



Technieken en kansen voor een koolstofpositieve economie 2040 Provincie Zuid-Holland

Overzicht en beschrijving van 18 technieken voor koolstofdioxideverwijdering met potentie en kansen per techniek en per sector voor de Provincie Zuid-Holland

November 2023

Inleiding

Dit rapport is een beschrijving van technieken voor koolstofverwijdering en koolstofhergebruik, welke potentie hebben in de Provincie Zuid-Holland, beoordeeld op kosten, ontwikkelingsfase en mitigatiepotentieel. Met als afsluiting per sector oplossingsrichtingen om verder uit te werken.

Maatschappelijk aanleiding

De aanleiding is, dat de EU eind 2023 of begin 2024 een nationaal koolstofverwijderingsdoel en broeikasgasreductiedoel gaat bepalen voor het jaar 2040. Nederland gaat dat in 2024 wettelijk implementeren in nationale doelen.

Zoals het er nu uit ziet zal de netto-emissie in 2040 90% tot 95% lager moeten zijn ten opzichte van 1990 in de EU. Koolstofverwijdering is een onderdeel van dat percentage van ongeveer 15% in 2040. Dat betekent dat de werkelijke uitstoot in Nederland tussen 2030 en 2040 van 45% naar 20% of 25% gaat en dat extra koolstofverwijdering daar 15% van af haalt, zodat de netto broeikasgasuitstoot in 2040 5% of 10% is.

Koolstofverwijdering vervangt de noodzaak tot broeikasgasreductie niet, maar speelt tot 2040 wel degelijk een belangrijke rol om de netto-emissie

zo laag mogelijk te krijgen. Na 2050 gaat koolstofverwijdering een rol spelen in het werkelijk verlagen van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer, waarbij er meer koolstof wordt opgeslagen in EU, dan dat er uitgestoten wordt.

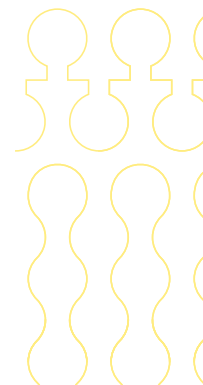
Aanleiding voor provinciale kennisontwikkeling

Zuid-Holland speelt daarin de grootste rol van alle Nederlandse provincies, vooral omdat er veel CO₂-pijpleidingen via Rotterdam gaan lopen, maar ook veenweide, de zee de bio-reststromen van glastuinbouw en innovatieve industriële technieken bieden veel mooie kansen voor een koolstofpositieve economie in 2040.

Voor de benutting van die kansen zijn verschillende partijen nodig. Het provinciebestuur is er daar één van, bijvoorbeeld via het ZH-PLG.

Tegen deze achtergrond wordt onderzoek over dit thema uitgevoerd in het kader van de Toekomst-Agenda, onderdeel van het programma Kennis Zuid-Holland. Dit eerste rapport beschrijft technieken en kansen. Het voornemen is om in een tweede deel handelingsperspectieven te presenteren.

Zuid-Holland kan een belangrijke rol spelen in de ontwikkeling van een koolstofpositieve economie. Uit de tabel op bladzijde 9 van deze rapportage blijkt namelijk, dat 20% tot 70% van het mitigatiepotentieel van de totale Nederlandse koolstofverwijdering in Zuid-Holland ligt. Met name het effect van de technieken Biochar/Hydrochar en Direct Air Capture & Storage kunnen het verschil maken. In een vijftal sectoren is het provinciebestuur betrokken in reguliere rollen en processen, waarin zij daadwerkelijk de introductie en opschaling kan bevorderen.



Inhoudsopgave

Inleiding	2
Leeswijzer	4
Regels	5
Mitigatiepotentieel van Koolstof Verwijdering	10
Agroforestry – boslandbouw	11
Afforestation and reforestation – her- en bebossing	12
Ecosystemrecovery – natuurherstel	13
Peatland and Wetland Restoration – veenherstel	14
Soil Carbon Sequestration – koolstofopslag in landbouwbodems	16
ZH-PLG Samengevat	17
Bio-Energy Carbon Capture and Storage – BECCS	18
Bio-Chemistry Carbon Capture and Storage – Biochemie	20
Biochar/Hydrochar – Biokool	22
Construction Stored Carbon – biobased en koolstof-opslaand bouwen	23
Infrastructure Stored Carbon – koolstofopslag in weg- en waterbouw	25
Enhanced Rock Weathering – versnelde verwerking van silicaat steengruis	26
Wood Harvesting and Storage – houtoogst en –opslag	27
Coastal Bleu Carbon – Koolstofopslag in zeegras, zeewier en ander zeeleven	29
Direct Air Capture and Storage – DACS	30
Alkanility Enhancement – tegengaan verzuring van de zee	32
Direct Ocean Removal – Directe CO ₂ -opslag in zeewater	33
Artificial Upwelling / Downwelling – Kunstmatige verticale stroming zeewater	36
Macro-Algal Cultivation – Zeewierteelt	37
Kansen voor een koolstofpositieve economie in de Provincie Zuid-Holland 2040 per sector	38
Land- en Tuinbouw	38
Energie- en elektriciteit	39
Afval	40
Bouw / Infra / Industrie	41
De Noordzee en rivier	41
Bijlage: Lijst met begrippen en afkortingen	42
Colofon	43

Leeswijzer

Het eerste hoofdstuk bevat een aantal spelregels die bij koolstofopslag hoort, om effectief en integer mee te tellen als zodanig. Dit is belangrijk, want het loont om vanaf het begin met de goede set regels te werken om teleurstellingen achteraf te voorkomen.

De feitelijke beschrijving start met een samenvattende tabel. Elke mogelijke techniek wordt in de tabel genoemd, net als de technische geschiktheid (TRL), de kostprijs per opgeslagen ton en het mitigatiepotentieel.

De technieken staan min of meer in chronologische volgorde in de tabel van boven naar beneden.

De eerste vijf technieken zijn het Programma Landelijk Gebied (ZH-PLG), daarna volgen de technieken die vrijwel gereed zijn om toe te passen en daarna de technieken waar in extra onderzoek geïnvesteerd moet worden om deze tussen 2030 en 2040 te kunnen toepassen.

Per techniek wordt deze kort beschreven, het migratiepotentieel weergegeven, Zuid-Hollandse toepassingen benoemd, (bijkomende) voordelen beschreven. Tot slot wordt er in een stroomschema nader op ingegaan, hoe elke techniek tot permanente koolstofopslag leidt. Daarin staan ook 100 voorbeelden die aanklikbaar zijn voor meer informatie per bedrijf of initiatief dat de techniek toepast of toe gaat passen in de toekomst.

Per thema of sector is er vervolgens een lijst met mogelijke ingrepen die de Provincie Zuid-Holland kan doen of bevorderen om koolstofopslag te versnellen en deze in dienst van de eigen economie te kunnen gebruiken.



Regels

Koolstofdioxideverwijdering (CDR) is cruciaal voor elke mitigatiestrategie die gericht is op het bereiken van de lange termijn doelstelling van het Verdrag van Parijs. Het vervangt de noodzaak voor reducties niet, maar komt er extra bij.

Europees verdrag en beleid

De EU gaat zeer binnenkort een reductiedoel stellen voor het jaar 2040 van 90% tot 95% ten opzichte van de uitstoot van het jaar 1990, op aanraden van het Climate Advisory Board.

Dit betekent:

2020: 25% minder broeikasgasemissie

2030: 55% minder broeikasgasemissie

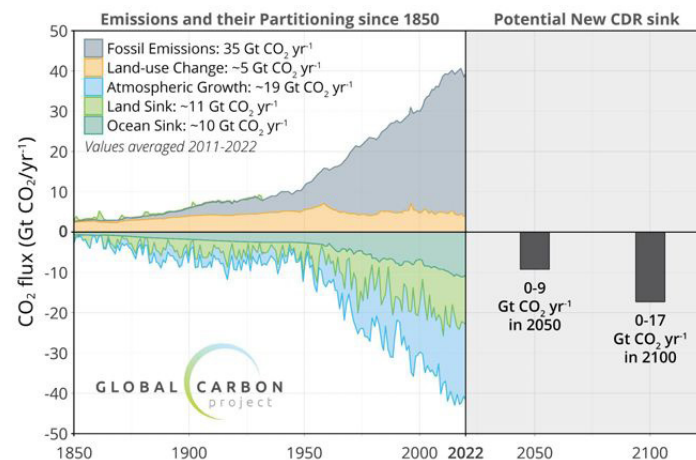
2040: 80% minder broeikasgasemissie + 15% koolstofdioxideverwijdering (CDR) = 95% reductie.

Het kan ook zijn dat de reductie ten opzichte van 2030 30% wordt in 2040 en de extra koolstofdioxideverwijdering 10% wordt ten opzichte van 1990, maar voor het jaar 2040 komt dat op eenzelfde netto-uitstoot neer.

Na 2050 en vele decennia daarna is er meer koolstofdioxideverwijdering nodig, dan dat er uitstoot is, om

het te veel aan historische emissies wereldwijd uit de atmosfeer te halen en de tegenvallers van droogte, bosbranden, ontthooien permafrost, verzuring zee, minder aerosolen en/of minder wit aardoppervlak door gesmolten ijsvlaktes te compenseren.

Hoe eerder er met koolstofdioxideverwijdering begonnen wordt, des te minder er nodig is in de toekomst.



Afbeelding 1: gewijzigd uit Minx et al. 2018:

Wereldwijde broeikasgasemissies in 2022:

fossiel: 35 Gton CO₂ eq/jr

veranderd landgebruik: 5 Gton CO₂ eq/jr

Wereldwijde broeikasgasopnames in 2022:

oceaan (-10 Gton CO₂ eq/jr)

biosfeer (-11 Gton CO₂ eq/jr)

atmosfeer (-19 Gton CO₂ eq/jr)

Prognose extra koolstofdioxide-verwijdering (CDR):

2050: 9 Gton CO₂ eq/jr

2100: 17 Gton CO₂ eq/jr

CDR speelt drie verschillende rollen in toekomstige trajecten in overeenstemming met het akkoord van Parijs:

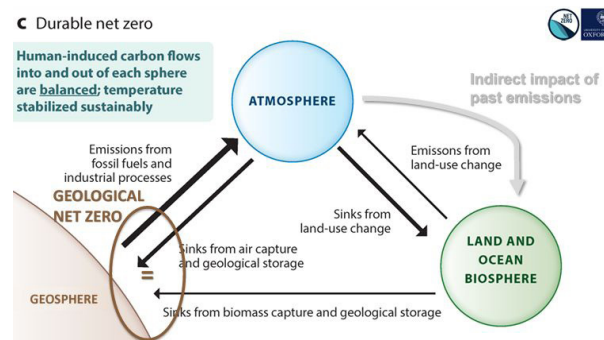
Ten eerste kan CDR, als de permanentie van de koolstofverwijdering kan worden gewaarborgd, helpen de netto-uitstoot verder te verminderen om op korte termijn aan de tussentijdse emissiereductiedoelstellingen te voldoen.

Ten tweede kan CDR op gigatonschaal tegen het midden van de eeuw helpen bij het balanceren van de resterende emissies om een netto-nul-uitstoot te bereiken, een noodzakelijke stap om de temperatuurstijging te beperken.

Ten derde kan CDR, nadat de netto-nul-emissies zijn bereikt, worden ingezet om netto-negatieve emissies na te streven en in stand te houden. De niveaus van de vereiste CDR-inzet zullen grotendeels afhangen van beleidsbeslissingen met betrekking tot de gewenste mate van temperatuurdaling de hoeveelheid restemissies die gecompenseerd moeten worden.

Hoeveelheid koolstofverwijdering die vereist is tot het jaar 2100

De IPCC gaat in haar meest recente 1,5 graden-scenario's uit van een cumulatieve netto negatieve uitstoot van 20 tot 660 Gton CO₂eq tussen het jaar 2020 en 2100, afhankelijk van de snelheid waarmee de emissies gereduceerd worden. Dit is gemiddeld tussen de 0,3 Gton/jr en 11 Gton/jr tussen 2040 en 2100.



Allen et al, Annual Reviews of Environment and Resources, 2022

De potentie van BECCS is daarin 30 tot 780 Gton CO₂eq.
De potentie van DACCS is daarin 0 tot 310 Gton CO₂eq.
De potentie van AFOLU is daarin 20 tot 400 Gton CO₂eq.

De IPCC neemt voor het gemak niet alle 18 CDR-technieken, maar slechts 3 technieken mee. We spreiden het risico op falen over zo veel mogelijk technieken, voor grootste kans op succes om het doel te halen. De potenties van de verschillende technieken afzonderlijk zijn niet zo maar op te tellen, omdat je dan het risico loopt om dubbel te tellen.

De IPCC gaat in haar meest recente 2,0 graden-scenario's uit van een cumulatieve netto negatieve uitstoot van 40 tot 290 Gton CO₂eq tussen het jaar 2020 en 2100, afhankelijk van de snelheid waarmee de emissies gereduceerd worden. Dit is gemiddeld tussen de 0,7 Gton/jr en 4,8 Gton/jr tussen 2040 en 2100.

De potentie van BECCS is daarin 170 tot 650 Gton CO₂eq.
De potentie van DACCS is daarin 0 tot 250 Gton CO₂eq.
De potentie van AFOLU is daarin 10 tot 250 Gton CO₂eq.

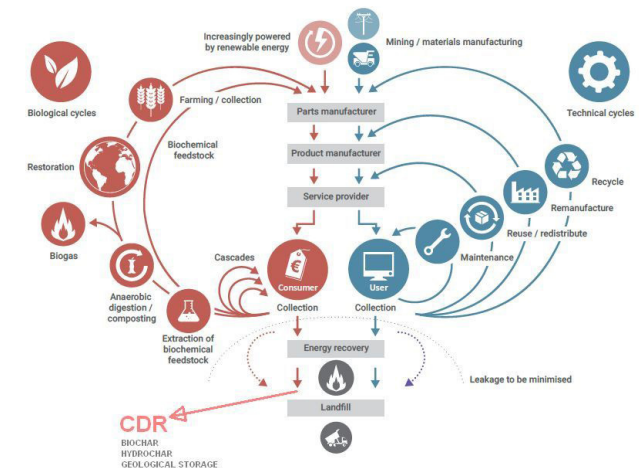
AFOLU betekent: Landbouw, Bosbouw en ander grondgebruik.

Met het veranderende evenwicht tussen CO₂-concentraties in oceaan, atmosfeer, biosfeer en

geosfeer is hierin al rekening gehouden.

Per scenario komen andere waarden en bandbreedtes voor noodzakelijke CDR naar boven, afhankelijk van veel parameters bij IPCC, dus kan de uitkomst vreemd overkomen, maar dat komt door onderliggende aannames die verschillen per scenario.

Climate Cleanup komt uit op een totaal van 1500 Gton CDR, maar die loopt ook door na jaar 2100, welke IPCC niet meeneemt.



Conceptualisering van een circulaire economie (Ellen MacArthur foundation)

Er is wel onvoorziene uitstoot uit de biosfeer en oceaan door mogelijke tegenslagen als droogte, overstromingen, ontdooien deel permafrost, bosbranden en verzuring en opwarming van zeewater, waar IPCC geen rekening mee heeft gehouden in haar modellen. Die uitstoot moet nog van de koolstofverwijdering worden afgetrokken om tot de werkelijke cumulatieve netto-negatieve-uitstoot te komen. Ook de snelle reductie van aerosolen in o.a. diesel en scheepvaart zou een extra opwarmingseffect kunnen betekenen, waar de IPCC een snelle reductie van methaan tegenover had gesteld als advies, maar welk advies door beleidsmakers niet is overgenomen of begrepen. (Dus per direct verplichte bijvoer Bovaer wereldwijd, maar dit geheel terzijde).

Toch kun je er nu al van uitgaan dat er gemiddeld tussen 2040 en 2100 voor het halen van Parijs een netto negatieve werelduitstoot moet zijn tussen de 0,66 Gton/jr en 11 Gton/jr, met de hoge kant van de bandbreedte als waarschijnlijk voorzorgsbeginsel.

Om blijvende emissies en tegenvallers te niet te doen.

Voor de EU betekent dat, tussen de 0,07 en 1,1 Gton/jr. Het EU Climate Advisory Board kwam in hun advies echter tussen de 0,61 en 0,76 Gton/jr uit, dus is die bandbreedte in tabel overgenomen.

Voor NL betekenen de IPCC-cijfers tussen de 2,6 Mton/jr en 41,5 Mton/jr.

Voor NL betekenen de EU cijfers tussen de 23 Mton/jr en 29 Mton/j.

Maar door BECCS en DACCS komt Nederland hoger uit, want Nederland heeft weliswaar weinig grond, maar relatief veel CCS (meer dan Frankrijk of Duitsland bijvoorbeeld) wat ook en vooral voor CDR ingezet moet worden.

Hoe meer CDR Nederland extra levert dan de netto cumulatieve negatieve uitstoot, des te groter de economie, voor zo ver de CDR tegen een economisch rendabele prijs geleverd wordt.

Voorwaarden voor beleids- en marktontwikkeling

Koolstofverwijderingsbeleid heeft een helder regelgevings- en bestuursregime nodig om een CDR-industrie te ontwikkelen die de emissiereducties zal aanvullen. Dit, zodat het niveau van CDR bereikt wordt, dat wordt beoogd door scenario's die de opwarming beperken tot 1,5 en 2 °C: De verwachte hoeveelheid is 3,3 tot 7,6 extra Gigaton CO₂eq per jaar in 2050 vergeleken met 2020, maar meer is mogelijk.

Koolstofdioxideverwijdering moet aan een aantal

zaken voldoen:

- 1) Additioneel: Het moet additioneel zijn, niet iets wat er al is of wat altijd al zo gedaan werd, want dan voegt het geen extra koolstofdioxideverwijdering toe.
- 2) Antropogeen: Het moet door mensen gemaakt zijn of gecultiveerd worden, geen spontaan natuurlijk proces zonder menselijk ingrijpen daarin.
- 3) Herkomst CO₂: De CO₂ moet afkomstig zijn uit de atmosfeer, biosfeer of oceaan of producten die daarvan gemaakt zijn. De CO₂ moet niet uit fossiele reservoirs, de geosfeer of veen/turf of producten die daar van gemaakt zijn komen.
- 4) Meetbaar: De hoeveelheid CO₂ moet meetbaar zijn. Er moet bekend zijn hoe veel CO₂ verwijderd zijn, anders klopt de boekhouding niet.
- 5) Boekhouding: Er moet een boekhouding worden bijgehouden, zonder dubbeltellingen. Wel kan een tijdelijke koolstofopslag later worden omgezet in een permanente opslag, maar bij die tweede omzetting wordt dat niet geteld als koolstofdioxideverwijdering, want dan zou dezelfde koolstofverwijdering dubbel tellen en klopt de boekhouding niet.
- 6) Permanent: De koolstofopslag moet uiteindelijk, en dat kan ook in meerdere stappen plaatsvinden, permanent zijn. Brandstof die in de open lucht verbrand wordt, slaat CO₂ niet permanent op en telt dus niet als CDR, zelfs als het biogene CO₂ is:

Dan is het wel klimaatneutraal.

- 7) Het mag geen biodiversiteit aan tasten, tot bosverlies leiden, tot voedselonzeekerheid leiden of tot onoverkomelijke sociaal-maatschappelijke problemen leiden.

Certificering nader beschouwd

Een voorwaarde voor robuuste CDR-beleidsvorming en marktintroductie is een sterk certificerings-systeem. De EU is nog bezig hier een systeem voor te ontwikkelen. Toch zijn er een aantal onvolkomenheden:

- Herstel van bestaande bossen en vernatting van veen wordt door de EU gezien als koolstofverwijdering, terwijl het eigenlijk reducties van de uitstoot zijn. Het zijn geen verwijderings-activiteiten. Toch nemen we het mee in de technieken.
- Er is in de EU nog geen heldere systematiek om goed om te gaan met tijdelijke koolstofverwijdering en permanente koolstofdioxideverwijdering. In SB-308 van Californië is dat wel nu al geregeld: Een tijdelijke koolstofopslag

moet later altijd een permanente koolstofopslag kunnen worden door middel van verplichte aankoop tweede fase Carbon Credits na verloop van eerste fase Carbon Credits. De EU zou dat over moeten nemen.

Voor dit laatste geldt, dat de atomen gevolgd moeten worden in de wet- en regelgeving op logische momenten. De eerste afvang en opslag telt daarbij, de daaropvolgende methodes tellen niet nogmaals in de boekhouding, maar zijn wel verplicht om de koolstofopslag permanent te houden. De afbakening van de koolstofmarkten maakt veel verschil in het uiteindelijke resultaat van de koolstofverwijderingsmix.

Stel bijvoorbeeld, dat een agrarisch bedrijf bouw-materiaal teelt, dan wordt er CO₂ voor gemiddeld 75 jaar lang opgeslagen in gebouwen. Stel dat de gebouweigenaar zijn biobased gebouw sloop in het jaar 2100, dan is het onvoorstelbaar dat het biologische sloopafval in de open lucht verbrand wordt, gezien de CDR-doelen die er aan komen. De gebouweigenaar zal echter bij een sloopvergunning 'Carbon Credit's' moeten kopen, om te garanderen

dat de koolstof in het biobased materiaal permanent opgeslagen wordt.

Op deze manier is de waarde van de Carbon Credit voor de agrariër die bouwmaterialen teelt, het hoogst. Wat de opschaling nu ten goede komt. Dus is daarvoor wetgeving met eerste en tweede fase Carbon Credits nodig, omdat dit het emissievrije verdienmodel van landbouw en klimaatbeleid ten goede komt.

Een andere omgang met tijdelijke koolstofopslag - zoals in landbouwbodems - kan ook zijn om deze tijdelijke verwijdering ter compensatie van methaan te gebruiken, omdat methaan ook een korte levensduur heeft. Maar dan moet dit wel in regelgeving aan elkaar gekoppeld worden. De veeteelt betaalt dan ook voor de koolstofopslag in andermans bodem om de eigen moeilijk te vermijden emissies te neutraliseren.

Op Landgebruik gebaseerde CDR zou ook beperkt kunnen worden tot het balanceren van op Landgebruik gebaseerde koolstofemissies. Dan koopt veeteelt Carbon Credits bij bouwmaterialentelers om landbouw als geheel klimaatneutraal te krijgen.

Voor snelle opschaling van CDR in de bouw-materialenteelt is een *Carbon Takeback Obligation* op aardgas echter een stuk lucratiever, omdat vanuit die sector veel meer financiële slagkracht te maken is. Noordzeegas klimaatneutraal maken door per opgepompte m3 aardgas te betalen voor de koolstofverwijdering via alkanisatie zeewater of aanplant zee gras, zee wier en oesterbanken is ook een CTBO-optie, mits de verwijdering een permanent karakter heeft en gecertificeerd is.

Of emissierechten uit ETS aan koolstofverwijderingen in LULUCF gekoppeld worden of niet, is aan de EU om te beslissen. LULUCF betekent: landgebruik, veranderend landgebruik en bosbouw. Een koppeling zou betekenen dat de landbouwsector er een externe financier krijgt die koolstofverwijderingen opkoopt. Gevolg van zo een koppeling is echter, dat het duurder wordt voor de landbouwsector om zelf klimaatneutraal te worden als kapitaalkrachtige fabrieken koolstofverwijderingen uit landbouw opkopen, terwijl landbouw zelf ook koolstofverwijdering nodig heeft om emissies uit veenweide, fossiel energiegebruik en methaanuitstoot van vee te compenseren. Het is zeer waarschijnlijk dat de EU besluit om de koolstofmarkten van landbouw en fabrieken zo veel mogelijk gescheiden te houden.

Ook omdat koolstofopslag in landbouwbodem een tijdelijk karakter heeft en wel werkt om kortlevende methaan-uitstoot te compenseren, maar niet werkt tegen koolstofdioxide uitstoot met een veel langere gemiddelde levensduur per atoom.

Voor Provincie Zuid Holland geldt, dat het door de aanwezigheid van CO₂-leidingen, door de aanwezigheid van veel kennis, industrie, Noordzee en glastuinbouw veruit de grootste mix aan koolstofverwijdering kan en zal maken van alle Nederlandse provincies. Dat vraagt om grote ambities om een koolstofpositieve economie te bouwen voor 2040, gebruikmakend met alle technieken die voorhanden zijn of nog gaan komen. En om slimme ingrepen en slimme regels, die het vooral lucratief maakt, betaald uit de markt, met extra voordeel voor natuur én economie. Naast het gegeven, dat het nu eenmaal nodig is om een klimaat-gereguleerde aarde te hebben waar niet teveel onbewoonbare plekken ontstaan als gevolg van een te veel opgewarmde aarde.



Mitigatiepotentieel van Koolstofverwijdering

Klik op de techniek om naar het betreffende hoofdstuk te gaan

Carbon Dioxide Removal	TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
			Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
Agro Bosbouw	9	10 - 150	0,3 - 9,4	0,02 - 0,64	0,21 - 0,42	0,01 - 0,02	10 - 100 (1 ^e fase)	Per direct 0,39-0,51
Bebossing en Herbebossing	9	2 - 150	0,5 - 10,0	0,30 - 0,60	0,44 - 0,70	0,03 - 0,06	10 - 100 (1 ^e fase)	
Natuurherstel	9	10 - 100	0,1 - 1,0	0,01 - 0,10	0,05 - 0,72	0,08 - 0,12	10 - 100	
Veenweide Strategie	9	40 - 160	0,5 - 2,1	0,05 - 0,10	1,00 - 2,00	0,21 - 0,27	>1000	
Koolstof Opslag in de Bodem	9	45 - 100	2,0 - 2,6	0,13 - 0,17	0,50 - 0,90	0,02 - 0,05	30 - 40	
Bio-Energie, CO ₂ -Afvang en -Opslag (BECCS)	8	100 - 140	0,5 - 11,0	0,07 - 0,34	10,00-17,20	0,00 - 7,20	>1000	voor 2030
Bio-Chemie die CO ₂ Opslaat	8	80 - 120	0,2 - 1,3	0,03 - 0,12	3,00 - 10,80	0,20 - 1,00	10 - 100 (1 ^e fase)	
Biokool/Hydrokool	7	10 - 345	0,3 - 6,6	0,10 - 0,20	1,00 - 4,00	1,00 - 2,00	80% > 100	
Biobased Bouw en CO ₂ -Opslag in beton/steen	8	80 - 120	1,0 - 8,0	0,10 - 0,40	2,77 - 3,90	0,29 - 0,80	75 (1 ^e fase)	
CO ₂ -Opslag in Weg - en Waterbouw	8	80 - 120	0,1 - 0,5	0,01 - 0,05	0,06 - 0,10	0,01 - 0,02	80% > 100	
Versnelde Verwerking van Steen	6	50 - 200	2,0 - 4,0	0,20 - 0,40	0,70 - 5,40	0,07 - 0,54	>1000	
Houtoogst en -Opslag	6	150 - 200	0,1 - 0,5	0,01 - 0,05	0,10 - 1,30	0,10 - 0,40	100 - 500	
CO ₂ -Opslag via Zeeleven in Zeebodem	5	10 - 100	0,1 - 0,4	0,01 - 0,02	0,20 - 2,00	0,20 - 1,00	>1000	voor 2040
CO ₂ -Afvang en -Opslag Direct uit de Lucht (DACs)	6	100 - 500	0,5 - 5,0	0,25 - 0,50	3,60 - 7,20	2,00 - 4,00	>1000	
Tegengaan van Verzuring van de Zee	3	25 - 160	1,0 - 15,0	0,07 - 1,00	0,00 - 10,00	0,00 - 5,00	>20.000	
Directe CO ₂ -Verwijdering uit de Zee	3	82 - 600	1,0 - 10,0	0,10 - 1,00	0,00 - 10,00	0,00 - 5,00	>1000	nvt
Kunstmatige Stuwning van Zeewater	2	100 - 150	0,1 - 1,0	0,00 - 0,20	0,00 - 0,50	0,00 - 0,50	10 - 100	
Zeewierteelt	3	25 - 125	0,1 - 0,6	0,01 - 0,06	0,05 - 0,50	0,05 - 0,50	10 - 100	nvt
Totaal conform IPCC, EU Climate Advisory Board en PBL			0,66 - 11,00	0,61 - 0,76	27,0 - 39,0	4,2 - 28,5		

Bronnen: NOAA (VS), State of CDR (UK), EU Climate Advisory Board, PBL, Bossenstrategie, NLPC, ZH-PLG, Building Balance

Agroforestry

Agro Bosbouw

Agro bosbouw is het opzettelijk integreren van houtige gewassen (bomen en struiken) met de teelt van gewassen of dierlijke productiesystemen, vanwege de beoogde voordelen die ontstaan door de ecologische en economische interacties.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
9	10 - 150	0,3 - 9,4	0,02 - 0,64	0.21 - 0.42	0,01 - 0,02	10 - 100	Per direct

Voorbeelden

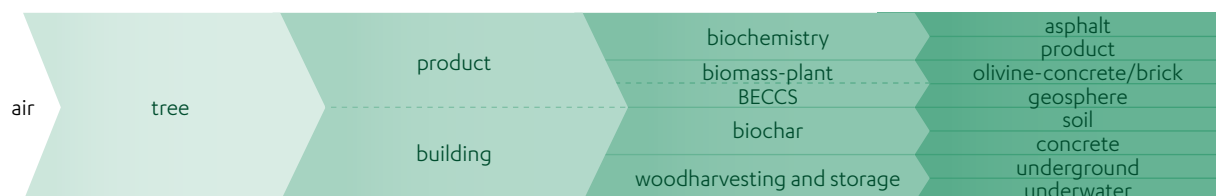
Milieufederatie Zuid Holland is in 2023 een project met proefpercelen gestart om een extra impuls aan agroforestry te geven, kennis te ontwikkelen, te experimenteren om zo te leren over nieuwe verdienmodellen en toepassingsmogelijkheden voor de landbouw in samenhang met natuur en om zo meer CO₂-opslag in de landbouw te krijgen, zodat deze klimaatneutraal wordt.

Tevens maken ze informatiepakketten over agroforestry met andere provincies samen. Doel van dit project is om een laagdrempelige manier te ontwikkelen voor een grote groep agrariërs om met agroforestry te kunnen starten of eerst

experimenteren.

Men is nog op zoek naar meer proefpercelen van 0,5 tot 1,0 hectare groot.

De CO₂-opslag van agroforestry wordt ook erkend in de Bossenstrategie. Doelstelling is 0,08 Mton CO₂/jaar in Nederland aan koolstofverwijdering met agroforestry in Nederland. Ook de houtige landschapselementen (als onderdeel van GBDA)



zijn onderdeel van de Bossenstrategie om het klimaatdoel (0,13 MtonCO₂/jaar) te behalen.

Bijkomende voordelen

Schaduw voor vee, meer biodiversiteit, diverser verdienmodel, notenhout en fruit hout levert zeer mooi meubel hout op, op den duur, waarin de koolstof opgeslagen blijft na einde levensduur van deze bomen.

Er is wel kennisoverdracht en beloning van eco-systeemdiensten voor nodig, om agroforestry goed te kunnen doen.

Carbon Credits kunnen daarbij helpen.

In onderstaand stroomschema wordt aangegeven welke route CO₂ idealiter aflegt om in meerdere stappen opgeslagen te worden met een steeds grotere permanentie.

Hoe donkerder de kleur, des te permanenter de koolstofdioxide opslag. Dit geldt voor alle stroomschema's in dit rapport.

Afforestation and Reforestation

Bebossing en Herbebossing

Aanplant van bossen en herbebossing staat in de Bossenstrategie en ZH-PLG. Zuid-Holland heeft 10.827 hectare bos. Nederlands doel is om in 2030 37.000 ha bos-uitbreiding te realiseren, wat 10% meer is dan het huidige bosareaal.

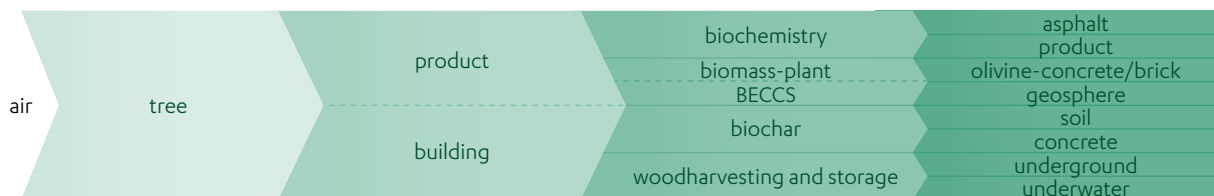
TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
9	2 - 150	0,30 - 0,60	0,02 - 0,64	0,44 - 0,70	0,03 - 0,06	10 - 100	Per direct

Vertalen we het Nederlandse doel globaal naar de Provincie Zuid-Holland, dan is dat indicatief 2300 ha extra bos er bij in 2030. Dit extra bos slaat 0,028 Mton CO₂eq/jr op. Voor het jaar 2040 zou dit het dubbele kunnen zijn. Maar twee tot drie keer zo veel extra bos is mogelijk, indien er 10% tot 20% veenwoud op de 26.250 hectare te vernatten veenweide komt.

Voor het realiseren van meer bosuitbreiding in Zuid-Holland is de subsidieregeling 'meer bos in Zuid-Holland' opgesteld per 1 september 2023.

Er zijn meerdere bos-strategieën in Zuid Holland en het Groene Hart:

- Bos en Bomenbeleid
- Bos en Bomen Zuid-Holland
- De ruimtelijke strategie
- Inspiratiedocument Groene Hart 2050 met veenwoud op vernat veen in energielandschap
- Er is ook een bosmakelaar in Zuid-Holland om de uitbreiding van bossen in Zuid Holland te coördineren.



Bijkomende voordelen

Schaduwwerking, biodiversiteit, recreatie, toekomstig bronmateriaal in bio-economie, bijvoorbeeld als bouwmaterialen en het levert beschutting tegen windmolens op land, zodat deze wellicht wel acceptabel te krijgen zijn in het landschap. Dit levert dan tevens een verdienmodel voor de grondeigenaren (veelal agrariërs) op, zodat de grondprijs niet hoeft te worden afgewaardeerd.

Ecosystem Recovery

Natuurherstel

Natuurherstel van Natura 2000 staat beschreven in de [Natuurdoelanalyses](#) van de Provincie Zuid-Holland. De provincie werkt aan het realiseren van de laatste 3.300 ha NNN van in totaal 45.000 ha NNN in Zuid-Holland, inclusief Natura2000 voor het jaar 2027.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
9	10 - 100	0,1 - 1.0	0,01 - 0,10	0.22 - 0.78	0,08 - 0,12	10 - 100	Per direct

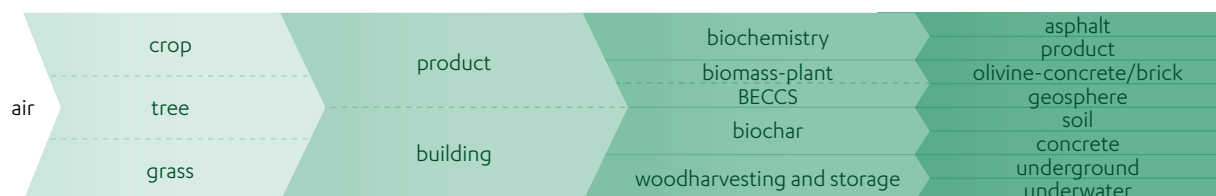
De provincie realiseert een nieuw en aaneengesloten natuurnetwerk van ca 5.800 hectare voor 2027, welke als extra koolstofverwijdering kan tellen. Hiervan is 2500 hectare al gerealiseerd en 3300 hectare gaat nog gerealiseerd worden. Dit geheel is goed voor een extra koolstofopslag van 0,058 Mton CO₂eq/jr in de provincie Zuid-Holland.

De 10% biodiversiteits-eilandjes als EU-eis (1285 hectare) en de bufferstroken (indicatief: 4100 hectare) als gevolg van de KaderRichtlijn Water levert daar samen nog 0,018 Mton CO₂ bij.

Totaal levert 'Ecosystem Recovery' 0,076 Mton CO₂eq/jr aan koolstofverwijdering op in de provincie Zuid-Holland.

Bijkomende voordelen

Biodiversiteit blijft behouden door herstel van een betere en vitalere natuurkwaliteit. Extensieve recreatie, waar de rust gezocht kan worden. Mooi en divers landschap. Educatie-doel-einden: Men kan veel leren van de natuur.



Peatland and Wetland Restoration

Veenweide Strategie

Veen stoot meer CO₂eq uit bij verlaging van het peilniveau van de grondwaterstand.

Verhoging van het peilniveau leidt dus tot een broeikasgasreductie.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
9	40 - 160	0,5 - 2,1	0,05 - 0,10	1,00 - 2,00	0,21 - 0,27	>1000	Per direct

In de ZH-PLG staat de veenweidestrategie van de Provincie Zuid-Holland.

Met maatwerk wordt het per gebied bekeken, zoals bijvoorbeeld in Krimpenerwaard of Gouwe Wiericke.

Vuistregel is, dat 20 centimeter peilverhoging 8 ton CO₂-emissie per hectare per jaar vermijdt. De CO₂ blijft dan in het veen opgeslagen. Met veenmos of veenwoud groeit het veen zelfs aan en is er sprake van koolstofverwijdering in plaats van koolstofuitstoot.

De opgave om de CO₂-eq emissies uit veenweiden te reduceren staat in het Nationaal Klimaatakkoord uit 2019. Hierin is, binnen het onderdeel landbouw

en landgebruik, voor de agrarische veenweiden een reductieopgave van 1 Mton CO₂-eq emissie in 2030 opgenomen, waarbij 2017 als referentiejaar is genomen. Daarnaast is een indicatieve verdeling van de opgave tussen de provincies afgesproken, waarin Zuid-Holland 21% van de reductie opgave heeft ofwel 0,21 Mton. Dat komt neer op circa 69,3% reductie van de berekende actuele referentie-emissie uit de Zuid-Hollandse veenweiden (van circa 0,33 Mton). Het gaat dan om ongeveer 26.000 hectare agrarische veenweide waar het waterpeil verhoogd moet worden.

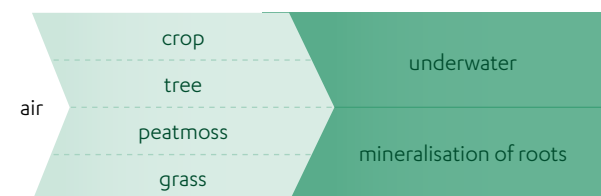
Beloning kan via Valuta voor Veen in Zuid Holland. Certificering koolstofopslag kan via Stichting Nationale Koolstofmarkt.

De broeikasgasuitstoot per hectare is in Zuid-Holland gemiddeld de laagste van alle zes de 'Veen-Provincies'. Gemiddeld stoot veenweide per hectare in Zuid-Holland bijna 10 ton CO₂eq/jr uit.

Toch is dat veel. Ter vergelijking: Gemiddeld neemt een bos of bouwmaterialenteelt met hennepvezel per hectare 10 ton CO₂eq/jr op en bouwmaterialenteelt met miscanthus 20 ton CO₂eq/jr.

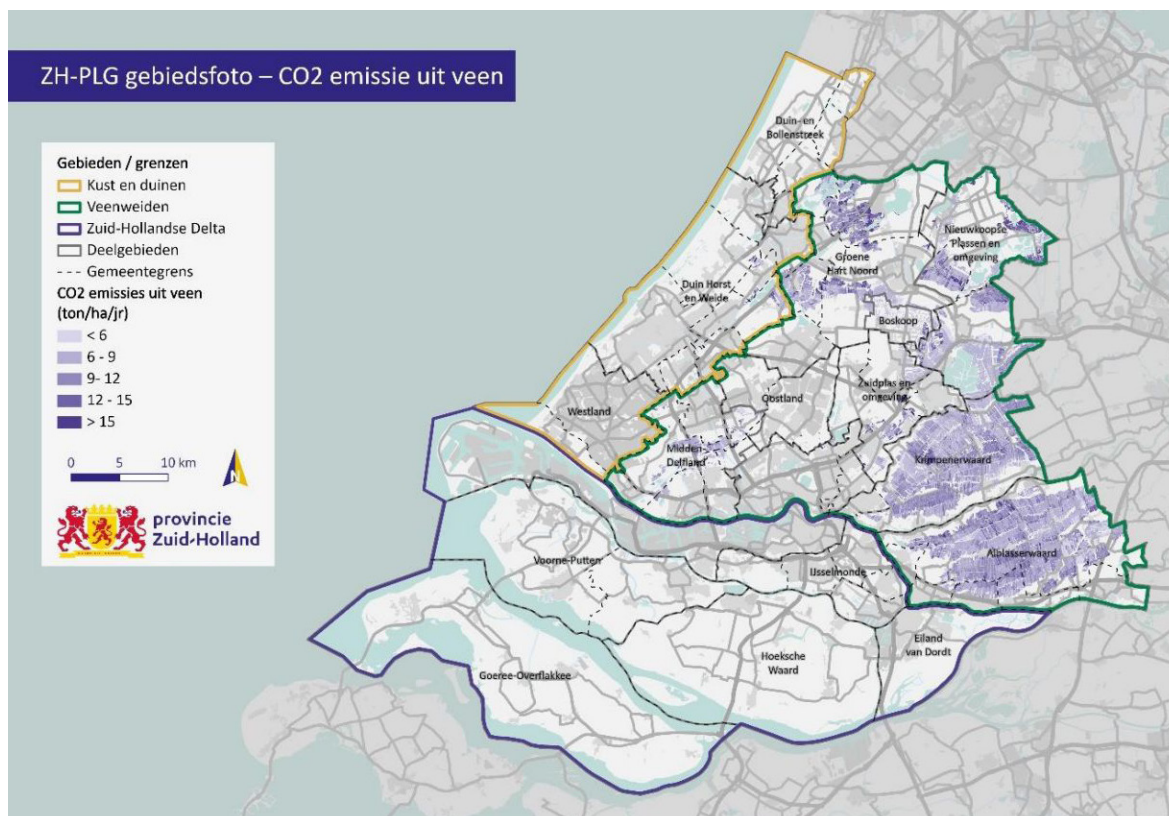
Als je enkel via aanplant bossen de CO₂-uitstoot uit veenweide zou willen compenseren, dan zou je minstens 33.789 hectare bos moeten aanplanten in Zuid-Holland, wat bijna de hele doelstelling voor Nederland is aan bosaanplant voor 2030 in de Bossenstrategie.

Lisdodde op vernet veen is voor wat betreft carbon dioxide removal een nog in onderzoek vanwege de aantrekkende werking van methaanvormende bacteriën bleek uit het internationale Cinderella rapport.



Peatland and Wetland Restoration

Veenweide Strategie



Bron Factsheets Stikstofgevoelige Natura-2000 gebieden in Zuid-Holland.

Veenmos, riet, wilg, broekbos of cranberries gaan wel goed samen op vernat veen, zonder noemenswaardige extra methaan- of lachgasuitstoot. Of dit ook voor de Nederlandse situatie zo is, moet

nog uit lopend onderzoek naar lisdodde als isolatie-teelt in Friesland bij aannemer Dijkstra Draisma blijken.

Voor het verdienmodel kan natte teelt nog aan-gevuld worden met een 'energie-landschap' van wind of zon als dit landschappelijk op een behaag-lijke manier kan worden ingepast. Het scheelt maatschappelijke kosten als het ontstaan van deze landschappen via Carbon Credits en CO₂-arme elektriciteit ruim wordt meegefinancierd vanuit de markt.

Bijmengen klei en drainage werkt ook als broei-kas-reductie, maar in mindere mate als vernatting, waardoor er met die aanpak meer hectare moeten worden aangepakt, dan met vernatting alleen. Ook hier moet niet alleen per hectare gekeken worden, maar ook naar efficiënt landgebruik als geheel. Maar uiteraard ook naar wat er ter plaatse goed past. Het is altijd maatwerk met oog voor het grote geheel.

Bijkomend voordeel

Verhoging waterpeil in veenweide voorkomt bodem-daling en maatschappelijke kosten voor schade aan funderingen, wegen en dijken. Vanwege het grote oppervlakte kun je meerdere doelen 'stapelen' in vernat veen voor efficiënt ruimtegebruik.

Soil Carbon Sequestration

Koolstofopslag in de Bodem

Voor koolstofvastlegging in landbouwbodems is een landelijk doel van 0,5 Mton CO₂-eq afgesproken voor 2030 (buiten veengrond om).

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
9	45 - 100	2,0 - 2,6	0,13 - 0,17	0,50 - 0,90	0,02 - 0,05	30 - 40	Per direct

Vertaald naar Provincie Zuid-Holland is dat een indicatief doel van 0,024 Mton CO₂eq/jr buiten de veengebieden om. Na 2030 zal dit nog verder op kunnen lopen tot maximaal 0,044 Mton CO₂eq/jr.

Rustgewassen en vanggewassen in akkerbouw slaan na onderploegen extra CO₂ in landbouwgrond op, zodra ze mineraliseren. Miscanthus, Zonnekroon, vezelhennep, Paulowniabomen, bamboe en blijvend grasland zorgen vanwege hun wortels die mineraliseren voor de opslag van circa 0,5 ton CO₂/ha/jr extra.

De koolstofopslagduur is grotendeels betrekkelijk kort: 30 tot 40 jaar. Wanneer dit als compensatie

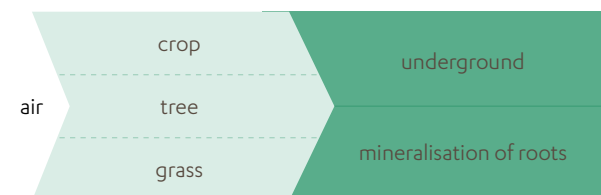
van methaan-uitstoot van vee wordt gezien, is die kortere levensduur geen probleem. Methaan heeft namelijk ook een korte levensduur.

Beloning kan via Carbon Farmers, Spatialise in Noordwijk kan via satellieten Soil Carbon op perceelniveau bijhouden voor Carbon Credits voor agrariërs.

Bijkomend voordeel

Het is tevens goed voor het bodemleven en de kringloop van nutriënten zonder uitspoeling naar grondwater.

Hoe donkerder de kleur in elk stroomschema, des te permanenter de koolstofdioxide-opslag. De opslag is hier dankzij de mineralisatie van ondergeploegde biomassa of wortels in de grond.



De ZH-PLG samengevat

In ruimtebeslag en CDR 2030 en CDR 2040

Om in 2030 tot 0,35 Mton CO₂eq en in 2040 tot 0,56 Mton CO₂eq aan CDR in Provincie Zuid-Holland te komen is nodig:

Maatregel	Ruimtebeslag (hectare)	CDR 2030 Mton CO ₂ eq/jr	CDR 2040 Mton CO ₂ eq/jr
Agroforestry + Houtachtige landschapselementen	1000 - 2000	0,010	0,020
Aforestation and reforestation	1083 - 2166	0,028	0,055
Ecosystem Recovery (uitbreiding NNN-netwerk)	5800	0,058	0,058
10% biodiversiteits-eilandjes EU-eis	1285	0,013	0,013
Bufferstroken	4100	0,050	0,050
Peatland and Wetland Restoration*	26250 - 33789	0,210	0,270
Soil Carbon Sequestration	48000 – 96000	0,024	0,048
Totaal		0,393	0,514

- *Uitgangspunt:
- Doel Veenstrategie 2030 PZH is 0,21 Mton CO₂eq/jr reductie.
 - Gemiddelde uitstoot Zuid-Hollands veen = 9,85 ton CO₂eq/ha/jr.
 - 20 cm peilverhoging = 8 ton CO₂eq/ha/jr reductie.

Bio-Energy Carbon Capture and Storage

Bio-Energie gecombineerd met CO₂-Afvang en -Opslag

BECCS is interessant vanwege de snelle opschaal-mogelijkheid met Porthos, Aramis en Noordkaap, Delta Rhine Corridor, CO₂Next en wellicht later Athos nog. Dit kan deels de OCAP-leiding van alle biogene koolstof voorzien, zodat de glastuinbouw aardgasvrij en klimaatneutraal wordt.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
8	100 - 140	0,5 - 11,0	0,07 - 0,34	10,00-17,20	0,00 -7,20	>1000	voor 2030

De RWE heeft in Geertruidenberg en Eemshaven concrete plannen om de kolencentrales met biomassa-bijstook om te bouwen tot BECCS Samen levert dit 10 Mton CDR/jr, waarvan de 0,6 GW in Geertruidenberg via de CO₂-leiding van de Delta-Rhine-Corridor 2,9 Mton CO₂ vanuit Brabant via Zuid-Holland naar de Noordzee kan transporteren.

Wanneer de twee kolencentrales (Onyx en Maas-vlakte) met biobijstook in Zuid-Holland (Rotterdam) beide ook BECCS zouden worden, kunnen ze met huidig vermogen maximaal 7,20 Mton CO₂/jr aan extra CDR leveren.

Internationaal gezien zijn DRAX in Engeland, Exergie in Stockholm en Ørsted in Denemarken het verst met het bouwen van BECCS.

Ook afvalcentrales zijn deels BECCS, vanwege het aandeel biologisch afval dat er in gaat. AVR en AEB zijn ook actief CO₂-afvang en -opslag aan het onderzoeken om in te zetten, waarvan het biogene deel Carbon Dioxide Removal is. AEB komt met haar CO₂ via OCAP dan ook in Rotterdam uit.



Er zijn met Duitsland en België ook afspraken om vanuit daar de Delta Rhine Corridor mee te vullen met grote hoeveelheden, dus de CO₂-leidingen zullen snel vol zitten. Biogene CO₂ moet daarin voorrang krijgen, omdat het meer Carbon Dioxide Removal betekent, wat een 'no regret'-maatregel is, welke geen 'lock in' veroorzaakt.

Fossiele CCS uit industrie is grotendeels een tijdelijke maatregel om afschrijvingstermijn van bestaande fabrieken niet te hoeven verkorten, zodat bedrijven de transitie ook mee kunnen maken. Fossiele CCS voor energie-doeleinden zal langer in stand blijven, tot het moment dat groene waterstof (en klimaat neutrale elektriciteit) ruim aanwezig is op betaalbare wijze.

Bijkomende voordelen

Elektriciteit wordt alleen klimaatneutraal met BECCS en Bio-waste-to-energy. Elektriciteit zal in het jaar 2035 klimaatneutraal zijn is de doelstelling. Dan stoot het 0,0 gram per kWh uit. Alle warmtepompen, elektrische auto's en elektrische industrie stoot dan

Bio-Energy Carbon Capture and Storage

Bio-Energie gecombineerd met CO₂-Afvang en -Opslag

ook echt niks uit. De producten die Nederlandse industrie dan met elektriciteit maakt, is meer waard, want er hoeven dan geen Carbon Credits voor gekocht te worden om de uitstoot van elektriciteit te compenseren. Dat is een groot economisch belang voor de maak-industrie, buiten de elektriciteitssector om. BECCS maken aardgaspiekcentrales + CCS mogelijk tot op zekere hoogte. Dat levert mogelijk goedkopere elektriciteit, klimaatneutraal, zolang waterstof nog schaars en duur is.



Bio-Chemistry Carbon Capture and Storage

Bio-Chemie die CO₂ Opslaat

CO₂ uit de lucht, zee of biosfeer, waaronder biovezels, biosuikers, eiwitten of lignine zijn bouwstenen voor de biochemie. Als deze CO₂ daardoor gevangen wordt in producten met langdurige levensduur, dan is het koolstofverwijdering. Als het gevangen wordt in synthetische brandstoffen, dan zijn het klimaat neutrale brandstoffen, mits de CO₂ uit de atmosfeer of biosfeer komt.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
8	80 - 120	0,2 - 1,3	0,03 - 0,12	3,00 - 10,80	0,20 - 1,00	10 - 100	voor 2030

Groene Methanol speelt bij dat laatste een grote rol, zoals bij *Gidera* in Rotterdam en Amsterdam. Hetzelfde geldt voor mierenzuur, waar *Dens* energieopslag-units van maakt, die via brandstofcel weer elektriciteit op locatie kan leveren (zonder stikstof- of broeikasgasuitstoot).

N-Flux en *TNO* hebben in 2022 een effectanalyse gemaakt van CCUS in verschillende productgroepen.

Mineralisatie is daarin het snelst en het meest kansrijk als koolstofverwijdering. Zoals CO₂-opslag in beton en gevelstenen door carbonisatie (zie

Construction Stored Carbon en Enhancement Rock Weathering). Bioplastics zijn dat echter ook.

Hoewel het geen koolstofverwijdering is, speelt groene methanol en mierenzuur een belangrijke rol in de wijze waarop van biomassa en elektriciteit wordt ingezet. Groene methanol wordt een belangrijke bron van scheepvaart-



en vliegtuigbrandstof (zonder DACS). Het is makkelijker en goedkoper te vervoeren en op te slaan, dan waterstof. Het heeft de potentie een groot deel van de reducties van de fossiele bunker-brandstoffen te realiseren.

Methanol en mierenzuur concurreren echter om zelfde biomassa en elektriciteit als veel vormen van koolstofverwijdering. Belangrijk is dus, om methanol en mierenzuur zo veel mogelijk te beperken tot de sectoren waar elektrificatie echt geen oplossing is, zoals lucht- en scheepvaart, zodat er elders ruim genoeg biomassa overblijft voor koolstofverwijdering. Hetzelfde geldt voor waterstof, wat vooral voor staal en ammoniak geschikt is, maar rechtstreeks qua opslag en transport minder geschikt dan methanol of mierenzuur is. Een andere optie voor een veilige, goedkope waterstofdrager is de 'liquid organic hydrogen carrier' (LOHC) van de Delftse start-up *Voyex*, zonder biomassa.

De kunst is om de inzet van biomassa en elektriciteit in een zodanige balans te krijgen, dat het meest

Bio-Chemistry Carbon Capture and Storage

Bio-Chemie die CO₂ Opslaat

optimale mitigatiepotentieel qua klimaat gehaald wordt. De beschikbare biomassa en elektriciteit is nu eenmaal beperkt, ook als deze flink wordt opgeschaald.

Voorbeelden van aansprekende biochemische bedrijven

- **Avantium**, die CO₂ met electrochemie omzet in bouwstenen voor plastics en polymeren en zuren die daarbij een rol spelen (mierenzuur bijvoorbeeld).
- **Photanol**, die met cyanobacteriën en fotosynthese zuurstof als bijproduct maken (waar Mote Hydrogen met biomassa een 1500 graden oven en waterstof van kan maken) en als hoofdproducten de moleculaire bouwstenen voor plastics, zeep en biobrandstoffen.
- **Twelve** maakt producten, e-kerosine en zuurstof van CO₂ via industriële fotosynthese van afgevangen CO₂.
- **Steelanol**, die in Gent fossiele CO₂ opvangt en omzet in ethanol. Omdat de CO₂ van fossiele afkomst is, is dit geen koolstofverwijdering, maar als de ethanol weer in de staalfabriek werd ingezet was het wel een vorm van CO₂-reductie.
- **D-CRBN**, die in een pilotfabriek in Antwerpen van CO₂ met plasma-techniek koolmonoxide (CO) maakt, wat als bouwsteen voor synthetische brandstof, polymeren en chemicaliën dient en in scheepvaart, luchtvaart, staalindustrie en chemische industrie gebruikt kan worden. Er komt ook zuurstof bij vrij, wat elders samen met biomassa een hoge temperatuuroven voor industrie kan vormen, waar dan weer waterstof en biogene CO₂ bij vrijkomt die door de techniek van Mote Hydrogen van elkaar gescheiden kan worden.
- **Electrochaea** die in Duitsland en Denemarken energieopslag en CCUS combineren door met elektriciteit hernieuwbaar methaan te maken van waterstof en CO₂ met micro-organismen (dezelfde organismen die voor lisdodde op vernet als bouwteelt juist roet in het eten gooit, maar hier de bron wordt van hernieuwbaar biogas).
- **Goodyear** maakt autobanden voor 70% tot 90% uit biobased materiaal.
- **Stora Enso** maakt een binder van biobased materiaal. Onder andere voor glaswol en steenwol, wat veel ammoniak-, fenol en formaldehyde-uitstoot in Nederland scheelt, indien het toegepast werd.
- **Bintell** maakt bitumen en asfalt uit mest en miscanthus.
- **Grasfalt** maakt asfalt uit miscanthus.
- **Biofutura** maakt bioplastics en biobased verpakkingen in Waddinxveen.
- **HVC** in Dordrecht maakt bioplastics uit zuiveringsslib in demonstratiefabriek.
- **Paques** maakt diverse biomaterialen met biochemie.
- **Sweetwoods** is een consortium van Graanul Invest, dat reststromen bij pelletproductie voor RWE biochemisch is gaan verwaarden, toen Nederland de subsidie voor biomassa-bijstook aankondigde stop te zetten in 2025. Biosuikers en lignine uit hout is daarvoor de grondstof.
- **Twence** en **Coval Energy** onderzoeken productie van mierenzuur uit CO₂ in een nog te bouwen pilotplant.



Biochar/Hydrochar

Biokool/Hydrokool

Als je biomassa zonder zuurstof verbrandt via pyrolyse krijg je biokool en houtteer of bio-olie of syngas of waterstof. **Nettenergy** doet dat met bermmaaisel van Vermeulen Groep in Zuid-Holland.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
7	10 - 345	0,3 - 6,6	0,10 - 0,20	1,00 - 4,00	1,00 - 2,00	80% > 100	voor 2030

Als je biomassa zonder lucht en met enkel zuurstof verbrandt, krijg je waterstof en CO₂ die je af kunt vangen en scheiden van elkaar. **Mote Hydrogen** doet dat.

Als je rioolslib droogt en zonder lucht verbrandt krijg je hydrochar en afvalwater waaruit fosfor, stikstof en kalium voor kunstmest kunnen worden teruggewonnen met mestkrakers. **C-Green** en **SPIE** doen dat in Rotterdam in een pilot bij Reijnders. Als elke rioolwaterzuivering dit verplicht zou doen en de hydrochar begraven wordt, levert dit veel Carbon Dioxide Removal op en voorkomt het veel aardgasgebruik bij kunstmestproductie.

Dutch Carboneers coördineert biochar-projecten in Zuidelijke landen vanuit Nederland.

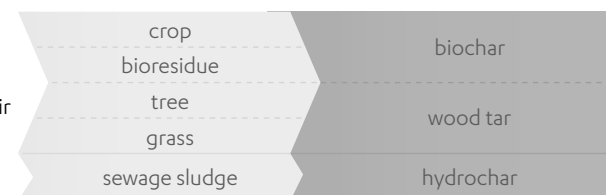
Charcotech maakt units voor biocharproductie. Als die verplicht bij elke gemeentelijke milieustraat zou staan, kan alle biochar uit A-hout in de bodem en alle biochar uit B-hout in gevelsteen of beton permanent worden opgeslagen. Dit is ook mogelijk voor reststromen van tuinbouw of uit de koffie- en noten verwerkende industrie. Bepaalde soorten biochar maken beton namelijk drie maal sterker, waardoor je er minder van nodig hebt én er wordt zo koolstof in opgeslagen. Onderzoek of biochar uit Nederlandse reststromen deze reducerende en versterkende eigenschap in beton heeft, kan interessant zijn.

Perpual Next maakt grootschalige biochar-units op industriële schaal in Amsterdam.

Biochar wordt ook in **bomenzand** gebruikt en kan zo een rol spelen in de aanleg en het herstel van bossen. Er zijn te veel biocharproducenten om hier op te noemen. **Carbofex** werkt met reststromen in Finland. **Wakefield** maakt potgrond van biochar en is de grootste biocharproducent ter wereld.

Bijkomende voordelen

- Biochar houdt voedingsstoffen en water beter vast in de bodem.
- Indien het potgrond uit veen vervangt, levert het enorme reductie op.
- Biochar maakt beton sterker, bij gebruik van notendoppen, kokosschil en koffiebonen. De voedselverwerkende industrie in Nederland kan hier leverancier van zijn.
- De tijdelijkere koolstofopslag van biochar in grond is geen probleem, indien het methaanuitstoot compenseert uit veeteelt of aardgaswinning, want methaan heeft een kortere levensduur dan CO₂. Biochar kan helpen om landbouw op economisch rendabelere wijze klimaatneutraal te maken.



Construction Stored Carbon

Biobased Bouwen en CO₂-Opslag in beton en stenen

De bouw stoot via de bouwmaterialenindustrie veel CO₂ uit. Er is een materialentransitie en een productietransitie nodig om de bouw klimaatneutraal te maken. De koolstof-opslag in bouwmaterialen is daarvoor van belang en de waardering voor koolstofopslag in de MPG ook.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
8	80 - 120	1,0 - 8,0	0,10 - 0,40	2,77 - 3,90	0,29 - 0,80	75	voor 2030

Allereerst is er in Nederland bouwmaterialenteelt nodig met vlas, stro, vezelhennep, miscanthus, zonnekroon en lisdodde om de landbouw én bouw klimaatneutraal te maken en een nieuw verdienmodel te zijn, op plekken waar natuurwaarden op andere wijze in het gedrang zouden komen. Op vernet veen is lisdodde een optie, mits goed onderzocht is, dat methaan-aantrekkende bacterie-en door lisdodde bij hoger waterpeil geen roet in het eten gooien. Dit onderzoek vindt nu plaats in Friesland.

Climate Clean Up werkt aan een gecertificeerd systeem voor Carbon Credits voor bouwmaterialenteelt met de ASN Bank.

Perpetuel Next jaagt koolstofreducties in de bouwmaterialen-industrie aan en ook de 'embodied carbon' daarin. Het zet ook 'van land tot pand' bouwketens op. Van Hier is daar een klein maar sprekend voorbeeld van. Grootschalige biobased



woonfabrieken met CLT en HSB in het land hebben nog meer impact, getalsmatig.

Om de koolstofopslag in biobased bouw permanent te maken, zijn 1^e fase en 2^e fase Carbon Credits nodig, zoals in SB-308 California. Dan krijgt de bouwmaterialenteler betaald uit de 1^e fase Carbon Credit en koopt de gebouw-eigenaar verplicht 2^e fase Carbon Credits bij verbouw en sloop in de vergunning of melding.

Voorgesteld wordt, dat gestort biobased bouw materiaal in milieustraten in biochar-units terecht komt voor permanente opslag van de biogene CO₂. En anders in de Bio-Waste-to-Energy+CCS van AVR of HVC die op termijn verplicht wordt. Of in een biomassacentrale, waarvan de CO₂ gevelstenen of beton worden.

VanderSanden maakt gevelstenen die CO₂ opnemen door Carbonisatie. Als alle gevelstenen in Nederland zo gemaakt zouden worden, levert dat 0,11 Mton CDR/jr en een reductie van 0,35 Mton CO₂/jr, omdat

Construction Stored Carbon

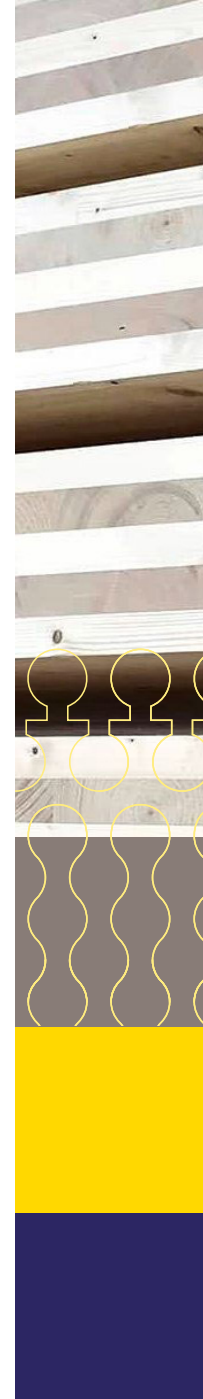
Biobased Bouwen en CO₂-Opslag in beton en stenen

0,15 bcm aardgas dan niet meer nodig is voor metselstenen. Er is dan ook geen waterstof nodig voor de verspreid liggende baksteenfabrieken in Nederland. Enkel CO₂ en daar is voorlopig 'genoeg' van.

Paebbl heeft units om versneld CO₂ van biomassa-centrales af te vangen met olivijn en daar cement van te maken.

Equatic heeft een vorm van Direct Ocean Capture ontwikkeld, die in combinatie met de CDR-techniek van Mote Hydrogen een cementfabriek (vliegas, CaCO₃, hoge temperatuur) een waterstoffabriek (71% rendement) én een koolstofopslag is met zee-water als medium. Zie pg 33, Direct Ocean Removal.

Cement en metselstenen zijn in potentie een grote koolstofopslag, met biochar, vliegas en Calcium-Carbonaat uit schelpen of gecontroleerde alkanisatie van zeewater. Beton is het meest gebruikte product ter wereld en stoot 11% van de wereld-emissies uit. De omslag naar koolstofopslag daarvan maakt wereldwijd één van de grootst mogelijke impact op klimaat. Zuid-Holland kan daar een grote rol in spelen!



Infrastructure Stored Carbon

Koolstofopslag in Weg-en waterbouw

Omdat de volumes groot zijn in infrastructuur, loont het om daarin te zoeken naar materialen die koolstof opslaan in plaats van uitstoten tijdens het productieproces.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
8	80 - 120	1.0 - 8.0	0,10 - 0,40	2.77 - 3.90	0,29 - 0,80	80% > 100	voor 2030

Voorbeelden zijn

- Grasfalt
- Asfalt uit mest
- Zinkstukken van wilgentenen
- Houten heipalen ter vervanging van stalen damwanden zoals *Underground Forest*

Vermalen betongruis slaat in de open lucht 5% van zijn eigen gewicht als CO₂ op uit de lucht.

En vergeet daarbij ook de berm niet. Bomen en heggen helpen daar ook. Als het maaisel biochar wordt van Nettenergy, is dat ook koolstofopslag.

De vele opties voor cement in infra als koolstofopslag, zoals

- Fortera
- Solidia
- Carbon Cure
- Equatic
- CarbiCrete
- BrimStone

Bijkomend voordeel

De reducties door vermeden fossiele uitstoot is meestal groter dan de koolstofopslag zelf. Samen kan zo meer dan 100% van de uitstoot gereduceerd worden.

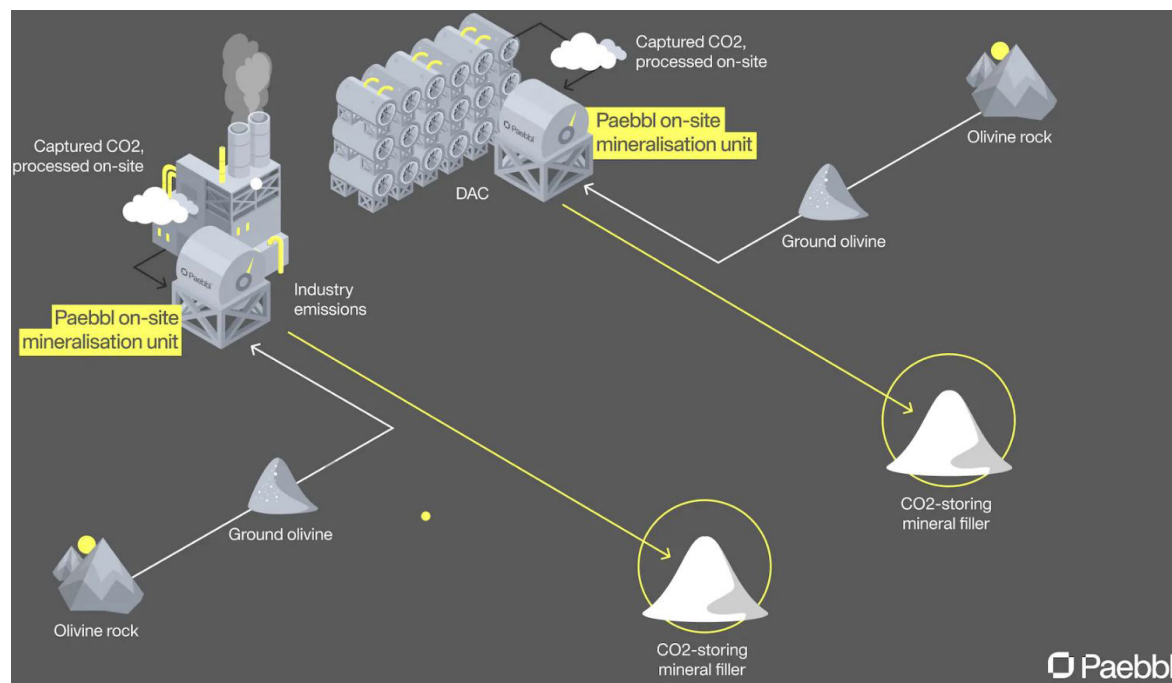


Enhanced Rock Weathering

Versnelde Verweving van Steen

Dit houdt de versnelde verwerking van gemalen silicaatgesteente in. Dat kan vulkanisch gesteente, basalt of olivijn zijn. In mindere mate reageert vermalen betongruis ook met CO₂, zodat het uit de atmosfeer gehaald wordt.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
6	50 - 200	2,0 - 4,0	0,20 - 0,40	0,70 - 5,40	0,07 - 0,54	>1000	voor 2030



Zo werkt olivijn-gruis op paden als CO₂-verwijderaar. Paebbl versnelt dat proces, door een unit boven een schoorsteen te hangen. Daarna kan het gruis dat de CO₂ opgenomen heeft dienen als ingrediënt van cement. Hierdoor kan een biomassacentrale zonder CO₂-leiding toch CO₂ afvangen en koolstof uit de afmosfeer verwijderen. Olivijn neemt 1x zijn eigen gewicht als CO₂ op.

De unit kan ook op een DACS worden aangesloten. Dan is het ook koolstofverwijdering. De DACS hoeft dan niet op een leiding te worden aangesloten, wat vaak kosten scheelt.

De unit kan ook op een fabriek met fossiele uitstoot worden aangesloten. Dan is het geen koolstofverwijdering, maar een reductie.

Afbeelding van Paebbl: De Paebbl-units zijn modulair en werken via een alkalische-oplossing van olivijngruis in water waar de CO₂ door geleid wordt, zodat carbonaat neerslaat als grondstof voor bijvoorbeeld klimaatneutraal cement: Opslag en grondstof ineen.



Wood Harvesting and Storage

Hout Oogst en -Opslag

Biomassa kan ook direct onder de grond of onder waterpeil begraven of geheid worden om koolstof op te slaan. Onder een kleilaag kan ook.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
6	150 - 200	0.1 - 0,5	0,01 - 0,05	0,10 - 1.30	0,10 - 0,40	100 - 500	voor 2030

Underground Forest is dat van plan te gaan doen met heipalen en een elektrische robot-gestuurde hei-machine. Lange stammen worden in het bos geoogst en in deltagebieden de grond ingeslagen tot ver onder grondwaterpeil. De kopse kanten worden dicht gemaakt met hars of waterglas om de opslag zo permanent mogelijk (>500 jaar) te maken en bacteriële aantasting uit te sluiten. Eventueel kan er een opzetstuk van olivijnbeton of fossielvrij staal opgezet worden, zodat het dient als fundering die netto-CO₂ opslaat.

Indien het traditionele betonnen of stalen heipalen vervangt, is het naast koolstofverwijdering tevens een emissiereductie. Dit heeft de voorkeur, omdat koolstofverwijdering idealiter samengaat met

reducties en die reducties niet vervangt.

Het kan functioneren als dragend raster onder (delen van) een nieuwe woonwijk of als paalmatras onder weg- of trein-infra of bij bruggenhoofden, zodat het ondergronds beton vermijdt op plaatsen waar waterpeilfixatie is om problemen achteraf uit te sluiten. Underground Forest fixeert de peilfixatie eigenlijk, want de gevolgen van waterpeil verlaging in veenweidegebied wordt groter met een Underground Forest.

Het kan ook dienen als ophoging van de grond om bodemdaling in veenweidegebied tegen te gaan en gelijktijdige waterpeilverhoging om uitstoot uit veen te vermijden. Waarbij wel meer uitstoot uit

veen vermeden moet worden. De verdere praktische uitwerking gaat getest en doorontwikkeld worden in The Green Village op de TU in Delft.

Deze toepassing spreekt door haar eenvoud tot de verbeelding en leidt tegelijkertijd tot praktische vragen en vragen over de omgang met primair hout als grondstof voor koolstofverwijdering.

Het voordeel van Underground Forest ten opzichte van verbranding in de open lucht zonder CO₂-afvang van primair hout is, dat het niks uitstoot. Maar hoe verhoudt dit zich tot andere technieken die hout gebruiken voor CO₂-opslag? Hoe moeten we eigenlijk omgaan met primair hout? Is het verstandig om primair hout ineens voorgoed op te bergen onder de grond in veen, of is het verstandiger om primair hout zodanig op te bergen dat het later nog meerdere malen gebruikt kan worden en emissies kan vermijden? Moeten we geen voorraad aanleggen voor later, net zo als we een aardgasvoorraad hebben?



Wood Harvesting and Storage

Hout Oogst en -Opslag

Underground Forest daagt uit om op die vragen een antwoord te geven en is alleen al daarom de moeite waard. Wanneer er een overschot aan paalmateriaal is, bijvoorbeeld als papierfabrieken stilvallen, bij plagen zoals de letterzetter of als BECCS er maar niet komen, is een riant ondergronds bos met hoge paaldichtheid per hectare een goede aanvulling op koolstofverwijdering.

Wanneer er een tekort aan paalmateriaal is, dan dient het primair paalgebruik zo efficiënt mogelijk emissies te reduceren en zal Underground Forest een zo laag mogelijke paaldichtheid moeten nastreven die functioneel ge-eist wordt of in het ergste geval de grondstof gunnen aan bovengronds herhaaldelijk gebruik welke meermaals emissies gaat vermijden waarbij de CO₂ opgeslagen blijft.

Andere initiatieven voor biomassabegraving

- Carbon Lockdownproject
- Kasoma Systems
- Inter Earth



Coastal Blue Carbon

CO₂-Opslag in Zeeplanten en -dieren

Coastal Blue Carbon is een mooie manier om CO₂ op te slaan, omdat het de financiering voor meer en gezonder zeeleven betekent, via Carbon Credits. Het legt ook geen beslag op reguliere landbouwgrond en Nederland heeft relatief gezien veel Noordzee.

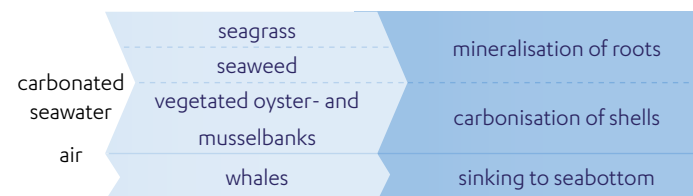
TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
5	10 - 100	0,1 - 0,4	0,01 - 0,02	0,20 - 2,00	0,20 - 1,00	>1000	voor 2030

Een met **zeewier** begroeide oesterbank kan 3,6 ton CO₂/ha/jr opnemen onder de juiste omstandigheden. De Noordzeebodem bestond voorheen uit 15% oesterbanken, maar daar is nog maar weinig van over. Als deze tussen de wondmolens in zee weer terugkomen en er zeewier of zeewiergras opgroeit, dan zuivert dat het zeewater, komt er meer leven in de zee en slaat het CO₂ op. Op (de hele lange) termijn kunnen de oesterbanken dienen als bron voor CO₂-vrij cement. De oester zelf is een bron van nutriënten, waardoor er zeewier of zeegras op kan groeien, waarvan de wortels mineraliseren als zeebodem.

Er zijn meerdere initiatieven

- Bleu Carbon
- Kelp Blue
- Zilte zones
- Zeegrasherstel Rijkswaterstaat
- The Seaweed Company
- North Sea Farmers

De meest knuffelbare en tragische Carbon Credits zijn overigens te koop bij **Bleu Green Future**: Walvissen zijn namelijk ook een 'Carbon Sink'. Walvissen slaan per jaar zo 12 Mton CO₂ op, door na overlijden naar de diepe zeebodem te zinken.



Direct Air Capture and Storage

CO₂-Afvang en -Opslag Direct uit de Lucht

DACS zijn op bedrijfsniveau interessant voor land- en tuinbouw en MKB, maar zal na 2040 op enorme schaal nodig zijn om minimum bijmengpercentage e-kerosine binnenlands te kunnen maken.

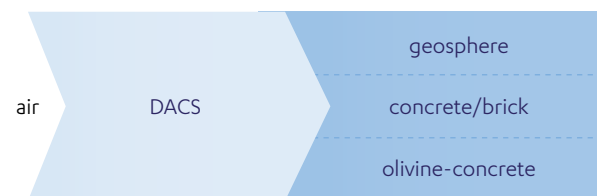
TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
6	100 - 500	0,5 - 5,0	0,25 - 0,50	3,60 - 7,20	2,00 - 4,00	>1000	voor 2040

- **Carbyon** (NL) richt zich op landbouw. Werkt met de **dunst mogelijke filter** wereldwijd, waardoor deze snel vol zit en met elektriciteit weer snel leeg gemaakt kan worden, wat tijd en energie scheelt ten opzichte van DACS die dit met warmte doen en een dikkere filter hebben. Energiegebruik: minder dan 1500 kWh/ton CDR. Streven voor kostprijs: €50 tot €100 / ton CDR. Heeft de X-prize van Elon Musk gewonnen.
- **Skytree** (NL) richt zich op land- en tuinbouw, op gebouwventilatie en op het leveren van CO₂ aan bouwindustrie voor gevelstenen en beton.
- **Greencap** richt zich op tuinbouw en industrie. Er is een pilot met tuinbouwbedrijf in Noorwegen mee geweest. Betaalbaarheid is nu nog een issue.
- **ReCarbn** is een Nederlandse startup die samenwerkt met tuinders in het Westland om haar DACS-units de komende jaren door te ontwikkelen tot een opgeschaald commercieel product dat glastuinbouw helpt om klimaatneutraal te worden.
- **Climeworks** is de grootste DACS-fabrikant uit Zwitserland en het meest vergevorderd in ontwikkeling. Bijvoorbeeld de **Orca-installatie** die in IJsland 4000 ton CO₂ per jaar verwijdert uit de lucht of de **Mammoth** die 36.000 ton CO₂ per jaar verwijdert. Elke Climeworks-container slaat 500 ton CO₂ per jaar op met 1500 a 1800 kWh/ton CDR.

- **TerraFixing** slaat met DACS de opgevangen CO₂ op in ondergrondse basaltlaag in de meest koude landen ter wereld (IJsland, Noorwegen, Alaska, Groenland) omdat DACS bij een zo laag mogelijke temperatuur minder energie kosten.
- **Solitaire Power** maakt DACS die aangesloten worden op gebouwventilatie, bijvoorbeeld scholen, vergaderzalen of bioscopen, waar meer CO₂ in de uitgaande luchtstroom zit en de ventilatie er toch al was, zodat het minder energie kost.

Een manier van opslag zonder CO₂-leiding of CO₂-tank is de Olivijn-Unit van Paebbl (zie Enhanced Rock Weathering). Dit kan voor kleine hoeveelheden een gunstigere oplossing zijn. Een CO₂-kamer waarin gevelstenen van Van Der Sanden uitharden kan ook.

De e-kerosineproductie in Nederland vraagt echter om veel grootschaligere oplossingen, die veel elektriciteit vergen, waar nu eigenlijk nog geen machines van bestaan op die schaal. Onderzoek



Direct Air Capture and Storage

CO₂-Afvang en -Opslag Direct uit de Lucht

naar opschalingstechnieken is nodig om de Europese bijmeng-doelen voor luchtvaart te halen, bijvoorbeeld bij onderzoeksfaciliteit **NET** van TNO.

Zo ontwikkelt **Zero Emissions Fuel (ZEF)** bijvoorbeeld een modulair opschaalbare “micro-plant” waarbij lucht met behulp van elektriciteit van een zonnepaneel wordt omgezet in methanol. Het is een combinatie van een DACS, alkaline-elektrolyse en methanol-synthese ineen, welke als grootschalig zonneveld is op te schalen. Geen koolstofverwijdering, maar wel klimaat-neutrale brandstof.

E-kerosine zal rond 2040 een groot deel van de kerosineproductie in Pernis vervangen. DACS zijn tegen die tijd ook een ruimtevraagstuk, want gezien de grote hoeveelheden CO₂ die e-kerosine nodig heeft, zijn de installaties daarvoor ook groot bij elkaar.

Op RTHA is een kleinschalige pilot van SkyNRG en Climeworks geweest om e-kerosine te maken. Een studie naar opschaling is nu de volgende stap

die nog gemaakt moet worden om een grotere krimp dan nodig voor luchtvaart te kunnen vermijden. DACS (en veel elektriciteit) spelen daarbij een rol.



Alkalinity Enhancement

Tegengaan van Verzuring van de Zee

Er zijn verschillende manieren om zuur-bufferende (basische) capaciteit aan de zee toe te voegen. Deze omvatten het verspreiden van fijngemalen alkalische stoffen over de open oceaan, het storten van alkalisch zand of grind op stranden of kustvlakten en het laten reageren van zeewater met alkalische materialen in reactoren voordat het gemodificeerde zeewater in de oceaan wordt geloosd.

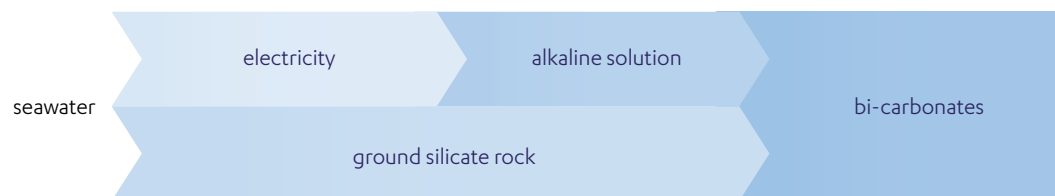
TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
3	25 - 160	1,0 - 15,0	0,07 - 1,00	0,00 - 10,00	0,00 - 5,00	>20.000	voor 2040

Het verbeteren van de zuur-bufferende (basische) capaciteit aan de zee gaat verzuring van de zee tegen, die veroorzaakt wordt door opname van CO₂ in de bovenste waterlaag. Het verhogen van de pH kan gunstig zijn voor organismen die kwetsbaar zijn voor verzuring.

Echter: bij verwerking van alkalische mineralen zoals olivijn komen bijproducten vrij zoals silica, magnesium en sporenmetalen. Deze kunnen zowel positieve als negatieve gevolgen hebben voor het maritieme zeeleven en de samenstelling van fytoplanktongemeenschappen veranderen. Er is een reeks laboratorium- en veld experimenten

nodig om de milieueffecten van, en de gevoeligheden voor verbetering van de zuurgraad van de zee beter te begrijpen.

EBB Carbon onderzoekt dit en wil dit inzetten als grootschalige koolstofverwijdering, net als SeaChange in samenwerking met de 'UCLA Samueli School of Engineering' in LA, Californië.



Voordelen

Als het op een wijze gebeurt, waar het zeeleven wel voordeel, maar geen nadeel aan kan ondervinden is het in potentie een op te schalen manier van koolstofverwijdering. Maar omdat daar nu nog geen zekerheden over bestaan, is het een belofte, waar pas rekening mee gehouden kan worden, na grondig onderzoek daar naar.

Toelichting bij schema:

Anders dan bij Direct Ocean Removal is alkanisatie een manier die direct steengruis in de zee wil verspreiden of een manier die eerst elektrolyse op zeewater toepast en vervolgens steengruis in de zure stroom oplost en dat samen met de alkalische stroom direct weer naar de zee terugvoert met hoge PH. Dit levert dit risico's op voor het zeeleven, indien het steengruis vervuiling bevat of de PH verkeerd is. Deze techniek is nog niet verfijnd genoeg en met te weinig waarborgen om zo te worden toegepast op schaal.

Direct Ocean Removal

Directe CO₂-Verwijdering uit de Zee

Dit is een combinatie van methodes met zeewater als medium, waarbij het ingaande zeewater dezelfde kwaliteit heeft als het uitgaande zeewater en het risico op een negatieve invloed op het zeeleven te voorkomen is.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
3	82 - 600	1,0 - 10,0	0,10 - 1,00	0,00 - 10,00	0,00 - 5,00	>1000	voor 2040

Equatic verwacht in 2028 CO₂ te kunnen verwijderen voor €84/ton CDR. Omdat er ook waterstof en grondstof voor cement bij wordt gemaakt worden de kosten over meerdere geldstromen verdeeld.

Equatic is te combineren met Mote Hydrogen.

Kort omschreven produceert Equatic waterstof, zuurstof, vliegias en CalciumCarbonaat met zeewater als medium, electrolyse als techniek en een zure zeewaterstroom die met steengruis geneutraliseerd wordt en een basische zeewaterstroom die met CO₂-oplossing geneutraliseerd wordt, waarna het zeewater met dezelfde kwaliteit als waar het binnenkomt, weer in zee wordt geloosd.

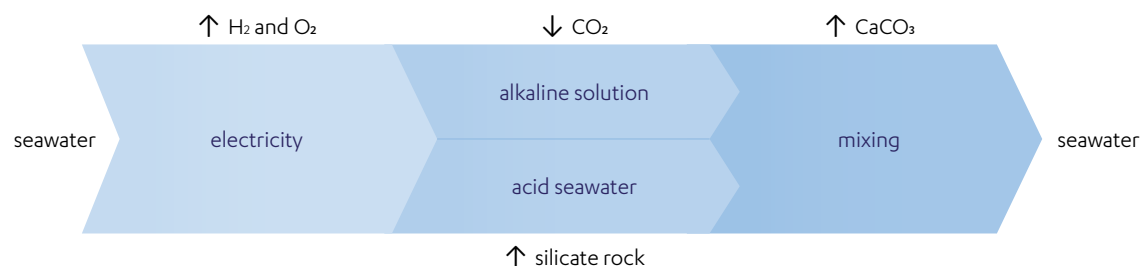
Mote Hydrogen verbrandt biomassa met enkel zuurstof, zonder lucht, waardoor waterstof en koolstofoxide ontstaat die uit elkaar wordt gehaald.

Koppel je de zuurstof uitstroom van Equatic aan de zuurstof instroom van Mote en koppel je de CO₂-uitstoot van Mote aan de CO₂-instroom van Equatic, dan heb je een waterstoffabriek met 71% rendement, die tevens nog meer CDR kan leveren én cement-

ingredienten produceert: zuivere vliegias en Calcium-Carbonaat. Omdat de biomassa met zuurstof 1500 graden wordt, biedt dat de kans om CO₂-neutraal kalk te blussen.

Cement wordt gemaakt door eerst Calcium-Carbonaat (CaCO₃) te branden waar CO₂ bij vrijkomt. Deze CO₂ wordt afgevangen en opgenomen door de alkalische stroom zeewater na electrolyse en niet uitgestoten in de atmosfeer. Vervolgens wordt de gebrande kalk (Calcium-oxide, CaO) met water geblust en wordt het gebluste kalk (CalciumHydroxide, Ca(OH)₂). Gebluste kalk wordt gemengd met zand en natuurlijke toeslagen, wat ook biochar of Paebbl-cement kan zijn dat eerder CO₂ heeft opgenomen. En daarna water. Dan hebben we kalk- of betonmortel dat verhardt tot voegwerk of beton door te reageren met CO₂ uit de lucht.

Zet je er een biochar-unit uit biomassa van koffie-, noten-, cacao- en kokos-schillen bij, dan heb je beton, waterstof en koolstofverwijdering



Direct Ocean Removal

Directe CO₂-Verwijdering uit de Zee

gerealiseerd die geen CO₂ uitstoot, maar juist opneemt, op schaal.

Met de Noordzee naast de deur, met windmolens er in, een grote voedselverwerkende industrie en een grote biomassa-reststroom uit tuinbouw is de provincie Zuid Holland een perfecte plek voor zo een koolstofpositieve beton- en waterstoffabriek voor de Nederlandse economie.

SeaO₂ is een startup uit Delft die dit idee technisch verder zou kunnen brengen in Zuid-Holland.

SeaO₂-CDR is een internationaal samenwerkingsverband van onderzoeksinstituten dat het regelgevend kader rondom CO₂-verwijdering in zee opstelt en kan helpen om deze klimaat neutrale productiewijze van beton en waterstof met zeewater passend binnen de wet- en regelgeving te krijgen met alle waarborgen die daar bij horen.

Eventuele cementfabrikanten kunnen hier bij betrokken worden, indien er zicht op kans van slagen is, zodat zij zich in Zuid-Holland vestigen voor een grotere koolstofpositieve economie in deze provincie die krimp elders opvangt.

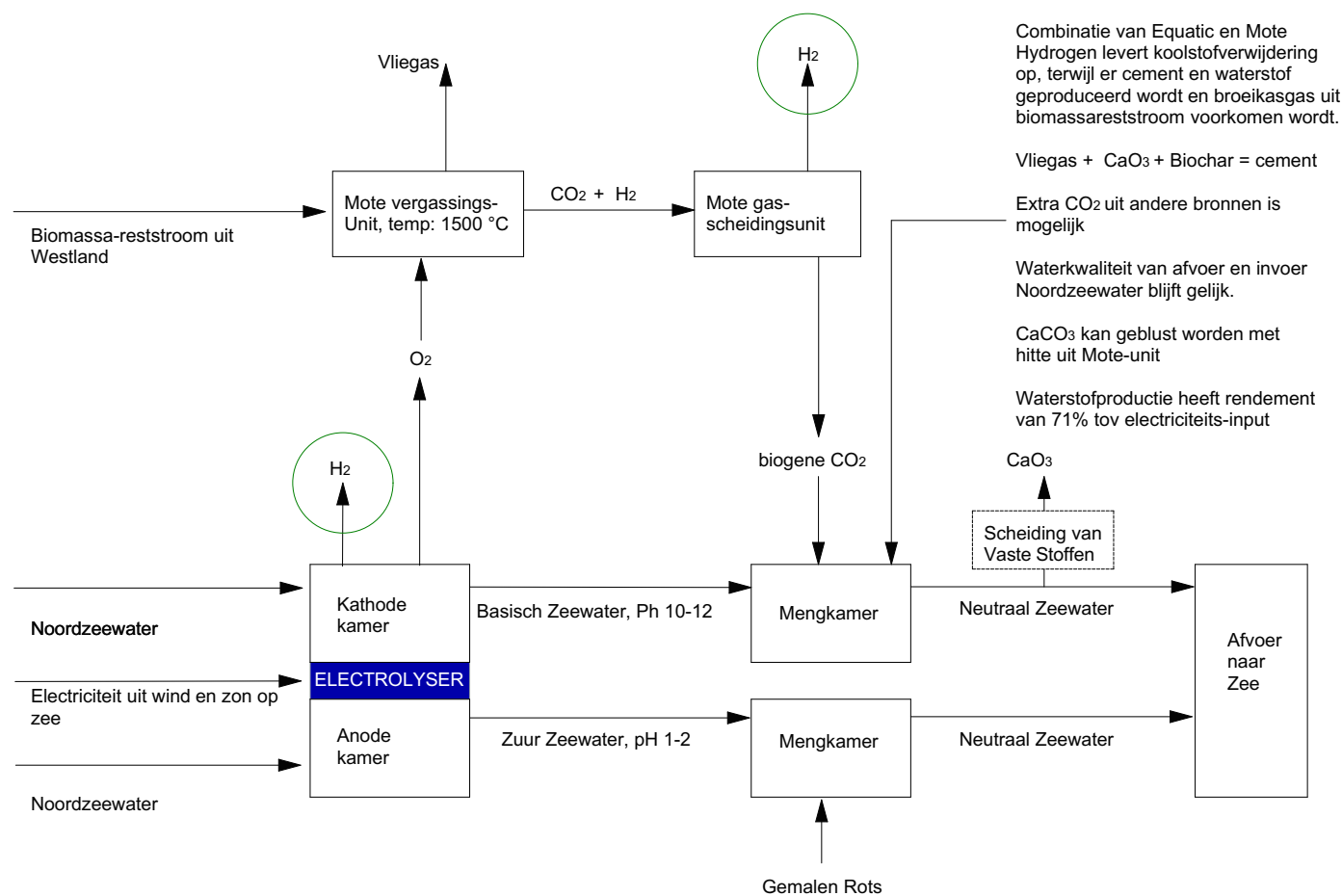


Direct Ocean Removal

Directe CO₂-Verwijdering uit de Zee

Fig.

Waterstof- en cementfabriek en Carbon Dioxide Removal (CDR) op basis van de techniek van Equatic en Mote Hydrogen



Artificial Upwelling / Downwelling

Kunstmatige Stuwung van Zeewater

Hiervoor is de Nederlandse Noordzee niet diep genoeg.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
2	100 - 150	0,1 - 1,0	0,00 - 0,20	0,00 - 0,50	0,00 - 0,50	10 - 100	nvt

Kunstmatige neerwaartse stuwung van zeewater kan worden veroorzaakt door pompen. Het oppervlaktewater wordt hierdoor kunstmatig gekoeld, zodat zeewater meer CO₂ opneemt uit de lucht en biomassa-deeltjes in de zee worden zo afgezonken naar de bodem om diep de zee te mineraliseren.

Kunstmatige opstuwing verwijst naar het oppompen van koeler, zouter, voedselrijk water uit de diepte om de activiteit van fytoplankton te stimuleren met meer zonlicht zodat deze meer CO₂ opzuigen en het zeewater meer CO₂ opneemt, omdat het koeler is. Door smelten van ijs op de polen, wordt het oppervlaktewater in de oceaan minder zout

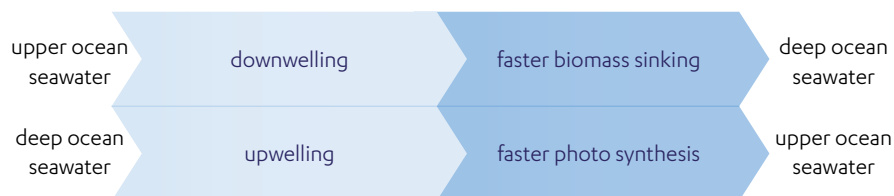
en kan het diepere zoute zeewater (wat zwaarder is) moeilijker boven komen zodat de fytoplankton daarin niet door zonlicht kan groeien.

Het is nog niet in de praktijk toegepast en de milieu-impact is onbekend.

Er is een zeediepte van honderden meters voor nodig om effect te hebben. De Nederlandse Noordzee

is met gemiddeld 30 a 40 meter diepte niet diep genoeg voor deze techniek, en overal kan zonlicht komen. Er is ook geen sprake van smeltwater in de Nederlandse Noordzee.

Mocht het van theorie tot praktijk komen, dan is de Noordzee in Noorwegen met 700 meter diepte bijvoorbeeld wel geschikt of in de buurt van de poolcirkel.



Macro-Algal Cultivation

Zeewierteelt

In sommige rapporten wordt zeewierteelt apart genoemd en besproken van Blue Carbon, daarom staat het hier ook nog apart van Blue Carbon vermeld.

TRL	Kostprijs €/ton CO ₂	Mitigatie-Potentieel				Opslagduur jaar	Op schaal
		Wereld Gt CO ₂ eq/jr	EU Gt CO ₂ eq/jr	NL Mt CO ₂ eq/jr	PZH Mt CO ₂ eq/jr		
3	25 - 125	0,1 - 0,6	0,01 - 0,06	0,05 - 0,50	0,05 - 0,50	10 - 100	nvt

Het uitbreiden van de duurzame zeewierteelt langs de kust of tussen windmolens heeft potentiële voordelen op gebied van koolstofverwijdering en groei van biodiversiteit om eventuele ecologische nadelen van wind op zee te compenseren.

Onder bepaalde voorwaarden is zeewierteelt met oesterbanken te combineren, zodat het 3,6 ton CO₂/ha/jr verwijdt. Dit zou een klein deel van de emissies uit de winning van Noordzeegas kunnen compenseren, als je het enorm grootschalig toepast. Certificering van zeewierteelt is echter wel eerst nodig, voordat het als koolstofverwijdering grootschalig ingezet kan worden.

Doordat zeewier 90% water bevat, is het oogsten en

drogen en opslaan voor de CO₂-verwijdering wel een zware energie-intensieve klus.

Bleublocks heeft diverse bouwproducten en meubilair van zeewier gemaakt, waarin CO₂ wordt opgeslagen.

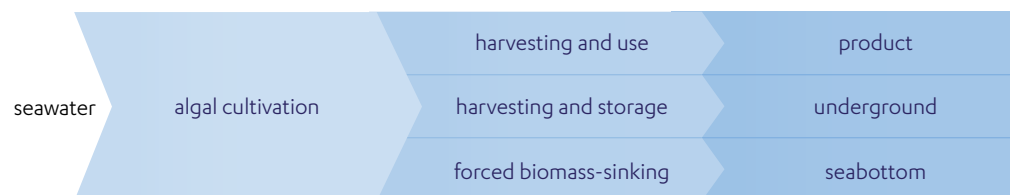
Zeewier als dak- en gevelbekleding is ook mogelijk. Door het hoge zoutgehalte is het materiaal brand- en schimmelwerend. In Mexico en op de Caribische eilanden worden ook metselstenen van aangespoeld zeewier geperst.

Zeewier heeft een umami-smaak dat in de voedings-industrie bij vleesvervangers wordt gebruikt, wat een verandering richting een minder vleesrijk dieet vanwege de smaak makkelijker maakt en zo indirect methaan kan reduceren.

Voor het afzinken van zeewier is de Noordzee niet diep genoeg, naast het gegeven dat de ecologische effecten en koolstofverwijderingsbijdrage onbekend zijn.

Zeewierteelt heeft vele bijkomstige voordelen voor het zeeleven, maar het is nu nog lastig te certificeren als koolstofverwijdering en op te schalen. Het lijkt voorsnag vooral kansrijk voor bijzondere producten en de voedselindustrie, zolang er geen certificering van de CDR is.

Zeewier als grondstof voor biobrandstof is intensief onderzocht door MacroFuels. Voor de opbrengst van een beperkte hoeveelheid brandstof en bio methaan is een relatief zeer groot oppervlakte aan zeewierteelt nodig.



Kansen voor een koolstofpositieve economie in Zuid-Holland per sector.

Land- en tuinbouw

- De ZH-PLG biedt de eerste aanzet voor een koolstofpositieve economie in Zuid Holland, waarin veenstrategie, bossenstrategie, koolstofopslag in landbouwbodem, boslandbouw en natuurherstel een integraal geheel vormen voor de landbouwplannen van de toekomst.
- Voor een klimaat neutrale land- en tuinbouw, is verder nodig:
 1. Voor een klimaat neutrale glastuinbouw moet 100% van de CO₂ in OCAP biogeen of atmosferisch zijn. Omdat dit bij afvalcentrales niet kan en die wel aan de tuinbouw (gaan) leveren, blijft er een deel fossiel over. Hierdoor kan tuinbouw niet klimaatneutraal worden buiten hun schuld om. Als tijdelijke tussenoplossing is aanvoer van de (deels) fossiele CO₂ aan glastuinbouw geen probleem, maar dit kan niet de uiteindelijke oplossing voor 2040 zijn en zelfs niet voor 2035 als de elektriciteit klimaatneutraal moet zijn. Uiteindelijk zal de CO₂ uit afval in lege gasvelden of in andere permanente opslag moeten worden gevangen

vanwege de fossiele component er in en de OCAP enkel gevuld zijn met biogene of atmosferische CO₂. Het fossiele deel van de uitstoot van een afvalcentrale is niet te vermijden, maar is wel (deels) op te vangen en permanent op te slaan, dus is dat wat er moet gebeuren om de doelen te halen. Er zijn mogelijkheden te over om in de provincie biogene CO₂ op te vangen en door te geleiden naar de glastuinbouw. Er zijn 42 biomassacentrales, 3 bijgestookte kolencentrales in de buurt van Zuid-Holland die geheel BECCS kunnen worden, papierfabrieken die tot BECCS kunnen worden omgebouwd en bio-installaties in de industrie die allemaal aan OCAP kunnen leveren. Er is uiteindelijk geen heffing voor glastuinbouw, want geen fossiele CO₂ in OCAP. Er van bewust zijn, wat op OCAP aangesloten wordt is van belang om de tuinders te behoeden voor onnodige heffingen en om fossiele lockins te vermijden. Er is nu een **regeling** door ministerie EZK en LNV voorgesteld om een boekhoudkundige mouw te passen aan het mengen van fossiele en biogene C'tjes

in dezelfde OCAP-leiding, waarbij de biogene CO₂ 100% wordt toebedeeld aan tuinbouw en de fossiele aan CCS. De aanvoer van voldoende biogene en atmosferische CO₂ in OCAP moet permanent gegarandeerd worden in de toekomst voor glastuinbouw.

2. Geadviseerd wordt om monovergisters voor melkveehouderij te verplichten op termijn, met afvang van biogene CO₂ bij opwerking van biogas tot bio methaan en levering van biogene CO₂ aan chemische industrie, cementindustrie of geologische opslag via CCS-techniek. Dit maakt veeteelt klimaat neutraler, doordat biogene CO₂ permanent opgeslagen wordt én omdat er fossiele emissies mee vermeden worden: Dubbele klimaatwinst.
3. Geadviseerd wordt om WKK's op bio methaan of biogas te laten functioneren. Het flexibele electriciteitsaanbod hiervan is cruciaal voor electriciteitsnet, maar dan moet het aanbod van bio methaan en biogas wel tijdig (voor 2035) zijn opgeschaald tot 2 bcm in Nederland.
4. Geadviseerd wordt om bio methaantrekkers en tanken bij de boer van melkwagens te stimuleren, zodat de 0,5 miljard liter dieselgebruik en haar fossiele emissies in Nederland door landbouw wordt vermeden
5. Biochar uit pure bioreststromen, voor zover

deze niet voor nutriënten en vezelrijkheid van landbouwbodem nodig is. Dus niet ten kostte van ‘Soil Carbon’, maar als aanvulling daarop, voor verbetering van landbouwbodems en verhoging van koolstofopslag in de bodem. Dat de levensduur van de koolstofopslag deels beperkt is, is geen probleem als het ter compensatie van onvermijdelijke methaanuitstoot van veeteelt mag gelden, omdat de levensduur van methaan-atomen in de atmosfeer ook beperkter is dan die van CO₂.

6. Bouwmaterialenteelt, opschalen biobased verwerkingsketen, aanjagen van vraag naar biobased bouw materiaal.
7. DACS als aanvulling inzetten, onder voorwaarde dat koolstofverwijdering niet voldoende met biogene CO₂ is op te lossen en de DACS gebruik kunnen maken van overtollige wind- en zonne-energie, zodat deze betaalbaar is. Het vergoten van de hoeveelheid wind- en zonne-energie in de landbouw is hier uiteraard ook van groot belang voor om dit mogelijk te maken. DACS zijn in landbouw een oplossing, als er veel ongebruikte elektriciteits(-overschotten) zijn of agrariër zelf een windmolen of veel zon op land heeft (en dus goedkope elektriciteit, belastingvrij). Voor 1500 kWh slaat een efficiënte DACS van Carbyon 1 ton CO₂ op. De

elektriciteitsprijs en ROI zijn doorslaggevend voor de rendabiliteit van toepassing van DACS.

8. Levering van reststromen en bermmaaisel aan industriële toepassingen die van biomassa gebruik maken en het permanent opslaan, zodat het uit de atmosfeer blijft.
9. Voorkomen van onnodig composteren van reststromen wat broeikasgas uitstoot. Er is in glastuinbouw jaarlijks voor 73.848 ton groenafval uit de tomatenteelt, en 65.125 ton groenafval uit de paprikateelt. Er van uitgaand, dat dit allemaal wordt gecomposteerd, betekent dit een totale jaarlijkse uitstoot van 4458.4 ton CO₂-equivalent door compostering van reststromen uit de tomaten- en paprikateelt, die vermeden kan worden als dit biochar wordt, langjarige producten, of biogene CO₂ die permanent wordt opgeslagen. Vergeleken met de huidige fossiele component aan CO₂ in OCAP is de CO₂ uit deze bioreststroom overigens een factor 50 kleiner, waaruit blijkt dat punt 1) meer aandacht verdient dan dit punt. Alhoewel er zeker mooie producten uit deze reststroom komt.
10. Onderzoeken of veenwoud op vernet veen in energielandschap qua verdienmodel en qua ruimtelijke ervaring van het landschap een koolstofpositieve economie ten goede komt en Landbouwperspectief biedt voor natuur, recreatie

en klimaat neutrale energievoorziening.

Energie en elektriciteit

11. Onderzoeken of Jersey-koeien op vernet veen ook een optie zijn, omdat ze niet zo veel wegen of dikkere tractorbanden samen met klei-aanvulling en peilverhoging. Er is al een proef met Blaarkoppen in Zuid-Holland.
12. Ombouw van alle kolencentrales tot BECCS voor 2030 of vlak daarna en aansluiten op Aramis, CO₂-next en Porthos of nieuwe CCS-projecten.
13. Verplichte CO₂-afvang en -opslag van afvalcentrales zoals AVR, AEB (via OCAP) en HVC en aansluiten op Aramis, CO₂-next en Porthos.
14. Ruimte in Delta Rhine Corridor reserveren voor biogene CO₂, zodat dit altijd kan en fossiele CCS enkel met einddatum goedkeuren. Biogene CO₂-opslag hoort voorrang te krijgen, tenzij er goede maatschappelijke redenen voor fossiele CCS zijn.
15. Fossiele CCS uitsluitend toepassen met een einddatum, tenzij de fossiele emissie echt onvermijdelijk is.
16. Grootschalige DACS voor e-kerosine productie ontwikkelen, zoals ZEF.
17. Waterstofproductie uit zeewater, wat ook cement-ingrediënten oplevert en versnelde koolstofopslag in zeewater mogelijk maakt. Grootschalig onderzoek daarnaar, vanwege de

grote potentie voor werkgelegenheid, economie en klimaatneutraliteit. Er is nu in Nederland geen cementindustrie. Die was er vroeger wel. Het zou mooi zijn als die terug komt in Zuid-Holland, maar dan klimaatneutraal. Zuid-Holland heeft alle kenmerken daarvoor (zeewater, biomassa, waterstofbehoefte, hoge hitte-behoefte).

18. Het doel nastreven om naast elke biomassa-centrale een installatie te hebben die de biogene CO₂ afvangt, gebruikt of permanent opslaat, waarvoor meerder technieken beschikbaar zijn, zoals bijvoorbeeld de Paebbl-unit, de gevelstenen van Van Der Sanden die met staalslak uitharden door CO₂ of een biochemische installatie.
19. Biocharproductie op warmtenet aansluiten, indien dit mogelijk is. Er komt namelijk warmte vrij bij biocharproductie.
20. Methanol en mierenzuur gemaakt met CO₂ uit biomassa en waterstof uit elektriciteit worden belangrijke dragers van CO₂ en waterstof, welke een groot deel van fossiele bunkerbrandstoffen gaat vervangen. Dit is een grote transitie in Rotterdam en van groot belang voor scheepvaart en luchtvaart. Het worden dan hernieuwbare bunkerbrandstoffen, waarin CO₂, CO, O₂ en H₂ steeds gerecycled worden. Waarbij wel beseft moet worden dat het elektriciteits-intensieve processen zijn. CO₂ is energetisch

gezien het afvoerputje van de atomen. Om het op te werken kost altijd veel energie. Ander dilemma: de biomassa-reststroom in bunkerbrandstoffen levert grote reducties, maar is ook nodig voor een groot deel van koolstofverwijdering. Elektrificatie heeft dus de voorkeur en dan koolstofverwijdering, om de concurrentie om biomassa-reststromen in te perken en enkel daar waar nodig in te zetten voor brandstoffen. Maar het zal knellen, want ook glastuinbouw, biochemie, biobased bouw, biochar en koolstofopslag in landbouwbodems concurreren om diezelfde biomassa-reststroom die niet oneindig groot is. Sturing en beperkingen daarop zal op een gegeven moment nodig zijn via wetgeving, zodat de biomassa-reststroom dáar wordt ingezet, waar deze de grootste klimatologische en economische impact heeft of waar er echt geen elektrisch alternatief is.

Afval

21. Geadviseerd wordt om in elke milieustraat een biochar-unit voor gft-afval en hout met milieuklasse A- en B-kwaliteit te plaatsen. Biochar met A-kwaliteit voor in de grond. Biochar met B-kwaliteit voor in betonproductie of wegebouw. Pilot om de beste unit te

onderzoeken. De biochar-units in milieustraten gaat niet alleen om GFT (groente, fruit, tuin), maar ook om bouw- en meubelhout met klasse A (onbehandeld = ongiftig = in de bodem) en B (gelakt, vernist = niet echt giftig, niet in bodem, wel in beton) en C (geïmpregneerd = vergif = niet in de bodem of beton, maar secuur en veilig opbergen als chemisch afval bijna). Die stroom is nu nog niet heel groot. Maar juist door deze stroom aan de achterkant van de koolstofketen met permanente koolstofopslag dicht te zetten, wordt aan de voorkant bij de bioteelt voor producten en gebouwen de koolstofopslag van meer waarde, want er is een grotere garantie dat een groot deel van de biogene CO₂ permanent opgeslagen wordt. Hout met de milieuklasse A en B kunnen ook houtpellets voor een grote biomassacentrale worden. C niet, want dat vergiftig je het vliegias en wordt dat onbruikbaar. De scheiding van deze stroom naar milieuklassen moet aangehouden worden, ook in vliegias en biochar en hydrochar. De herkomst moet bekend zijn en of het giftig is of niet, voor verder hergebruik in bodem of cement.

22. Geadviseerd wordt een beloningssysteem voor koolstofopslag te ontwikkelen met tweede fase Carbon Credits die bij gemeentelijke milieustraat

gekocht kan worden of bij slooppmelding.

De eerste fase Carbon Credits zijn voor bouwmaterialenteler. (conform de wetgeving SB-308 in California). Dit maakt de beloning voor vezelboeren hoger.

23. Verplichte CO₂-afvang en -opslag van afvalcentrales zoals AVR, EAB (via OCAP) en HVC en aansluiten op Aramis, CO₂-next en Porthos. Zie ook punt 11)
24. Biochar uit voedselverwerking: reststromen uit cacao, koffie en noten hebben bepaalde kenmerken, waardoor beton met biochar uit die reststromen drie keer sterker is en er dus minder materiaal (en energie) nodig is.

Bouw / Infra / industrie

25. Breed onderzoek en ketenaanpak met alle stakeholders als team naar waterstof- en cementproductie met zeewater, welke tevens koolstof opslaat volgens een gecombineerd proces van Equatic en Mote Hydrogen, met SeaO₂ en SeaO₂-CDR.
26. Biobased bouwketen opschalen, MPG aanpassen.
27. Een minimum percentage biobased bouw materiaal of steenachtig bouw materiaal met biogene CO₂ er in, bij overheidsopdrachten van Provincie eisen, liefst lokaal geproduceerd, om de vraag op niveau te krijgen.

28. Een minimum percentage CO₂-opslag in bouw materiaal of steenachtig bouw materiaal met biogene CO₂ er in bij overheidsopdrachten (zowel bouw als infra) van Provincie eisen, liefst lokaal geproduceerd, om de vraag op niveau te krijgen. Dan kunnen gevelstenen en prefab betonelementen met biochar, vlieg as en uitharding in CO₂-kamers ook meedoen met de biobased bouw om een koolstofpositieve economie mogelijk te maken.
29. Biobased oplossing altijd meenemen ipv beton of staal die niet groen geproduceerd is, ook indien kosten iets hoger zijn, ook bij waterinfra. Carbon Credits als korting op de prijs meerekenen.
30. Een minimum percentage CO₂-opslag in asfalt in overheidsopdrachten van Provincie eisen, zodat het meer van miscanthus en mest gemaakt wordt.
31. Houten heipalen overal mogelijk maken en bij grotere uitleglocaties afdwingen, want goedkoper dan beton en minder uitstoot.
32. CO₂-hubs creëren, waarvan producten en brandstoffen gemaakt worden, met een meetbaar onderscheid in fossiele CO₂ en biogene / atmosferische CO₂, voor de koolstofboekhouding.
33. Industriesectoren die tussenproducten als koolmonoxide, zuurstof, mierenzuur of e-brandstoffen maken of gebruiken clusteren.

34. CO₂-ketens bouwen en met elkaar in contact brengen voor optimale lokale circulariteit.
35. Bedrijven die CO₂ als grondstof gebruiken clusteren naast biomassacentrales, opwerkingsunits van biogas of bij CO₂-hubs, zodat de druk op Porthos, Aramis en Delta Rhine Corridor voor opslag in lege gasvelden wordt beperkt en dit geen vertragende factor wordt.

Concluderend:

Heel platgeslagen betekent koolstofverwijdering 'Ruim je kamer op en je krijgt zakgeld'. Maar dan op een immense schaalgrootte binnen een zeer kort tijdsbestek, die zeer uitdagend is, met als doel te komen tot een koolstofpositieve economie in Zuid-Holland.

Negatieve emissies leveren een bijdrage aan de compensatie van restemissies en aan het uit de atmosfeer halen van de overmaat aan historische CO₂-uitstoot. Als de restemissies de komende decennia niet sterk worden gereduceerd, raakt het doel om klimaatneutraal te worden uit zicht. Zonder negatieve emissies wordt het Akkoord van Parijs niet meer gehaald.

Volgens UNEP zijn er vier belangrijke acties nodig van overheden om CDR in te kunnen zetten en op te kunnen schalen:

- Het signaleren en stellen van prioriteiten voor CDR
- Het ontwikkelen van robuuste meet-, rapportage- en verificatiesystemen voor CDR
- Het benutten van synergiën en bijkomende voordelen bij CDR
- Het versnellen van de noodzakelijke innovatie van CDR

Van de achttien beschreven technieken, zijn er zes clusters te vormen die initieel de grootste potentie lijken te hebben om grote volumes aan negatieve emissies te realiseren in Zuid-Holland en concreet handelingsperspectief bieden. In deel 2 van deze studie gaan we nader in op deze zes clusters met de meeste potentie:

1) CO₂-leidingen naar lege aardgasvelden voor CDR (17,5 Mton CO₂/jr) gevoed door:

i. BECCS zouden er kunnen komen door ombouw van de twee kolencentrales in Zuid-Holland en in Geertruidenberg vlak over de grens in Noord Brabant, maar ook door afvang bij opwerking van biomethaan naar biogas, bij papierfabrieken, door pyrolyse en door heteluchtovens met biomassa en

zuurstof, wat tevens waterstof produceert. Het gaat bij BECCS nadrukkelijk niet (alleen) om bomen in kolencentrales, wat vaak gedacht wordt. Deze verschillende soorten BECCS voeden samen in potentie de CO₂-leidingen het meest, indien RWE, Uniper en Riverstone hier toe bereid zijn, indien veeteelt veel meer biomethaan maakt en indien pyrolyse en heteluchtovens zoals die van Mote Hydrogen de norm zijn in industrie én indien de CO₂-capaciteit van de leidingen (de infrastructuur) er op tijd is.

ii. Afvalcentrales zijn na de BECCS de grote leveranciers van (deels) biogene CO₂ in de leidingen naar lege gasvelden voor permanente opslag.

iii. DACS zullen eerst op de derde plaats komen en daarna de hoeveelheid CO₂ uit afvalcentrales veruit overstijgen. BECCS blijven echter op één staan, qua potentie.

2) Koolstofpositieve Cementproductie (5 Mton CO₂/jr) met daarin:

- i. Calciumcarbonaat uit zeewater
- ii. Vliegas
- iii. Biochar
- iv. Hydrochar
- v. Biogene en atmosferische koolstofdioxide

vastgelegd in staalslak en silicaat gesteende

vi. Olivijn cement

vii. Gerecycled betongranulaat

In koolstofpositieve cementproductie kunnen de volgende technieken worden gebruikt: DACS, Biomassaverbranding zonder aanwezigheid van zuurstof (pyrolyse), biomassaverbranding met enkel zuurstof op zeer hoge temperatuur (Mote Hydrogen), electrolyse, alkanisatie, Direct Ocean Capture (Seao₂, Equatic), CO₂-afvang bij biomassacentrales, carbonisatie en versnelde mineralisatie van CO₂ (Paebbl).

Dit ecosysteem van grondstoffen uit meerdere technieken voor koolstofpositieve betonproductie moet echter in provincie Zuid-Holland van de grond af worden opgebouwd worden. ENCI en Heidelberg zouden daarin een rol kunnen spelen. Paebbl, Equatic en Mote Hydrogen ook. Biocharproducenten ook met reststroom uit koffie, cacao, pinda's of kokosnoot ook voor extra betonsterkte.

De provincie heeft er alle geografische kenmerken voor om dit te laten lukken, maar er is een breed consortium uit het bedrijfsleven nodig die dit ook wil zien en mede oppakt in praktisch, financieel en onderzoeksgericht opzicht.

3) Biochemie voor producten (meerdere Mtonnen CO₂)

Hierbij spelen meerdere technieken een rol die enorm elektriciteits-intensief zijn, in de eerste plaats voor biobrandstoffen (wat geen CDR is, maar wel een reductie) en op de tweede plaats voor materialen van producten (Wat wel permanente CDR is, nadat CO₂-afvang op afvalcentrales verplicht is en er een systematiek van eerste en tweede fase carbon credits is)

Hierbij moeten de moleculen goed gevolgd worden, om te kunnen beoordelen of het in biochemie gaat om CDR of om een reductie of om iets wat eigenlijk helemaal geen zin heeft. Deskundigheid bij overheid over de processen en integriteit en transparantie bij industrie moet hier op hoog niveau zijn, om niet in de bekende valkuilen van slimme marketing te tuinen. Een prudente koolstofboekhouding, certificering en LCA door derde partijen en transparantie daarover kan hier voor zorgen.

4) Noordzeebodem (1 Mton CO₂/jr)

Door mineralisatie wortels van zee gras en zeewier indien zeer grootschalige inzet van Blue Carbon tussen wind op zee er komt uit een steeds lucratiever wordende koolstofmarkt. Certificering door SeaO₂-CDR is hiervoor cruciaal. Onder voorwaarden is dit mogelijk met oesterbanken, maar onderzoek voor

precieze certificering hiervoor is nog gaande in de praktijk.

5) Veenweide (0,21 Mton CO₂/jr op 27.000 ha)

Indien vernatting en toevoeging klei mogelijk is zonder de huidige cultuur-historische waarde en voedselproductiewaarde sneller te ondermijnen dan bodemdaling onvermijdelijk op enig moment toch wel zal doen zonder ingrijpen in waterstand/grondsamenstelling. Hier moet niet alleen vanuit het perspectief van koolstofopslag naar gekeken worden. De reductie-bijdrage is relatief klein en het oppervlakte en impact op samenleving relatief groot. Hier moet vanuit meerdere perspectieven naar gekeken worden om tot maatwerk te komen op perceelniveau, die van:

- a) cultuurhistorisch landschap
- b) voedselproductielandschap
- c) natuurlandschap
- d) energielandschap
- e) koolstofbindend landschap.

Maatwerk is mogelijk door de gelaagdheid van het landschap door de verschillende 'brillen' allemaal te erkennen en te behouden door vooral bodemdaling te voorkomen. Met de voortgaande bodemdaling is op termijn alleen natuur in energielandschap volhoudbaar, omdat bodemdaling al het andere op

den duur ondermijnt, juist de cultuur-historische en voedselproductiewaarde. Bodemdaling brengt ook enorme kosten en schade met zich mee.

Tegen die ondermijning is vernatting/verandering bodemsamenstelling en peilfixatie vooral de oplossing. De koolstofopslag is een bijkomend voordeel, maar zou niet het hoofddoel hoeven te zijn. Wordt er minder dan de indicatieve doelstelling van 0,21 Mton CO₂eq op veen gereduceerd in Zuid-Holland, dan zal het te kort aan koolstofopslag/reductie door landbouwers opgevangen moeten worden door extra inzet van DACS (Carbyon), extra bosaanleg of bouwmaterialenteelt elders of extra biocharproductie, waarvan de kosten in de melkprijs zichtbaar zal worden door te beprijsen. Het verdienmodel staat bij veenweide onder druk.

6) De rest (1 Mton CO₂ samen)

Extra bebossing, ecosysteemherstel, opslag in landbouwbodem, agroforestry, biobased bouwen en bouwmaterialenteelt kunnen ook een grote rol spelen, juist in de impact op de kleinere spelers in het bedrijfsleven, juist om een volhoudbaar ecosysteem te herstellen en juist om de eerste vijf punten te kunnen blijven voeden met een biomassa-stroom op volhoudbare wijze. Het draagvlak daarvoor en brede welvaart vanwege de kleinere schaal, maakt

dat ook die zaken in de provincie gestimuleerd moet worden, niet alleen vanuit het oogpunt van koolstofopslag, maar ook uit oogpunt van reductie elders, gezondheid, ecologie en recreatie.

De glastuinbouw speelt hierin ook een rol, maar zal om aardgasvrij en klimaatneutraal te worden moeten overgaan op geothermie, WKK's op biomethaan die melkveehouders massaal moeten gaan maken, uitsluitend biogene of atmosferische CO₂ in OCAP (of een juridisch houdbare toewijzing van het niet-fossiele deel in OCAP aan glastuinbouw, zolang er ook fossiele CO₂ in zit) en DACS om het tekort aan CO₂ klimaatneutraal aan te vullen. Haar bio-restroom speelt een koolstofverwijderingsrol in punt 2 (cement) en 3 (biochemie) voor lokale ketens. Zo haakt de glastuinbouw positief aan op dit geheel.

Dilemma's en beperkingen

Biomassabeschikbaarheid kan een beperkende factor worden, in combinatie met de vraag naar duurzame biomassa voor hoogwaardigere toepassingen en biobrandstoffen voor transportsectoren met weinig alternatieven.

De beschikbaarheid van CO₂-opslag en ruimte in de CO₂-leidingen voor koolstofverwijdering is een belangrijke randvoorwaarde voor BECCS en DACCS.

Als de Nederlandse industrie ook na 2030 sterk blijft inzetten op fossiele CCS, zoals dat in een aantal toekomstscenario's gebeurt, wordt de uitdaging om tijdig voldoende opslagcapaciteit voor negatieve emissies te ontwikkelen groter. Beleid is nodig om te sturen op een steeds betere verhouding van fossiele en niet-fossiele CO₂ in CO₂-leidingen.

De beschikbaarheid van veel extra koolstofarme elektriciteit is een belangrijke voorwaarde voor een groot aantal koolstofverwijderingstechnieken, welke geremd kunnen gaan worden door netcongestie en publieke weerstand tegen deze of gene opwekmethode, zoals dit nu nog het geval is. Gezien de hoeveelheid koolstofverwijdering die vereist is in 2040, kan gesteld worden dat er voorlopig een groot koolstofarm elektriciteitstekort is.

Dit zet de noodzaak van extra elektriciteit ook in een ander daglicht: Fors meer koolstofarme elektriciteit in een installatie voor Direct Air Capture and Storage of in een Direct Ocean Removal betekent fors minder broeikasgas in de atmosfeer. Meer energie daarvoor, levert minder klimaatopwarming op, als het aan koolstofverwijdering wordt besteed. Energiebesparing daarop, is contraproductief voor het klimaat. Dat meer energiegebruik automatisch meer uitstoot betekent, is bij koolstofverwijdering niet het geval.

Het omgekeerde wel. Wellicht kunnen DACS zelfs ingezet worden als flexibele vraag voor de meter, om het elektriciteitsnet te stabiliseren, indien apparatuur van DACS in prijs daalt.

Het is in de EU de vraag of langdurige (maar niet-permanente) opslag ook onder de definitie van negatieve emissies valt. Dit is te ondervangen door de koolstofroute van bos, vezelteelt of lucht richting permanente koolstofopslag zodanig in te richten, dat deze in meerdere stappen via tijdelijke opslagen gemaakt kan worden, totdat de permanente opslag bereikt is. Bij elke opslag-techniek in deze rapportage is die route geïllustreerd in het bijgaande schema op de bladzijde van de techniek.

De opschaling van tijdelijke opslagen kan gerealiseerd worden door te werken met eerste (tijdelijke) en tweede (permanente) fase koolstofverwijderingsbeloning zoals in Californië. Hierdoor wordt een hogere economische waarde toegekend aan de tijdelijke opslagen, mits gegarandeerd kan worden dat de tijdelijke opslag op termijn over gaat in een permanente opslag. Dit vraagt om het dichtzetten van biogene en atmosferische emissies bij de afvalverwerking of opname in producten, lege gasvelden, zeewater of zeebodem. Dit vereist wel een goede monitoring,

verificatie, certificering en koolstofboekhouding, zodat het meetelt in de negatieve emissies voor de klimaatdoelen en dubbeltellingen vermeden worden. Dit vereist ook de aanwezigheid in de provincie van voldoende installaties die deze permanente CO₂-opslag uit de secundaire en tertiaire biomassa-reststromen verwezenlijkt.

Het centrale thema in de tijdige ontwikkeling van negatieve emissies is het wegwerken van de vele onzekerheden. Dat vraagt overheidsregie en gericht beleid. De EU komt begin 2024 met regels voor certificering, regels voor afbakening van de koolstofmarkten en regels die bepalen hoe we om moeten gaan met tijdelijke koolstofopslag. Dit leidt ook tot een reductie- en verwijderingsdoelstelling voor het jaar 2040. Nederland verwerkt dit nationale doel volgend jaar in eigen klimaatwetgeving (Dit is afhankelijk van formatiesnelheid van het nieuwe kabinet).

Handelingsperspectief

De Provincie Zuid-Holland kan wel nu al voorsorteren op maatregelen, waarvan zij geen spijt krijgt. Het Plan Landelijk Gebied, de ZH-PLG, is daar een voorbeeld van.

Een belangrijke strategie welke altijd goed is, is om

achteraan de koolstofketen te beginnen met een verplichte afvang en een zo permanent mogelijk opslag: Bij afvalcentrales, biomassa-centrales, biomethaanopwerking, papierfabrieken en dergelijke. Dit, voor hergebruik of permanente opslag. Een tekort aan biogene CO₂ voor industrie en transitie kan zo, zo veel mogelijk, worden voorkomen. Zonder doelmatig beleid wordt dat tekort niet vermeden.

Een andere belangrijke strategie is ook om zeer serieus in te zetten op koolstofverwijdering buiten de CO₂-leidingen om, om filevorming en vertraging van de opschaling van koolstofverwijdering te voorkomen. Het herintroduceren van een innovatieve cementindustrie in Zuid Holland, die netto CO₂ opneemt in plaats van uitstoot, levert naast werkgelegenheid ook extra snelheid in de transitie op, omdat het in potentie ook een grote reductie op de forse CO₂-uitstoot van betonproductie betekent. Dit is een belangrijke kans voor Zuid-Holland, die nog niet is meegenomen in bestaande prognoses.

Koolstofopslag in zeewater is op gecontroleerde wijze mogelijk via de methode van de start-up Equatic en levert een extra kans op, waar het PBL nog geen rekening mee gehouden heeft.

Starten met onderzoek hiernaar en ketenvorming hiervoor is een actie, waarvan geen spijt gekregen gaat worden.



Bijlage: Lijst met begrippen en afkortingen

CDR:	Carbon Dioxide Removal, nieuwe door mensen gecreëerde of gecultiveerde koolstofdioxideverwijdering uit de atmosfeer, biosfeer of oceaan, zodat deze meetbaar op zo permanent mogelijke wijze opgeslagen wordt en niet meer terug de atmosfeer in kan komen.	BECCS:	Bio Energy and Carbon Capture and Storage. Bio-Energie en efvang en opslag van koolstofdioxide in de geosfeer, zodat deze meetbaar op zo permanent mogelijke wijze opgeslagen wordt en niet meer terug de atmosfeer in kan komen.	CaCO ₃ :	Calcium Carbonaat.
CCS:	Carbon Capture and Storage. Afvang en opslag van koolstofdioxide in de geosfeer, zodat deze meetbaar op zo permanent mogelijke wijze opgeslagen wordt en niet meer terug de atmosfeer in kan komen.	DACS:	Direct Air Capture and Storage: Koolstofdioxide-afvang en –opslag direct uit de lucht.	AEB:	Afval Energie Bedrijf (Amsterdam)
CCUS:	Carbon Capture, Utilisation and Storage: Afvang, hergebruik en opslag van koolstofdioxide in producten, zodat deze meetbaar op zo permanent mogelijke wijze opgeslagen wordt en niet meer terug de atmosfeer in kan komen.	TRL:	Technology Readiness Level: De mate waarin de techniek geschikt is om op korte termijn toe te passen op een schaal van 0 tot 10. Hoe hoger de TRL, des te sneller de techniek geschikt is om per direct toe te passen.	AVR:	Afval Verwerking Rotterdam
		CO ₂ :	Koolstofdioxide.	HVC:	HuisVuilCentrale (diverse locaties)
		CO ₂ eq:	Het equivalent van het broeikaseffect van een koolstofdioxide-molecuul.	OCAP:	Organic CO ₂ for Assimilation by Plants. Letterlijk: Biogene koolstofdioxide van planten (in de glastuinbouw). Koolstofdioxide-leiding die van Amsterdam en Rotterdam naar het Westland loopt.

Colofon

Auteurs

Gijs Kaper, Architectuur & Bouwadvies

Marco van Steekelenburg, Krispijn Beek, Rindert

Groeneveld, Provincie Zuid-Holland

Met dank aan Team Onderzoek PZH:

Frenk Bekkers, Lieke Rotman, Noor IJpma

Vormgeving:

Rick Eijsbouts, Studio-PLS, Emmy van Lamoen

Uitgave

Technieken en kansen voor een koolstofpositieve
economie 2040 Provincie Zuid-Holland

Datum

November 2023

Contact

MGN.Van.Steekelenburg@pzh.nl

G.Kaper@Studio-pls.nl



Technieken en kansen voor een koolstofpositieve economie 2040 Provincie Zuid-Holland / November 2023