



Methodes voor CO₂-verwijdering

Vergelijkend literatuuronderzoek naar
toepassing in de Nederlandse context

Opdrachtgever: Natuur & Milieu

Rotterdam, 25 april 2023

Methodes voor CO₂-verwijdering

Vergelijkend literatuuronderzoek naar
toepassing in de Nederlandse context

Opdrachtgever: Natuur & Milieu

Rotterdam, 25 april 2023

Rogier Eldering
Menno van Benthem

BEN/RG 1004438rap

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1 Inleiding	10
1.1 Aanleiding.....	10
1.2 Onderzoeksvragen.....	11
1.3 Afbakening.....	11
1.4 Methode.....	12
1.5 Terminologie.....	13
1.6 Leeswijzer.....	13
2 Beschrijving methodes	14
3 Inzichten uit de literatuur	16
3.1 Kosten per verwijderde ton CO ₂ equivalenten.....	16
3.2 Energieverbruik in de gehele keten per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten ..	19
3.3 Grondstoffenverbruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten.....	21
3.4 Direct en indirect landgebruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten.....	23
3.5 Vastleggingsduur van de verwijderde CO ₂	26
3.6 Inpassing in een hernieuwbare en circulaire economie.....	28
3.7 Impact op leefomgeving en economie.....	31
3.8 Potentiële synergiën en conflicten.....	36
4 Conclusies	40
Literatuurlijst	45

Samenvatting

Aanleiding

Om klimaatverandering tegen te gaan, moet de CO₂-concentratie in de atmosfeer beperkt worden. Het kabinet heeft zich vastgelegd op een reductie van 55% CO₂-emissie in 2030 ten opzichte van 1990, met een streven naar 60% reductie. De belangrijkste manier om dit te bereiken is het verminderen van CO₂-emissies afkomstig van fossiele brandstoffen. Het beperken van CO₂-emissies zelf is echter onvoldoende, er zijn ook methodes nodig die CO₂ uit de lucht verwijderen. De beleidsmatige inzet van deze methodes is relatief nieuw en nog volop in ontwikkeling. Er is daarom nog veel onduidelijkheid over de effecten van deze methodes.

Doel en scope

Het doel van dit rapport is om een aantal verschillende methodes voor CO₂-verwijdering met elkaar te vergelijken. In dit onderzoek hebben we in totaal zes methodes onderzocht:

1. Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)
2. Vastlegging in bossen
3. Vastlegging in de bodem
4. Vastlegging in mariene ecosystemen
5. Biokool
6. Versnelde verwerking van mineralen

Deze zes methodes hebben we op acht indicatoren beoordeeld:

1. Kosten
2. Energieverbruik in de keten
3. Grondstoffenverbruik
4. Direct en indirect landgebruik
5. Duur van de CO₂-vastlegging
6. Inpassing in een hernieuwbare economie
7. Impact op leefomgeving en economie
8. Synergieën en conflicten

Methode

Voor het beoordelen van de methodes hebben we gebruikgemaakt van bestaande bronnen. In eerste instantie baseren we ons op publicaties van Nederlandse agentschappen en onderzoeksbureaus. Waar nodig zijn deze aangevuld met wetenschappelijke literatuur.

Resultaten

Kosten

De kosten van de methodes zijn onzeker en zijn van verschillende factoren afhankelijk. De inschattingen van de kosten per methode verschillen daardoor ook tussen bronnen. Over het algemeen worden voor 2030 CO₂-vastlegging in de bodem en in mariene ecosystemen als goedkope opties aangemerkt en biokool als een dure optie. De geschatte kosten van BECCS en vastlegging in bossen variëren sterk. Deze variëren van minimaal dezelfde orde van

grootte als vastlegging in de bodem tot maximaal (de lagere regionen van) biokool anderzijds. In 2050 zijn de kosten van de meeste technieken waarschijnlijk lager dan in 2030.

Energieverbruik

In oplopende volgorde hebben eerst vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen een verwaarloosbaar energieverbruik. Versnelde verwerking van mineralen heeft vervolgens een significant energieverbruik tijdens het verwerken en transporteren van de mineralen. Biokool heeft een hoge energiebehoefte, vooral voor reactoren waarin de biomassa tot hoge temperaturen verwarmd wordt. BECCS is de enige methode die netto energie opwekt bij de verbranding van de biomassa, waarvan een gedeelte gebruikt wordt voor de afvang en opslag van de CO₂.

Grondstoffenverbruik

Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen kennen geen grondstoffengebruik. BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen hebben echter een grote grondstoffenbehoefte. Deze grondstoffen kunnen in onvoldoende mate in Nederland geproduceerd worden en zullen daarom geïmporteerd moeten worden.

Landgebruik

In het landgebruik is een scheiding te zien tussen enerzijds BECCS en biokool en anderzijds vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen. BECCS en biokool gebruiken direct weinig ruimte, ze hebben alleen de ruimte voor de installaties nodig. Indirect gebruiken ze echter veel ruimte voor de productie van grondstoffen. Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen laten een tegenovergesteld beeld zien. Het directe landgebruik is groot, terwijl ze indirect geen land nodig hebben. Er zijn wel mogelijkheden voor multifunctioneel ruimtegebruik. Versnelde verwerking van mineralen heeft een klein direct en indirect landgebruik, mits de mineralen verspreid worden in multifunctionele ruimtes.

Vastleggingsduur

CO₂ wordt met alle methodes langdurig vastgelegd, als er voldaan wordt aan enkele voorwaarden. Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen is permanent, zolang deze ecosystemen intact en gezond blijven. Ook BECCS is permanent, zolang de afgevangen CO₂ niet uit de opslag kan ontsnappen. De laatste permanente optie is versnelde verwerking van mineralen. De mineralen zijn chemisch stabiel en houden de koolstof vast. Hoewel niet permanent is biokool erg stabiel. Hierdoor vergaat het erg langzaam en blijft het duizenden jaren intact.

Inpassing in een hernieuwbare economie

Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen zijn erg geschikt voor een hernieuwbare economie. Deze systemen zijn hernieuwbaar van zichzelf en hebben, indien ze gezond zijn, geen grondstoffen of energie van buitenaf nodig. BECCS en biokool zijn beide beperkt inpasbaar in een hernieuwbare economie. De benodigde biomassa is moeilijk op hernieuwbare en duurzame wijze te produceren. Daarnaast is hergebruik van de afgevangen CO₂ en geproduceerde biokool zeer beperkt.

Impact op de leefomgeving en economie

Voor geen van de methodes is concrete informatie gevonden over de effecten op lokale economie en werkgelegenheid. Voor vastlegging in bossen, de bodem en mariene

ecosystemen zijn de effecten op de leefomgeving bekend en uitgesproken positief. Deze systemen hebben een grote positieve werking op de biodiversiteit, hebben een bufferfunctie tegen extreem weer en dragen bij aan de gezondheid van omliggende gebieden. BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen zijn nog relatief nieuwe methodes, waardoor ze hooguit in kleinschalige testopstellingen bestaan. Hierdoor zijn veel effecten nog onbekend en onbewezen. Aan alle drie worden zowel positieve als negatieve effecten toegeschreven.

Synergieën en conflicten

Voor bijna alle methodes zijn synergieën en conflicten gevonden. De versnelde verwerking van mineralen is een opvallende buitenstaander, waarvoor geen duidelijke synergieën of conflicten gevonden zijn. Er is geen methode die duidelijk naar voren komt als beste keuze, dit is afhankelijk van het belang dat aan de synergieën en conflicten toegerekend wordt.

De synergieën zijn divers en beslaan verschillende thema's. Ze variëren van efficiënter gebruik van grondstoffen en reststromen tot voordelen voor de biodiversiteit, kustverdediging, werkgelegenheid en een potentiële transitie in landbouwwormen.

De meeste conflicten zijn samen te vatten in twee groepen. De eerste draaien om gelimiteerde beschikbaarheid van grondstoffen, specifiek biomassa. Zowel BECCS als biokool (en andere toepassingen) concurreren om dezelfde biomassa, waarbij de verhoogde vraag tot grootschalige verandering van landgebruik, biodiversiteitsverlies en landdegradatie kan leiden.

De andere groep conflicten draait om de benodigde ruimte, waarbij uitbreiding van bossen, de bodem en (in mindere mate) mariene ecosystemen op gespannen voet staat met het bestaande ruimtegebruik.

Conclusie

In tabel S.1 geven we een overzicht van de scores op alle indicatoren voor elk van de zes onderzochte methodes. Harde conclusies over de toepassing van de methodes in Nederland zijn echter nog moeilijk te trekken, gezien de beperkte beschikbaarheid van studies en praktijktoepassingen. Enerzijds is het effect van de verschillende methodes sterk afhankelijk van de gebruikte grondstoffen en de beschikbare ruimte. Anderzijds zijn de effecten slechts op kleine schaal onderzocht. Toepassing van een methode op grote schaal, zoals voor heel Nederland, zou daarom onvoorziene effecten tot gevolg kunnen hebben. De resultaten van dit onderzoek zijn daarom van voorlopige aard en meer onderzoek is gewenst voor alle methodes.

Tabel S 1 Resultaten per onderzoeksvraag en methode

	BECCS bij kolencentrales/AVI's	Vastlegging in bossen	Vastlegging in de bodem	Vastlegging in mariene ecosystemen	Biokool	Versnelde verwerking van mineralen
1.1 Kosten per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten 2030	Kolencentrales: 57 – 88 euro/tCO ₂ AVI's: 72 - 96 euro/tCO ₂	60 - 239 euro/tCO ₂	0 - 60 euro/tCO ₂	10 - 97 euro/tCO ₂	119 - 597 euro/tCO ₂	84 euro/tCO ₂
1.2 Kosten per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten 2050	Kolencentrales: 88 - 177 euro/tCO ₂ AVI's: onbekend	13 - 44 euro/tCO ₂	0 - 100 euro/tCO ₂	44 - 88 euro/tCO ₂	26 - 106 euro/tCO ₂	onbekend
2. Energieverbruik in de gehele keten per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	-0,8 - -10 GJ/tCO ₂	0 GJ/tCO ₂	0 GJ/tCO ₂	0 GJ/tCO ₂	200,5 GJ/tCO ₂	0,3 – 46 GJ/tCO ₂
3. Grondstoffengebruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	Biomassacentrale: 1,41 – 2,21 ton biomassa/tCO ₂ AVI's: 1,57 Mton afval/tCO ₂	Vastlegging in bossen: geen grondstoffengebruik Houtbouw: 1,67 m ³ hout/tCO ₂	Geen grondstoffengebruik	Geen grondstoffengebruik	2,8 - 25 ton biomassa/tCO ₂	0,8 – 1 ton olivijn/tCO ₂
4.1 Direct landgebruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	Verwaarloosbaar direct landgebruik	0,21 - 0,29 ha/tCO ₂ /jaar	0,9 – 12,5 ha/tCO ₂ /jaar	0,07 – 1,2 ha/tCO ₂ /jaar	Verwaarloosbaar direct landgebruik	Verwaarloosbaar direct landgebruik
4.2 Indirect landgebruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	Biomassacentrale: 0,1 – 1,7 ha/tCO ₂ AVI's: 0 ha/tCO ₂	Geen indirect landgebruik	Geen indirect landgebruik	Geen indirect landgebruik	0,19 ha/tCO ₂	<0,01 ha/tCO ₂
5. Vastleggingsduur van de verwijderde CO ₂	Permanent bij opslag in lege gasvelden	Permanent met goed bosbeheer 75 – 300 jaar voor houtbouw	Permanent met goed bodembeheer	Permanent met goed beheer	Duizenden jaren	Permanent

	BECCS bij kolencentrales/AVI's	Vastlegging in bossen	Vastlegging in de bodem	Vastlegging in mariene ecosystemen	Biokool	Versnelde verwerking van mineralen
6. Inpassing in een hernieuwbare en circulaire economie	Geen consensus, dankzij discussie over CO ₂ -lekken en duurzame biomassaproductie	Volledige inpassen	Volledige inpassen	Volledige inpassing	Onbekend, vanwege onbewezen effect op de leefomgeving	Beperkte inpassing, vanwege theoretische eindigheid van mineralen en onbewezen effect op de leefomgeving
7. Impact op leefomgeving en economie	Sterk negatieve impact op de leefomgeving, mogelijk positieve impact op economie	Sterk positieve impact op de leefomgeving, onbekend effect op de economie	Sterk positieve impact op de leefomgeving, mogelijk negatieve impact op economie	Sterk positieve impact op de leefomgeving, onbekende impact op de economie	Onbewezen impact op de leefomgeving, positief effect op de economie	Onbewezen impact op de leefomgeving, mogelijk positieve impact op de economie

	BECCS bij kolencentrales/AVI's	Vastlegging in bossen	Vastlegging in de bodem	Vastlegging in mariene ecosystemen	Biokool	Versnelde verwerking van mineralen
8. Potentiële synergieën en conflicten	<p>Synergie: Opwekking van duurzame energie gaat ten koste van energie uit fossiele brandstoffen.</p> <p>Synergie: Uitbreiding van het bosareaal vergroot de grondstoffenvoorraad voor BECCS.</p> <p>Conflict: BECCS en biokool concurreren om dezelfde grondstoffen.</p> <p>Conflict: Grotere biomassaproductie kan tot voedselproblematiek en landdegradatie leiden.</p>	<p>Synergie: Uitbreiding van bossen biedt meer hernieuwbare grondstoffen voor houtbouw.</p> <p>Synergie: Uitbereiding van bossen profiteert van extensievere landbouwtechnieken.</p> <p>Synergie: Hout uit bossen kan als grondstof voor BECCS en biokool gebruikt worden.</p> <p>Synergie: Uitbreiding van bossen verhoogt de CO₂-opslag in de bodem voor vergroting van de organische laag.</p> <p>Conflict: Uitbreiding van bossen heeft een sterke impact op het landgebruik.</p>	<p>Synergie: Vastlegging in de bodem kan versterkt worden door vastlegging in bossen.</p> <p>Conflict: Uitbereiding van veenbodems gaat ten koste van het huidige landgebruik.</p>	<p>Synergie: Uitbereiding van mariene ecosystemen profiteert van extensievere landbouwtechnieken.</p> <p>Synergie: Mariene ecosystemen kunnen bijdragen aan de kustverdediging.</p> <p>Synergie: Mariene ecosystemen kunnen zich ontwikkelen rondom windparken op zee.</p> <p>Conflict: Uitbreiding van mariene ecosystemen gaat ten koste van het huidige landgebruik.</p>	<p>Synergie: Biokool kan hout en mogelijk zilte biomassa als grondstof gebruiken.</p> <p>Synergie: Biokool en biobased brandstoffen/grondstoffen zijn onderdeel van hetzelfde productieproces.</p> <p>Conflict: Biokool en BECCS concurreren om dezelfde grondstoffen.</p> <p>Conflict: Grotere biomassaproductie kan tot voedselproblematiek en landdegradatie leiden.</p>	

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Om klimaatverandering tegen te gaan, moet de concentratie CO₂ (equivalenten) in de atmosfeer beperkt worden. De belangrijkste manier om te dit bereiken is het verminderen van CO₂-emissies afkomstig van fossiele brandstoffen. Uit steeds meer klimaatscenario's blijkt echter dat emissiereductie alleen onvoldoende is om te voorkomen dat de concentratie broeikasgassen in de lucht te hoog wordt na 2030. Het kabinet heeft zich vastgelegd op een reductie van 55% CO₂-emissie in 2030 ten opzichte van 1990, met een streven naar 60% reductie. Om ambitieuzere klimaatdoelstellingen te halen zijn methodes nodig die CO₂ uit de lucht verwijderen. Restemissies zijn namelijk onvermijdelijk, methodes voor het verwijderen van CO₂ moeten hiervoor gaan compenseren.¹

Deze methodes worden vaak 'negatieve emissies' genoemd. In dit rapport hanteren we 'methodes voor CO₂-verwijdering'. De term negatieve emissie kan suggereren dat deze methodes pas werken als het niveau van CO₂-emissie op nul uitkomt.

De afgelopen jaren hebben methodes voor CO₂-verwijdering meer aandacht gekregen en beginnen ze een belangrijke rol te krijgen in klimaatplannen en -doelstellingen. Door de Tweede Kamer zijn daarnaast verschillende moties aangenomen om de rol van CO₂-verwijdering in de klimaatplannen te verduidelijken.^{4,5}

In het klimaatakkoord speelt CO₂-verwijdering ook een prominente rol. CO₂-verwijdering wordt als noodzakelijke activiteit benoemd om de 2030-doelstelling te halen. Het klimaatakkoord ziet een belangrijke rol weggelegd verschillende methodes die CO₂ verwijderen, zoals vastleggen in de bodems, bossen en BECCS.⁶

Dit jaar heeft het Interdepartementaal Beleidsonderzoek (IBO) CO₂-verwijdering als een van de 6 hoofdaandachtspunten benoemd.⁷ Het IBO adviseert om te bepalen hoe CO₂-verwijdering over de sectoren verdeeld kan worden, uit te zoeken hoe burgers en bedrijven geprikkeld kunnen worden om koolstof vast te leggen en een markt voor CO₂-verwijdering te stimuleren. Het belang van CO₂-verwijdering om de klimaatdoelstellingen in 2050 te kunnen halen wordt benadrukt; zo zou BECCS vanaf 2030 1 Mton CO₂ per jaar moeten verwijderen. Ook andere methodes zoals het vergroten van veengebieden en (her)bebossing worden genoemd.⁸

Het IBO ziet CO₂-verwijdering echter als ondergeschikt aan het reduceren van CO₂-emissies. Ze benoemen duidelijk dat hoe meer CO₂-emissies gereduceerd worden, des te minder CO₂-verwijdering er nodig is.

¹ Jetten (2023) *Naar een beleidsagenda voor een Klimaatneutraal Nederland*

⁴ Bontenbal en Erkens (2022) *Motie van de leden Bontenbal en Erkens- Industriebeleid*

⁵ Bontenbal en Amhaouch (2021) *Motie van de leden Bontenbal en Amhaouch – Kabinetsaanpak Klimaatbeleid*

⁶ Diverse partijen (2019) *Klimaatakkoord*

⁷ Het IBO gebruikt de term 'negatieve emissies' waar in dit rapport CO₂-verwijdering gehanteerd wordt. .

⁸ IBO (2023) *Scherpe doelen, scherpe keuzes: IBO aanvullend normerend en beprijzend national klimaatbeleid voor 2030 en 2050*

In navolging van het IBO rapport, heeft het kabinet op 26 april 2023 een aanvullend pakket klimaatmaatregelen aangekondigd. Door de toepassing van CO₂-verwijdering door middel van BECCS (en andere maatregelen) en AVI's wil het kabinet in 2030 respectievelijk 1,5 en 2 Mton CO₂-emissiereductie realiseren.⁹

Methodes voor CO₂-verwijdering gebruiken mogelijk energie en grondstoffen. Ook is er, afhankelijk van de methode, land nodig. Er is nog onduidelijkheid over de effecten op bijvoorbeeld de leefomgeving, economie en biodiversiteit en de termijn waarvoor CO₂ vastgelegd wordt. Het is daarmee niet duidelijk in welke mate methodes voor CO₂-verwijdering een toegevoegde waarde hebben voor de bredere klimaatopgave.

Het doel van dit rapport is om de verschillende methodes voor CO₂-verwijdering met elkaar te vergelijken. Het rapport geeft beleidsmakers en stakeholders inzicht in de mogelijkheden en uitdagingen bij de uitrol van methodes voor het realiseren van CO₂-verwijdering als aanvulling op bestaand beleid.

1.2 Onderzoeksvragen

Natuur en Milieu wil inzichtelijk maken wat het potentieel van verschillende methodes voor de verwijdering van CO₂ is in de Nederlandse context. Hiervoor zijn acht onderzoeksvragen opgesteld die verschillende aspecten van de onderzochte methodes beschouwen. De onderzoeksvragen zijn:

1. Wat zijn de typische kosten per methode per verwijderde ton CO₂-equivalenten?
2. Wat is het typische energieverbruik in de gehele keten voor de methode per verwijderde ton CO₂-equivalenten?
3. Wat is het typische grondstoffenverbruik voor de methode per verwijderde ton CO₂-equivalenten?
4. Wat is het typische directe en indirecte landgebruik voor de methode per verwijderde ton CO₂-equivalenten?
5. Hoelang blijven de CO₂-equivalenten typisch vastgelegd bij de beschouwde methode?
6. Hoe goed past de methode waarmee CO₂-verwijdering wordt gerealiseerd binnen een hernieuwbare en circulaire economie?
7. Wat is de impact (positief of negatief) op andere factoren zoals biodiversiteit, lucht-, water- en bodemkwaliteit, de lokale economie en werkgelegenheid?
8. Wat zijn potentiële conflicten of juist synergieën tussen verschillende methodes?

1.3 Afbakening

In dit onderzoek beschouwen we zes methodes voor de verwijdering van CO₂. Deze methodes komen veelvuldig in de literatuur terug als bruikbare methodes en zijn (technisch) voldoende ontwikkeld voor (grootschalige) inzet. Deze methodes zijn:

⁹ Jetten (2023) *Tabel Klimaatpakket voorjaarsbesluitvorming*.

1. Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) bij kolencentrales en/of AVI's;
2. Vastlegging in bossen¹⁰;
3. Vastlegging in de bodem;
4. Vastlegging in mariene ecosystemen (blue carbon);
5. Biokool (biochar);
6. Versnelde verwerking van mineralen.

De hoeveelheid CO₂ (tCO₂) die een methode potentieel kan verwijderen, is geen expliciet onderdeel van deze beschouwing. Dit is door verschillende studies al in kaart gebracht voor de methodes in het algemeen^{11,12,13} en voor Nederland in het bijzonder^{14,15}. In plaats daarvan richten we ons op de indicatoren die voor een belangrijk deel de haalbaarheid en het potentieel voor toepassing van de methode in Nederland bepalen. We hanteren daarbij geen specifieke tijdshorizon, maar geven die aan wanneer relevant.

Ook expliciet geen onderdeel van deze studie zijn losstaande Carbon Capture and Storage (CCS) en Carbon Capture and Utilisation (CCU) methodes. Deze methodes voorkomen dat (een deel van de) CO₂ uitgestoten wordt, maar verwijderen deze niet actief uit de atmosfeer voor een lange of onbepaalde tijd. (Bij BECCS is dit wel het geval, aangezien deze biomassa die CO₂ verwijderd als grondstof gebruikt).

Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) maakt ook geen onderdeel uit van deze studie. DACCS is een zeer energie-intensief proces en lijkt op dit moment nog niet geschikt voor grootschalige commerciële toepassing.

Als laatst zijn methodes die CO₂ niet langdurig kunnen vastleggen niet meegenomen. Deze beschouwen we niet als methodes voor CO₂-verwijdering, in lijn met het IPCC.

1.4 Methode

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen maken we gebruik van bestaande bronnen. Deze documentatie verzamelen we in twee stappen. In eerste instantie focussen we ons op documentatie van Nederlandse uitvoeringsorganisaties en (inter)nationale agentschappen. Zo is de beschikbare documentatie zo goed mogelijk toegespitst op de Nederlandse context. De beschikbare bronnen analyseren we op betrouwbaarheid, volledigheid van informatie en toepassing in de Nederlandse context. In tweede instantie zoeken we gericht naar wetenschappelijke bronnen voor die onderzoeksvragen en/of methodes waarover de in stap 1 verzamelde informatie gebrekkig blijkt.

¹⁰ Bij vastlegging in bossen nemen we ook houtbouw in overweging.

¹¹ Minx et al (2018) *Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis*

¹² Fuss et al (2018) *Negative emissions part 2: Costs, potentials and side effects*

¹³ Energy Transition commission (2022) *Mind the gap. How CO₂ removal must complement deep decarbonisation to keep 1.5 °C alive*

¹⁴ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

¹⁵ RHDHV (2022) *Quickscan behoefte naar en onderzoeksprogramma gericht op negatieve CO₂-emissie*

1.5 Terminologie

- **Agroforestry:** Boslandbouw waarbij houtige gewassen gecombineerd worden met landbouw en/of veeteelt op hetzelfde land.
- **Aquacultuur:** Teelt van aquatische gewassen en dieren.
- **AVI:** Afvalverbrandingsinstallatie
- **BECCS:** Bio-energy met Carbon Capture and Storage. Methode waarbij biomassa verbrand wordt en de resulterende CO₂ afgevangen en opgeslagen wordt.
- **Biokool / biochar:** Een koolachtige materie met een hoog koolstofgehalte. Het is een product van thermochemische conversie van biomassa, waarbij ook gassen en oliën vrijkomen.
- **CCS:** Carbon Capture and Storage. Het afvangen en permanent opslaan van CO₂ die vrijkomt bij het verbranden van fossiele brandstoffen.
- **CCU:** Carbon Capture and Utilization. Het afvangen van CO₂ bij de verbranding van fossiele brandstoffen om deze te verwerken in een product.
- **CDR:** Carbon Dioxide Removal. De hoeveelheid CO₂ in de lucht wordt verlaagd door het verwijderen en permanent opslaan van CO₂.
- **DACCS:** Direct Air Carbon Capture and Storage. Techniek om CO₂ uit de lucht te filteren en permanent op te slaan.
- **Direct landgebruik:** Landgebruik nodig voor een methode of proces zelf.
- **Indirect landgebruik:** Landgebruik nodig voor de gehele keten van een methode of proces, inclusief grondstoffenproductie en reststroomverwerking.
- **Negatieve emissie:** Het resultaat van CO₂-verwijdering op systeemniveau.

1.6 Leeswijzer

- In [hoofdstuk 2](#) geven wij eerst een algemene beschrijving van de zes onderzochte methodes.
- In [hoofdstuk 3](#) beantwoorden wij vervolgens een voor een de gestelde onderzoeksvragen voor alle onderzochte methodes.
- [Hoofdstuk 4](#) besluit het rapport met enkele algemene conclusies over de voor- en nadelen van de verschillende methodes, waarbij ook gekeken wordt naar hun onderlinge samenhang in relatie tot de Nederlandse doelen voor klimaat en natuur.

2 Beschrijving methodes

In dit onderzoek zijn zes methodes voor het realiseren van negatieve CO₂ emissies met elkaar vergeleken en beoordeeld.

Bio Energie en CCS (BECCS) bij kolencentrales en/of AVI's

Kolencentrales en AVI's verbranden steenkool dan wel afval, waarbij energie vrij komt die vervolgens gebruikt kan worden. Bij het verbrandingsproces komt CO₂ vrij die uitgestoten wordt. Deze CO₂ kan door Carbon Capture and Storage (CCS) systemen afgevangen en opgeslagen worden, waardoor er bijna geen CO₂ meer vrijkomt. Hiermee kan een kolencentrale bijna CO₂-neutraal worden. Als kolencentrales overschakelen op biomassa in plaats van kolen wordt er in theorie netto CO₂ verwijderd uit de lucht. Dit komt doordat de biomassa tijdens de groei CO₂ opneemt, die dankzij CCS niet meer terugkeert in de atmosfeer. Hetzelfde proces geldt voor AVI's wanneer ze afval van biogene oorsprong verbranden en de vrijgekomen CO₂ wordt afgevangen. Deze methode kent nog geen grootschalige of commerciële toepassing en is dus weinig getest in de praktijk.

BECCS kent mogelijk ook toepassingen in de chemische industrie, bijvoorbeeld bij de productie van plastics uit biogene grondstoffen. Deze toepassingen worden in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten, aangezien dit CCU toepassingen zijn en technologisch niet voldoende ontwikkeld. Ook zijn er geen toepassingen bekend in de chemische industrie die langdurige koolstofopslag garanderen.

Vastlegging in bossen

Bomen leggen van nature CO₂ vast doordat zij CO₂ gebruiken als bouwsteen tijdens hun groeiproces. De CO₂ blijft opgeslagen zolang de boom leeft en groeit. Wanneer deze afsterft, vergaat het hout en komt de koolstof weer vrij als onder andere CO₂ of CH₄. Door het vergroten van het areaal aan bossen wordt er meer CO₂ vastgelegd in de nieuwe bomen dan dat er vrijkomt. Dit proces wordt versterkt met goed bosmanagement waarbij de jaarlijkse opslag verhoogd kan worden.

Er zijn verschillende mogelijkheden voor het vergroten van het bosareaal. Zo kunnen nieuwe bossen aangelegd worden en bestaande bossen uitgebreid worden. Ook kunnen bossen aangelegd worden voor voedselproductie (agroforestry) of houtproductie. Het hout kan vervolgens gebruikt worden voor andere toepassingen waar het langer in gebruik blijft, bijvoorbeeld als toepassing in de bouw. Zolang het hout in een gebouw zit, vergaat het niet en blijft de CO₂ vastgelegd.

Vastlegging in de bodem

Verschillende onderdelen van de bodem hebben een groot potentieel voor het vasthouden en vastleggen van CO₂. Zo ligt er gemiddeld 11 kg koolstof per m² vastgelegd in de Nederlandse bodem, wat in Europees verband overigens aan de lage kant is.¹⁶ Door het toepassen van een mix van landbouwtechnieken kan deze organische laag vergroot worden. Bijvoorbeeld door het land minder te 'keren' en 'scheuren' waardoor het organisch materiaal minder

¹⁶ CLM et al (2013) *Verwaarden van goed bodemkoolstofbeheer in de landbouw*

oxideert en meer kan aangroeien. Ook kunnen gewassen geplant worden die meer koolstof vastleggen en kunnen gewasresten op het land achtergelaten worden.

Een andere manier om CO₂ in de bodem vast te leggen is door de groei van veengebieden en wetlands te stimuleren. Door het veen praktisch onder water te zetten door het verhogen van de waterstand, kan veen weer aangroeien waarmee het CO₂ vastlegt.

Vastlegging in mariene ecosystemen

Onder blue carbon wordt de vastlegging van CO₂ in mariene ecosystemen verstaan. Hierin worden twee categorieën onderscheiden: *deep blue carbon* en *coastal blue carbon*. Deep blue carbon betreft de koolstof opgeslagen in diepzeesystemen. Coastal blue carbon gaat over kustecosystemen zoals zeegrasvelden, mangroves, kwelders en Nederlandse zeekleilandschappen. De processen die in deze ecosystemen CO₂ vastleggen zijn vergelijkbaar met vastlegging in de bodem (op land), maar dan in kustsystemen. Volgens schattingen gaat 83% van de koolstofcyclus door mariene ecosystemen en zijn kustecosystemen goed voor de helft van de koolstofopslagcapaciteit.¹⁷ Het vergroten van deze systemen zorgt voor meer plantengroei en vastlegging van CO₂ in de organische laag op de zeebodem. Net als bij vastlegging in bossen, kan een marien ecosysteem in zijn natuurlijke toestand gelaten worden of gebruikt worden om bepaalde gewassen te produceren (aquacultuur). Of aquacultuur vervolgens leidt tot CO₂-verwijdering, is afhankelijk hoelang het product de koolstof vasthoudt.

Biokool (biochar)

Biokool (of biochar in het Engels) is een koolstofproduct van pyrolyseprocessen. In een pyrolyseproces wordt biomassa tot enkele honderden graden verwarmd zonder zuurstof, waardoor de biomassa niet verbrandt maar verkoolt. Wat overblijft is een mix van gassen, bio-oliën en biokool. De gassen en oliën kunnen verder opgewerkt worden tot brandstof of als grondstof voor de chemische industrie dienen. De biokool is een zeer stabiel product waar CO₂ in vastgelegd is. De biokool dient vervolgens opgeslagen te worden. De meest besproken opslagmethode is het verspreiden van de biokool over landbouwgronden ten behoeve van de vruchtbaarheid van de bodem.

Versnelde verwerking van mineralen

Een aantal natuurlijke mineralen (zoals olivijn) leggen CO₂ vast op het moment dat ze verwerken. Onder invloed van water en wind verweert het mineraal in kleine deeltjes en reageert het met CO₂. Er wordt een nieuw, stabiel mineraal gevormd waarin koolstof is vastgelegd. Dit is een natuurlijk proces, dat normaal gesproken traag verloopt. Als je de verwerking kunstmatig versnelt door de mineralen te vermalen, versnel je het chemische proces. Hiervoor zou het mineraal tot 2 micrometer vermalen moeten worden en op grote schaal aan de lucht moeten worden blootgesteld. Voorgestelde toepassingen zijn het opnemen van vermalen olivijn in beton, het vermalen van olivijn met zand voor bouwprojecten en het uitspreiden van olivijn over het strand.

¹⁷ www.bluecarbon.nl, geraadpleegd 30-03-2023

3 Inzichten uit de literatuur

3.1 Kosten per verwijderde ton CO₂ equivalenten

In 2018 heeft het PBL in een studie de verwachte additionele kosten per verwijderde ton CO₂ onderzocht. Deze kosten zijn weergegeven in figuur 3.1.¹⁸ Hierin heeft het PBL voor zover mogelijk de hele keten meegenomen. Gezien grote onzekerheden in de toepassing van de methodes, zijn de kosten in een bereik weergegeven. Dit maakt het ook onzeker of een methode rendabel kan zijn of ondersteuning vanuit de overheid nodig heeft. Om dit te bepalen is aanvullend onderzoek nodig.

Voor **BECCS** betekent het meenemen van de hele keten dat (houtachtige) biomassa ingekocht en getransporteerd wordt en door middel van verbanding verwerkt wordt. De afgevangen CO₂ wordt getransporteerd naar lege gasvelden onder de Noordzee voor opslag. De opslagcapaciteit van de gasvelden wordt nog in kaart gebracht op het moment en is daarmee bepalend voor de potentiële capaciteit van BECCS in Nederland.

In Nederland is onvoldoende biomassa beschikbaar om BECCS toe te kunnen passen. Biomassa dient geïmporteerd te worden, wat extra kosten met zich meebrengt. BECCS in AVI's wordt iets duurder verondersteld dan in biomassacentrales. Het totale kostenbereik loopt van € 72 tot € 96 per verwijderde ton CO₂.

Per verwijderde ton CO₂ zijn ongeveer twee derde van de kosten voor investeringen en één derde voor operationele uitgaven.¹⁹ Van deze operationele uitgaven zijn aanschaf en transport van de biomassa grote kostenposten. Inschattingen van de grootte van deze kostenposten variëren flink, afhankelijk van het type biomassa en de afstand waarover deze getransporteerd moet worden.²⁰

De kosten voor **vastlegging in bossen** zijn grotendeels afhankelijk van de gronden waar de bossen op gerealiseerd worden. De kosten aan de onderkant van het bereik gaan uit van het herstel en verbetering van bestaande bossen, terwijl de hoge kant van het bereik uitgaat van grondaankoop voor nieuw aan te planten bossen. Hierbij wordt uitgegaan van enkelvoudig ruimtegebruik.

Eenzelfde verklaring is er voor het bereik van **vastlegging in de bodem**. Aan de lage kant van het bereik zitten de kosten voor verschillende landbouwtechnieken. Deze technieken kunnen zonder grote ingrepen in samenhang met de bestaande landbouw uitgevoerd worden en hebben daarmee maar beperkte extra kosten. Deze kosten zouden nog lager kunnen zijn als wordt uitgegaan van biologische landbouwbedrijven, die een aantal van de

¹⁸ De kosten voor de toepassing van een methode verschillen onderling, en verschillen voor een methode per bron. We hanteren het prijspeil 2023 bij het beantwoorden van deze onderzoeksvraag. Waar bedragen niet in euro's worden benoemd, worden deze omgerekend naar euro's voor de wisselkoers van 1 januari van dat betreffende jaar waarna een inflatiecorrectie toegepast wordt.

¹⁹ Smith et al. (2016) *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*

²⁰ Fuss et al (2018) *Negative emissions part 2: Costs, potentials and side effects*

landbouwtechnieken al gedeeltelijk toepassen. Het PBL schat de kosten van de andere landbouwtechnieken tussen de € 0 – € 60 per verwijderde ton CO₂.

Het PBL doet geen uitspraken over de kosten van het herstel van veengebieden en wetlands. De Energy Transition Commission (2022) geeft voor het herstel van deze gebieden een bereik van € 10 – € 97 per verwijderde ton CO₂. De ETC gaat hier echter uit van veengebieden en wetlands over heel Europa. In Nederland worden de veengebieden intensief gebruikt voor landbouw en hebben een relatief hoge grondprijs, waardoor de prijs hier mogelijk hoger ligt. .

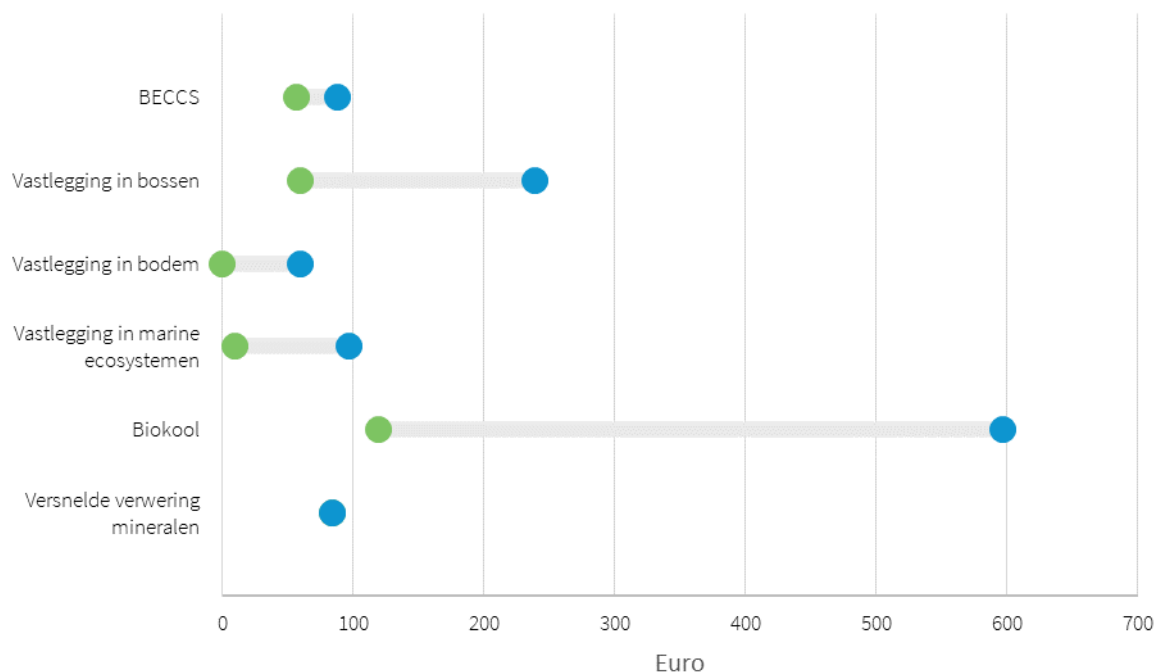
Het PBL doet ook geen uitspraken over de kosten van [vastlegging in mariene ecosystemen](#). Het ETC geeft voor blue carbon hetzelfde kostenbereik als voor vastlegging in veengebieden, namelijk € 10 – € 97 per verwijderde ton CO₂. De ETC benoemt hierbij specifiek mangroves, zoutmoerassen, en kwelders, maar geen zeegrasvelden. Mangroves komen echter niet voor in Nederland, terwijl zeegrasvelden zeer geschikt zijn voor delen van de Nederlandse kust.

Voor alle vastleggingsmethodes in de bodem gezamenlijk, liggen de kosten tussen de € 0 en € 97 per verwijderde ton CO₂.

De kosten voor [biokool](#) bestaan hoofdzakelijk uit de kosten voor de benodigde energie voor het pyrolyseproces en de benodigde biomassa. Het deel voor de biomassa is aanzienlijk groter dan het deel voor de energie. Het PBL heeft de bovenkant van het bereik bepaald door te rekenen met hoge kwaliteit biomassa van loofhout uit de Verenigde Staten. Dit type biomassa is beperkt beschikbaar in Nederland, waardoor er biomassa geïmporteerd moet worden met extra kosten tot gevolg. Een alternatief is om lagere kwaliteit biomassa te verwerken, maar daar is de biokool opbrengst per ton biomassa aanzienlijk lager. Hierdoor moeten de pyrolyse-installaties langer draaien, met hogere operationele kosten tot gevolg.

De kosten voor [versnelde verwerking van mineralen](#) omvatten de winning (van olivijn) in Spanje, transport naar Nederland, vermaling van de olivijn en verspreiding over stranden. Het PBL gaat uit van € 84 per tCO₂. Ongeveer een derde daarvan is voor de winning en verwerking van de olivijn, de rest is voor transport naar Nederland en verspreiding over het land. Olivijn uit Noorwegen is volgens het PBL 2 euro duurder, vanwege hogere transportkosten. Olivijn zou mogelijk ook als vervanger van zand in beton kunnen dienen. Hiervoor gaat het PBL uit van een meerprijs van € 29 ten opzichte van zand.

Figuur 3.1 Kosten per verwijderde ton CO₂ (euro) in 2030²¹



Bron: PBL (2018)

De Energy Transition Commission heeft een inschatting van de kosten gemaakt voor 2030 en 2050, zie tabel 3.1. Voor de vijf methodes onderzocht, blijven de kostenbereiken van vier ruwweg gelijk of zakken licht. Alleen de kosten van vastlegging in bossen stijgen. Dit wordt verklaard door verhoogde kosten van onderhoudsactiviteiten aan de bossen.²²

Tabel 3.1 Kosten per methode in 2030 en 2050²³

Method	Kosten (eur/tCO ₂) in 2030	Kosten (eur/tCO ₂) in 2050
BECCS bij kolencentrales/AVI's	€ 88 – € 292	€ 88 – € 177
Vastlegging in bossen	€ 4 – € 29	€ 13 – € 44
Vastlegging in de bodem	€ 0 – € 97	€ 0 – € 88
Vastlegging in mariene ecosystemen	€ 10 – € 97	€ 44 – € 88
Biokool (biochar)	€ 29 – € 117	€ 26 – € 106
Versnelde verwerking van mineralen	<i>Onbekend</i>	<i>Onbekend</i>

Bron: Energy Transition Commission (2022)

²¹ Vastlegging in mariene ecosystemen en vastleggen in veengebieden (vastlegging in de bodem) zijn afkomstig van Energy Transition Commission (2022), bewerking Ecorys. Overige methoden afkomstig van PBL (2018), bewerking Ecorys.

²² Energy Transition commission (2022) *Mind the gap. How CO₂ removal must complement deep decarbonisation to keep 1.5 C alive*

²³ Idem

Deelconclusie

De kosten van de methodes zijn onzeker en zijn van verschillende factoren afhankelijk. Methodes voor het verwijderen van CO₂ zijn nog sterk in ontwikkeling en zijn nog grotendeels niet getest in de praktijk. De inschattingen van de kosten per methode verschillen daardoor ook tussen bronnen. De Energy Transition Commission schat de kosten voor BECCS tot drie keer zo hoog in als het PBL, terwijl de maximale kosten voor biokool mogelijk vijf keer zo laag zijn. Ook de ontwikkeling van de kosten door de tijd heen is met grote onzekerheid omgeven. De verwachting is dat de kosten over het algemeen gelijk of lager zullen zijn in 2050 ten opzichte van 2030. Alleen vastlegging in bossen wordt iets duurder ingeschat door de Energy Transition Commission.

De grootste kostenposten zijn het benodigde land (voor vastlegging in bossen en vastlegging in de bodem) enerzijds en de aankoop en transport van de grondstoffen anderzijds (voor BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen). Daarbovenop hebben BECCS en biokool te maken met operationele kosten die relatief hoog zijn ten opzichte van vastlegging in bossen, bodem, mariene ecosystemen en mineralen.

3.2 Energieverbruik in de gehele keten per verwijderde ton CO₂-equivalenten

Van de zes beschouwde methodes hebben vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen geen energieverbruik specifiek voor het verwijderen van CO₂. Kleine hoeveelheden energie zijn nodig voor de aanleg van de ecosystemen en onderhoudsactiviteiten. Zo vergt actief bosmanagement bijvoorbeeld machines voor de kap en het vervoer en bomen en vergt de groei van veengebieden een hoog waterpeil. Dit wordt kunstmatig in stand gehouden en verbruikt dus energie. Dit type activiteiten vergt relatief zeer weinig energie. De hoeveelheid verbruikte energie is verwaarloosbaar wanneer vergeleken met BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen, zie tabel 3.2.²⁴

BECCS produceert energie door de verbrandingsreactie en verbruikt energie voor de CCS installatie. Deze installatie stuurt de verbrandingsgassen langs een amine oplossing die de CO₂ opneemt. Vervolgens wordt de CO₂ van de oplossing gescheiden en gecomprimeerd. Het PBL komt uit op een energieverbruik van 2,8 GJ/tCO₂ voor de CCS installatie, op basis van een vergelijkend onderzoek van 12 casestudies. Netto levert het proces van de verbrandingsreactie en CSS samen tussen de 0,8 tot 10 GJ/tCO₂ op.

De energieopbrengst van BECCS is echter niet zeker. Er zijn nog geen grootschalige BECCS installaties werkzaam en er is dus nog weinig praktische ervaring. Een bekende zorg bij BECCS is de 'energy penalty'. Dit is de additionele energie die nodig is voor de CCS installatie op een biomassacentrale. Volgens schattingen gebruikt deze tussen de 37,2 en 48,6% van de opgewekte energie, wat de efficiëntie van de centrale verlaagt.²⁵ Hierdoor is aanzienlijk meer biomassa nodig om dezelfde energie-output te verkrijgen.

²⁴ Smith et al. (2016) *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*

²⁵ Gustafson et al. (2021) *BECCS with combined heat and power: assessing the energy penalty*

Het produceren van **biokool** is een zeer energie-intensief proces. Speciale ovens moeten voor langere tijd verwarmd worden tot boven de 400 °C om de biomassa te verwerken. De hoeveelheid energie die nodig is, is van vele variabelen afhankelijk. De verwarmingsduur, de temperatuur en het type biomassa hebben allen invloed op elkaar. Op basis van de restproducten van suikerriet en een typisch pyrolyseproces, is er 200,5 GJ/tCO₂ nodig.²⁶

De energiebehoefte van **versnelde mineraalverwerking** zit hem in de winning, transport en vermaling van de mineralen. Volgens het PBL is voor het gehele proces tussen de 0,8 en 2,7 GJ/tCO₂ nodig.²⁷ Andere studies geven een bereik van 0,3 tot 46 GJ/tCO₂. De belangrijkste verklaring voor de grote verschillen is de afstand van het benodigde transport en de korrelgrootte na vermaling.

Tabel 3.2 Energieverbruik (GJ/tCO₂)

Methode	Energieverbruik (GJ/tCO ₂)
BECCS bij kolencentrales/AVI's	-0,8 tot -10 ²⁸
Vastlegging in bossen	<0,1
Vastlegging in de bodem	<0,1
Vastlegging in mariene ecosystemen	<0,1
Biokool (biochar)	200,5 ^{29 30 31}
Versnelde verwerking van mineralen	0,3 – 46 ^{32 33}

Bron: Ecorys, op basis van verschillende bronnen

Deelconclusie

In oplopende volgorde hebben eerst vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen een verwaarloosbaar energieverbruik. Bij deze methodes is alleen energie nodig tijdens de aanleg en eventueel onderhoud. Versnelde verwerking van mineralen heeft vervolgens een significant energieverbruik tijdens het verwerken en transporteren van de mineralen. Zodra deze verspreid zijn, zakt het energieverbruik naar nul. Biokool heeft een hoge energiebehoefte, vooral voor reactoren waarin de biomassa tot hoge temperaturen verwarmd wordt. BECCS is de enige methode die netto energie opwekt bij de verbranding van de biomassa. Een aanzienlijk gedeelte van de opgewekte energie is echter nodig voor de CCS installatie, wat de methode in zijn geheel minder efficiënt maakt.

²⁶ Op basis van een typisch pyrolyseproces is de output 10,1% biokool, 77,3% gassen en 12,6% as (Maguyon-Detras et al. (2020)). In onze berekening is 10,1% van de totale energiebehoefte van het pyrolyseproces gealloceerd aan biokool. De gehele potentiële CO₂ verwijdering van pyrolyse is hoger, aangezien er ook koolstof in de gassen en as vastgelegd wordt.

²⁷ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

²⁸ The Royal Society (2018) *Greenhouse gas removal*

²⁹ Maguyon-Detras et al. (2020) *Thermochemical Conversion of Rice Straw, bewerking Ecorys*

³⁰ Jeswani et al. (2022) *Environmental sustainability of negative emissions technologies: a review, bewerking Ecorys*

³¹ Treedet & Suntivarakorn (2011) *Sugar cane trash pyrolysis for bio-oil production in a fluidized bed reactor*

³² Smith et al. (2016) *Biophysical and economic limites to negative CO₂ emissions*

³³ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

3.3 Grondstoffenverbruik per verwijderde ton CO₂-equivalenten

Net als bij het energieverbruik, hebben vastlegging in bossen, bodem en mariene ecosystemen geen grondstoffenbehoefte. Als de omstandigheden voor deze ecosystemen gunstig zijn, blijven ze zonder menselijke ingrepen en inbreng functioneren. Een uitzondering hierop kan bij [vastlegging in bossen](#) voorkomen. Bij natuurlijk verloop van bossen, sterven de bomen na verloop van tijd waarbij de opgeslagen CO₂ weer vrijkomt. Als de bomen voordat ze sterven echter gebruikt worden als bouw materiaal, vergaat het hout niet en blijft de CO₂ langer opgeslagen. Houtbouw vervangt daarbovenop mogelijk CO₂ intensieve bouwmaterialen, zoals beton.

Volgens de TU Delft³⁴ is er 1,67 m³ hout nodig in de bouw om 1 ton CO₂ voor langere tijd vast te leggen. Nadeel hierbij is dat Nederland te weinig aanbod van hout kent om te voorzien in de potentiële houtvraag van houtbouw. In 2015 kon Nederland zelf in maar 10% (242 duizend m³) van de vraag naar hout in de bouw voorzien. 88% van de import kwam uit Europa, 12% van daarbuiten.³⁵

BECCS, Biokool en versnelde verwerking van mineralen hebben een significant grondstofverbruik. [BECCS](#) bij kolencentrales of AVI's verbruiken biomassa of afval. De theorie is dat er tijdens de groei van de biomassa CO₂ opgeslagen wordt. Als de biomassa vervolgens verbrandt en de CO₂ uitstoot ervan afgevangen wordt, dan heb je netto verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer. 1 ton opgenomen CO₂ door biomassa betekent theoretisch 1 ton verwijderde CO₂. De hoeveelheid biomassa die je nodig hebt voor het opnemen van 1 ton CO₂ varieert per type biomassa³⁶, het koolstofgehalte verschilt namelijk per plant. Voor veelgebruikte soorten biomassa varieert het tussen de 1,41 ton voor rijstkaf en 2,21 ton voor houtsnippers per ton verwijderde CO₂.³⁷ Afvalverbranding in AVI's ligt aan de onderkant in hetzelfde bereik, met 1,57 ton afval per verwijderde ton CO₂.³⁸

Of 1 ton opgenomen CO₂ door biomassa ook daadwerkelijk leidt tot 1 ton verwijderde CO₂ wordt op veel plaatsen ter discussie gesteld.^{39,40} Verschillende wetenschappelijke instituten beargumenteren dat dit een te simplistisch beeld van de werkelijkheid is. Verschillende Life Cycle Analyses tonen aan dat BECCS over de keten van biomassa tot CO₂ opslag op verschillende plekken CO₂ 'lekt'.⁴¹ Niet elke stap zou 100% van zijn koolstof vasthouden, waardoor er CO₂ vrij kan komen. Hierdoor is het mogelijk dat BECCS meer CO₂ uitstoot dan het verwijdert. Aangezien BECCS nog niet buiten kleinschalige testopstellingen wordt toegepast, is er nog weinig praktische ervaring. Of, in welke mate en waar CO₂ weglekt in de keten is daardoor nog hoofdzakelijk een theoretisch debat. Schattingen lopen op tot maximaal 50%.⁴²

³⁴ TU Delft (2021) *Houtbouw, een kuur voor vele crises*

³⁵ NIBE (2019) *Potentie van biobased materialen in de bouw*

³⁶ Fuss et al (2018) Negative emissions part 2: Costs, potentials and side effects

³⁷ Fuss et al (2018) stelt dat 1 EJ biomassa gemiddeld gezien voor 0,035 Gt verwijderde CO₂ leidt. Maguyon-Detras et al. (2020) geeft 12,9 MJ/KG voor rijstkaf, 16 MJ/KG voor maïskolven en 20,2 MJ/KG voor houtsnippers.

³⁸ Niet herbruikbaar brandbaar afval met ten minste 50% biogene oorsprong. Bron: RHDHV (2022) *Quickscan behoefte naar en onderzoeksprogramma gericht op negatieve CO₂-emissie*

³⁹ EASAC (2019) *Forest bioenergy, carbon capture and storage, and carbon dioxide removal: an update*

⁴⁰ KNAW (2020) *Factsheet CO₂-afvang en opslag*

⁴¹ Door bijvoorbeeld landbouwmaterieel, transport van de biomassa en afvangprocessen die niet 100% efficiënt zijn.

⁴² EASAC (2019) *Forest bioenergy, carbon capture and storage, and carbon dioxide removal: an update*

Voor Nederland is het echter wel een belangrijke overweging, aangezien in Nederland onvoldoende biomassa geproduceerd wordt om BECCS op grote schaal toe te passen. In een aantal kolencentrales wordt nu beperkt (houtige) biomassa bijgemengd, die geïmporteerd moet worden. Andere typen biomassa (zoals suikerriet) werken in theorie ook. Het is echter nog niet zeker of deze voldoende energie bevatten om BECCS centrales mee te kunnen voeden en of deze in voldoende mate beschikbaar zijn. Hiermee is het onwaarschijnlijk dat Nederland in zijn eigen potentiële biomassabehoefte kan voorzien. Door biomassa op grote schaal te importeren, wordt de keten verlengd, de transparantie in de keten verminderd en wordt de CO₂-emissie van de methode hoger. Werkelijke CO₂-verwijdering wordt daarmee moeilijker te monitoren en te garanderen.

Ook bij de productie van biokool speelt de discussie omtrent de beschikbaarheid van de biomassa. Bij **biokool** is ook het type biomassa van belang voor de vastlegging van CO₂. Het pyrolyseproces werkt effectiever met houtachtige biomassa, bijvoorbeeld houtsnippers. Dit type biomassa leidt tot een lagere as- en hogere koolopbrengst. Daarnaast is ook de temperatuur en tijdsduur van verhitting van de biomassa relevant voor de verhouding tussen as-, biokool- en gasopbrengst. Typisch is er tussen de 2,8 ton (bij stro) en 25 ton (bij palmolierest) nodig om een hoeveelheid biokool te produceren, waarin 1 ton CO₂ vastgelegd is.^{43 44}

Bij **versnelde verwerking van mineralen** zijn de mineralen zelf de benodigde grondstoffen. Zodra deze geprepareerd zijn, is het verder een natuurlijk proces. Een van de meest geschikte mineralen is olivijn. Dit mineraal komt veelvuldig voor en is een van de meest reactieve in zijn soort, waardoor de CO₂ het snelst opgenomen wordt. Als de olivijn voldoende klein gemalen is, is er 0,8 – 1 ton olivijn per verwijderde ton CO₂ nodig.⁴⁵

Tabel 3.3 Grondstoffenverbruik (.../tCO₂)

Methodie	Gebruikte grondstoffen	Hoeveelheid grondstoffen (per ton CO ₂)
BECCS bij kolencentrales/AVI's	Houtige biomassa Biogeen afval	Biomassacentrale: 1,41 – 2,21 t/tCO ₂ AVI's: 1,57 Mt afval/tCO ₂
Vastlegging in bossen	Vastlegging in bossen: Geen Houtbouw: Hout	Vastlegging in bossen: - Houtbouw: 1,67 m ³ /tCO ₂
Vastlegging in de bodem	Geen	-
Vastlegging in mariene ecosystemen	Geen	-
Biokool (biochar)	Biomassa	2,8 - 25 t/tCO ₂
Versnelde verwerking van mineralen	Olivijn	0,8 – 1 t/tCO ₂

Bron: Ecorys, op basis van diverse bronnen

⁴³ Jeswani et al (2022) *Environmental sustainability of negative emissions technologies: a review*, bewerking Ecorys

⁴⁴ Maguyon-Detras et al. (2020) *Thermochemical Conversion of Rice Straw*, bewerking Ecorys

⁴⁵ The Olivine Foundation (2021) *Fact and figures about CO₂ and Olivine*, geraadpleegd 01-04-2023

Deelconclusie

Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen kennen geen grondstoffengebruik. BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen hebben wel een grote grondstoffenbehoefte. Een van de meest geschikte mineralen is olivijn, wat veel voorkomt wereldwijd, maar niet in Nederland. BECCS en biokool maken beide gebruik van biomassa. Beide werken het best op houtachtige biomassa en concurreren mogelijk om dezelfde beperkte voorraad. Nederland is te klein met te weinig bos om in zijn eigen biomassa-vraag te voorzien; er wordt op dit moment al biomassa geïmporteerd. Andere typen biomassa, zoals suikerriet, kunnen theoretisch ook werken. Onzeker is dan echter of de BECCS en biokoolinstallaties rendabel kunnen draaien. Daarnaast is het onzeker of BECCS in zijn keten niet te veel CO₂ verliest om een effectieve CO₂-verwijderingsmethode te zijn.

3.4 Direct en indirect landgebruik per verwijderde ton CO₂-equivalenten

In de literatuur worden twee verschillende definities gehanteerd voor direct en indirect landgebruik. De eerste wordt veelal toegepast als men spreekt over het landgebruik en de verandering daarvan bij biomassa-productie. Onder direct landgebruik vallen dan landbouwgronden die eerst voedselgewassen produceerden, maar wisselen naar energiegewassen. Bij indirect landgebruik gaat het dan om andere typen landgebruik, zoals weide of bossen, die omgezet worden naar landbouwgrond voor voedselgewassen om te compenseren voor het verlies door het directe landgebruik.

In dit onderzoek hanteren we een andere definitie voor landgebruik, welke beter geschikt is voor het vergelijken van alle methodes. Direct landgebruik definiëren we als het land dat nodig is voor het primaire verwijderingsproces van CO₂. Dit zijn bijvoorbeeld nieuwe bossen of de percelen voor de biomassacentrales. Indirect landgebruik is vervolgens het land dat nodig is om de keten van deze processen te ondersteunen. Dit omvat zowel het land nodig voor de grondstofproductie als het land voor de verwerking van het product dat wordt gebruikt door de methode.

In tabel 3.4 is het directe en indirecte landgebruik opgenomen. Een aandachtspunt is dat landgebruik voor vastlegging in bossen, bodem en mariene ecosystemen is uitgedrukt in ha/tCO₂/jaar. BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen zijn uitgedrukt in ha/tCO₂. Dit verschil komt doordat de eerste drie methodes continue processen zijn: met deze methodes wordt jaarlijks CO₂ vastgelegd in biomassa en de organische laag in de bodem. In de literatuur is het daarom gebruikelijk om het landgebruik van de methodes per jaar uit te drukken. De tijdscomponent is minder sterk aanwezig bij BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen. Deze zijn slechts afhankelijk van de beschikbaarheid van grondstoffen.

BECCS heeft een beperkt direct landgebruik, namelijk de ruimte die nodig is voor biomassacentrales. Nederland heeft nog vier operationele kolencentrales, welke mogelijk omgebouwd kunnen worden. Daarnaast zijn er verschillende stand-alone biomassacentrales waar mogelijk CCS toegepast kan worden. Er is dus al een aanzienlijk potentieel voor BECCS in Nederland aanwezig, zonder dat er extra ruimte voor het directe landgebruik nodig is. Ook AVI's hebben

een beperkt direct ruimtegebruik, deze zijn ook al gebouwd en kunnen omgebouwd worden om CCS te kunnen toepassen. Voor al deze toepassingen dient wel de infrastructuur aangelegd te worden om de afgevangen CO₂ naar de lege gasvelden te transporteren.

Indirect heeft BECCS echter een veel grotere voetafdruk. BECCS heeft veel biomassa nodig, waarin Nederland niet kan voorzien. Afhankelijk van het type biomassa, heb je tussen de 1 – 1,7 ha/tCO₂ nodig voor houtachtige biomassa, 0,6 ha/tCO₂ voor landbouwafval en tussen de 0,1 – 0,4 ha/tCO₂ voor energiegewassen.⁴⁶ Als energiebron is BECCS inefficiënt ten opzichte van bijvoorbeeld zonne-energie. Om dezelfde hoeveelheid energie te produceren, heb je 50 tot 100 keer meer oppervlakte nodig voor biomassaproductie dan voor zonnepanelen.⁴⁷ Schattingen lopen sterk uiteen, maar vermoedelijk is er tussen de 7% en 25% van het wereldwijde landbouwareaal nodig in 2100 om voldoende CO₂ te verwijderen met BECCS om onder de 2-graden doelstelling te blijven.⁴⁸

Het directe landgebruik van [vastlegging in bossen](#) is aanzienlijk groter dan BECCS en wordt op 0,29 ha/tCO₂ geschat voor (her)bebossing. Dit is inclusief opname in de bosbodem.⁴⁹ In Nederland is de beschikbare ruimte voor (her)bebossing beperkt en de verwachting is dan ook dat dit ten koste gaat van land voor de veehouderij.⁵⁰ Het directe landgebruik van voedselbossen wordt iets lager ingeschat, op 0,21 ha/tCO₂/jaar.⁵¹ Het indirecte landgebruik van bossen is verwaarloosbaar. Enige capaciteit voor de opslag en verwerking van hout is nodig, maar dit neemt relatief weinig ruimte in beslag.

Het directe landgebruik voor [vastlegging in de bodem](#) van CO₂ is sterk afhankelijk van welke landbouwtechnieken toegepast worden. Specifieke vanggewassen (bijvoorbeeld grassen, havers en klavers) telen die veel CO₂ vastleggen in de bodem is een efficiënte methode, met 0,9 ha/ tCO₂/jaar. Gewasresten achterlaten op het land komt uit op 1,9 ha/tCO₂/jaar terwijl het toevoegen van extra compost op het land het minst effectief is, met 12,5 ha/tCO₂/jaar.⁵² Het directe landgebruik bij het herstel van veengebieden en wetlands komt uit op ongeveer 1,25 ha/tCO₂/jaar.⁵³ Vastlegging in de bodem heeft geen indirect landgebruik.

Er is geen landgebruik voor opslag in zeeën en oceanen (deep blue carbon). Voor de [vastlegging in mariene ecosystemen](#) aan de kust echter wel. Zo is er voor zeekleilandschappen zoals kwelders en zeedelta's tussen 0,07 – 1,7 ha/tCO₂/jaar nodig en 0,13 – 0,26 ha/tCO₂/jaar voor zeegrasvelden. Een belangrijk gedeelte van dit ruimtegebruik zal in zee zijn, waardoor het effectieve landgebruik lager uitvalt. Deze ecosystemen kennen geen indirect landgebruik.

[Biokool](#) heeft, net als BECCS, een zeer beperkt direct landgebruik. De benodigde ruimte voor de biokoolinstallaties is verwaarloosbaar ten opzichte van het indirecte ruimtegebruik nodig voor de productie van biomassa en uitspreiding van de biokool. Het PBL ervanuit dat er 45 ton

⁴⁶ Smith et al. (2016), *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*

⁴⁷ KNAW (2020) *Factsheet CO₂ afvang en opslag*

⁴⁸ Donnison et al (2020) *Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): Finding the win-wins for energy, negative emissions and ecosystem services – size matters*

⁴⁹ Smith et al. (2016), *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*

⁵⁰ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

⁵¹ Leschen et al. (2021) *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse Landbouw*

⁵² Leschen et al. (2021) *De potentie voor koolstofvastlegging in Gelderse landbouwbodems*

⁵³ Bain (2010) *Peatlands and greenhouse gas emissions reduction opportunities in Scotland*

biokool per ha landbouwgrond uitgespreid kan worden.⁵⁴ Afhankelijk van het type biomassa, heb je dan tussen de 0,007 en 0,06 ha/tCO₂ nodig als je respectievelijk biokool uit stro of palmolieresten gebruikt. Dit land kan echter (vermoedelijk) nog gebruikt worden voor landbouw, waardoor er geen toegewijd direct landgebruik nodig is. Het indirecte landgebruik voor de productie van biomassa is ongeveer 0,19 ha/tCO₂.⁵⁵

Tot slot is het ruimtegebruik voor **versnelde verwerking** sterk afhankelijk van hoe de mineralen verspreid worden. Veel uitspreidingsmethodes zijn echter multifunctioneel, waardoor er geen toegewijd landgebruik nodig is. Het indirecte landgebruik komt neer op minder dan 0,01 ha/tCO₂ voor winning, verwerking en transport van de mineralen.

Tabel 3.4 Direct en indirect landgebruik per methode⁵⁶

Methode	Direct landgebruik	Indirect landgebruik
BECCS bij kolencentrales / AVI's	Biomassacentrale: 0 ha/tCO ₂ AVI's: 0 ha/tCO ₂	Biomassacentrale: ⁵⁷ <ul style="list-style-type: none"> Houtachtig: 1 – 1,7 ha/tCO₂ Landbouwfval: 0,6 ha/tCO₂ Energiegewassen: 0,1 – 0,4 ha/tCO₂ AVI's: 0 ha/tCO ₂
Vastlegging in bossen	0,21 - 0,29 ha/tCO ₂ /jaar ⁵⁸	Geen indirect landgebruik
Vastlegging in de bodem	<ul style="list-style-type: none"> Specifieke vanggewassen planten: 0,9 ha/tCO₂/jaar Gewasresten achterlaten: 1,9 ha/tCO₂/jaar Extra compost toevoegen: 12,5 ha/tCO₂/jaar⁵⁹ 	Geen indirect landgebruik
Vastlegging in mariene ecosystemen	<ul style="list-style-type: none"> Zeekleilandschappen: 0,07 – 1,2 ha/tCO₂/jaar Zeegrasvelden: 0,13 – 0,26 ha/tCO₂/jaar⁶⁰ 	Geen indirect landgebruik
Biokool	0 ha/tCO ₂	Productie van biomassa: 0,19 ha/tCO ₂
Versnelde verwerking van mineralen	0 ha/tCO ₂	<0,01 ha/tCO ₂ ⁶¹

⁵⁴ Idem

⁵⁵ Maguyon-Detras et al. (2020) *Thermochemical Conversion of Rice Straw, bewerking Ecorys*

⁵⁶ Direct landgebruik is het land nodig voor de methode zelf. Indirect landgebruik is het land nodig voor de rest van de keten om de methode mogelijk te maken. Zie het begin van hoofdstuk 3.4.

⁵⁷ Smith et al. (2016), *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*

⁵⁸ Idem

⁵⁹ Leschen et al. (2021) *De potentie voor koolstofvastlegging in Gelderse landbouwbodems*

⁶⁰ Howard et al. (2017) PBL (2018) *Bewerking Ecorys*

⁶¹ Smith et al. (2016), *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*

Deelconclusie

In het landgebruik is een scheiding te zien tussen enerzijds BECCS en biokool en anderzijds vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen. BECCS en biokool kennen een zeer laag direct landgebruik, ze hebben alleen ruimte voor de installaties nodig. Indirect is het landgebruik echter groot. Beide hebben grote hoeveelheden land nodig voor de productie van biomassa. Hoeveel ruimte daadwerkelijk nodig is voor de biomassaproductie, is afhankelijk van het type biomassa.

Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen laten een tegenovergesteld beeld zien. Het verwijderingspotentieel van deze systemen is direct gekoppeld aan hoe groot ze zijn. Grotere ecosystemen verwijderen meer CO₂. Daar staat tegenover dat deze methodes indirect geen land nodig hebben. Deze methodes hebben geen aanvoerketen waar land nodig is voor bijvoorbeeld grondstoffenproductie.

Het directe ruimtegebruik voor versnelde verwerking van mineralen is beperkt, namelijk alleen de installaties voor het winnen en vermalen van de olivijn. De meeste toepassingen van olivijn zijn vervolgens multifunctioneel, waardoor er netto geen ruimte verloren gaat bij de verwerking van olivijn. Het indirecte landgebruik is daarmee verwaarloosbaar.

3.5 Vastleggingsduur van de verwijderde CO₂

De tijdsduur van vastlegging verschilt tussen de gebruikte methodes. Een opslagmethode hoeft niet permanent te zijn om van belang te zijn. Ook een (relatief) korte verwijderingsduur van meerdere decennia draagt al bij aan de klimaatdoelen. De komende decennia zijn namelijk een cruciale periode voor het temperen van de effecten van klimaatverandering. Alle CO₂ die in deze periode verwijderd kan worden, is nuttig, ook als deze CO₂ na een eeuw weer vrijkomt. Dit biedt namelijk ruimte om klimaatverandering tegen te gaan in de tussentijd.

Bij **BECCS** wordt de afgevangen CO₂ onder de grond opgeslagen. Hiervoor wordt gekeken naar lege gasvelden onder de Noordzee of aquifers. Deze gasvelden en aquifers zijn luchtdicht vanwege de aanwezigheid van verschillende aardlagen die geen gas doorlaten. Bij een goede afsluiting van het gasveld of de aquifer, ligt de CO₂ er theoretisch permanent opgeslagen. Alleen lekken door verandering in de aardlagen of degradatie van de afsluiting zou de CO₂ weer laten ontsnappen. Het Noordzeeloket van de Rijksoverheid gaat uit van een opslagcapaciteit van in totaal 1.600 Mton CO₂ in het Nederlandse deel van de Noordzee.⁶² Dit is echter voor zowel CCS als methodes voor CO₂-verwijdering.

Bossen zijn theoretisch CO₂ neutraal. Een boom neemt CO₂ op tijdens de groei en stoot deze weer uit nadat hij sterft. De eerste paar jaar in het leven van een boom is de CO₂ vastlegging nog gering. Naarmate een boom zijn bladerdak extra ontwikkelt, neemt hij netto CO₂ op.⁶³ Extra CO₂ is vast te leggen door meer bomen aan te planten, met elke boom wordt de totale hoeveelheid opgeslagen CO₂ vergroot. Waar een individuele boom dus alleen gedurende zijn eigen leven CO₂ vastlegt, is een bos in staat afgestorven bomen te vervangen en theoretisch permanent CO₂ vast te leggen. Het natuurlijk herstel van een bos is met goed bosmanage-

⁶² www.noordzeeloket.nl, geraadpleegd 04-04-2023

⁶³ Köhl et al. (2017) *The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity*

ment te gebruiken om een versterkt effect te krijgen. Een bos met actief management en kap heeft in het begin een negatieve koolstofbalans, terwijl een bos zonder beheer gedurende zo'n 150 jaar veel CO₂ vastlegt. Na 150 jaar legt zo'n bos echter bijna geen CO₂ meer vast⁶⁴ en legt een bos met actief management in totaal uiteindelijk meer CO₂ vast.⁶⁵ Door de volgroeide bomen te kappen en deze te hergebruiken, sla je CO₂ op in het gekapte hout en heb je de effectieve opslagcapaciteit vergroot. Zolang het hout geconserveerd blijft, blijft de CO₂ vastgelegd.

Een van de sectoren waar veel hout geconserveerd kan worden is de bouw. Er zijn verschillende houtbouwtechnieken mogelijk, waarmee hout tot wel vijf keer hergebruikt kan worden (bijvoorbeeld houtskeletbouw of kruislaaghout).⁶⁶ Naar schatting kan de levensduur van hout in de bouw op deze manier tussen de 75 en 300 jaar halen.⁶⁷ Aan het eind van de levensduur kan het hout nog verwerkt worden, bijvoorbeeld als grondstof voor BECCS, voor warmte of elektriciteitsproductie of andere toepassingen. Hier schuilt dan wel het gevaar in van dubbeltelling van CO₂-verwijdering.

Net als bij vastlegging in bossen, ligt CO₂ in [de bodem](#) vast zolang de organische laag gezond is. De organische laag van de bodem legt CO₂ vast door zichzelf te vergroten en stoot CO₂ uit door oxidatie. Het systeem is CO₂ neutraal. Door het systeem te vergroten, dus een grotere organische laag of veengroei te stimuleren, wordt er netto meer CO₂ opgeslagen. Zolang zo'n ecosysteem vervolgens gezond is, ligt de CO₂ vast.

Hetzelfde principe geldt voor vastlegging in [mariene ecosystemen](#), waarbij de CO₂ opgeslagen ligt in zeevegetatie en de sedimentlaag op de zeebodem. De zeevegetatie is relatief kortcyclisch, CO₂ wordt hier relatief snel opgenomen en uitgestoten. De sedimentlaag heeft echter een grote opslagcapaciteit. Deze laag is erg stabiel en verliest CO₂ en andere broeikasgassen als deze met lucht in aanraking komt en oxideert. Aangezien deze laag voor het grootste gedeelte onder water ligt, oxideert deze niet en vormt het een stabiel opslagmedium. En in tegenstelling tot organische lagen op het land, raakt de sedimentlaag niet verzadigd. Deze laag bouwt zich namelijk op in samenhang met zeespiegelstijging.⁶⁸ Over de opslagcapaciteit van oceanen is nog onvoldoende duidelijk om een eenduidig beeld te schetsen.⁶⁹

[Biokool](#) is een uiterst stabiele substantie en verweert amper. Er is nog niet veel bekend over de precieze levensduur van biokool, maar algemene inschattingen zijn dat het duizenden jaren meegaat.⁷⁰

Ook de [mineralen na verwerking](#) blijven duizenden jaren stabiel. Een mogelijk risico dat benoemd wordt, is dat nog onbekend is wat voor effect het oplossen op grote schaal van de mineralen in (zee)water heeft.

⁶⁴ WUR (2018), *Klimaatcijfers voor natuur. Cijfers voor koolstofopslag en vastlegging in Nederlandse natuur*

⁶⁵ VVNH (2021) *Klimaatwinst door houtbouw*

⁶⁶ TNO (2021) *Een verkenning van het potentieel van tijdelijke CO₂-opslag bij houtbouw*

⁶⁷ VVNH (2021) *Klimaatwinst door houtbouw*

⁶⁸ Mcleod et al. (2011) *A Blueprint for blue carbon toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂*

⁶⁹ Imares (2015) *A review of blue carbon in the Netherlands*

⁷⁰ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

Tabel 3.5 Tijdsduur van CO₂-vastlegging

Methodie	Tijdsduur CO ₂ vastlegging
BECCS bij kolencentrales/AVI's	Permanent bij opslag in lege gasvelden.
Vastlegging in bossen	Permanent bij behoud van natuur en met goed management. Totale opslagcapaciteit is te verhogen door toepassing van hout in de gebouwde omgeving. Met meervoudig hergebruik kan hout tot 75-300 jaar meegaan.
Vastlegging in de bodem	Permanent bij behoud van organisch materiaal en bij behoud van natuur met goed management. Veenweides kunnen millennia meegaan. ⁷¹
Vastlegging in mariene ecosystemen	Permanent bij behoud van de maritieme ecosystemen en organische lagen.
Biokool	Biokool kan duizenden jaren stabiel blijven.
Versnelde verwerking van mineralen	Permanent, de resulterende silicaten zijn stabiel.

Deelconclusie

BECCS, vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen leggen de CO₂ in principe permanent vast, als er aan een aantal voorwaarden voldaan wordt. Voor BECCS betekent dit dat de CO₂ opgeslagen wordt op plaatsen waar deze niet kan ontsnappen, zoals bijvoorbeeld lege gasvelden. De CO₂ wordt in bossen, de bodem en mariene ecosystemen permanent opgeslagen, zolang deze ecosystemen gezond en intact blijven. Als ecosystemen zijn deze methodes CO₂-neutraal en leggen ze CO₂ vast zolang ze bestaan. De levensduur van individuele bomen kan verlengd worden met een aantal decennia door ze te oogsten en hoogwaardig toe te passen, als bijvoorbeeld bouwmetaal. Zo kan hout koolstof tot wel 300 jaar vastleggen en de totale opslagcapaciteit vergroot worden. Biokool is stabiel en vergaat erg langzaam, waardoor het duizenden jaren intact blijft en de koolstof voor lange tijd vastlegt.

3.6 Inpassing in een hernieuwbare en circulaire economie

De mate waarin een methode goed past bij een hernieuwbare en circulaire economie, beoordelen we aan de hand van het grondstoffen- en energieverbruik. De benodigde grondstoffen en energie moeten duurzaam en hernieuwbaar geproduceerd worden om passend te zijn in een hernieuwbare en circulaire economie. Ook moeten eventuele reststromen opnieuw ingezet kunnen worden voor andere hernieuwbare processen.

Of BECCS past in een hernieuwbare en circulaire economie is onderwerp van uitgebreide discussie. Grootschalige biomassa-productie leidt mogelijk tot ontbossing en verlies aan biodiversiteit. Zo stelt de SER stelt dat de noodzaak voor biograndstoffen als brandstof voor elektriciteitsopwek snel verdwijnt door de opkomst van hernieuwbare alternatieven. De rol van biograndstoffen voor de energieproductie zou dan enkel als finale laagwaardige stap in een

⁷¹ Energy Transition commission (2022) *Mind the gap. How CO₂ removal must complement deep decarbonisation to keep 1.5 C alive*

cascaderingraamwerk zijn, waarbij biograndstoffen eerst voor andere toepassingen gebruikt worden.

Naast de CO₂-afdruk en neveneffecten van grootschalige biomassaproductie, zijn ook de producten van BECCS een zorg. Het CO₂-gas wordt opgeslagen in lege gasvelden, zo wordt voorzien. In deze gasvelden kan het gas theoretisch permanent opgeslagen liggen. Waar grootschalige afvang van CO₂ en opslag zonder hergebruik zeker een bijdrage kan leveren aan klimaatmitigatie, blijft het een lineair proces. Het gas wordt niet hergebruikt en blijft eeuwig opgeslagen. In theorie zou de chemische sector een afnemer van CO₂ kunnen zijn. Dit lijkt echter geen realistische of grootschalige optie de komende decennia en is bovendien een CCU toepassing.⁷²

Voor een ander (rest)product van een populaire BECCS-techniek, amines, zijn we geen informatie tegengekomen over (circulaire) verwerkingsmethodes. In de Nederlandse context zijn er vier kolencentrales die mogelijk over kunnen stappen naar BECCS. In veel scenario's worden deze centrales niet meegenomen, aangezien het kabinet de stook van kolen verboden heeft per 2030.

Vastlegging van CO₂ in bossen is een puur hernieuwbaar en circulair proces. Bossen zijn al hernieuwbaar en CO₂ neutraal van zichzelf. Door het vergroten van de bossen wordt de opslagcapaciteit alleen maar groter terwijl het systeem als geheel neutraal blijft. Daarnaast is met duurzaam bosbeheer hout te winnen, wat vele toepassingen kent. Aan het eind van zijn levensduur kan het hout hergebruikt worden, of zijn koolstof op een andere manier vastleggen. Voorbeelden hiervan zijn BECCS en vastlegging in de organische laag van de bodem.

Naast vastlegging in bossen, is ook **vastlegging in de bodem** een circulair en CO₂-neutraal proces. Door ander bodembeheer en de voorgestelde landbouwtechnieken toe te passen,⁷³ zijn de landbouwgronden in Nederland hernieuwbaarder te maken. Met deze aanpassingen is de bodem meer in balans te brengen en kan deze vruchtbaarder en resistenter tegen extreme weersveranderingen worden.

Ook het derde natuurlijke systeem, **vastlegging in mariene ecosystemen**, is circulair en CO₂-neutraal. Opslag in oceanen en kustgebieden kost geen grondstoffen of energie. Daarnaast leveren vooral kustgebieden wel enkele hernieuwbare producten. Zo kunnen oester- en mosselbanken extra voedsel produceren als ze vergroot worden. Ook kustgebieden zoals kwelders kunnen voedsel bieden voor vee.⁷⁴ De CO₂ komt dan echter wel weer snel vrij. Hoeveel capaciteit voor deze toepassingen in Nederland beschikbaar is, is geen onderdeel van dit onderzoek.

Bij de productie van **biokool** komen ook gassen, oliën en wat as vrij. Deze restproducten zijn uitstekend herbruikbaar. Nederland staat goed gepositioneerd voor de verwerking van deze restproducten.⁷⁵ Vooral de gassen en oliën kunnen verder opgewerkt worden tot duurzame brandstoffen, voor zover ze niet gebruikt worden om het proces zelf van energie te voorzien. Deze processen, zoals pyrolyse en vergassing, produceren dus ook andere typen

⁷² Ecorys (2023) *Technological scope and potential cost reductions Early Phase Scale up* (nog niet openbaar).

⁷³ Zie de omschrijving van de methodes in hoofdstuk 2.

⁷⁴ Imares (2015) *A review of blue carbon in the Netherlands*

⁷⁵ Ecorys (2023) *Technological scope and potential cost reductions Early Phase Scale up* (nog niet openbaar).

brandstoffen uit de biomassa. Maar onder de streep is de uitgaande energie van deze processen verwaarloosbaar.⁷⁶ De processen kunnen draaien op duurzaam opgewekte energie, zoals duurzame biobrandstoffen en groene waterstof.

Of biokool past in een circulaire economie hangt vooral van twee dingen af. De eerste is of de gebruikte biomassa duurzaam geproduceerd is. Biokool heeft wel als bijkomend voordeel dat veel verschillende typen biomassa in theorie verwerkt kunnen worden, waaronder menselijk afval uit waterzuiveringsinstallaties.⁷⁷ Op dit moment wordt volop onderzoek gedaan naar de te gebruiken soorten biomassa in pyrolyse- en vergassingsprocessen.

Naast de biomassa, zijn ook de toepassingsmogelijkheden van de biokool een zorg. De meest voorkomende toepassing van biokool is het uitspreiden over landbouwgronden. Biokool zou verschillende positieve effecten kunnen hebben op de bodem en gewassen. Er is echter nog niet veel onderzoek gedaan naar deze toepassing, waardoor niet alle effecten duidelijk zijn. De biokool kan bijvoorbeeld verontreinigd zijn met zware metalen.⁷⁸ Of biokool dus als circulaire grondstof beschouwd kan worden, vereist meer onderzoek. Daarnaast blijft biokool nog duizenden jaren intact, is het op korte termijn niet hernieuwbaar en is het niet van landbouwgronden te verwijderen.⁷⁹

De grondstoffen voor de laatste methode, [versnelde verwerking van mineralen](#), zijn overdadig aanwezig op aarde maar in mindere mate in Nederland. Het proces van versnelde verwerking is echter een lineair proces. De grondstoffen zijn (theoretisch) eindig en de mineralen hebben na verwerking weinig bekende toepassingen. Daarnaast is het effect van het grootschalig introduceren van mineralen in ecosystemen niet bekend. Zo verhogen de mineralen de pH-waardes in het water en de bodem.⁸⁰ Met betrekking tot deze effecten bestaat nog geen consensus.

Een mogelijke toepassing van de mineralen is als grondstof voor beton. Beton zelf is echter maar beperkt circulair. Het energieverbruik voor de verwerking van mineralen kan naar verwachting wel duurzaam, als de winning en vermaling van de mineralen met duurzame energie kan plaatsvinden.

⁷⁶ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

⁷⁷ Wu et al. (2023) *Bibliometric analysis of biochar research in 2021*

⁷⁸ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

⁷⁹ Idem

⁸⁰ Deltares (2012) *Olivijn legt CO₂ vast in de gemeente Rotterdam*

Deelconclusie

Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen is erg geschikt voor een hernieuwbare economie. Deze systemen zijn hernieuwbaar van zichzelf en hebben, indien ze gezond zijn, geen grondstoffen of energie van buitenaf nodig.

De inpassing van BECCS is onzeker, vanwege twee factoren. Allereerst is het onzeker of de benodigde biomassa voor BECCS duurzaam en hernieuwbaar geproduceerd kan worden. Daarnaast wordt de afgevangen CO₂ in pure vorm opgeslagen in bijvoorbeeld lege gasvelden. Dit is een lineair proces, waarbij de afgevangen CO₂ niet hergebruikt wordt.

Voor biokool gelden dezelfde overwegingen als voor BECCS. Ook biokool heeft grote hoeveelheden biomassa nodig, die mogelijk niet hernieuwbaar geproduceerd kunnen worden. Daarnaast blijft de biokool voor duizenden jaren intact, waarbij het de vraag is of een cyclus van duizenden jaren als hernieuwbaar geclassificeerd kan worden.

Als laatste is versnelde vertering van mineralen maar beperkt inpasbaar in een hernieuwbare samenleving. Er zijn geen toepassingen bekend waarbij de mineralen, na hun reactie met CO₂, nog voor iets gebruikt kunnen worden. Vertering van mineralen is daarmee een lineair proces.

3.7 Impact op leefomgeving en economie

Voor de impact van een methode op biodiversiteit, lucht-, water- en bodemkwaliteit, de lokale economie en werkgelegenheid beschouwen we niet alleen de methode zelf, maar kijken we naar de gehele keten.

Bij grootschalige toepassing heeft **BECCS** een grote impact op de omgeving. De grote hoeveelheid (houtige) biomassa die nodig is, vergt veel ruimte. Aangezien Nederland niet in zijn eigen biomassa kan voorzien, zal er geïmporteerd moeten worden. Daarmee zijn de neveneffecten van biomassaproductie in het buitenland onderdeel van de BECCS keten in Nederland. De algemene aanname in de literatuur is dat grootschalige productie van biomassa ten koste gaat van bos-, woud- en bestaande voedselproductiegronden. De voedselproductiegronden verplaatsen zich vervolgens, waardoor een nog groter beslag op bosgebieden wordt gelegd. Verlies van bosgronden heeft een sterk negatief effect op biodiversiteit, lucht-, water- en bodemkwaliteit en stoot extra CO₂ uit. Er zijn minder bomen om de lucht te filteren, minder bomen om de grond te stabiliseren met erosie tot gevolg en er spoelen meer meststoffen in het water. Nederland is op dit moment al een van de grotere tropische ontbossers per capita in Europa vanwege de hoge vraag naar biomassa voor energie en soja voor veevoer.⁸¹

Voor Nederland biedt BECCS de kans om de vier resterende kolencentrales om te bouwen en open te houden na 2030. De beschikbare documentatie spreekt niet over de effecten op werkgelegenheid en de lokale economie wereldwijd of voor Nederland specifiek. Daarnaast kan een verhoogde vraag naar duurzame biomassa in Nederland wel leiden tot een verduurzaming van productie in het buitenland.⁸²

⁸¹ Van der Lugt (2021) *Houtbouwmythes ontkracht. Het onderscheid tussen labels en feiten*

⁸² Idem

Naast biomassa, maakt één type BECCS gebruik van amines voor het afvangen van CO₂. Deze amines zouden mogelijk een negatief effect op de volksgezondheid kunnen hebben,⁸³ maar er is meer onderzoek nodig om hierover met voldoende zekerheid een uitspraak te kunnen doen.⁸⁴

In contrast met BECCS staat **vastlegging van CO₂ in bossen**. Natuurlijke bossen herbergen een grote biodiversiteit en dragen bij aan lucht-, bodem- en waterkwaliteit. Ze huisvesten een breed scala aan flora en fauna.⁸⁵ Dit geldt voor Nederland, maar ook als bijvoorbeeld een grotere afzet voor duurzaam gewonnen tropisch hardhout gecreëerd zou worden. De bijdrage aan een grotere biodiversiteit is mogelijk nog groter bij bebossing, waarbij gebieden die niet eerder bebost waren beplant worden.⁸⁶ Het werkelijke effect op de biodiversiteit is sterk afhankelijk van het type landgebruik dat vervangen wordt door de bossen en welke boomsoorten aangeplant worden.

Productiebossen hebben een hogere mate van monocultuur dan natuurlijke bossen en hebben niet per definitie een hogere biodiversiteit. Beide typen bossen dragen bij aan een verbetering van luchtkwaliteit, waterretentie en leefklimaat.⁸⁷ Door hun schaduwwerking, verdamping van vocht en reflectie van straling hebben ze een klimaatadaptieve werking.⁸⁸ De wortels van bomen leggen de bodem vast, waarmee erosie, aardverschuivingen en uitspoeling van de bodem voorkomen worden.⁸⁹ Hiermee blijft de organische bovenlaag van de bodem behouden, waar veel nutriënten (en CO₂) in opgeslagen liggen.

Natuurlijke bossen huisvesten daarnaast verschillende fauna, welke voedselgewassen in de omgeving bestuiven en plagen onder controle houden.⁹⁰ Bossen dragen ook bij aan menselijke gezondheid. Veel ontwikkelingslanden zijn echter meer afhankelijk van lokale bossen en wouden voor het recyclen van nutriënten, filteren van drinkwater en als bron van traditionele medicijnen.

De positieve bijdrage van (her)bebossing wordt nog groter als je het landgebruik in oenschouw neemt dat vervangen wordt door bos. Zo wordt de uitstoot van fosfaat, methaan, lachgas, ammoniak en stikstof verminderd als gronden voor veehouderij bebost worden. Een waterbedeffect hiervan kan echter zijn dat de veestapel in het buitenland groeit met lossere emissiestandaarden, waardoor de netto uitstoot groeit.⁹¹

Effecten op de lokale economie en werkgelegenheid zijn niet gevonden in de literatuur. In Nederland zou de werkgelegenheid in de intensieve landbouwsector dalen, door de bebossing van overwegend landbouwgronden. Daartegenover staat een groeiende werkgelegenheid in het bosmanagement en mogelijk agroforestry. De precieze effecten op de economie en werkgelegenheid zijn echter niet bekend.

⁸³ Gentry et al. (2014) *Potential occupational risk of amines in carbon capture for power generation*.

⁸⁴ Bello et al. (2020) *BECCS based on bioethanol from wood residues: Potential towards a carbon-negative transport and side effects*

⁸⁵ Van Goor & Snoep (2019) *The contribution of forests to climate change mitigation*

⁸⁶ Idem

⁸⁷ Brans (2022) *Klimaataansprakelijkheid, negatieve emissies en herstel van biodiversiteit*

⁸⁸ Idem

⁸⁹ Van Goor & Snoep (2019) *The contribution of forests to climate change mitigation*

⁹⁰ Idem

⁹¹ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

Ook het stimuleren van CO₂ *vastlegging in de bodem* levert een positieve bijdrage aan biodiversiteit, bodem- en waterkwaliteit. De extra landbouwtechnieken zorgen voor een groei van de organische laag in de bodem. Dit leidt tot een beter vochtregulerend en retentievermogen, betere waterinfiltratie en een hogere biodiversiteit.⁹² Een grotere en gezondere organische laag leidt tot verminderde erosie, dempt de effecten van extreme neerslag en ondersteunt in de plaagbeheersing van de landbouwgronden.⁹³

Een gezondere organische laag heeft ook een grotere vruchtbaarheid en levert meer nutriënten voor gewassen.⁹⁴ Zo zou het mestgebruik mogelijk verminderd kunnen worden, waardoor de stikstofuitstoot teruggedrongen kan worden.

Door het toepassen van deze technieken zouden boerenbedrijven iets minder intensief kunnen worden. Het toepassen van bodemherstellende maatregelen zou extra inspanning vergen zonder direct betere oogsten, en mogelijk zouden ze minder waardevolle gewassen moeten gaan telen.⁹⁵ Dit zou een remmende invloed op de lokale economie en werkgelegenheid kunnen hebben. Het is onbekend en vermoedelijk locatieafhankelijk wat het effect precies is. Het herstellen van veengebieden heeft waarschijnlijk een grotere negatieve invloed op de lokale economie en werkgelegenheid. Om veen te laten groeien wordt het waterpeil verhoogd. Dit beperkt de toepassing van de huidige vorm van intensieve landbouw en economische activiteiten.⁹⁶ Specifieke landbouwvormen voor nichemarkten zijn potentieel mogelijk, maar meer onderzoek is nodig.⁹⁷

Het derde natuurlijke systeem voor CO₂ verwijdering, *vastlegging in mariene ecosystemen*, laat een vergelijkbaar beeld zien voor zowel de kustgebieden (coastal blue carbon) als voor vastlegging in bossen en de bodem. De zoute kustgebieden zijn een hotspot voor biodiversiteit.⁹⁸ Veel van deze dier- en plantensoorten zijn uniek voor Nederland en komen wereldwijd weinig voor. Zilte natuurgebieden in Nederland hebben naar verwachting nog maar 40% van hun oorspronkelijke biodiversiteit over.⁹⁹ Uitbreiding van deze gebieden zou een grotere biodiversiteit kunnen ondersteunen. Zeegrasvelden dienen bijvoorbeeld als een foerageergebied, schuilplaats en kraamkamer voor verschillende soorten vis en schelpdieren. Een vergroting van deze populatie biedt dan meer voedsel voor vogels.

Ook biedt het meer kansen voor de visserij en aquacultuur.¹⁰⁰ Dit heeft vermoedelijk een positief effect op de lokale economie, maar over de effecten op de werkgelegenheid is geen informatie beschikbaar.¹⁰¹

Met het oog op veiligheid tegen overstromingen vanuit de zee, bieden gebieden als zeegrasvelden en kwelders kansen.^{102,103} Ze breken de golfstroming en hebben een kalmerende functie op het water. Meer onderzoek zal moeten aantonen welke locaties in Nederland

⁹² PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

⁹³ CLM et al. (2013) *Verwaarden van goed bodemkoolstofbeheer in de landbouw*

⁹⁴ Leschen et al. (2021) *De potentie voor koolstofvastlegging in de Gelderse bodem*

⁹⁵ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

⁹⁶ Idem

⁹⁷ Verstand et al. (2020) *Naar klimaatbestendige agrarische bedrijven op veen en moerige gronden in de Veenkoloniën*

⁹⁸ Imares (2015) *A review of blue carbon in the Netherlands*

⁹⁹ Idem

¹⁰⁰ Brans (2022) *Klimaataansprakelijkheid, negatieve emissies en biodiversiteit*

¹⁰¹ Strietman et al. (2019) *De economische effecten van twee toekomstscenario's voor de Noordzee*

¹⁰² Idem

¹⁰³ Imares (2015) *A review of blue carbon in the Netherlands*

geschikt zijn voor het uitbreiden van deze gebieden zonder grote delen land op te offeren. De effecten van CO₂ opslag in oceanen (deep blue carbon) is zeer complex en wordt nog onderzocht. Op dit moment kunnen er nog geen conclusies getrokken worden.

Op dit moment wordt er veel onderzoek uitgevoerd naar de effecten van het uitspreiden van *biokool* over landbouwgronden. Er is nog geen consensus over de effecten van grootschalige uitrol, verschillende proeven lijken andere resultaten op te leveren. Biokool heeft mogelijk een positieve bijdrage aan plantproductiviteit, plantopbrengsten, bodemkwaliteit, vruchtbaarheid en resistentie tegen zouten voor de planten door een verbeterde ionenbalans. Ook zou het de activiteit van micro-organismen en enzymen in de bodem bevorderen, wat de bodemkwaliteit ten goede komt.¹⁰⁴ Biokool zou ook de emissie van lachgas en methaan uit de bodem kunnen neutraliseren.¹⁰⁵

Uit onderzoek van het PBL blijkt echter dat de effecten van biokool niet zo duidelijk zijn. Het PBL heeft geen verhoogde gewasopbrengsten, gewaskwaliteit of verbeteringen aan de bodemkwaliteit aangetroffen in hun onderzoek. Daarnaast kan biokool verontreinigd zijn met zware metalen, PAK's, PCB's en dioxinen. Ook stelt het PBL dat de interactie tussen biokool en stikstof nog niet begrepen wordt.¹⁰⁶

Aan de inputzijde van biokool gelden dezelfde zorgen over de beschikbaarheid van biomassa en de neveneffecten van grootschalige biomassaproductie die bij BECCS gelden. De productiemethodes van biokool zelf kosten veel energie. Mits deze duurzaam opgewekt wordt, is de impact op externe factoren niet groot.

Een groot voordeel is dat Nederland een uitstekend economisch klimaat en infrastructuur heeft voor de vastlegging van CO₂ in biokool. Nederland bezit veel kennis en kunde over de thermochemische processen voor de productie van biokool en de technische capaciteit om het uit te voeren bij (fossiele) energiebedrijven. Nederland beschikt met o.a. Moerdijk en Heerlen ook over de chemische industrie die nodig is om de verschillende reststromen (gassen en oliën) te verwerken en opwaarderen tot waardevolle brandstoffen en andere chemicaliën.¹⁰⁷ Het produceren van brandstoffen en chemicaliën via thermochemische processen (zoals pyrolyse en vergassing) is een nieuw werkveld. Deze processen kunnen (een gedeelte van) de brandstoffen en chemicaliën op fossiele basis vervangen en daarmee lokale werkgelegenheid en economie in stand houden.

Met betrekking tot het grootschalig uitstrooien van mineralen voor *versnelde verwerking* is nog weinig praktijkkennis opgedaan. Het PBL stelt dat het grootschalig verspreiden van olivijn een uitdaging vormt voor economie, infrastructuur en gezondheid.¹⁰⁸ Er is voor zover bekend geen onderzoek gedaan naar de effecten op de economie en werkgelegenheid bij het vermalen en verspreiden van olivijn.

De effecten op de gezondheid en omgeving zijn nog grotendeels onbekend. De verwerende mineralen verhogen de pH waarde van omliggende bodems en water. Wat de effecten hiervan

¹⁰⁴ WU et al. (2023) *Bibliometric analysis of biochar research in 2021: A critical review for development, hotspots and trend directions*

¹⁰⁵ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

¹⁰⁶ Idem

¹⁰⁷ Ecorys (2023) *Technological scope and potential cost reductions Early Phase Scale up* (nog niet openbaar).

¹⁰⁸ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

zijn, verschilt per ecosysteem, plantensoort en diersoort. Zo zijn er mossel- en algensoorten die minder groeien, maar versterkt het de groei bij andere schaaldieren. Wieren hebben bijvoorbeeld baat bij verhoogde pH concentraties, maar zeevlooien ervaren er hinder van.

Wel is duidelijk dat de mineralen de verzuring van oceanen, als gevolg van absorptie van CO₂, gedeeltelijk kunnen tegengaan.¹⁰⁹ Het zou ook blauwalg kunnen tegengaan en de waterbodem verstevigen door carbonaatneerslag.¹¹⁰ Wat de gevolgen hiervan zijn, is echter niet duidelijk.¹¹¹

Bij de verspreiding van olivijn bestaat ook de kans dat er zware metalen vrijkomen, voornamelijk nikkel. Vermoedelijk heeft nikkel geen grote invloed op de omgeving, maar de discussie hierover loopt nog.¹¹² Meer onderzoek naar de invloed van olivijn en specifiek nikkel is echter nog wel nodig.¹¹³

¹⁰⁹ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

¹¹⁰ Deltares (2012) *Olivijn legt CO₂ vast in de gemeente Rotterdam Mogelijkheden voor praktijktoepassingen en klimaatdoelstellingen*

¹¹¹ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

¹¹² Idem

¹¹³ KNAW (2020) *Factsheet CO₂ afvang en opslag*

Deelconclusie

Voor geen van de methodes is concrete informatie gevonden over de effecten op lokale economie en werkgelegenheid. Voor vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen zijn de effecten op de leefomgeving bekend en uitgesproken positief. BECCS, biokool en versnelde verwerking van mineralen zijn nog relatief nieuwe methodes, waardoor ze hooguit in kleinschalige testopstellingen bestaan. Hierdoor zijn veel effecten nog onbekend en onbewezen.

Bossen verhogen de biodiversiteit. Ze dragen bij aan lucht-, bodem- en waterkwaliteit. Bossen leggen de bodem vast, waarmee erosie en landdegradatie voorkomen wordt. Ze houden plagen onder controle en dragen bij aan menselijke gezondheid en comfort.

Door vastlegging van CO₂ in de bodem te stimuleren, wordt de organische laag van de bodem vergroot. Dit verhoogt de biodiversiteit, de vochtregulatie en het retentievermogen. Een gezonde bodem leidt tot verminderde erosie, meer nutriënten en heeft een dempende werking op de effecten van extreme neerslag.

Ook mariene ecosystemen herbergen een grote biodiversiteit, ze dienen als foerageergebied en kraamkamer voor zeefauna. Daarnaast hebben mariene kustgebieden een dempende werking op de golfslag, wat de kustverdediging verbetert.

BECCS heeft waarschijnlijk een negatief effect op de leefomgeving. Over het algemeen wordt aangenomen dat de ruimte voor de benodigde biomassa ten koste gaat van bossen, wouden en andere landbouwgronden. Een monocultuur van gewassen voor BECCS heeft vaak een tegenovergesteld effect aan de ecosystemen die het vervangt.

Dezelfde effecten zijn ook aan biokool toe te schrijven. Daarnaast zijn de effecten van biokool op de leefomgeving nog grotendeels onbekend. Er worden zowel positieve effecten (zoals vruchtbaarheid) als negatieve effecten (zware metalen verontreiniging) aan biokool toegedicht. Meer onderzoek naar de effecten is echter nodig om duidelijkheid te verschaffen.

Net als bij biokool worden er verschillende positieve (plantengroei) en negatieve effecten (zware metalen verontreiniging) toegeschreven aan de verwerking van mineralen. Ook deze effecten zijn echter nog onvoldoende onderzocht.

3.8 Potentiële synergieën en conflicten

Het is onwaarschijnlijk dat een enkele methode de doorslaggevende methode voor het verwijderen van CO₂ kan worden. Het is waarschijnlijker dat er een combinatie van methodes toegepast gaat worden. In dat kader bespreken we een aantal van de belangrijkste synergieën en conflicten tussen methodes onderling en met betrekking tot verschillende maatschappelijke beleidsdoelen.

Synergieën

In paragraaf 3.5 is besproken dat de CO₂-opslag van bossen gebaat kan zijn bij een actief oogstbeleid. De bossen worden productiever en leggen meer CO₂ vast. Het geogste hout

kan vervolgens gebruikt worden voor andere toepassingen, waarbij de opgeslagen CO₂ in het hout langer vastgehouden wordt. Uitbreiding van bossen in Nederland met actief oogstbeleid leidt tot meer beschikbaar hout. Dit hout kan in de bouw lange tijd CO₂ vastleggen, of als grondstof voor BECCS of biokool dienen na het einde van zijn levensduur. Beide methodes werken het best met houtachtige biomassa als grondstof. Zo wordt er meer CO₂ in bossen vastgelegd en is er in Nederland meer biomassa beschikbaar. Theoretisch zou hetzelfde principe voor mariene ecosystemen ook kunnen werken, maar er is weinig onderzoek beschikbaar naar marien beheer ten behoeve van biomassaproductie.

Bossen en mariene ecosystemen kunnen beide ook goed samengaan met een landbouwtransitie als mogelijke bijdrage aan de stikstofcrisis. Een omschakeling van intensieve veeteelt naar bijvoorbeeld agroforestry of aquacultuur zou de werkgelegenheid en voedselvoorziening op peil kunnen houden, terwijl bossen en mariene systemen uitgebreid worden. Zo kan er meer CO₂ verwijderd worden en minder stikstof worden uitgestoten. Dit meervoudig landgebruik kan zo ruimte bieden aan zowel (extensieve) landbouwvormen als een vergroot marien en bosareaal. Een reductie van de intensieve landbouw zou als bijkomend gevolg ook kunnen leiden tot een verlaging van restemissies, waarvoor CO₂-verwijdering als compensatie zou kunnen dienen.

De productie van biokool gaat samen met de productie van biobased brandstoffen en materialen. Voor deze industrieën is niet de biokoolproductie het doel, maar de reststromen. Deze reststromen bestaan uit gassen en oliën die opgewerkt kunnen worden tot brandstoffen of andere koolstofhoudende stoffen. De productie van biokool heeft, naast de biokool zelf, weinig ongebruikte reststromen. Biokoolproductie leidt dus niet alleen tot CO₂-verwijdering, maar ook tot een verhoogde productie van biobased brandstoffen en grondstoffen. Zo kan het aandeel brandstoffen en materialen van fossiele oorsprong verlaagd worden.

CO₂ vastleggen in bossen combineert ook goed met bepaalde vormen van vastlegging in de bodem. In het natuurlijke verloop van bossen sterven bomen af en vergaan. Een gedeelte van de opgeslagen koolstof van de bomen (en andere flora) blijft vervolgens opgeslagen in de organische laag op de grond. Deze laag draagt vervolgens weer bij aan de gezondheid van het bos. Dit effect speelt niet bij productiebossen, waarbij hout uit het bos verwijderd wordt voordat het kan vergaan.

Naast het verwijderen van CO₂, blijft het reduceren van CO₂-emissies een belangrijk doel. Door de toepassing van BECCS hoeven er minder fossiele brandstoffen gebruikt te worden voor energieopwekking en wordt het aandeel duurzaam opgewekte energie verhoogd, terwijl tegelijkertijd CO₂ verwijderd wordt. Zo kan BECCS bijdragen aan zowel CO₂-emissiereductie als CO₂-verwijdering, mits de benodigde biomassa daadwerkelijk CO₂-winst realiseert.

Nederland is gebaat bij een sterke kustverdediging, waar (coastal) mariene ecosystemen aan kunnen bijdragen. Systemen zoals schorren en kwelders dempen de golfwerking van het water en verlagen de druk van het water op de dijken. Daarnaast is uit onderzoek gebleken dat, mocht een dijk alsnog doorbreken, schorren en kwelders leiden tot een kleinere dijkdoorbraak. Hierdoor stroomt er minder water het achterland in, waardoor er meer tijd is om te reageren en de schade afneemt.¹¹⁴

¹¹⁴ Zhu et al. (2020) *Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence*

Als laatste synergie zouden specifieke mariene ecosystemen goed kunnen samengaan met windturbines op zee. De basis van een turbine blijkt een geschikte plek voor mosselbanken om zich te ontwikkelen, welke weer een positieve bijdrage leveren aan de biodiversiteit van de zee. Windparken op zee leveren zo niet alleen duurzame energie en verlagen de behoefte aan energie uit fossiele bronnen, maar bieden ook een anker voor de flora en fauna van mosselbanken om te ontwikkelen.

Conflicten

BECCS, biokool (met gerelateerde biobased brandstoffen en materialen) en houtbouw werken (het beste) met houtachtige biomassa en maken dus gebruik van dezelfde grondstoffen. De beschikbaarheid van biomassa staat in Nederland al onder druk en veel van de benodigde biomassa wordt al geïmporteerd. Daarbovenop is de mondiale beschikbaarheid van biomassa voor grootschalige productie van biomassa erg onzeker. De benodigde ruimte voor biomassa-productie gaat vaak ten koste van bestaande voedselgewassen, bossen en oerwouden. Als er grootschalig biomassa geproduceerd wordt, gaat dit voor een gedeelte ten koste van voedselproductie. De voedselproductie zal zich moeten verplaatsen en andere ruimte gebruiken. Dit zullen veelal bossen en oerwouden zijn, wat een averechts effect op CO₂ vastlegging, biodiversiteit en gezondheid kan hebben.¹¹⁵

Een ander groot conflict is de beschikbare ruimte in Nederland. Vastlegging van CO₂ in bossen en de bodem staan beide op gespannen voet met het huidige landgebruik in Nederland. De ruimte is schaars en uitbreiding van bossen of het herstel van veengebieden zal grotendeels ten koste gaan van andere activiteiten. In Nederland zullen dit vaak intensieve landbouwactiviteiten zijn.¹¹⁶ Voor veenherstel moet het gebied dusdanig vernat worden dat er geen intensieve landbouw meer mogelijk is. In het geval van bossen zijn er hybride vormen denkbaar zoals agroforestry. Het IPCC verwacht dat er veel concurrentie zal ontstaan tussen voedselproductie en andere vormen van landgebruik.¹¹⁷

¹¹⁵ Zie hoofdstuk 3.4

¹¹⁶ PBL (2018) *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*

¹¹⁷ Van Goor & Snoep (2019) *The contribution of forests to climate change mitigation*

Deelconclusie

Voor bijna alle methodes zijn synergieën en conflicten gevonden, onderling of met maatschappelijke beleidsdoelen. De versnelde verwerking van mineralen is een opvallende buitenstaander, waarvoor geen duidelijke synergieën of conflicten gevonden zijn. Hierdoor is er niet één methode duidelijk als beste keuze aan te wijzen.

De synergieën zijn divers en beslaan verschillende thema's. Ze variëren van efficiënter gebruik van grondstoffen en reststromen, tot voordelen voor de biodiversiteit, kustverdediging, werkgelegenheid en een potentiële transitie in landbouwwormen.

De meeste conflicten zijn samen te vatten in twee groepen. De eerste draait om gelimiteerde beschikbaarheid van grondstoffen, specifiek biomassa. Zowel BECCS als biokool (en andere toepassingen) concurreren om dezelfde biomassa, waarbij de verhoogde vraag tot grootschalige verandering van landgebruik, biodiversiteitsverlies en landdegradatie kan leiden.

De andere groep conflicten draait om de benodigde ruimte, waarbij uitbreiding van bossen, de bodem en (in mindere mate) mariene ecosystemen op gespannen voet staat met het bestaande ruimtegebruik.

4 Conclusies

In dit vergelijkend literatuuronderzoek hebben we gekeken naar methodes voor het verwijderen van CO₂ in de Nederlandse context. Voor zes methodes hebben we acht indicatoren bestudeerd op basis van beschikbare literatuur. De eerste prioriteit ging hierbij uit naar documentatie van Nederlandse kennis- en onderzoeksinstituten, waar nodig aangevuld met wetenschappelijke literatuur.

Harde conclusies over de toepassing van de methodes in Nederland zijn moeilijk te trekken gezien de beperkte beschikbaarheid van studies en praktijktoepassingen. Enerzijds is het effect van de verschillende methodes sterk afhankelijk van de gebruikte grondstoffen en de beschikbare ruimte. Anderzijds zijn de effecten slechts op kleine schaal onderzocht. Toepassing van een methode op grote schaal, zoals voor heel Nederland, zou kunnen leiden tot onvoorziene effecten die op kleine schaal niet naar voren gekomen zijn. Voor alle methodes is daarom meer onderzoek nodig om de effecten beter in te kunnen schatten.

De **kosten** per verwijderde ton CO₂ lopen sterk uiteen in de literatuur, ze worden veelal uitgedrukt in bereiken. Voor 2030 lopen de extremen van deze bereiken van 0 euro (geen kosten) voor vastlegging in de bodem tot 597 euro voor biokool. Hierbij hebben BECCS en versnelde verwerking van mineralen met een kleiner bereik relatief meer zekerheid in de kosten dan de overige vier methodes. Ook voor 2050 zijn de kosten nog onzeker. Vermoedelijk worden alle methodes goedkoper, met uitzondering van vastlegging in bossen.

Het **energieverbruik** van de methodes varieert onderling sterk. Vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen kennen geen energieverbruik. Versnelde verwerking van mineralen heeft een beperkte energieconsumptie terwijl biokool veel energie vergt. BECCS is de enige methode die ook energie opwekt.

Vastlegging in de bodem en in mariene ecosystemen kennen geen **grondstoffengebruik**. Voor BECCS, hout voor de bouw en olivijn voor verwerking is het grondstoffengebruik grotendeels bekend. Het grondstoffengebruik van biokool is daarentegen onzeker en sterk afhankelijk van het type biomassa dat wordt gebruikt.

Bij het **directe en indirecte landgebruik** tekent zich een scherpe onderverdeling af. De drie methodes die gebaseerd zijn op natuurlijke ecosystemen (vastlegging in bossen, de bodem en mariene ecosystemen) hebben een groot direct landgebruik en geen indirect landgebruik. Voor de andere drie methodes geldt het tegenovergestelde: het directe landgebruik is verwaarloosbaar, terwijl het indirecte landgebruik groot is als gevolg van het hoge grondstoffengebruik van deze methodes.

Alle zes methodes zijn geschikt om **CO₂ voor langere termijn vast te leggen**. Bij het gebruik van hout voor houtbouw en biokool na, zijn alle methodes theoretisch gezien in staat om CO₂ permanent op te slaan. Deze termijn waarop koolstof in hout voor houtbouw is vastgelegd, is echter lang genoeg om een significante bijdrage aan CO₂-verwijdering te kunnen leveren.

Wat betreft [de inpassing in een hernieuwbare economie](#), zijn de drie natuurlijke ecosystemen uitermate geschikt. De inpassing van de andere drie methodes is onzekerder en is over het algemeen nog onvoldoende onderzocht.

De drie natuurlijke ecosystemen hebben een duidelijke [positieve impact op de leefomgeving](#). In de literatuur is voor geen van de methodes informatie gevonden over de impact op de economie of lokale werkgelegenheid .

Er zijn verschillende [synergieën en conflicten tussen methodes](#) gevonden. De meeste zijn terug te voeren tot schaarste aan ruimte wereldwijd, maar zeker ook in Nederland. Hierdoor treden conflicten met betrekking tot de benodigde ruimte voor de methodes en/of hun grondstoffen. Synergieën zijn te vinden in het combineren van methodes, waarbij de ene methode ruimte krijgt voor uitbreiding en daarmee grondstoffen voor de andere methode produceert. Op deze manier kan tweezijdig CO₂ verwijderd worden.

In tabel 4.1 geven we een overzicht van de belangrijkste resultaten per onderzoeksvraag.

Tabel 4.1 Resultaten per onderzoeksvraag en methode

	BECCS bij kolencentrales/AVI's	Vastlegging in bossen	Vastlegging in de bodem	Vastlegging in mariene ecosystemen	Biokool	Versnelde verwerking van mineralen
1.1 Kosten per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten 2030	Kolencentrales: 57 – 88 euro/tCO ₂ AVI's: 72 - 96 euro/tCO ₂	60 - 239 euro/tCO ₂	0 - 60 euro/tCO ₂	10 - 97 euro/tCO ₂	119 - 597 euro/tCO ₂	84 euro/tCO ₂
1.2 Kosten per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten 2050	Kolencentrales: 88 - 177 euro/tCO ₂ AVI's: onbekend	13 - 44 euro/tCO ₂	0 - 100 euro/tCO ₂	44 - 88 euro/tCO ₂	26 - 106 euro/tCO ₂	onbekend
2. Energieverbruik in de gehele keten per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	-0,8 - -10 GJ/tCO ₂	0 GJ/tCO ₂	0 GJ/tCO ₂	0 GJ/tCO ₂	200,5 GJ/tCO ₂	0,3 – 46 GJ/tCO ₂
3. Grondstoffengebruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	Biomassacentrale: 1,41 – 2,21 ton biomassa/tCO ₂ AVI's: 1,57 Mton afval/tCO ₂	Vastlegging in bossen: geen grondstoffengebruik Houtbouw: 1,67 m ³ hout/tCO ₂	Geen grondstoffengebruik	Geen grondstoffengebruik	2,8 - 25 ton biomassa/tCO ₂	0,8 – 1 ton olivijn/tCO ₂
4.1 Direct landgebruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	Verwaarloosbaar direct landgebruik	0,21 - 0,29 ha/tCO ₂ /jaar	0,9 – 12,5 ha/tCO ₂ /jaar	0,07 – 1,2 ha/tCO ₂ /jaar	Verwaarloosbaar direct landgebruik	Verwaarloosbaar direct landgebruik
4.2 Indirect landgebruik per verwijderde ton CO ₂ -equivalenten	Biomassacentrale: 0,1 – 1,7 ha/tCO ₂ AVI's: 0 ha/tCO ₂	Geen indirect landgebruik	Geen indirect landgebruik	Geen indirect landgebruik	0,19 ha/tCO ₂	<0,01 ha/tCO ₂
5. Vastleggingsduur van de verwijderde CO ₂	Permanent bij opslag in lege gasvelden	Permanent met goed bosbeheer 75 – 300 jaar voor houtbouw	Permanent met goed bodembeheer	Permanent met goed beheer	Duizenden jaren	Permanent

	BECCS bij kolencentrales/AVI's	Vastlegging in bossen	Vastlegging in de bodem	Vastlegging in mariene ecosystemen	Biokool	Versnelde verwerking van mineralen
6. Inpassing in een hernieuwbare en circulaire economie	Geen consensus, dankzij discussie over CO ₂ -lekken en duurzame biomassaproductie	Volledige inpassen	Volledige inpassen	Volledige inpassing	Onbekend, vanwege onbewezen effect op de leefomgeving	Beperkte inpassing, vanwege theoretische eindigheid van mineralen en onbewezen effect op de leefomgeving
7. Impact op leefomgeving en economie	Sterk negatieve impact op de leefomgeving, mogelijk positieve impact op economie	Sterk positieve impact op de leefomgeving, onbekend effect op de economie	Sterk positieve impact op de leefomgeving, mogelijk negatieve impact op economie	Sterk positieve impact op de leefomgeving, onbekende impact op de economie	Onbewezen impact op de leefomgeving, positief effect op de economie	Onbewezen impact op de leefomgeving, mogelijk positieve impact op de economie

	BECCS bij kolencentrales/AVI's	Vastlegging in bossen	Vastlegging in de bodem	Vastlegging in mariene ecosystemen	Biokool	Versnelde verwerking van mineralen
8. Potentiële synergieën en conflicten	<p>Synergie: Opwekking van duurzame energie gaat ten koste van energie uit fossiele brandstoffen.</p> <p>Synergie: Uitbreiding van het bosareaal vergroot de grondstoffenvoorraad voor BECCS.</p> <p>Conflict: BECCS en biokool concurreren om dezelfde grondstoffen.</p> <p>Conflict: Grotere biomassaproductie kan tot voedselproblematiek en landdegradatie leiden.</p>	<p>Synergie: Uitbreiding van bossen biedt meer hernieuwbare grondstoffen voor houtbouw.</p> <p>Synergie: Uitbereiding van bossen profiteert van extensievere landbouwtechnieken.</p> <p>Synergie: Hout uit bossen kan als grondstof voor BECCS en biokool gebruikt worden.</p> <p>Synergie: Uitbreiding van bossen verhoogt de CO₂-opslag in de bodem voor vergroting van de organische laag.</p> <p>Conflict: Uitbreiding van bossen heeft een sterke impact op het landgebruik.</p>	<p>Synergie: Vastlegging in de bodem kan versterkt worden door vastlegging in bossen.</p> <p>Conflict: Uitbereiding van veenbodems gaat ten koste van het huidige landgebruik.</p>	<p>Synergie: Uitbereiding van mariene ecosystemen profiteert van extensievere landbouwtechnieken.</p> <p>Synergie: Mariene ecosystemen kunnen bijdragen aan de kustverdediging.</p> <p>Synergie: Mariene ecosystemen kunnen zich ontwikkelen rondom windparken op zee.</p> <p>Conflict: Uitbreiding van mariene ecosystemen gaat ten koste van het huidige landgebruik.</p>	<p>Synergie: Biokool kan hout en mogelijk zilte biomassa als grondstof gebruiken.</p> <p>Synergie: Biokool en biobased brandstoffen/grondstoffen zijn onderdeel van hetzelfde productieproces.</p> <p>Conflict: Biokool en BECCS concurreren om dezelfde grondstoffen.</p> <p>Conflict: Grotere biomassaproductie kan tot voedselproblematiek en landdegradatie leiden.</p>	

Literatuurlijst

Bain (2010). *Peatlands and greenhouse gas emissions reduction opportunities in Scotland*

Bello et al. (2020). *BECCS based on bioethanol from wood residues: Potential towards a carbon-negative transport and side effects.*

Bontenbal en Amhaouch (2021). *Motie van de leden Bontenbal en Amhaouch – Kabinetsaanpak Klimaatbeleid.*

Bontenbal en Erkens (2022). *Motie van de leden Bontenbal en Erkens- Industriebeleid.*

Brans (2022). *Klimaataansprakelijkheid, negatieve emissies en herstel van biodiversiteit.*

CLM et al. (2013). *Verwaarden van goed bodemkoolstofbeheer in de landbouw.*

Deltares (2012). *Olivijn legt CO₂ vast in de gemeente Rotterdam.*

Diverse partijen (2019). *Klimaatakkoord.*

Donnison et al. (2020). *Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): Finding the win-wins for energy, negative emissions and ecosystem services - size matters.*

EASAC (2019). *Forest bioenergy, carbon capture and storage, and carbon dioxide removal: an update.*

Energy Transition commission (2022). *Mind the gap. How CO₂ removal must complement deep decarbonisation to keep 1.5 °C alive.*

Fuss et al (2018). *Negative emissions part 2: Costs, potentials and side effects.*

Gentry et al. (2014). *Potential occupational risk of amines in carbon capture for power generation.*

Gustafson et al. (2021). *BECCS with combined heat and power: assessing the energy penalty.*

Howard et al (2017). *Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation.*

IBO (2023). *Scherpe doelen, scherpe keuzes: IBO aanvullend normerend en beprijzend national klimaatbeleid voor 2030 en 2050.*

Imares (2015). *A review of blue carbon in the Netherlands.*

IPCC (2022). *Climate Change 2022 - Migration of Climate Change.*

Jeswani et al. (2022). *Environmental sustainability of negative emissions technologies: a review.*

- Jetten (2023). *Naar een beleidsagenda voor een Klimaatneutraal Nederland*.
- Jetten (2023). *Tabel Klimaatpakket voorjaarsbesluitvorming*.
- KNAW (2020). *Factsheet CO₂-afvang en opslag*.
- Köhl et al. (2017). *The impact of tree age on biomass growth and carbon accumulation capacity: A retrospective analysis using tree ring data of three tropical tree species grown in natural forests of Suriname*.
- Leschen et al. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in Gelderse landbouwbodems*.
- Leschen et al. (2021). *De potentie voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw*.
- Maguyon-Detras et al. (2020). *Thermochemical Conversion of Rice Straw*.
- Material Economics (2021). *EU Biomass Use in a Net-Zero Economy: A course correction for EU biomass*.
- Mcleod et al. (2011). *A Blueprint for blue carbon toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂*.
- Minx et al. (2018). *Negative emissions – Part 1: Research land scape and synthesis*.
- Nemet et al. (2018). *Negative emissions — Part 3: Innovation and upscaling*.
- NIBE (2019). *Potentie van biobased materialen in de bouw*.
- PBL (2018). *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*.
- Royal Haskoning DHV (2022). *Quickscan behoefte naar en onderzoeksprogramma gericht op negatieve CO₂-emissie*.
- SER (2023). *Meer vaart maken met de grondstoffentransitie*.
- Smith et al. (2016). *Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions*.
- Strietman et al. (2019). *De economische effecten van twee toekomstscenario's voor de Noordzee*.
- The Olivine Foundation (2021). *Fact and figures about CO₂ and Olivine*, geraadpleegd 01-04-2023.
- The Royal Society (2018). *Greenhouse gas removal*.
- TNO (2021). *Een verkenning van het potentieel van tijdelijke CO₂-opslag bij houtbouw*.

Treedet & Suntivarakorn (2011). *Sugar cane trash pyrolysis for bio-oil production in a fluidized bed reactor.*

TU Delft (2021). *Houtbouw, een kuur voor vele crises.*

Van der Lugt (2021). *Houtbouwmythes ontkracht. Het onderscheid tussen fabels en feiten.*

Van Goor & Snoep (2019). *The contribution of forests to climate change mitigation.*

Verstand et al. (2020). *Naar klimaatbestendige agrarische bedrijven op veen en moerige gronden in de Veenkoloniën.*

VVNH (2021). *Klimaatwinst door houtbouw.*

Wu et al. (2023). *Bibliometric analysis of biochar research in 2021.*

WUR (2018). *Klimaatcijfers voor natuur. Cijfers voor koolstofopslag en vastlegging in Nederlandse natuur.*

www.bluecarbon.nl, geraadpleegd 30-03-2023.

www.noordzeeloket.nl, geraadpleegd 04-04-2023.

Zhu et al. (2020). *Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence.*



Postbus 4175
3006 AD Rotterdam
Nederland

Watermanweg 44
3067 GG Rotterdam
Nederland

T 010 453 88 00
F 010 453 07 68
E netherlands@ecorys.com

K.v.K. nr. 24316726

W www.ecorys.nl