag in mariene ecosystemen speelt nu nog geen rol. De potentie van natuurlijke methodes kan nog iets worden vergroot. Tegelijkertijd biedt dit kansen voor de verlaging van restemissies. Op korte termijn kunnen afvalverbrandingsinstallaties benut worden om de eerste megatonnen koolstof permanent te verwijderen. Met behulp van biobased bouwen kan ook al snel koolstofverwijdering gerealiseerd worden. Hiermee kan de gebouwde omgeving veranderen van een bron van uitstoot naar een bron van opslag. Op de iets langere termijn kunnen mineralisatie en biobrandstofproductie met CCS een grote bijdrage gaan leveren. Vanwege het gebruik van vergelijkbare biograndstoffen is het hierbij belangrijk om te borgen dat biobrandstofproductie niet ten koste gaat van biobased bouwen. Daarnaast moet voorkomen worden dat er een lock-in optreedt van biobrandstoffen. De inzet van biograndstoffen voor biobased bouwen is een nog hoogwaardigere toepassing, die daarom voorrang verdient. Deze concurrentie speelt niet bij superkritische watervergassing, aangezien hierbij gebruik wordt gemaakt van natte (afval)stromen. Het is daarom de moeite waard deze methode verder te ontwikkelen. Tot slot heeft DACCS op de lange termijn de hoogste potentie, aangezien deze voornamelijk afhankelijk is van de beschikbaarheid van duurzame energie. Dit is veel minder beperkend dan de beschikbaarheid van ruimte en duurzame biograndstoffen. Op de lange termijn, richting 2100, zal de ondergrondse opslagcapaciteit beperkend worden voor de methodes die afhankelijk zijn van CCS voor de vastlegging.

Om te zorgen dat deze methodes van de grond komen is het noodzakelijk dat de overheid doormiddel van gericht beleid gaat sturen in de ontwikkeling van koolstofverwijdering. Natuur & Milieu doet hiervoor een aantal beleidsaanbevelingen op Europees niveau en aan de Rijksoverheid. Het zijn:

Europees beleid:

- Stel een doel voor koolstofverwijdering;
- Ontwikkel een systeem voor het monitoren en verifiëren van koolstofverwijdering;
- Ontwikkel een Europese markt voor koolstofverwijdering.

Nationaal beleid

- Ontwikkel een visie op koolstofverwijdering;
- Stel een nationaal doel voor koolstofverwijdering als invulling van het Europese doel;
 - Stimuleer de gewenste koolstofverwijderingsmethodes met gerichte maatregelen, te weten:
 - Stimuleer biobased bouwen. Bijvoorbeeld door het opnemen van een verplichting voor het gebruik van biobased materialen in het Besluit Bouwwerken Leefomgeving, de Milieuprestatie Gebouwen en de Grond-, Weg- en Waterbouwaanbestedingen van de Rijksoverheid. Daarnaast kan het Rijk een voortrekkersrol vervullen door een oplopend aandeel standaard biobased in te kopen;
 - Stimuleer vastlegging van koolstof in mariene ecosystemen door het uitbreiden van gebieden op de Noordzee met bodemrust;
 - Stimuleer vastlegging van koolstof in bos en bodem door het uitbreiden van het Nederlandse bosareaal, en door alternatieve landbouwmethodes die leiden tot koolstofvastlegging in de bodem, te belonen;
 - Koppel een afvangverplichting aan subsidie voor geavanceerde biobrandstoffabrieken;
 - Realiseer CO₂-afvang en -opslag bij superkritische watervergassing (groengasproductie) en biochemie door het op te nemen in de SDE;
 - Ondersteun DACCS innovaties en ontwikkel een kader dat de inzet van overschotten duurzame elektriciteit voor DACCS bevordert. Bijvoorbeeld door het mee te nemen bij de ontwikkeling van windparken op zee.
- Organiseer vastleggingsveilingen.

In het rapport worden deze beleidsaanbevelingen verder toegelicht.

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1. Voorwoord	5
2. Inleiding	6
3. Basisprincipes koolstofverwijdering	8
4. Methodes voor koolstofverwijdering	10
1. Overzicht methodes	11
2. Beschrijving methodes	11
3. Keuze methodes	13
4. Beoordeling methodes	13
5. Scenario voor koolstofverwijdering in Nederland	14
6. Conclusies & beleidsaanbevelingen	19
Bijlages	21
Bijlage 1: Nadere toelichting beoordelingsfactoren	21
Bijlage 2: Analyse methodes	23
2.1 Methodes op basis van biograndstoffen	23
2.2 Methodes die vooral energie vereisen	27
2.3 Methodes die vooral ruimte vereisen	29
Bijlage 3: Analyse kosten	32
Colofon	34

1. Voorwoord

Nederland wil in 2050 klimaatneutraal zijn.¹ Om dit te bereiken, moet de uitstoot van broeikasgassen drastisch worden verlaagd. Dit alleen zal echter niet voldoende zijn om de doelstelling te halen. Zelfs als volledig wordt gestopt met het gebruik van fossiele brand- en grondstoffen vinden er naar verwachting restemissies plaats, bijvoorbeeld de uitstoot van methaan vanuit de veeteelt. Om op netto nul uitstoot te komen, moet actief CO₂ uit de atmosfeer worden gehaald. Methodes om dit voor elkaar te krijgen, vallen onder de term 'koolstofverwijdering'.

Hoeveel koolstofverwijdering nodig is, hangt van twee zaken af: de snelheid waarmee de uitstoot omlaag wordt gebracht, en de hoogte van de restemissies. Ondanks de doelstelling van klimaatneutraliteit verwachten verschillende sectoren ook in 2050 nog fossiele brand- of grondstoffen te gebruiken. Hoe hoger de emissies hiervan, hoe meer koolstof er weer uit de atmosfeer verwijderd moet worden. Daarnaast is netto-nul in 2050 niet het einddoel. Op lange termijn moet het streven zijn om tot netto negatieve emissies te komen en daarmee de concentratie van CO₂ in de atmosfeer te verlagen. Hiervoor blijft ook lang na 2050 koolstofverwijdering nodig.

Het belang van koolstofverwijdering wordt steeds duidelijker en het onderwerp krijgt steeds meer aandacht.² Specifiek voor Nederland zijn de laatste jaren een aantal studies uitgevoerd. In 2018 verkende het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) de Nederlandse potentie van verschillende methodes,³ gevolgd door een verkenning van de behoefte naar een onderzoeksprogramma door Royal HaskoningDHV in 2022.⁴ CE Delft bouwde hierop voort in 2023, in een studie die naast het aanbod ook de behoefte aan koolstofverwijdering en de beleidsimplicaties onderzocht.⁵ In 2024 stelde de Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR) een adviesrapport op, gericht op het vormgeven van koolstofverwijderingsbeleid.⁶ Tot slot is ook het afwegingskader uit het advies van de Sociaal-Economische Raad (SER) 'Biomassa in balans'⁷ relevant, aangezien veel methodes voor koolstofverwijdering gebruikmaken van biograndstoffen. Vanwege de beperkte beschikbaarheid van duurzame biograndstoffen is hoogwaardige toepassing hiervan essentieel. Koolstofverwijdering verandert hier niks aan. Met hoogwaardige inzet en circulaire maatregelen kan koolstof zo lang mogelijk nuttig vastgelegd worden in producten. Aan het eind van de levensduur is laagwaardige toepassing in de vorm van verbranding alsnog mogelijk, in combinatie met afvang en opslag.

Op het moment van schrijven van dit rapport wordt door het kabinet, op verzoek van de Tweede Kamer, gewerkt aan de Routekaart Koolstofverwijdering. De publicatie hiervan is naar verwachting begin 2025.⁸ Het beleid rond koolstofverwijdering gaat grote gevolgen hebben, niet alleen voor het klimaat. Het is daarom essentieel om hierin goede afwegingen te maken. In opdracht van Natuur & Milieu deed Ecorys in 2023 een verkenning van de bredere impact van methodes.⁹ Op basis van deze en verschillende andere studies, geeft Natuur & Milieu in dit rapport haar visie op koolstofverwijdering.

1) <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/voortgang-klimaatdoelen>

2) Zie o.a. 'The State of Carbon Dioxide Removal': <https://www.stateofcdr.org>

3) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf
In 2022 is een erratum doorgevoerd waardoor dit het publicatiejaar is. De inhoud van het rapport uit 2018 is echter ongewijzigd gebleven, op één tekstuele aanpassing na.

4) Royal HaskoningDHV (2022): Quickscan behoefte naar een onderzoeksprogramma gericht op negatieve CO₂-emissie. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2022/03/15/rapportage-quickscan-negatieve-emissie>

5) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

6) WKR (2024): De lucht klaren? <https://www.wkr.nl/documenten/rapporten/2024/07/10/adviesrapport-de-lucht-klaren>

7) <https://www.ser.nl/-/media/ser/downloads/adviezen/2020/biomassa-in-balans.pdf>

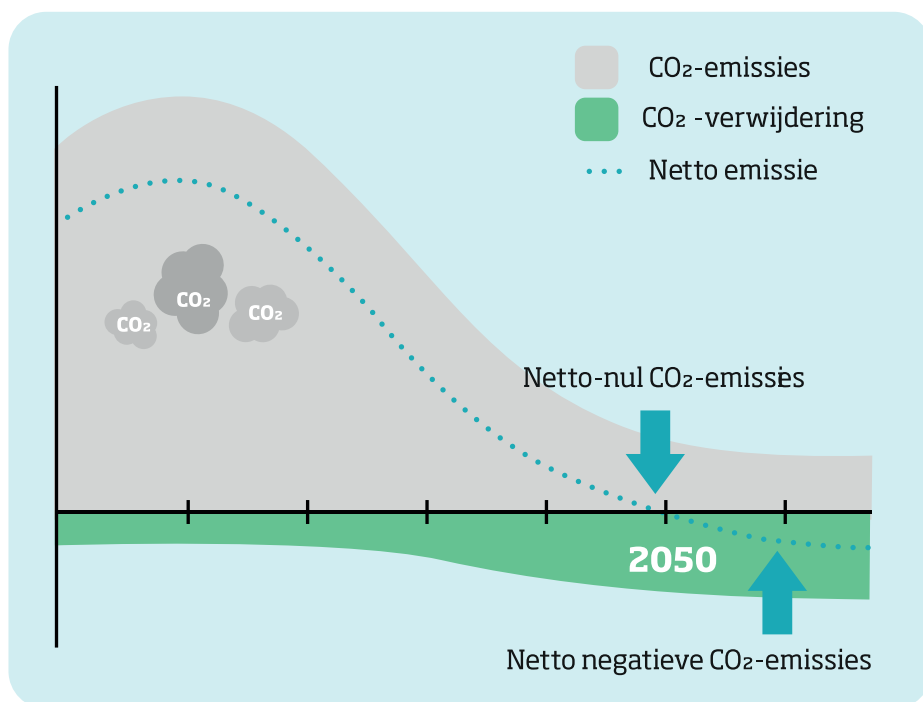
8) Zie: <https://open.overheid.nl/documenten/81f06223-45e2-4c62-92fc-c6799efcd4ff/file>

9) Ecorys (2023): Methodes voor CO₂-verwijdering. <https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Ecorys-Rapport-Methodes-voor-CO2-verwijdering.pdf>

2. Inleiding

Er bestaan diverse manieren om CO₂ af te vangen, op te slaan en/of te gebruiken. Rondom deze koolstofmaatregelen worden veel verschillende termen en definities gebruikt, zoals CCS, CCU, CCUS en negatieve emissies. Dit rapport richt zich op koolstofverwijdering (ook wel CO₂-verwijdering genoemd). Hiervan is sprake als er actief CO₂ uit de atmosfeer wordt gehaald en langdurig wordt opgeslagen. Over de minimale vastleggingsduur is discussie, maar in veel gevallen wordt uitgegaan van minimaal honderd jaar.¹⁰ Koolstofverwijdering wijkt dus duidelijk af van andere klimaatmaatregelen, die gericht zijn op het verminderen of voorkomen van uitstoot naar de atmosfeer. Bij koolstofverwijdering gaat het om het uit de atmosfeer halen van al uitgestoten CO₂, waarmee de CO₂-concentratie in de atmosfeer omlaag kan worden gebracht. Onderdeel van de definitie is dat het om een actief proces gaat. Er zijn natuurlijke processen die zonder menselijk ingrijpen CO₂ uit de lucht halen. Bij koolstofverwijdering gaat het om processen die door menselijk handelen in gang worden gezet of versterkt.

De afkorting CDR komt vaak terug als het om koolstofverwijdering gaat: Carbon Dioxide Removal. Ook de term 'negatieve emissies' wordt vaak gebruikt. Officieel is dit niet correct: er is sprake van netto negatieve emissies als de hoeveelheid CO₂-verwijdering binnen een land, regio of sector groter is dan de CO₂-uitstoot. De onderstaande afbeelding maakt dit duidelijker.



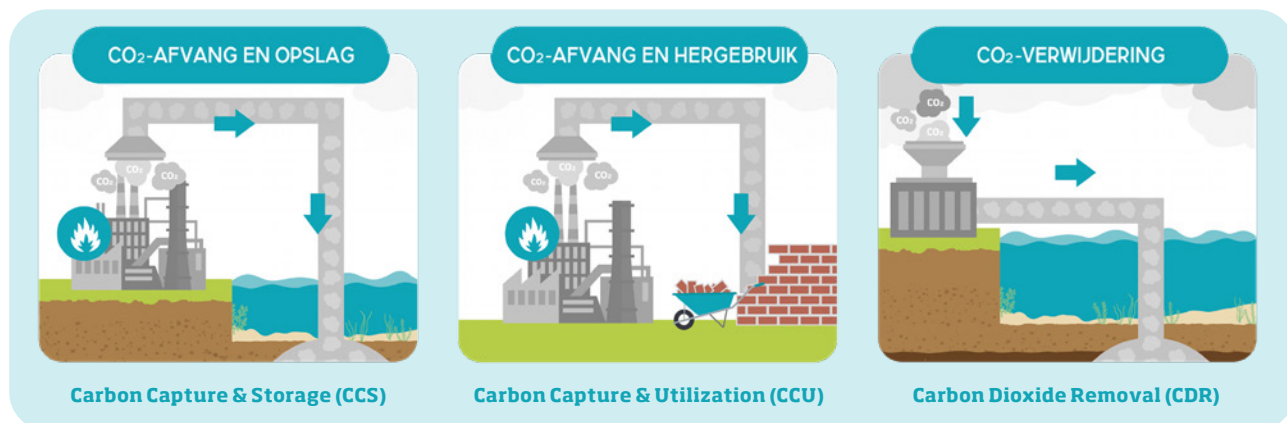
Naast CO₂-verwijdering of CDR wordt vaak gesproken over de koolstofmaatregelen CCS (Carbon Capture & Storage, ofwel CO₂-afvang en opslag) en CCU (Carbon Capture & Utilization, ofwel CO₂-afvang en hergebruik). Om het onderscheid duidelijk te maken, worden ze hieronder kort besproken.

Bij CCS gaat het om het afvangen van CO₂, bijvoorbeeld bij industrieën, om deze vervolgens te transporteren en permanent op te slaan. CCS wordt op dit moment vooral ingezet om CO₂ af te vangen uit fossiele bronnen (kolen, olie en aardgas) en daarmee uitstoot te voorkomen. Het is echter ook mogelijk om met behulp van CCS koolstofverwijdering te realiseren. Dit kan als de CO₂ uit een biogene bron komt (bio-energy + CCS, ofwel BECCS) of rechtstreeks uit de atmosfeer (direct air carbon capture and sequestration, ofwel DACCS).

¹⁰ Zie bijvoorbeeld: CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid.
https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

Bij CCU gaat het om het afvangen van CO₂ om deze vervolgens te gebruiken. Het kan bijvoorbeeld worden benut in kassen, worden verwerkt tot producten of als basis dienen voor synthetische brandstoffen. De klimaatimpact van CCU verschilt enorm, afhankelijk van: de bron van de CO₂ (fossiel, biogeen of atmosferisch); de oorsprong van de benodigde energie (hernieuwbaar of fossiel); en de bestemming (komt de CO₂ na gebruik direct weer in de atmosfeer of wordt deze voor langere tijd vastgelegd in producten?). Ook speelt mee welk productieproces vervangen wordt door het CCU-proces en hoeveel uitstoot daarmee vermeden kan worden.

In onderstaande figuur zijn de drie belangrijkste koolstofmaatregelen visueel weergegeven.



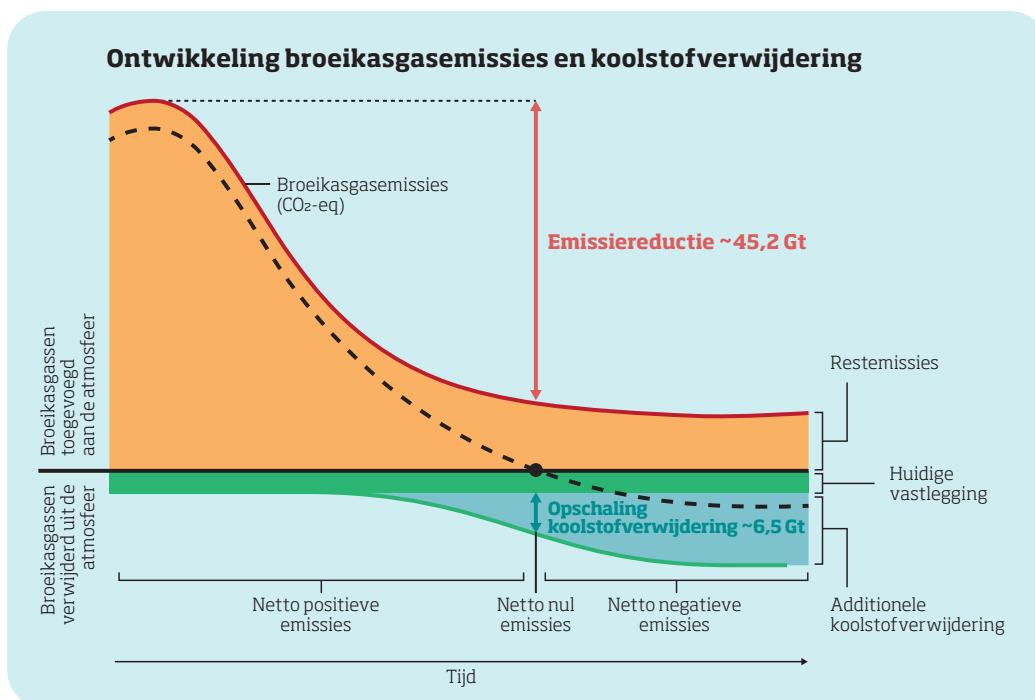
3. Basisprincipes koolstofverwijdering

Verderop in dit rapport worden verschillende methodes voor koolstofverwijdering besproken. Een aantal basisprincipes geldt echter altijd met betrekking tot de inzet van en het beleid voor koolstofverwijdering, ongeacht de gebruikte methode.

1. Relatie koolstofverwijdering - emissiereductie

- **Maximale inzet op het verminderen van uitstoot blijft nodig, ook mét koolstofverwijdering.** Koolstofverwijdering zonder maximale emissiereductie is dweilen met de kraan open. De uitstoot nu niet beperken en hopen op grootschalige verwijdering in de toekomst, is een extreem risicovolle strategie. Bovendien schuiven we zo onze huidige problemen door naar de volgende generatie. Daarnaast is er geen perfecte methode van koolstofverwijdering. Alle methodes hebben nadelen, er zijn nog veel onzekerheden en de schaal waarop methodes toegepast kunnen worden, is beperkt.
- **Voor emissiereductie en koolstofverwijdering zijn aparte doelstellingen nodig.** Om te zorgen voor een maximale inzet op emissiereductie, is het belangrijk hiervoor een aparte doelstelling te hebben. Dit voorkomt dat minder emissiereductie gecompenseerd kan worden door in te zetten op koolstofverwijdering. Een specifieke doelstelling voor koolstofverwijdering kan hier bovenop komen.

Onderstaande figuur illustreert de noodzaak van maximale inzet op emissiereductie. De huidige wereldwijde emissie van broeikasgassen is 53,9 Gt CO₂-equivalenten.¹¹ Ook vindt er al op beperkte schaal koolstofverwijdering plaats, dit is circa 2,2 Gt per jaar. Naar schatting kan dit op een duurzame manier opgeschaald worden met circa 6,5 Gt in 2050.¹² Om dat jaar op netto-nul uit te komen, zal een emissiereductie van 45,2 Gt plaats moeten vinden. Maximale emissiereductie zonder opschaling van verwijdering brengt ons dus al dichtbij het doel, terwijl dit bij grootschalige verwijdering zonder emissiereductie bij lange na niet het geval is. Bovendien is niet de uitstoot maar de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer bepalend voor de mate van opwarming. Scenario's waarbij op korte termijn minder emissiereductie plaatsvindt en op lange termijn meer verwijdering, zorgen voor hogere concentraties dan scenario's met maximale emissiereductie op korte termijn.



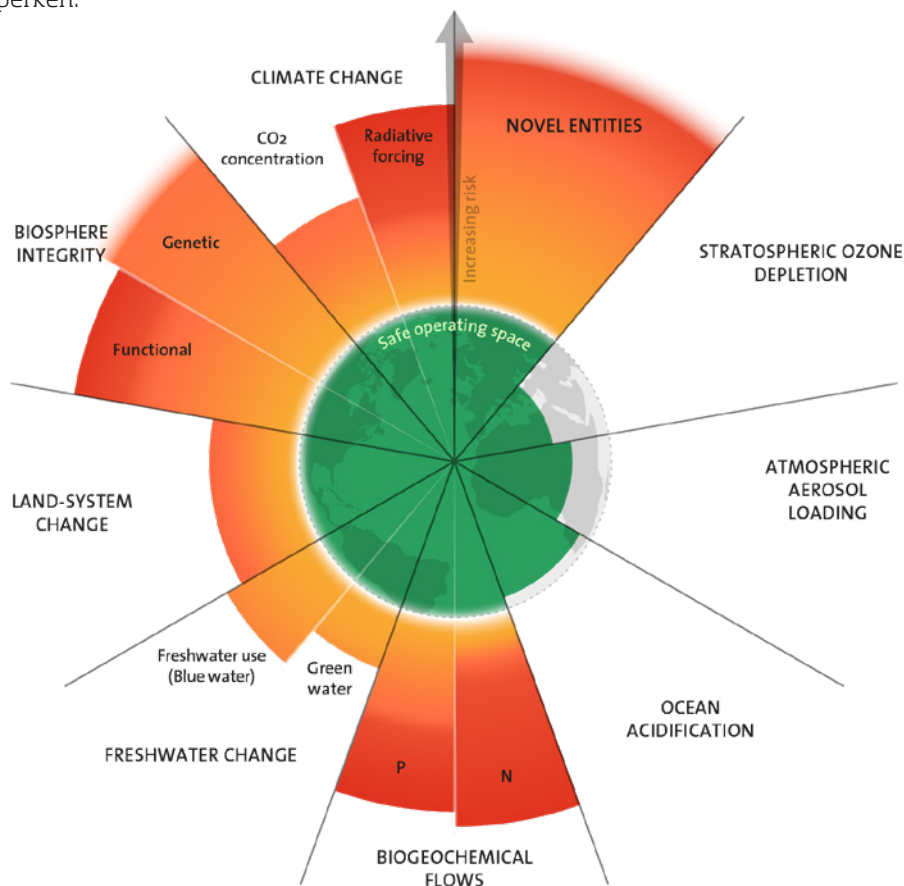
Illustratie ontwikkeling broeikasgasemissies en koolstofverwijdering. Op basis van NPR (2022); <https://www.npr.org/2022/05/02/1095097566/carbon-dioxide-removal-climate-emissions> (bewerking Natuur & Milieu)

11) <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> Het getal is van 2022, de meest recente waarde.

12) The State of Carbon Dioxide Removal (2024); <https://www.stateofcdr.org>

2. Effectiviteit en milieu-impact van koolstofverwijdering

- **Richt het koolstofverwijderingsbeleid alleen op methodes die effectief zijn voor het klimaat.**
Om effectief te zijn voor het klimaat, moet CO₂ uit de atmosfeer of uit biograndstoffen voor langere tijd worden vastgelegd. Hoe lang precies hangt af van veel factoren. Bijvoorbeeld hoe snel we in staat zijn onze CO₂-emissie tot (bijna) 0 te reduceren. In het algemeen heeft langere vastlegging wel de voorkeur boven kortere, meer tijdelijke vastlegging. Een goede vuistregel voor de minimale duur is honderd jaar. Methodes die gebruikmaken van geologische opslag (CCS) en mineralisatie vallen hier in de regel sowieso onder. Biobased bouwen en vastlegging in de ondiepe bodem, bos en mariene ecosystemen kunnen bij goed beheer van de grondstofstromen en ecosystemen ook voor meer dan honderd jaar koolstof vastleggen. Het vastleggen van koolstof in andere producten dan bouwmaterialen leidt in de regel niet tot een koolstofverwijdering voor honderd jaar of meer. De levensduur van de meeste producten is namelijk korter, en de producten eindigen vaak in de verbrandingsoven. Goede monitoring en verificatie van verwijdering is in alle gevallen noodzakelijk.
- **Bij het bepalen van de klimaatimpact moet de hele keten worden bekeken en meegerekend.**
Het doel van de methodes is CO₂ te verwijderen. Het is daarom essentieel om de CO₂-impact in de gehele keten in kaart te brengen. Denk hierbij aan het winnen van grondstoffen, de verwerking, het transport en eventueel het verwerken van afval. De ketenemissies dienen als basis voor het bepalen van de daadwerkelijke klimaatimpact.
- **Beoordeel maatregelen voor koolstofverwijdering op hun totale impact op mens en milieu.**
Binnen klimaatmaatregelen kan sprake zijn van een 'koolstoftunnelvisie', waarbij alleen gekeken wordt naar de CO₂-uitstoot. Klimaatverandering is echter slechts één van de planetaire grenzen waarbij we binnen de veilige leefruimte moeten blijven (zie figuur 1 hieronder). Ook maatregelen voor koolstofverwijdering kunnen een veel bredere impact hebben dan alleen op CO₂-uitstoot. Denk aan invloed op de lokale leefomgeving, lucht-, water- en bodemkwaliteit, landgebruik, biodiversiteit en werkgelegenheid. Maatregelen moeten beoordeeld worden op hun totale impact, waarbij het streven moet zijn waarde toe te voegen, niet slechts de schade te beperken.



Planetaire grenzen (2023). Bron: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>



4. Methodes voor koolstofverwijdering

Er bestaan diverse methodes om koolstof uit de atmosfeer te verwijderen. Een overzicht van methodes, inclusief beschrijving en analyse, is te vinden in bijlage 2. In dit rapport wordt specifiek gekeken naar mogelijkheden binnen Nederland. Hierbij wordt nadrukkelijk rekening gehouden met drie beperkende factoren: de beschikbaarheid van biograndstoffen, energie en ruimte.

In dit hoofdstuk zijn de methodes aan de hand van deze factoren ingedeeld. Hoewel soms meerdere factoren relevant zijn, is er voor elke methode altijd één van doorslaggevend belang voor de mate van inzet binnen Nederland. Aangezien duurzame biograndstoffen, duurzame energie en ruimte alle drie schaars zijn, is het cruciaal om goede afwegingen te maken tussen verschillende methodes voor koolstofverwijdering. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de inzet van biograndstoffen en energie voor andere beleidsdoeleinden, plus de ruimtelijke impact hiervan. Voor de inzet van biograndstoffen volgt dit rapport het afwegingskader uit het SER-advies 'Biomassa in balans'.¹³ Hoogwaardige toepassing als grondstof of in materialen gaat hierbij boven laagwaardige toepassingen zoals energieproductie via verbranding. Voor de beschikbaarheid van duurzame energie wordt uitgegaan van de huidige beleidsdoelen: een CO₂-vrij elektriciteitssysteem in 2035 en een volledig duurzaam energiesysteem in 2050.^{14,15} Voor het ruimtegebruik wordt gekeken naar de ruimtelijke impact in Nederland. Dit is bepalend voor de mate waarin methodes in Nederland kunnen worden toegepast. Uiteraard kunnen methodes ook in andere landen ruimtelijke impact hebben, vooral als het gaat om biograndstoffen die door Nederland worden geïmporteerd. Dit wordt niet direct meegenomen, maar komt terug in de afwegingen rond de inzet van biograndstoffen.

Naast de eerdergenoemde beperkingen speelt de capaciteit voor geologische CO₂-opslag ook een belangrijke rol in de toepassing van koolstofverwijdering. Hierop wordt in het volgende hoofdstuk ('Scenario voor koolstofverwijdering in Nederland') dieper ingegaan.

13) <https://www.ser.nl/-/media/ser/downloads/adviezen/2020/biomassa-in-balans.pdf>

14) https://www.eerstekamer.nl/behandeling/20231219/brief_van_de_minister_voor_k_e

15) <https://www.rijksoverheid.nl/actueel/nieuws/2023/07/03/kabinet-presenteert-strategie-voor-energiesysteem-van-de-toekomst>

1. Overzicht methodes

In het overzicht hieronder staan de methodes voor koolstofverwijdering die in dit rapport zijn meegenomen, gesorteerd aan de hand van de factoren biogrondstoffen, energie en ruimte. Beschrijvingen van deze methodes zijn te vinden op de volgende pagina.

Methodes op basis van biogrondstoffen

- BECCS bij kolencentrales, afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) of productie van hogetemperatuurwarmte
- Biobrandstofproductie met CCS
- Superkritische watervergassing met CCS
- Biochar
- Biobased bouwen¹⁶

Methodes die vooral energie vereisen

- DACCS
- Versnelde verwerking van mineralen

Methodes die vooral ruimte vereisen

- Duurzame (her)bebossing¹⁷
- Koolstofopslag in de bodem¹⁸
- Vastlegging in mariene ecosystemen

2. Beschrijving methodes

Bio-energie + CCS (BECCS)

(Bij kolencentrales, AVI's en hogetemperatuurwarmte)

BECCS is een veelgebruikte afkorting met verschillende betekenissen. In dit geval gaat het om bio-energie met Carbon Capture & Storage (CCS). Op dit moment wordt in kolencentrales steenkool verbrand om elektriciteit op te wekken. Wanneer deze centrales voorzien worden van een systeem voor het afvangen en opslaan van CO₂ (CCS) en overgaan op het verbranden van biogrondstoffen, kan er netto CO₂ uit de atmosfeer worden verwijderd. De CO₂ die bomen en gewassen tijdens hun leven hebben opgenomen, komt na verbranding niet terug in de atmosfeer, maar wordt permanent ondergronds opgeslagen.

Voor afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) voorzien van CCS geldt hetzelfde principe, maar alleen voor het biogene deel van het afval dat wordt verbrand.

Een andere vorm van bio-energie met CCS is het afvangen en opslaan van CO₂ dat vrijkomt bij het produceren van hogetemperatuurwarmte uit biomassa of biogas in de industrie. Op dit moment wordt in een groot deel van de behoefte aan hogetemperatuurwarmte voorzien met gasketels. Door aardgas te vervangen door biomassa of biogas, wordt de mogelijkheid gecreëerd om ook hier koolstof te verwijderen.

Biobrandstofproductie + CCS

Bij de productie van biobrandstoffen door middel van biomassavergassing komt een relatief pure stroom van CO₂ vrij. Deze CO₂ kan worden afgevangen en vervolgens permanent opgeslagen.

16) Vaak wordt gesproken over houtbouw, maar omdat naast hout gebruikgemaakt kan worden van diverse andere gewassen, wordt in dit rapport de bredere term 'biobased bouwen' aangehouden.

17) In dit rapport wordt specifiek gesproken over duurzame (her)bebossing. De impact van deze methode kan sterk positief tot sterk negatief zijn, afhankelijk van het type beplanting (monocultuur of diversiteit), de soorten, het beheer en de vroegere bestemming van het gebied. Bij duurzame (her)bebossing moet het streven zijn om een gezond ecosysteem te creëren waarin biodiversiteit wordt gestimuleerd en tegelijkertijd koolstof wordt opgeslagen. Stabiele ecosystemen zijn bovendien beter bestand tegen verstoringen als ziektes en brand, waardoor langdurige opslag beter gewaarborgd kan worden.

18) Deze categorie heeft in sommige gevallen overlap met (her)bebossing, aangezien bij aanplant van bomen zowel boven als onder de grond koolstofopslag plaatsvindt. Waar dit van toepassing is, worden deze methodes in dit rapport als één maatregel besproken.

Superkritische watervergassing (groengasproductie) + CCS

Superkritische watervergassing is een techniek waarbij gebruik wordt gemaakt van water in de superkritische fase. Hierbij heeft het water een hoge temperatuur en staat het onder hoge druk. Met deze techniek kan organisch materiaal worden omgezet naar groen gas. In tegenstelling tot andere processen waarbij biomassa wordt gebruikt, kunnen met superkritische watervergassing natte biomassastromen zoals mest, groenafval en rioolslib worden verwerkt. Naast groen gas worden ook waterstof en CO₂ geproduceerd. Wanneer de CO₂ permanent wordt opgeslagen, kan superkritische watervergassing worden ingezet voor koolstofverwijdering.

Biochar

Biokool (of biochar in het Engels) wordt gemaakt in een zogenaamd pyrolyseproces, waarbij biomassa wordt verwarmd tot enkele honderden graden zonder dat hierbij zuurstof aanwezig is. Hierdoor verkoolt de biomassa. Biochar is vrij stabiel, waardoor de koolstof gedurende eeuwen of millennia opgeslagen kan blijven. Biochar kan dienen als bodemverbeteraar en kan daarbij koolstof in de bodem opslaan. Daarnaast kan het aan beton of ander bouw materiaal worden toegevoegd, waardoor koolstof wordt vastgelegd. Mogelijk kan biochar ook ingezet worden bij het produceren van staal.¹⁹ In combinatie met CCS zou hiermee koolstofverwijdering gerealiseerd kunnen worden.

Biobased bouwen

Bij biobased bouwen gaat het om het vastleggen van koolstof in bouwmaterialen. In andere studies wordt vaak over houtbouw gesproken. In dit rapport hanteren we het bredere begrip biobased bouwen, omdat ook andere biogene materialen gebruikt kunnen worden in gebouwen. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om miscanthus ('olifantsgras'), vlas, hennep, leem, bamboe en stro.

DACCS

De afkorting DACCS is een combinatie van DAC (Direct Air Capture) en CCS (Carbon Capture & Storage). Direct Air Capture is een technologie om CO₂ direct uit de lucht af te vangen. Deze CO₂ kan vervolgens worden opgeslagen in geologische reservoirs.

Versnelde verwerking van mineralen

Sommige natuurlijke gesteentes (zoals basalt en olivijn) kunnen gebruikt worden om CO₂ in een stabiele vorm vast te leggen. Onder invloed van water en wind verweren deze mineralen in kleine deeltjes en reageren met CO₂ uit de omgeving. Dit is een natuurlijk proces, dat normaal gesproken traag verloopt. Bij versnelde verwerking van mineralen, ook wel mineralisatie genoemd, wordt dit proces versneld door het mineraal te vermalen en te verspreiden over grote oppervlakten. Dit kan toegepast worden in bestrating, kustverdediging of in de landbouw. Voor de snelheid van verweren maakt het wel uit of het gesteente direct in contact staat met lucht en water. Wanneer dit niet zo is, zoals bij ophoogzand onder wegen, vindt de verwerking veel langzamer plaats. Mineralen als olivijn kunnen ook toegevoegd worden aan oceanen; dit wordt kunstmatige alkanisatie genoemd.

Duurzame (her)bebossing

Koolstofopslag in bossen vindt plaats doordat bomen van nature CO₂ uit de atmosfeer opnemen en vastleggen. Deze koolstof bevindt zich in een kringloop, maar door het vergroten van het areaal aan bossen kan meer CO₂ uit de atmosfeer worden gehaald dan er terugkeert. De term duurzame (her)bebossing dekt het streven om een stabiel ecosysteem te creëren waarin biodiversiteit wordt gestimuleerd en tegelijkertijd koolstof wordt opgeslagen.

Koolstofopslag in de bodem

In de bodem liggen grote hoeveelheden koolstof opgeslagen. Vochtige veenweidegebieden en wetlands zijn hierin erg belangrijk, maar ook in landbouwbodems kan opslag plaatsvinden. Het vermogen van de bodem om koolstof op te nemen kan door menselijk ingrijpen worden vergroot. Zo kunnen verdroogde veenweidegebieden weer (deels) onder water worden gezet zodat ze kunnen herstellen. Met andere landbouwmethodes, zoals het achterlaten van gewasresten of het stoppen met ploegen, kan de hoeveelheid koolstof in landbouwbodems toenemen.

¹⁹ Zie bijvoorbeeld:

<https://www.tno.nl/nl/duurzaam/co2-neutrale-industrie/biobased-brandstoffen-chemicalien/nieuwe-technologie-biokoolstof/>

Vastlegging in mariene ecosystemen

Vastlegging in mariene ecosystemen is een verzamelterm voor een aantal verschillende manieren om CO₂ vast te leggen in zee of op de oceaانبodem. Voor Nederland is vooral het beheer van blauwe koolstof (blue carbon management) relevant. Het gaat hierbij om het vastleggen van koolstof door het versterken van kustecosystemen, zoals kwelders. Ook kan koolstof worden vastgelegd in zeegrassen en zeewieren.

3. Keuze methodes

De afgelopen jaren verschenen er verschillende Nederlandse studies naar koolstofverwijdering.^{20,21,22,23} Dit rapport neemt dezelfde methodes mee als deze studies. Uitzondering zijn biomaterialen, aangezien deze in het algemeen een te korte levensduur hebben om als koolstofverwijdering te tellen. Vastlegging in producten wordt alleen meegenomen voor de bouw, waar een levensduur van honderd jaar wel haalbaar is. Verder wordt binnen de biochemie alleen de productie van biobrandstoffen meegenomen; dit is momenteel de enige categorie waarbinnen realistisch potentieel wordt voorzien. Staalproductie volgens het Hisarna-proces valt hier ook buiten, aangezien dit in de huidige plannen van Tata Steel IJmuiden geen rol van betekenis lijkt te gaan spelen. Ook afvang bij biogascentrales wordt buiten beschouwing gelaten, aangezien dit te kleinschalig en decentraal is. Een aanvulling op deze lijst met methodes is afvang bij superkritische watervergassing, een innovatieve technologie met de potentie een rol te spelen voor koolstofverwijdering. Deze wordt in dit rapport als aparte categorie meegenomen. Een andere potentieel interessante technologie is afvangen van CO₂ uit zeewater.²⁴ Dit bevindt zich echter nog in de experimentele fase en wordt daarom in dit rapport nog niet meegenomen.

4. Beoordeling methodes

In dit rapport wordt nadrukkelijk de bredere impact van methodes voor koolstofverwijdering meegenomen. De verwachte prijs per ton CO₂ is slechts één van de relevante factoren in het beoordelen van methodes. Zoals hierboven beschreven, vragen schaarse beschikbaarheid van biograndstoffen, energie en ruimte om gerichte toepassing. Daarnaast hebben methodes potentieel grote impact op de leefomgeving en zijn er kansen om win-winsituaties te creëren waarbij verschillende beleidsdoelen worden gediend. De methodes worden daarom geanalyseerd aan de hand van de indicatoren landgebruik, biograndstoffengebruik, energiegebruik, permanentie, impact op biodiversiteit, conflicten/synergieën en kosten. Deze analyse is te vinden in bijlage 2.

20) PBL (2024): Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. <https://www.pbl.nl/system/files/document/2024-04/pbl-2024-trajectverkenning-klimaatneutraal-2050-5093.pdf>

21) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

22) WKR (2024): De lucht klaren? <https://www.wkr.nl/documenten/rapporten/2024/07/10/adviesrapport-de-lucht-klaren>

23) Ecorys (2023): Methodes voor CO₂-verwijdering - Vergelijkend literatuuronderzoek naar toepassing in de Nederlandse context. <https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Ecorys-Rapport-Methodes-voor-CO2-verwijdering.pdf>

24) Zie bijvoorbeeld: <https://www.nrc.nl/nieuws/2024/08/23/midden-op-de-afsluitdijk-trekt-een-start-up-de-klimaatdeken-uit-de-lucht-via-de-zee-2-a4863332?t=1726693221>

5. Scenario voor koolstofverwijdering in Nederland

Op basis van de in hoofdstuk 4 en bijlage 2 beschreven kenmerken van methodes heeft Natuur & Milieu een scenario opgesteld voor de ontwikkeling van koolstofverwijdering in Nederland. Verschillende methodes worden hierbij in meer of mindere mate meegenomen, waarbij planetaire grenzen en koppelkansen leidend zijn in de selectie.

Inschattingen van kosten worden beschreven in bijlage 2 en worden meegenomen in het scenario. Deze zijn echter niet leidend, aangezien de kosten van veel methodes qua orde grootte vergelijkbaar zijn. Bovendien zit er veel onzekerheid in de inschattingen en is de wetenschappelijke basis niet altijd sterk. De ontwikkeling van prijzen hangt ook sterk af van toekomstige opschaling; waar je op inzet, wordt goedkoper.

Voor het bepalen van de schaal waarop methodes in het scenario worden ingezet, wordt gebruikgemaakt van potentie-inschattingen uit de studies van PBL²⁵ en CE Delft.²⁶ Ook hier geldt echter dat er veel onzekerheden in de inschattingen zitten en dat de wetenschappelijke basis soms wankel is. Daarnaast spelen beleidskeuzes hier een essentiële rol. Potenties zijn geen vaststaand gegeven, maar hangen naast planetaire grenzen onder meer af van keuzes rondom ruimtegebruik, inzet van schaarse middelen en stimulering (of uitsluiting) van methodes. Gegevens over de potentie van verschillende maatregelen worden daarom aangevuld met andere bronnen en eigen inschattingen.

Een belemmering die geldt voor alle methodes die gebruikmaken van CCS, is de capaciteit voor geologische opslag. Uit onderzoek van Energie Beheer Nederland (EBN) en de Gasunie blijkt dat de opslagcapaciteit voor Nederland ongeveer 1.600 Mton CO₂ is.²⁷ Dit betekent dat wanneer de jaarlijkse opslag in de orde van grootte van enkele tientallen Mtonnen CO₂ per jaar komt, de totale opslagcapaciteit binnen honderd jaar gevuld is.

Het is belangrijk op te merken dat er niet één perfecte methode van koolstofverwijdering bestaat. Zowel uit de analyse in dit rapport als uit verschillende levenscyclusanalyses blijkt dat geen enkele methode beter scoort dan andere in alle impactcategorieën. Een portfolio van methodes is nodig om de verschillende voor- en nadelen te balanceren.²⁸ Hieronder worden per methode de afwegingen besproken bij het al dan niet meenemen in het scenario.

BECCS bij kolencentrales

Deze vorm van BECCS biedt een nieuwe bestemming voor bestaande kolencentrales en is daarnaast een relatief goedkope optie. Desondanks wordt voor deze methode geen rol in Nederland voorzien. Dit sluit aan bij recente conclusies van PBL.²⁹ Schaarste aan duurzame biograndstoffen vraagt om hoogwaardige inzet. Directe verbranding voor elektriciteitsproductie is geen hoogwaardige inzet, zeker gezien het feit dat hier voldoende alternatieven voor bestaan. Voor andere toepassingen van biobrandstoffen, zoals de inzet voor de lucht- en scheepvaart, zijn er weinig of geen alternatieven. Bovendien komt bij productie daarvan een continue stroom van relatief zuivere CO₂ vrij. Bij een BECCS-elektriciteitscentrale is deze stroom minder zuiver en veel minder constant, aangezien in een toekomstig energiesysteem vooral flexibiliteit vereist is.

BECCS bij afvalverbrandingsinstallaties (AVI's)

Nederland streeft ernaar om in 2050 een volledig circulaire economie te hebben.³⁰ Dit betekent dat er nauwelijks afvalverbranding meer plaatsvindt. Desondanks kan BECCS bij AVI's in de tussentijd een bescheiden rol spelen voor koolstofverwijdering. Er kan op relatief korte termijn mee gestart worden, wanneer de infrastructuur voor

25) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf

26) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

27) EBN, Gasunie (2018): Transport en opslag van CO₂ in Nederland. <https://www.ebn.nl/wp-content/uploads/2018/07/Studie-Transport-en-opslag-van-CO2-in-Nederland-EBN-en-Gasunie.pdf>

28) Zie: Kaponen, K. et al (2024): Responsible carbon dioxide removals and the EU's 2040 climate target. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad6d83>

29) PBL (2024): Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. <https://www.pbl.nl/system/files/document/2024-04/pbl-2024-trajectverkenning-klimaatneutraal-2050-5093.pdf>

30) Zie: <https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/nederland-circulair-in-2050>

CCS gereed is. Afhankelijk van de grootte van biogene afvalstromen kunnen enige Mtonnen afvang gerealiseerd worden. Het realistisch potentieel wordt door PBL³¹ ingeschat op 1,4 Mt in 2030 en 4,9 Mt in 2050. De potentie voor 2030 wordt aangehouden in het scenario, al zal deze vermoedelijk een aantal jaar later gerealiseerd worden. Hierna voorzien we echter slechts een beperkte verdere stijging, gevolgd door een daling richting 2050. Na 2050 zal BECCS bij AVI's naar verwachting nog een kleine rol blijven spelen, aangezien er ook in een circulaire economie afvalstromen zullen blijven bestaan waar weinig anders mee te doen is dan verbranden. Voor biobased producten (bijvoorbeeld uit de bouw) die niet meer her te gebruiken of te recycleren zijn, is dit bovendien een manier om de koolstof permanent uit de atmosfeer te houden.

Hogetemperatuurwarmte met CCS

Deze methode heeft, net zoals BECCS bij kolencentrales, geen rol in het scenario. We kiezen voor hoogwaardige inzet van biograndstoffen. Bovendien zijn er alternatieven voor de productie van warmte, zoals groen gas, waterstof en elektriciteit. Daarnaast gaat het om veel verschillende installaties die verspreid zijn over het land. Dit betekent dat het logistiek lastig zal zijn om de afgevangen CO₂ te transporteren en op te slaan.

Biobrandstofproductie + CCS

Voor biobrandstofproductie met CCS wordt, vooral door PBL,³² een heel grote rol voorzien. Het zal echter enige tijd duren voordat de eerste fabrieken gebouwd zijn en de CCS-infrastructuur gereed is. Daarna is grootschalige koolstofverwijdering mogelijk. Voor het scenario nemen we aan dat een niveau van 6 Mt per jaar bereikt wordt. Dit is het potentieel zoals ingeschat door CE Delft.³³ PBL lijkt uit te gaan van meer, maar vanwege de risico's van grootschalige inzet van biograndstoffen houden we de veiligere inschatting van CE Delft aan. Op lange termijn neemt de inzet van biobrandstofproductie met CCS af, door beperkingen in opslagcapaciteit voor CO₂. Ook zou de vraag naar biobrandstoffen kunnen gaan afnemen door de ontwikkeling van alternatieven. Los hiervan is er een limiet op de hoeveelheid koolstofverwijdering, doordat duurzame biograndstoffen beperkt beschikbaar zijn en deze zo hoogwaardig mogelijk ingezet moeten worden. Lock-in van biobrandstoffen moet voorkomen worden. Goede voorwaarden en controle op daadwerkelijke duurzaamheid zijn essentieel.

Superkritische watervergassing + CCS

Potentiële opschaling van superkritische watervergassing is onzeker en hangt af van diverse factoren. De technologie wordt op kleine schaal toegepast en koolstofverwijdering kan gerealiseerd worden wanneer CCS-infrastructuur gereed is. Aangezien het een innovatieve technologie betreft, is het moeilijk te voorspellen hoe groot de rol van deze methode in de toekomst gaat zijn. Voor het scenario gaan we uit van de doelstelling om 2 miljard kubieke meter groen gas per jaar te gaan produceren.³⁴ Wanneer dit via superkritische watervergassing geproduceerd wordt met een verhouding 80% methaan / 20% CO₂, zal hierbij 0,5 miljard kubieke meter CO₂ vrijkomen. Dit staat gelijk aan bijna 1 Mt CO₂. Uiteindelijk vormt de beschikbaarheid van CO₂-opslagcapaciteit een beperkende factor. Dit geldt ook voor de beschikbaarheid van biograndstoffen, al is dit minder beperkend dan bij andere methodes omdat andere stromen worden verwerkt.

Biochar

Gezien de onduidelijke en potentieel negatieve effecten van de toepassing van biochar in Nederlandse landbouw-bodems, is grootschalige toepassingen onwaarschijnlijk. Andere, kleinschalige toepassingen zijn wellicht wel mogelijk. Het realistisch potentieel van biochar wordt zeer laag ingeschat, in de studie van CE Delft³⁵ is dit 0,05 Mt per jaar. Vanwege deze zeer bescheiden rol komt biochar voorsnog niet terug in het scenario. Aangezien nog veel onbekend is rondom biochar, blijft het waardevol om onderzoek, specifiek voor toepassing in Nederland, voort te zetten.

31) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf

32) PBL (2024): Trajectverkenning Klimaatneutraal 2050. <https://www.pbl.nl/system/files/document/2024-04/pbl-2024-trajectverkenning-klimaatneutraal-2050-5093.pdf>

33) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

34) <https://www.platformgroengas.nl/groen-gas-productie-omhoog/>

35) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

Biobased bouwen

Biobased bouwen wordt al toegepast, al is dit op zeer beperkte schaal. Met de juiste sturing kan dit echter snel opgeschaald worden. Het technisch potentieel schat CE Delft³⁵ in op 3,9 Mt per jaar, wanneer alle nieuwbouw biobased wordt uitgevoerd. Vanwege de verdringing van zeer CO₂-intensieve bouwmaterialen als staal en beton, plus andere voordelen van biobased bouwen zoals een aangeneramer binnenklimaat, is het de moeite waard om dit actief te bevorderen. Biobased bouwen speelt daarmee een belangrijke rol in het scenario. We verwachten dat de gegeven maximale potentie iets te ambitieus is, maar dat we met het juiste beleid wel richting de 3,5 Mt per jaar kunnen gaan. Dit zal op de heel lange termijn iets afnemen, wanneer een groot deel van de bouw al biobased is. Uiteraard blijft, net zoals bij andere methodes die gebruikmaken van biograndstoffen, de duurzaamheid van winning cruciaal.

DACCS

Het voordeel van DACCS is dat niet biograndstoffen of ruimte de beperkende factoren zijn, maar duurzame energie. Dit kan veel meer opgeschaald worden dan de andere twee factoren. Daarnaast is DAC een op zichzelf staand product waarin veel innovatie mogelijk is. Producten kunnen sneller worden opgeschaald dan complexe processen, zoals bijvoorbeeld te zien is bij de sterk gedaalde kosten voor zonnepanelen tegenover toenemende kosten voor kerncentrales.³⁶ Vanwege de veel lagere concentratie CO₂ in de atmosfeer, vergeleken met bijvoorbeeld rookgassen, zal DAC wel altijd veel energie blijven kosten. Selectieve inzet op basis van overschotten aan duurzame energie is daarom de meest kansrijke route. We voorzien een sterke opschaling na 2035, wanneer alle elektriciteit hernieuwbaar is. Op de lange termijn kan DACCS naar behoefte worden opgeschaald, met uiteindelijk de geologische opslagcapaciteit als beperkende factor. Voor het scenario nemen we daarom aan dat de inzet van DACCS na verloop van tijd een maximum bereikt en richting het einde van deze eeuw weer zal dalen.

Versnelde verwerking van mineralen

Olivijn wordt al op beperkte schaal toegepast in bestrating en er zou op korte termijn begonnen kunnen worden met het bijmengen in bouwmaterialen en in ophoogzand voor kustverdediging. Met een potentieel van 5,4 Mt per jaar³⁷ vanaf 2050 is dit een interessante optie die ook in het scenario een rol speelt. Voor grootschalige toepassing is het wel essentieel om goed onderzoek te doen naar mogelijke negatieve effecten op water of bodem door het vrijkomen van metalen. Daarnaast is veel energie nodig voor het fijnmalen van mineralen. Hierdoor zal de inzet van deze methode gestaag opgeschaald kunnen worden, afhankelijk van het aanbod aan duurzame energie. Deze opschaling zal dus vooral na 2035 plaatsvinden. De hoeveelheden olivijn vormen naar verwachting geen beperkende factor, aangezien hier ruime voorraden van zijn. Aandachtspunt blijft echter wel de duurzaamheid van de mijnbouw.

Natuurlijke methodes

Duurzame (her)bebossing, koolstofopslag in de bodem en vastlegging in mariene ecosystemen

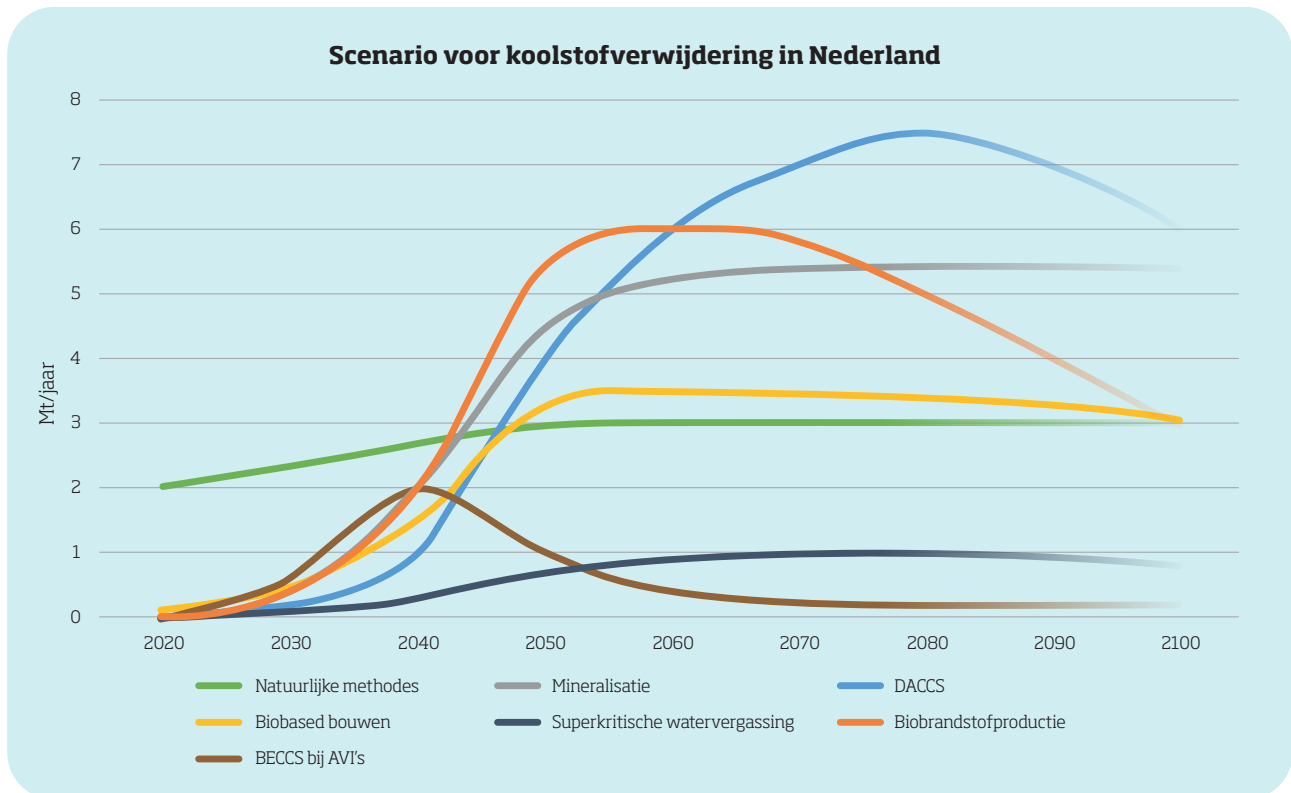
Voor een betere leesbaarheid van de figuur op de volgende pagina zijn deze methodes samengevoegd tot één categorie. De potentie van natuurlijke methodes is tweeledig. Aan de ene kant kan er CO₂ worden opgeslagen. Aan de andere kant kunnen restemissies omlaag worden gebracht, waardoor de totale benodigde hoeveelheid koolstofverwijdering afneemt. Voor koolstofverwijdering is er potentie om natuurlijke methodes op te schalen, maar door ruimtebeslag is deze opschaling beperkt. Op de lange termijn zal er een relatief constante hoeveelheid CO₂ opgeslagen blijven worden, zolang het beheer in orde blijft en er geen grootschalige verstoring plaatsvindt (zoals een bosbrand). Op dit moment wordt volgens CE Delft 2 Mt per jaar opgeslagen in bossen. Door (her)bebossing en koolstofopslag in de bodem zou dit met zo'n 1,5 Mt per jaar kunnen toenemen, tot totaal 3,5 Mt per jaar.³⁷ Omdat met verhoogde inzet op deze methodes het risico op ongewenste bijeffecten toeneemt, wordt in dit rapport een iets lager potentieel van 3 Mt per jaar gehanteerd. Het potentieel voor vastlegging in mariene ecosystemen is nog te onzeker om hierin te worden meegenomen.

Bij natuurlijke methodes dient ecosysteemherstel het streven te zijn, om positieve effecten te maximaliseren en een robuuster systeem te creëren dat bestand is tegen verstoringen.

36) <https://decorrespondent.nl/15355/kernenergie-niet-nodig-niet-slim-en-niet-te-betalen/a4891a46-e829-016f-039f-2bba651fdd5a>

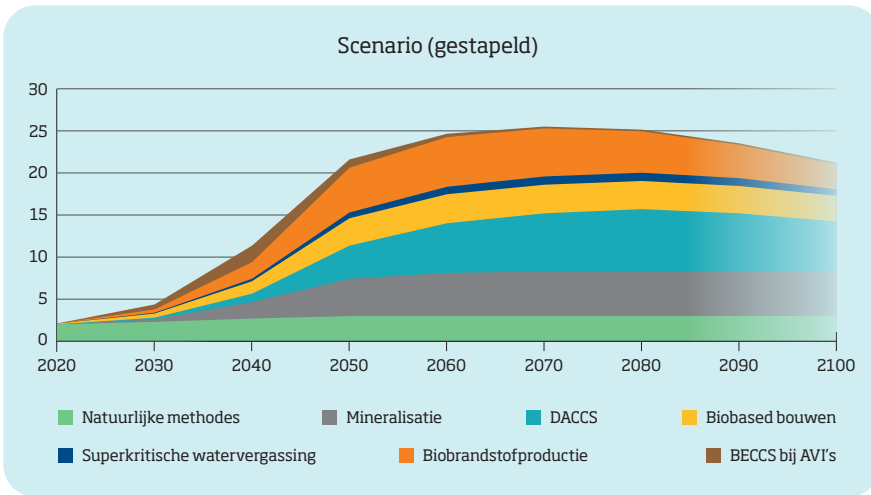
37) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

Scenario

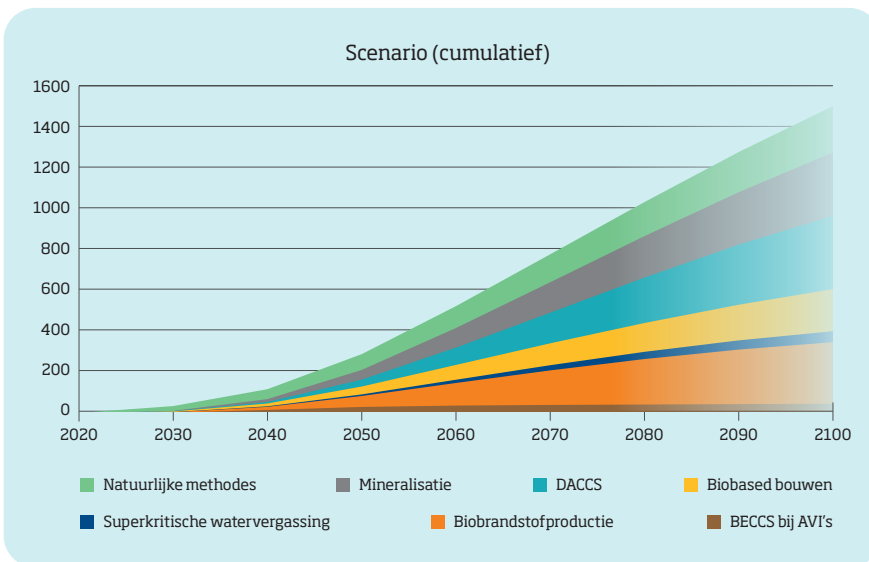


Op basis van de bovenstaande beschrijvingen is een scenario voor koolstofverwijdering in Nederland opgesteld. Hierin staat op de x-as een tijdspad van 2020 tot 2100. Op de y-as staat het aantal megaton CO₂ dat per jaar verwijderd kan worden. De potentie van de verschillende methodes is gebaseerd op inschattingen uit de literatuur, maar niemand kan de toekomst voorspellen. De waarden in de figuur geven daarom de ordegrrootte aan van de koolstofverwijdering die verschillende methodes kunnen realiseren.

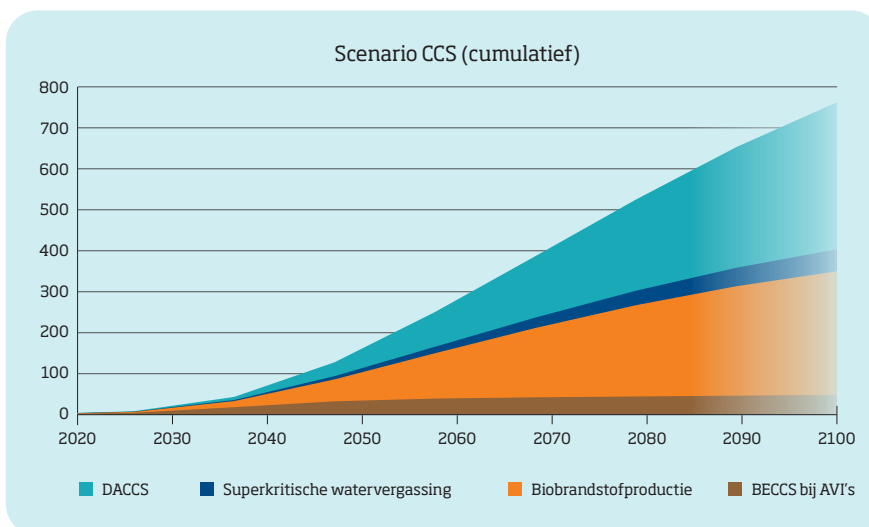
In het scenario is te zien dat koolstofverwijdering op dit moment bijna volledig van natuurlijke methodes komt. Door deze op de juiste manier te stimuleren kan de potentie hiervan nog iets worden vergroot. Tegelijkertijd biedt dit kansen voor de verlaging van restemissies. Op korte termijn kunnen afvalverbrandingsinstallaties benut worden om de eerste megatonnen koolstof permanent te verwijderen. Met behulp van biobased bouwen kan ook al snel koolstofverwijdering gerealiseerd worden. Hiermee kan de gebouwde omgeving veranderen van een bron van uitstoot naar een bron van opslag. Op de iets langere termijn kunnen mineralisatie en biobrandstofproductie met CCS een grote bijdrage gaan leveren. Daarnaast moet voorkomen worden dat er een lock-in optreedt van biobrandstoffen. De inzet van biograndstoffen voor biobased bouwen is een nog hoogwaardigere toepassing, die daarom voorrang verdient. Deze concurrentie speelt niet bij superkritische watervergassing, aangezien hierbij gebruik wordt gemaakt van natte (afval)stromen. Het is daarom de moeite waard deze methode verder te ontwikkelen. Tot slot heeft DACCS op de lange termijn de hoogste potentie, aangezien deze voornamelijk afhankelijk is van de beschikbaarheid van duurzame energie. Dit is veel minder beperkend dan de beschikbaarheid van ruimte en duurzame biograndstoffen. Op de lange termijn, richting 2100, zal de ondergrondse opslagcapaciteit beperkend worden voor de methodes die afhankelijk zijn van CCS voor de vastlegging.



De figuur hiernaast schetst hetzelfde scenario met een gestapelde grafiek. Dit geeft inzicht in de gecombineerde hoeveelheid koolstofverwijdering per jaar.



Voor een beeld van de totale hoeveelheid koolstofverwijdering zijn hiernaast twee cumulatieve grafieken weergegeven. De eerste geeft het totaal van alle methodes. De tweede geeft het totaal van de methodes die gebruik maken van CCS. Hierin is te zien dat in het scenario de behoefte aan geologische koolstofopslag richting de 800 Mt gaat in 2100. Dit is bijna de helft van de totale hoeveelheid beschikbare opslag in Nederland, zoals besproken in aan het begin van dit hoofdstuk. Hiermee dient rekening gehouden te worden bij het opstellen van richtlijnen voor de opslag van fossiele CO₂ en CO₂ uit het buitenland.





6. Conclusies & beleidsaanbevelingen

Om klimaatverandering te voorkomen, is het noodzakelijk dat niet alleen de emissies van broeikasgassen worden gereduceerd, maar ook dat koolstof uit de atmosfeer wordt verwijderd. Ook Nederland zal daaraan een bijdrage moeten leveren die past bij de verschillende transitie die we in verschillende sectoren moeten doormaken. In dit rapport schetst Natuur & Milieu een scenario dat hier zo goed mogelijk aan voldoet, en dat rekening houdt met de fysieke grenzen in de beschikbaarheid van ruimte, duurzame energie en biograndstoffen. Hierin wordt ingezet op de verschillende methodes die passen binnen de basisprincipes voor koolstofverwijdering zoals in hoofdstuk 3 van dit rapport geschetst.

Dit scenario kan alleen realiteit worden door een combinatie van Europees en nationaal beleid. Hieronder volgen een aantal beleidsaanbevelingen op Europees en nationaal niveau. Om de Europese beleidsaanbevelingen te realiseren, zal Nederland moeten optrekken met andere lidstaten die ook het belang van koolstofverwijdering onderkennen.

Europees beleid

- **Stel een Europees doel voor koolstofverwijdering.**

Dit kan in 2025 worden aangekaart in de discussie over het nieuwe commissievoorstel voor het 2040 klimaatdoel en de Europese Klimaatwet. Deze doelstelling moet vertaald worden naar doelstellingen voor lidstaten, om de ontwikkeling van nationaal beleid te stimuleren.

- **Ontwikkel een systeem voor het monitoren en verifiëren van koolstofverwijdering.**

Dit systeem moet onafhankelijk en transparant zijn. Het is aan te bevelen dat toekenning van 'koolstofcredits' geschiedt door een overheidsinstantie of een door de overheid gereguleerde instantie, met een extern verifieerbaar proces. Een Europese centrale koolstofbank kan hiervoor worden opgericht. Voor het vastleggen van de koolstofcredits kan gebruikgemaakt worden van blockchaintechnologie om fraude te beperken en transparantie te bevorderen.

- **Ontwikkel een Europese markt voor koolstofverwijdering.**

Deze markt mag niet concurreren met de bestaande markt voor emissiereductie (ETS). Oplopende vastleggingsdoelstellingen voor internationale sectoren met vastleggingspotentieel en Europese en nationale vastleggingsveilingen stimuleren dat koolstofvastlegging een prijs krijgt.

Nationaal beleid

- **Ontwikkel een visie op koolstofverwijdering.**

Geef in de visie invulling aan hoe Nederland kan bijdragen aan het verwijderen van koolstof uit de atmosfeer. Houd hierbij rekening met de begrenzings op het gebied van ruimte, biograndstoffen en duurzame energie.

- **Stel een nationaal doel voor koolstofverwijdering als invulling van het Europese doel**

en neem dit op in de Klimaatwet en het 5 jaarlijkse Klimaatplan waarin de overheid toelicht hoe de klimaatdoelen gehaald gaan worden.

- **Stimuleer de gewenste koolstofverwijderingsmethodes met gerichte maatregelen.**

Concreet stellen wij de volgende maatregelen voor:

- Stimuleer biobased bouwen. Bijvoorbeeld door het opnemen van een verplichting voor het gebruik van biobased materialen in het Besluit Bouwwerken Leefomgeving, de Milieuprestatie Gebouwen en de Grond-, Weg- en Waterbouw-aanbestedingen van de Rijksoverheid. Daarnaast kan het Rijk een voorttrekkersrol vervullen door een oplopend aandeel standaard biobased in te kopen;
- Stimuleer vastlegging van koolstof in mariene ecosystemen door het uitbreiden van gebieden op de Noordzee met bodemrust;
- Stimuleer vastlegging van koolstof in bos en bodem door het uitbreiden van het Nederlandse bosareaal, en door alternatieve landbouwmethodes die leiden tot koolstofvastlegging in de bodem, te belonen;
- Koppel een afvangverplichting aan subsidie voor geavanceerde biobrandstoffabrieken;
- Realiseer CO₂-afvang en -opslag bij superkritische watervergassing (groengasproductie) en biochemie door het op te nemen in de Subsidie Duurzame Energie (SDE);
- Ondersteun DACCS-innovaties en ontwikkel een kader dat de inzet van overschotten duurzame elektriciteit voor DACCS bevordert. Bijvoorbeeld door het mee te nemen bij de ontwikkeling van windparken op zee.

- Organiseer vastleggingsveilingen. Om de markt aan te jagen en (innovatieve) sectoren te bevorderen die koolstofvastlegging als hoofdproduct hebben (DACCS) kunnen overheden veilingen organiseren waar koolstofcredits worden aangekocht.

Bijlages

Bijlage 1: Nadere toelichting beoordelingsfactoren

Om de methodes voor koolstofverwijdering te beoordelen, is in dit rapport gebruikgemaakt van de volgende indicatoren: landgebruik, biogrondstoffengebruik, energiegebruik, permanentie, conflicten/synergieën en kosten. Hieronder worden de verschillende indicatoren kort besproken. Voor een betere leesbaarheid van de analyse in bijlage 2 wordt hier ook aangegeven van welke bronnen gebruik is gemaakt.

Landgebruik

Binnen deze categorie wordt onderscheid gemaakt tussen direct landgebruik (het land dat nodig is voor het primaire verwijderingsproces van CO₂) en indirect landgebruik (het land dat nodig is om de keten van deze processen te ondersteunen). Voor het landgebruik wordt uitgegaan van de gegevens van PBL,³⁸ waar nuttig aangevuld met gegevens van CE Delft³⁹ en Ecorys.⁴⁰ Ondanks het gebruik van meerdere bronnen zijn er niet voor alle methodes gegevens beschikbaar.

Biogrondstoffengebruik

Voor de methodes die gebruikmaken van biogrondstoffen zijn in de studie van PBL³⁸ schattingen beschikbaar van de benodigde hoeveelheid per ton verwijderde CO₂. Deze getallen vormen de basis voor dit rapport. Ook Ecorys⁴⁰ heeft inschattingen gemaakt, maar omdat dit slechts voor een paar methodes is gedaan biedt dit geen goed vergelijkingsmateriaal. Voor dit rapport wordt daarom uitgegaan van de gegevens van PBL.

Energiegebruik

Voor getallen over het energiegebruik wordt gebruikgemaakt van diverse bronnen; deze worden per methode aangegeven in bijlage 2.

Permanentie

Voor welke periode CO₂ naar verwachting wordt opgeslagen verschilt per methode. Vraagstukken rondom permanentie worden uitgebreid besproken door CE Delft⁴¹, die studie wordt in dit rapport dan ook als basis gebruikt. Eventuele aanvullingen hierop worden apart benoemd in bijlage 7.2.

Impact op biodiversiteit

Zoals beschreven in hoofdstuk 3, is klimaatverandering slechts één van de planetaire grenzen die overschreden wordt. De achteruitgang van biodiversiteit is een crisis die dringend actie vereist. Door negatieve effecten tot een minimum te beperken en zoveel mogelijk de kansen voor natuurversterkende effecten te grijpen kan voorkomen worden dat koolstofverwijdering gepaard gaat met verdere achteruitgang van biodiversiteit. In dit rapport wordt per methode kort beschreven wat de mogelijke effecten zijn. Hierbij wordt gebruik gemaakt van informatie van CE Delft,⁴¹ Ecorys⁴² en de WKR,⁴³ in enkele gevallen aangevuld met andere bronnen.

38) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf

39) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

40) Ecorys (2023): Methodes voor CO₂-verwijdering - Vergelijkend literatuuronderzoek naar toepassing in de Nederlandse context. <https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Ecorys-Rapport-Methodes-voor-CO2-verwijdering.pdf>

41) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

42) Ecorys (2023): Methodes voor CO₂-verwijdering. <https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Ecorys-Rapport-Methodes-voor-CO2-verwijdering.pdf>

43) WKR (2024): De lucht klaren? <https://www.wkr.nl/documenten/rapporten/2024/07/10/adviesrapport-de-lucht-klaren>

Synergieën/conflicten

Zoals beschreven vindt er tussen methodes voor koolstofverwijdering potentieel concurrentie plaats om schaarse goederen. Ook kan de inzet hiervan andere beleidsdoelen in de weg zitten. Daarentegen zijn er voor diverse methodes juist synergieën te vinden, waarbij meerdere beleidsdoelen worden gediend. Milieu-impact die buiten de andere indicatoren valt wordt hier ook besproken. Voor potentiële synergieën en conflicten wordt gebruik gemaakt van informatie uit de studies van CE Delft⁴¹, Ecorys⁴² en de WKR,⁴³ in enkele gevallen aangevuld met andere bronnen.

Kosten

Voor de verschillende methodes zijn inschattingen van kosten gemaakt, al lopen deze vaak sterk uiteen tussen verschillende bronnen. Prijzen zijn vaak erg afhankelijk van specifieke lokale omstandigheden, aannames en verwachtingen over toekomstige ontwikkelingen. Voor dit rapport is gebruikgemaakt van inschattingen van PBL⁴⁴ en CE Delft.⁴¹ Deze studies gaan specifiek uit van de Nederlandse situatie. Precieze afwegingen hierin worden besproken in bijlage 3.



41) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

42) Ecorys (2023): Methodes voor CO₂-verwijdering. [https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Ecorys-Rapport-Methodes-voor-CO₂-verwijdering.pdf](https://natuurenmilieu.nl/app/uploads/Ecorys-Rapport-Methodes-voor-CO2-verwijdering.pdf)

43) WKR (2024): De lucht klaren? <https://www.wkr.nl/documenten/rapporten/2024/07/10/adviesrapport-de-lucht-klaren>

44) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf

Bijlage 2: Analyse methodes

In de paragrafen hieronder worden de verschillende methodes voor koolstofverwijdering kort uitgelegd en geanalyseerd aan de hand van de hierboven beschreven indicatoren. De methodes zijn, net als in hoofdstuk 4, gegroepeerd aan de hand van de factor die het meest bepalend is: het biogrondstoffengebruik, het energiegebruik of het ruimtegebruik. Inschattingen over potenties worden in de analyse niet apart benoemd; deze zijn (aangevuld met eigen inschattingen) meegenomen in de opbouw van het scenario (zie hoofdstuk 5).

2.1 Methodes op basis van biogrondstoffen

Bio-energie + CCS (BECCS)

(Bij kolencentrales, AVI's en hogetemperatuurwarmte)

Landgebruik	Het directe landgebruik is klein; dit is alleen de centrale zelf. Er is echter een behoorlijk groot indirect landgebruik door de continue winning van biogrondstoffen. Dit landgebruik (in hectare per ton CO ₂) varieert per type grondstof: 1-1,7 voor houtige biomassa, 0,6 voor landbouwafval en 0,05-0,4 voor energiegewassen. Aan verbranding in AVI's wordt geen landgebruik toegewezen, omdat het afval betreft. Voor hogetemperatuurwarmte wordt geen landgebruik gespecificeerd, maar dit zal vergelijkbaar zijn met BECCS bij kolencentrales.
Biogrondstoffengebruik	Voor BECCS bij kolencentrales en hogetemperatuurwarmte wordt een biogrondstoffengebruik van 10 PJ/Mt CO ₂ ingeschat. ⁴⁵ Voor AVI's wordt dit op 0 gezet, omdat het afval betreft. In de praktijk worden echter uiteraard nog steeds biogrondstoffen verbrand. Dit zal een vergelijkbare hoeveelheid per Mt CO ₂ zijn.
Energiegebruik	Een biomassacentrale levert elektriciteit en/of warmte, maar de toevoeging van een CCS-installatie gaat gepaard met een behoorlijke energy penalty. Dit is ongeveer 200 kWh (0,72 GJ) elektriciteit per ton CO ₂ en 1000 kWh (3,6 GJ) warmte per ton CO ₂ . ⁴⁶
Permanentie	Opslag is in principe permanent in geologische formaties.
Impact op biodiversiteit	Net zoals veel andere methodes maakt BECCS gebruik van houtige biomassa uit (plantage)bossen, speciaal verbouwde energiegewassen of de reststromen daarvan. Op beperkte schaal kunnen biogrondstoffen op een verantwoorde manier gewonnen worden. Grootschalige winning van biogrondstoffen heeft echter potentieel grote negatieve effecten op de biodiversiteit. Zo zijn er onder andere risico's op ontbossing, het omzetten van natuur naar plantagebossen, het inzetten van gifstoffen en bodemdegradatie. Bij reststromen speelt dit mogelijk minder. De beschikbaarheid hiervan is echter beperkt. Daarnaast is de logistiek om reststromen in grote hoeveelheden te verzamelen vaak ingewikkelder, waardoor de kosten en energie-investering hoog zijn. Zonder strenge voorwaarden en controle ten behoeve van de duurzaamheid, zullen economische motieven bovengenoemde risico's altijd dichterbij brengen.

45) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf

46) <https://www.pbl.nl/system/files/document/2024-03/pbl-2024-eindadvies-sde-plus-plus-2024-5040.pdf>

Conflicten/synergieën Gezien de beperkte beschikbaarheid van duurzame biograndstoffen is er concurrentie met andere methodes voor koolstofverwijdering die hier ook gebruik van maken. Daarnaast kan grootschalige winning van biograndstoffen ten koste gaan van koolstofopslag in bossen en bodem. Ook is er concurrentie met industrieën die biograndstoffen willen inzetten om hun processen te verduurzamen. Hiermee kan inzet op koolstofverwijdering ten koste gaan van uitstootvermindering. Tot slot is er een mogelijk conflict met voedselproductie en de productie van biobased materialen vanwege concurrentie op landbouwgrond.

Specifiek voor BECCS-routes die gebaseerd zijn op verbranding van biomassa geldt dat dit leidt tot uitstoot van luchtvervuilende stoffen, waaronder stikstof en fijnstof. Wanneer elektriciteitsproductie plaatsvindt, vervangt dit mogelijk wel fossiele bronnen en de daarmee gepaard gaande uitstoot. In het toekomstige Nederlandse energiesysteem met veel zon en wind is echter flexibiliteit nodig. BECCS-energiecentrales die veel draaiuren moeten maken om de investering in de CCS-installatie terug te verdienen, passen hierin niet goed.

Kosten De prijs wordt ingeschat op € 50-70 per ton CO₂ voor omgebouwde kolencentrales en € 70-90 per ton CO₂ voor AVI's. Voor hogetemperatuurwarmte is de inschatting € 70-120 per ton CO₂.

Biobrandstofproductie + CCS

Landgebruik In de Nederlandse studies worden geen gegevens over landgebruik gegeven. Echter, gezien het dubbele biograndstoffengebruik (zie hieronder), zal het landgebruik bij dezelfde houtige stromen ook ongeveer twee keer zo groot zijn. Bij geavanceerde biobrandstoffen (uit reststromen en residuen) zal het landgebruik kleiner zijn.

Biograndstoffengebruik Voor deze methode wordt een biograndstoffengebruik van 20 PJ/Mt CO₂ ingeschat. Dit is hoger dan bij BECCS, aangezien een deel van de koolstof in de brandstof zit en na verbranding dus weer in de atmosfeer terechtkomt.

Energiegebruik Omdat de CO₂ die bij deze techniek vrijkomt een pure stroom is, zal er alleen energie nodig zijn voor de compressie en niet voor de afvang. Dit is met ongeveer 15 kWh (54 MJ) per ton CO₂ relatief weinig.⁴⁷

Permanentie Opslag is in principe permanent in geologische formaties.

Impact op biodiversiteit Zie de beschrijving bij BECCS hierboven; de potentiële impact is vergelijkbaar.

Conflicten/synergieën Vergeleken met BECCS is biobrandstofproductie plus CCS hoger op de duurzaamheidsladder, omdat de biomassa hoogwaardiger wordt ingezet. De geproduceerde biobrandstoffen zijn een hoogwaardige toepassing van biograndstoffen omdat er voor sommige sectoren, zoals luchtvaart en scheepvaart, nog geen of heel beperkt alternatieven zijn.

Kosten Gezien de relatief pure stroom CO₂ die vrijkomt, worden voor deze technologie geen additionele kosten gerekend. Enkel de kosten voor transport en opslag zijn hier dus van toepassing; deze worden ingeschat op € 10 per ton CO₂.

47) <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2024-09/Samenvattend-hoofdrapport-Aramis-fase-1.pdf>

Superkritische watervergassing (groengasproductie) + CCS

Landgebruik	In bestaande studies zijn geen gegevens over landgebruik beschikbaar. Net zoals bij BECCS bij AVI's wordt hier echter gebruikgemaakt van afvalstromen, waarvoor een landgebruik van 0 wordt aangehouden.
Biogrondstoffengebruik	In bestaande studies zijn geen gegevens over de hoeveelheden biogrondstoffen beschikbaar. Naar verwachting zal dit in dezelfde orde van grootte zijn als bij biobrandstofproductie + CCS.
Energiegebruik	Superkritische watervergassing heeft energie nodig om de benodigde druk en temperatuur te bereiken. Getallen daarvoor zijn echter nog niet beschikbaar. De CO ₂ die vrijkomt is een pure stroom. De verwachting is dat het totale energieverbruik om die redenen vergelijkbaar is als bij biobrandstofproductie + CCS.
Permanentie	Opslag is in principe permanent in geologische formaties.
Impact op biodiversiteit	Omdat bij superkritische watervergassing veelal gebruik wordt gemaakt van reststromen, spelen de bezwaren rondom grootschalige winning van biogrondstoffen hier minder. Verder is er nog weinig bekend over de impact. Wel is er in potentie een positieve invloed doordat vervuilde reststromen verwerkt kunnen worden en vervuiling daarmee uit ecosystemen verdwijnt.
Conflicten/synergieën	Er is weinig concurrentie met andere methodes die gebruikmaken van biogrondstoffen, omdat natte biomassastromen worden verwerkt. Het methaan dat geproduceerd wordt kan hoogwaardig ingezet worden in de industrie.
Kosten	Voor deze technologie zijn in bestaande studies op het gebied van koolstofverwijdering nog geen kostenindicaties beschikbaar.

Biochar

Landgebruik	Voor de toepassing van biochar wordt geen ruimtegebruik gerekend, aangezien het wordt toegevoegd aan landbouwgrond of producten, waarbij de functie behouden blijft. Voor het verbouwen van de biogrondstoffen is uiteraard wel land nodig; dit wordt ingeschat op 0,26 hectare per ton CO ₂ .
Biogrondstoffengebruik	Voor deze methode wordt een biogrondstoffengebruik van 18 PJ/Mt CO ₂ ingeschat.
Energiegebruik	Er worden voor biochar geen getallen genoemd. Er is voornamelijk energie nodig voor het verhitten van de biomassa. Wellicht kan het proces zich hierna zelf in stand houden door vrijkomende energie te benutten. ⁴⁸
Permanentie	Opslag in de vorm van biochar is tijdelijk, maar omdat het zeer langzaam afbreekt kan de koolstof voor een periode van eeuwen tot millennia worden vastgelegd. Volgens het IPCC ⁴⁹ is deze periode echter decennia tot eeuwen. Bij toepassing in beton kan de opslag mogelijk permanent worden gemaakt. ⁵⁰

48) Zie bijvoorbeeld: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622032383>

49) Zie: <https://evetamme.com/2022/04/06/ar6-wgiii-report-carbon-removal/>

50) WKR (2024): Achtergrondrapport CO₂-verwijdering. <https://www.wkr.nl/binaries/wetenschappelijkeklimaatraad/documenten/rapporten/2024/07/10/adviesrapport-de-lucht-klaren/Achtergrondrapport+CO2-verwijdering.pdf>

Impact op biodiversiteit	De bezwaren die spelen rondom de grootschalige inzet van biograndstoffen spelen hier ook; zie de tabel bij BECCS voor een beschrijving hiervan. Biochar heeft mogelijk een positief effect op de bodemkwaliteit en daarmee op de biodiversiteit indien de lokale omstandigheden hier geschikt voor zijn. Bij studies die specifiek in Nederland zijn uitgevoerd is echter geen significante verbetering van bodemkwaliteit en gewasopbrengst gevonden. ⁵¹
Conflicten/synergieën	Voor biochar spelen dezelfde overwegingen rondom concurrentie als bij BECCS hierboven. Veel hangt af van de bron van de biograndstoffen. Een koppelkans voor biochar is het verwerken van afvalstromen zoals rioolslib. Dit resulteert echter in vervuilde biochar die ongeschikt is voor toepassingen in de landbouw. Voor toepassingen in bijvoorbeeld asfalt maakt de vervuiling minder uit, maar het potentieel hiervan is nog onbekend. Biochar uit hout is met het oog op het duurzaamheidskader waarschijnlijk niet wenselijk. Een andere koppelkans voor biochar is de combinatie met biogas-productie.
Kosten	Schattingen lopen uiteen van € 100 tot € 500 per ton CO ₂ .

Biobased bouwen

Landgebruik	Voor biobased bouwen/houtbouw worden geen specifieke getallen genoemd. Het is echter aannemelijk dat het landgebruik van biobased bouwen in dezelfde ordegrootte ligt als bij biochar (0,26 hectare per ton CO ₂). Het gaat immers om de winning van biograndstoffen, waarvan na bewerking veruit het grootste deel van de koolstof wordt opgeslagen.
Biograndstoffengebruik	De inschatting voor het biograndstoffengebruik is 9 PJ/Mt CO ₂ .
Energiegebruik	De productie van biobased bouwmaterialen gebruikt in veel gevallen minder energie dan die van traditionele bouwmaterialen. Daarnaast kost ook de toepassing vaak minder energie door het lagere gewicht.
Permanentie	De CO ₂ ligt vast zolang de bouwmaterialen in gebruik blijven. Veel hangt dus af van de levensduur van het gebouw, de mate van hergebruik en de eindbestemming. Bij gebruik in constructief hout ligt de CO ₂ voor meer dan vijftig jaar vast. Met hergebruik kan deze periode aanzienlijk worden verlengd. Als aan het eind van de levensduur verbranding of vergassing met CCS plaatsvindt, kan worden voorkomen dat de CO ₂ weer in de atmosfeer komt. Tot slot is er ook sprake van vastlegging in de 'staande voorraad' van gebouwen. Als een biobased gebouw wordt afgebroken en weer wordt vervangen door een nieuw biobased gebouw, blijft de netto hoeveelheid vastgelegde koolstof in gebouwen gelijk.
Impact op biodiversiteit	Voor de winning van biograndstoffen gelden dezelfde risico's als bij andere methodes, zie hiervoor de beschrijving bij BECCS. Om negatieve effecten op biodiversiteit te voorkomen is het essentieel dat biograndstoffen op een verantwoorde manier worden geoogst.

51) Zie bijvoorbeeld: <https://kennisakker.nl/archief-publicaties/biochar-voor-de-landbouw4172>, <https://edepot.wur.nl/296756> en <https://edepot.wur.nl/392486>

Conflicten/synergieën	Voor biobased bouwen spelen dezelfde overwegingen rondom concurrentie als bij BECCS hierboven. Een groot voordeel van biobased bouwen is dat het naast opslag van CO ₂ ook leidt tot vermeden emissies door het vermijden of verminderen van het gebruik van staal en beton. Bij het fabriceren van die materialen komen namelijk grote hoeveelheden CO ₂ vrij. Daarnaast heeft biobased bouwen veel positieve eigenschappen t.o.v. beton, zoals snellere bouw tijden door prefab materialen, aantrekkelijke esthetische en akoestische eigenschappen en een gezonder binnenklimaat.
Kosten	Voor biobased bouwen worden in bestaande studies op het gebied van koolstofverwijdering geen kostenindicaties gegeven. Wel geeft CE Delft ⁵² aan dat biobased bouwmaterialen momenteel 10-20 procent duurder zijn dan conventionele materialen, maar dat deze ook zo'n 10 procent goedkoper kunnen zijn. Voor biobased bouwwerken ligt de prijs momenteel hoger (van 10-20 procent hoger tot tweemaal zo hoog). Uit recente vergelijkingen ⁵³ blijkt echter dat biobased bouwwerken al concurrerend kunnen zijn op prijs, waarbij in de toekomst verdere prijsdaling wordt verwacht door opschaling van modulair en industrieel produceren. Tegelijkertijd zullen de kosten van CO ₂ -intensieve traditionele bouwmaterialen door toenemende beprijzing van CO ₂ juist toenemen.

2.2 Methodes die vooral energie vereisen

DACCS

Landgebruik	Het directe landgebruik van DACCS is klein, zeker wanneer stapeling of combinatie met andere bebouwing mogelijk is. Er is wel een indirect landgebruik door de benodigde productie van duurzame energie. In totaal wordt dit ingeschat op 0,03 hectare per ton CO ₂ .
Biograndstoffengebruik	Deze methode maakt geen gebruik van biograndstoffen.
Energiegebruik	Schattingen over het energiegebruik lopen gigantisch uiteen, van 1,8 GJ/ton CO ₂ (theoretisch minimum) tot 45 GJ/ton CO ₂ (waarbij ook het energiegebruik voor het mijnen van grondstoffen en het opslaan van de CO ₂ is meegenomen). ⁵² We verwachten dat door innovatie het energiegebruik aan de lage kant van deze range zal uitkomen.
Permanentie	Opslag is in principe permanent in geologische formaties.
Impact op biodiversiteit	DACCS heeft in het algemeen weinig impact op biodiversiteit.
Conflicten/synergieën	Een voordeel van DAC is dat het om losse units gaat die flexibel geplaatst kunnen worden. Het kan dus gekoppeld worden aan zon- of windparken om gebruik te maken van surplus aan hernieuwbare elektriciteit. Ook kan er gekoppeld worden aan bestaande CO ₂ -opslagfaciliteiten.
Kosten	De prijs wordt ingeschat op € 85-540 per ton CO ₂ en is voor het grootste deel afhankelijk van de kosten van de gebruikte energie.

52) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

53) Zie: https://watkostdebouwvaneenhuurwoning.nl/media/2198/2024_handboek-woningbouw-in-houtdef.pdf

Versnelde verwerking van mineralen

Landgebruik	Voor het landgebruik van mineralisatie worden geen getallen genoemd. Het vermalen gesteente moet uitgespreid worden over een groot oppervlak om het goed in contact te laten komen met water en lucht. Dit is in veel gevallen echter dubbel ruimtegebruik. Daarnaast neemt de benodigde mijnbouw ruimte in; hoeveel wordt echter niet uitgewerkt.
Biogrondstoffengebruik	Deze methode maakt geen gebruik van biogrondstoffen.
Energiegebruik	Het energiegebruik wordt ingeschat op 0,3-2,7 GJ/ton CO ₂ . ⁵⁴
Permanentie	Na mineralisatie ligt de CO ₂ vast in een stabiele vorm. De opslag is daarmee in principe permanent.
Impact op biodiversiteit	Over het effect van grootschalige inzet van mineralisatie op biodiversiteit is nog weinig bekend. De impact zal sowieso afhangen van de specifieke toepassing en kan zowel positief als negatief uitpakken. Daarnaast is er de negatieve impact van mijnbouw op ecosystemen. Voor kunstmatige alkanisatie geldt dat de negatieve effecten op ecosystemen waarschijnlijk te groot zijn om als methode voor CO ₂ -verwijdering te worden toegepast.
Conflicten/synergieën	Een synergie voor mineralisatie is de toepassing in materialen, zoals ophoogzand voor kustverdediging, grind voor bestrating en cement voor in beton. Ook zijn er mogelijk voordelen voor de landbouw door bodemverbetering, wat leidt tot verminderde erosie en een verbeterde waterhuishouding. Wel is er kans op het vrijkomen van mogelijk schadelijke metalen in de bodem of in het water.
Kosten	De prijs wordt ingeschat op € 50-70 per ton CO ₂ .

54) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf

2.3 Methodes die vooral ruimte vereisen

Duurzame (her)bebossing

Landgebruik	Op basis van de gemiddelde huidige vastlegging wordt een landgebruik van 0,22 hectare per ton CO ₂ ingeschat.
Biograndstoffengebruik	Deze methode maakt geen gebruik van biograndstoffen.
Energiegebruik	Het energiegebruik voor deze methode is (nagenoeg) 0.
Permanentie	De koolstof ligt vastgelegd zolang het bos behouden blijft. Het creëren van robuuste ecosystemen en goed langetermijnbeheer zijn dus essentieel. Risico's op verstoring door bijvoorbeeld stormen en bosbranden blijven echter altijd bestaan. Ook is het nodig om de netto-verandering van de koolstofinhoud van bossen te meten.
Impact op biodiversiteit	Herbebossing en het herstel van ecosystemen bieden grote kansen voor het bevorderen van de biodiversiteit. Voorzichtigheid is wel geboden. De impact hangt af van het type beplanting (inheemse en autochtone soorten hebben in het algemeen de meeste waarde), de vorige bestemming (omzetting naar bos kan ook nadelig uitpakken, bijvoorbeeld wanneer het gebied eerst natuurlijk grasland was) en de opzet (een monocultuurplantage heeft nauwelijks waarde terwijl een natuurlijk bos dit wel heeft). Lokale ecologische kennis is dus essentieel bij het goed uitvoeren van deze methode.
Conflicten/synergieën	Bossen zijn essentieel voor het leven op aarde. Daarbij spelen gezonde ecosystemen een grote rol in klimaatadaptatie, recreatie en volksgezondheid. Daarnaast heeft (her)bebossing mogelijke synergieën met andere methodes voor koolstofverwijdering. Bossen kunnen hout leveren voor methodes die gebruikmaken van biograndstoffen, al is goed beheer hierbij van groot belang en moeten hier voor geen monocultuurplantages worden opgezet. Duurzame (her)bebossing en koolstofopslag in de bodem versterken elkaar. Ook kan een combinatie worden gemaakt met voedselproductie in de vorm van agroforestry en voedselbossen. Mogelijke conflicten zijn er op het gebied van ruimte, die in Nederland schaars is. Met behulp van synergieën kan wel gezocht worden naar meervoudig ruimtegebruik.
Kosten	De prijs wordt ingeschat op € 50 per ton CO ₂ voor bestaande natuurterreinen en >€ 200 bij grondaankoop van voormalige landbouwgrond. Onderbelicht in bestaande studies is dat bij andere vormen van landbouw, zoals agroforestry en voedselbossen, geen afwaardering van landbouwgrond hoeft plaats te vinden. Daarnaast is er in de praktijk niet alleen sprake van kosten. Er kan op verschillende manieren ook inkomen gegenereerd worden.

Koolstofopslag in de bodem

Landgebruik	Een schatting voor een realistische combinatie van landbouwmaatregelen is 0,43 hectare per ton CO ₂ . Dit is echter geen additioneel ruimtegebruik ten opzichte van de huidige landbouwpraktijk.
Biogroundstoffengebruik	Deze methode maakt geen gebruik van biogroundstoffen.
Energiegebruik	Het energiegebruik voor deze methode is (nagenoeg) 0.
Permanentie	De duur van de vastlegging hangt af van toekomstig beheer. Voor het aangroeien van veengebieden moeten deze voor lange tijd vochtig blijven. Wanneer ze verdrogen kan de opgeslagen koolstof weer vrijkomen. De vastlegging bij aangepaste landbouwmaatregelen blijft afhankelijk van de aanhoudende uitvoering van deze maatregelen.
Impact op biodiversiteit	Koolstofopslag in de bodem leidt tot een betere bodemkwaliteit en een betere vochtuishouding, wat een sterk positief effect heeft op zowel ondergronds als bovengronds leven. Onder de juiste omstandigheden kan ook de aangroei van veen in veeweidegebieden de biodiversiteit en de nutriëntenkringloop bevorderen.
Conflicten/synergieën	Koolstofopslag in de bodem gaat vaak hand in hand met duurzame (her) bebossing. Deze twee ontwikkelingen versterken elkaar. Daarnaast verbetert koolstofopslag in de bodem de bodemvruchtbaarheid, het vochtvasthoudend vermogen, de infiltratie bij zware regenbuien en de opbouw van stikstof in de bodem. Ook kan het erosie voorkomen. De invloed verschilt echter van locatie tot locatie; er moet dus goed rekening worden gehouden met de lokale context.
Kosten	De prijs wordt ingeschat op € 0-50 per ton CO ₂ .

Vastlegging in mariene ecosystemen

Landgebruik	Het landgebruik wordt ingeschat op 0,07 - 1,7 hectare per ton CO ₂ voor zeeleilandschappen zoals kwelders en zeedelta's en op 0,13 - 0,26 hectare per ton CO ₂ voor zeegrasvelden. Een groot deel hier van is op zee, waardoor het effectieve landgebruik lager is.
Biogroundstoffengebruik	Deze methode maakt geen gebruik van biogroundstoffen.
Energiegebruik	Het energiegebruik voor deze methode is (nagenoeg) 0.
Permanentie	Wanneer de opslag in kustecosystemen plaatsvindt, is de duur afhankelijk van de stabiliteit van deze ecosystemen. Het is ook mogelijk om biomassa te oogsten en af te zinken naar de diepe oceaan voor permanente opslag. Hierover is echter nog veel onbekend.
Impact op biodiversiteit	Het creëren of versterken van natuurlijke kustecosystemen heeft veel voordelen voor de biodiversiteit. Een punt van aandacht is dat geen inheemse soorten worden verdrongen of bestaande ecosystemen worden verstoord. Bij het op grote schaal afzinken van biomassa naar de oceanbodem zijn er mogelijk wel negatieve consequenties.

Conflicten/synergieën

Blauwe koolstof kan gecombineerd worden met natuurbescherming en -ontwikkeling. Ook zorgt het voor waterzuivering en kunnen stabiele kustecosystemen een belangrijke rol spelen in kustbescherming, bijvoorbeeld door het breken van golven. Een extra synergie is te vinden in de combinatie van windparken op zee met natuurversterking. Uitbreiding van mariene ecosystemen is mogelijk wel in conflict met bestaand ruimtegebruik.

Kosten

De prijs wordt ingeschat op € 3-160 per ton CO₂. Specifiek voor blauwe koolstof wordt € 9 per ton CO₂ genoemd, al ligt deze prijs in Nederland naar verwachting hoger.⁵⁵



55) WKR (2024): De lucht klaren? <https://www.wkr.nl/documenten/rapporten/2024/07/10/adviesrapport-de-lucht-klaren>

Bijlage 3: Analyse kosten

Zowel PBL⁵⁶ als CE Delft⁵⁷ geven inschattingen van de kosten van methodes, die in veel gevallen van elkaar verschillen. In de tabel hieronder wordt per methode aangegeven welke keuze hierin is gemaakt en wat de redenen daarvoor zijn. Prijzen zijn per ton CO₂.

Methode	Kosten PBL (€)	Kosten CE Delft (€)	Gekozen range (€)	Uitleg
BECCS bij kolencentrales	50-70	40-100	50-70	Range van PBL. CE Delft neemt de data van PBL rechtstreeks over, maar laat hierin de kosten voor opslag en transport weg. ⁵⁸ Bovendien worden de kosten van biogascentrales aan de range toegevoegd, wat hier niet relevant is.
BECCS bij AVI's	70-90	60-80	70-90	Range van PBL. CE Delft neemt de data van PBL rechtstreeks over, maar laat hierin de kosten voor opslag en transport weg. Dit geeft dus een verkeerd beeld van de daadwerkelijke kosten.
Hogetemperatuur-warmte met CCS	70 - 120	60 - 110	70 - 120	Range van PBL. CE Delft neemt de data van PBL rechtstreeks over, maar laat hierin de kosten voor opslag en transport weg.
Biochemie met CCS	7,5-13,5	-	7,5-13,5	In het productieproces ontstaat een relatief zuivere CO ₂ -stroom, die zonder meerkosten afgevangen kan worden. Het gaat hier dus alleen om de kosten voor opslag en transport, die CE Delft niet meerekent.
Superkritische watervergassing	-	-	-	Geen gegevens beschikbaar.
Biochar	100-500	200-1.500	100-500	In de beschrijving van CE Delft wordt letterlijk de tekst van PBL geciteerd. De kosten die in de samenvattende tabel gegeven worden lijken een verkeerde interpretatie van deze tekst. In dit rapport worden dus de kosten van PBL aangehouden.
Biobased bouwen	-	-	-	Er worden geen getallen gegeven voor de prijs per ton CO ₂ .

56) PBL (2022): Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland. https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2017-negatieve-emissies-technisch-potentieel-realistisch-potentieel-en-kosten-voor-nederland_2606.pdf

57) CE Delft (2023): Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid. https://ce.nl/wp-content/uploads/2023/07/CE_Delft_220460_Koolstofverwijdering_voor_klimaatbeleid_DEF-gecorrigeerd.pdf

58) Ook deze kosten worden gegeven als range, namelijk € 1,5 - 3,5 per ton CO₂ voor het transport en € 6 - 10 per ton CO₂ voor de opslag. Voor de overzichtelijkheid wordt in dit rapport met het naar beneden afgeronde gemiddelde van € 10 per ton CO₂ gerekend.

DACCS	260-860	85-540	85-540	Range van CE Delft. Gezien de snelle ontwikkeling van DACCS is een recentere inschatting betrouwbaarder.
Versnelde verwerking van mineralen	70	50-70	50-70	Range van CE Delft. Dit is een actualisatie van de inschatting van PBL.
Duurzame (her) bebossing	50- >200	50-1.000	50- >200	PBL geeft € 50 voor bestaande natuurterreinen en >€ 200 op voormalige landbouwgrond (als private grond moet worden opgekocht). Hoe de nog veel grotere range van CE Delft is bepaald, wordt niet duidelijk gemaakt. Voor dit rapport is daarom gekozen voor de range van PBL.
Koolstofopslag in de bodem	0-50	0-50	0-50	-
Vastlegging in mariene ecosystemen	-	3-160	3-160	Specifiek voor blauwe koolstof wordt door CE Delft een prijs van € 9 genoemd op basis van een wereldwijde studie. De WKR geeft hierbij aan dat deze kosten in Nederland naar verwachting (veel) hoger zullen liggen.

Colofon

Natuur & Milieu
Oktober 2024

Vormgeving

Meneer van Dijk

Tekstcorrectie

Teitler tekst

Contact

Natuur & Milieu

info@natuurenmilieu.nl

Peter de Jong: p.dejong@natuurenmilieu.nl

Simon de Jonge: s.dejonge@natuurenmilieu.nl

+31 (0)30 233 13 28

**NATUUR
& MILIEU**