



Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid

Analyse van behoefte, aanbod en
beleid voor negatieve emissies in
Nederland



Committed to the Environment

TNO innovation
for life

Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid

Analyse van behoefte, aanbod en beleid voor negatieve emissies in Nederland

Dit rapport is geschreven door:

Bettina Kampman, Katja Kruit, Emiel van den Toorn, Maarten de Vries, Anouk van Grinsven, Nina Voulis, Heleen Groenewegen, Reinier van der Veen (CE Delft); Lydia Rycroft, Filip Neele (TNO)

Delft, CE Delft, juni 2023

Publicatienummer: 23.220460.095

Opdrachtgever: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat

Uw kenmerk: 202209093

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider [Bettina Kampman](#) (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 45 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoud

	Samenvatting	4
	Afkortingen	10
1	Inleiding	11
	1.1 Aanleiding	11
	1.2 Beleidscontext	12
	1.3 Een aantal belangrijke termen en definities	15
2	Behoefte aan negatieve emissies	19
	2.1 Inleiding	19
	2.2 Behoefte aan negatieve emissies in Nederland	19
	2.3 Oorzaken van restemissies per sector	28
	2.4 Behoefte aan negatieve emissies in Europa	33
	2.5 Compensatie van overshoot: Negatieve emissies wereldwijd bij een koolstofbudget voor 1,5°C	41
	2.6 Conclusie: overzicht van de behoefte aan negatieve emissies	46
3	Aanbod van negatieve emissies	48
	3.1 Inleiding	48
	3.2 Selectie van technieken	48
	3.3 De verschillende routes op een rij	50
	3.4 Overzicht potentieel aanbod van negatieve emissies	56
	3.5 Potentieel van biomassa- en DAC-routes: het bredere perspectief	58
4	Geologische opslag van CO ₂	63
	4.1 Inleiding	63
	4.2 Definities van opslagcapaciteit	63
	4.3 Tijdslijn van de ontwikkeling van opslaglocaties	65
	4.4 De vraag naar opslagcapaciteit in Nederland	68
	4.5 Samenvatting van de vraag naar opslagcapaciteit in 2030 en 2050	74
	4.6 Beschikbare opslagcapaciteit in Nederland	75
	4.7 Benodigde acties om de 2030 en 2050 doelen te halen	83
	4.8 Bredere context	84
	4.9 Conclusies met betrekking tot beschikbaarheid van opslagcapaciteit voor CO ₂ uit negatieve-emissieprocessen	86
5	Ontwikkeling van negatieve emissies in de tijd	88
	5.1 Inleiding	88
	5.2 Bepalende factoren	88
	5.3 Speelveld tijdpaden	89
	5.4 Tijdpad 1 - Boven in de bandbreedte	90
	5.5 Tijdpad 2 - Snel en gericht	96
	5.6 Tijdpad 3 - Grote puzzel	100



5.7	Samenvattend overzicht van behoefte en aanbod in de tijdpaden	105
5.8	De tijdpaden in internationale context	106
5.9	Conclusies	108
6	Knelpunten en oplossingsrichtingen	110
6.1	Inleiding	110
6.2	Identificatie van knelpunten	110
6.3	Knelpunten nader toegelicht	111
6.4	Oplossingsrichtingen	114
6.5	Dilemma's en <i>trade-offs</i>	115
7	Beleidsimplicaties	119
7.1	Inleiding	119
7.2	Definiëren van negatieve emissies	119
7.3	Beleidsdilemma's en <i>trade-offs</i> : wat zijn de opties?	123
7.4	Regulering van negatieve emissies	124
7.5	Technologische ontwikkeling en innovatie	130
7.6	Conclusie: Roadmap beleid voor negatieve emissies	132
8	Conclusie	135
9	Literatuurlijst	137
A	Aanbod negatieve emissies	146
A.1	Bebossing en bosbeheer	147
A.2	BECCS - bio-energie en biochemische processen	150
A.3	Koolstofopslag in de bodem	160
A.4	Biochar	165
A.5	Mineralisatie	172
A.6	Mariene CO ₂ -opslag	177
A.7	Direct air capture + Carbon storage (DACCS)	179
A.8	Houtbouw	183
A.9	Biomaterialen	186
B	Duiding van emissiereductie in de KEV 2022	191
B.1	Emissies in 2040 (KEV)	191

Samenvatting

Negatieve emissies of koolstofverwijdering – processen waarbij broeikasgassen uit de atmosfeer permanent of langdurig worden verwijderd – worden steeds vaker gezien als een onderdeel in de gereedschapskist voor klimaatbeleid. Zo zijn in alle scenario's van het IPCC negatieve emissies nodig om klimaatneutraliteit in 2050 te bereiken. Dit onderzoek, in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat, brengt de technische en beleidsmatige aspecten van dit onderwerp in kaart. Het geeft een actueel beeld van de toekomstige behoefte, aanbod en mogelijke tijdspaden voor negatieve emissies, gaat in op de rol van CCS, en geeft inzicht in de behoefte aan en de opties voor beleid.

In dit rapport hanteren we als definitie van negatieve emissies: *maatregelen die als doel hebben om CO₂ langdurig of permanent aan de atmosfeer te onttrekken*. We laten hierbij ruimte voor niet-permanente opslag, omdat er in de Europese beleidscontext nog geen duidelijke consensus over is, maar maken in de analyse wel onderscheid tussen die twee categorieën.

Behoefte aan negatieve emissies

De behoefte aan negatieve emissies komt voort uit twee doelstellingen. Ten eerste het doel dat zowel Nederland als de EU in 2050 klimaatneutraal moeten zijn. Doordat er in 2050 en daarna nog restemissies blijven bestaan in sommige sectoren, is er dan een minstens even grote hoeveelheid negatieve emissies nodig om op een netto-nul-balans uit te komen. Ten tweede moeten negatieve emissies zorgen voor compensatie van de mondiale overshoot¹. De wereld koerst af op een overschrijding van het koolstofbudget dat nog beschikbaar is om de opwarming van de aarde te beperken tot 1,5°C, zoals afgesproken in het Klimaatakkoord van Parijs en ook de EU-klimaatwet stelt dat er vanaf 2050 netto-koolstofverwijdering uit de atmosfeer moeten worden gerealiseerd.

De restemissies na 2050 zijn in kaart gebracht op basis van bestaande scenario's voor een (bijna) klimaatneutrale economie in 2050. Alle scenario's houden nog rekening met restemissies. Die leiden in Nederland tot een behoefte aan negatieve emissies tussen de 8,8 en 38,3 Mton CO₂ per jaar in 2050. Deze restuitstoot zit met name in de landbouw, industrie en transport. In de landbouw zijn de (niet-fossiele) emissies van veeteelt en akkerbouw zeer moeilijk te vermijden, waardoor landbouw in alle scenario's voor een groot aandeel in de restemissies zorgt. Scenario's voor Nederland waar de industrie minder verduurzaamt, komen uit op hogere restemissies (tot 38,3 Mton/jaar), terwijl scenario's die uitgaan van een volledige transitie, ook van de industrie, uitkomen op circa 9-10 Mton/jaar restemissies. Restemissies in EU-scenario's komen uit op 541 tot 602 Mton in 2050.

Om in te schatten hoeveel negatieve emissies nodig zijn om de overschrijding (overshoot) van het mondiale koolstofbudget voor een maximale opwarming van 1,5°C te compenseren hebben we gebruikgemaakt van de IPCC-scenario's, en van twee verschillende aannames voor de toedeling van de mondiale overshoot aan Nederland. Dit geeft een bandbreedte van de benodigde negatieve emissies van 1,6-33 Mton/jaar, vanaf 2050.

¹ Waarbij moeten worden opgemerkt dat er boven 1,5°C-opwarming ook een aantal onomkeerbare processen kunnen optreden. Verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer op een later moment zal die effecten niet (volledig) kunnen omkeren.

Tabel 1 - Restemissies, compensatie mondiale overshoot en totale behoefte aan negatieve emissies in Nederland in 2050

Categorie	Emissies (Mton CO ₂ -eq./jaar)
Restemissies na aftrek fossiele CCS	8,8-38,3
Compensatie mondiale overshoot	1,6-33
Totale behoefte aan negatieve emissies	10,4-71,3

Potentieel aanbod aan negatieve emissies

Het geschatte potentieel en *technology readiness level* (TRL) van verschillende routes voor negatieve emissies is gegeven in de volgende tabel.

Tabel 2 - Potentieel, kosten en TRL van verschillende routes

Nr.	Technologie	Nederlands potentieel (Mton/jr)				TRL
		Technisch	Realistisch 2030	Realistisch 2050	Cumulatief tussen 2030-2050	
I	Bebossing	3,6	0,35	0,7	10,5	N.v.t.
IIA	Bio-energie met CCS-BECCS (verschillende routes)	12-19	>3,9*	>16,2*	>201*	8
IIB	Biochemie met CCS-BECCS (verschillende routes)		3,0	10,8	138	5-9
IV	Koolstofopslag in de bodem	2,3	0,6	0,9	15	8-9
V	Biochar	5,5	0	0,05	0,5	3-6
VI	Mineralisatie	14	0,7	5,4	61	4-9
VII	Marine NETP	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	0	4-6
VIII	DACCS	17	0	>0**	>0**	4-8
IX	Houtbouw	3,9	0,4	3,9	43	8-9
X	Biomaterialen (chemie)		0,4	0	4	4-9
Totaal			9,4	39	473	
Waarvan CCS			6,9	27	339	

* Het realistisch potentieel van BECCS uit biomassacentrales is hier niet in meegenomen, dat is weliswaar groot maar sterk afhankelijk van beleid.

** Het potentieel van DACCS is erg onzeker.

Niet alle methoden leiden tot permanente koolstofverwijdering. Koolstofvastlegging in de bodem, bosbouw, houtbouw en biomaterialen kan langdurig zijn, maar de tijdsduur van opslag kan verschillen.

Veel van deze methoden gebruiken duurzame biomassa. De beperkte beschikbaarheid van duurzame biomassa is dan ook een potentiële belemmering bij veel van deze routes, daarnaast betekent het dat deze potentiëlen niet per se optelbaar zijn. Er wordt concurrentie verwacht op de beschikbare biomassa en hernieuwbare CO₂ – tussen de negatieve emissiemethoden onderling, maar ook met andere toepassingen en waardeketens in de economie, zoals bioplastics en transportbrandstoffen. Een vergelijkbare situatie geldt voor het Nederlands potentieel van direct uit de atmosfeer verwijderde CO₂ (direct air capture, DAC). De toekomstige beschikbaarheid van deze CO₂ is nog erg onzeker, en ook dan is nog de vraag in hoeverre deze beschikbaar komt voor geologische opslag (DACCS). De CO₂ kan ook voor andere toepassingen (zoals synfuels) worden gebruikt.

Geologische opslag van CO₂

De Nederlandse ondergrond (op dit moment: lege gasvelden onder de Noordzee) heeft een aanzienlijke capaciteit voor de opslag van CO₂, voldoende voor enkele tientallen jaren van opslag van CO₂ uit eigen emissiebronnen. Het ontwikkelen van een CO₂-opslaglocatie, vanaf een eerste analyse van de opslagcapaciteit tot het starten van de bouw van de injectie-faciliteiten neemt vele jaren in beslag: van 5-7 jaar voor lege olie- of gasvelden tot minimaal 9 voor zoutwatervoerende lagen.

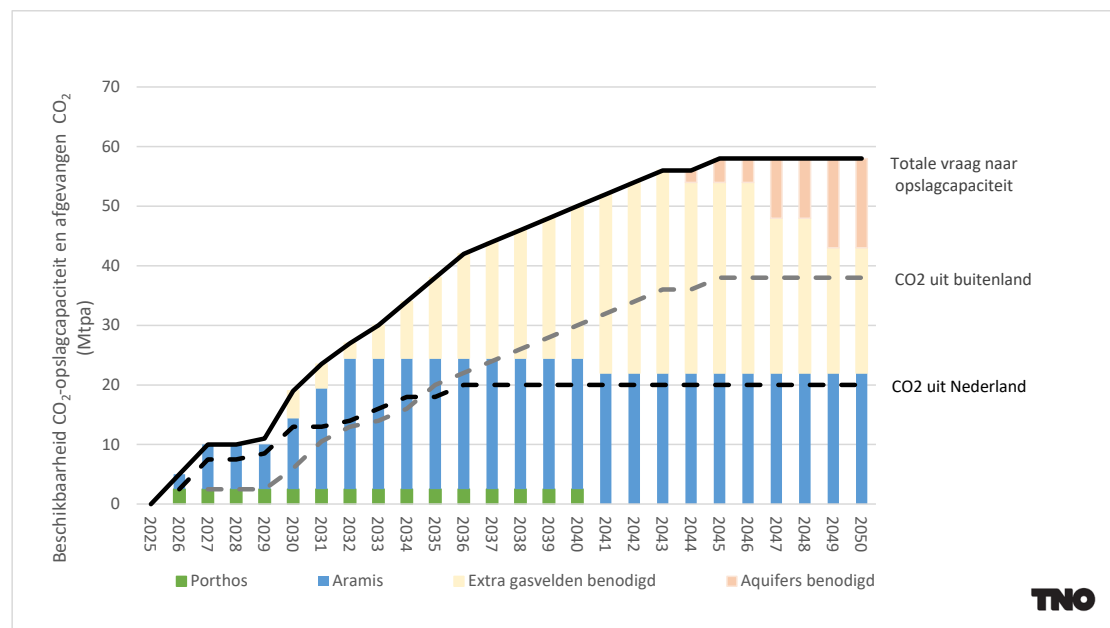
De vraag naar opslagcapaciteit die momenteel in beeld is, komt zowel van Nederlandse fossiele emissiebronnen als van import van CO₂ uit Duitsland en België. Daar komt in de toekomst een vraag aan CCS voor negatieve emissies bij. In de analyse van deze studie lag de focus op opslag in de Nederlandse ondergrond, daarnaast zijn er ook opslaglocaties in andere landen (bijv. Noorwegen, het Verenigd Koninkrijk) waar 'Nederlandse' CO₂ in de toekomst zou kunnen worden opgeslagen. Nader onderzoek naar de toekomstige vraag en aanbod van buitenlandse opslag, en daarmee naar de potentiële beschikbaarheid van opslagcapaciteit voor Nederlandse negatieve emissies, was buiten scope van deze studie.

Tabel 3 - Overzicht van geschatte vraag naar opslagcapaciteit voor CO₂ van emissiebronnen van fossiele CO₂. Aanvoer vanuit België en Duitsland wordt meegenomen, vanwege beperkingen aan opslagcapaciteit in die landen

Jaar	Geschatte volumes aan afvang van fossiele CO ₂ bij Nederlandse emissiebronnen	Verwachte CO ₂ -import uit DE (uitgezonderd wat elders wordt opgeslagen)	Verwachte CO ₂ -import uit BE (uitgezonderd wat elders wordt opgeslagen)	Geschatte opslag buiten NL door emissiebronnen in BE en DE	Totale vraag naar opslagcapaciteit in NL
2030	13 Mton/jaar	0	7 Mton/jaar	0	20 Mton/jaar
2050	20 Mton/jaar	28 Mton/jaar	9.5 Mton/jaar	Ongeveer 25 Mton/jaar	57,5 Mton/jaar

De totaal ontwikkelde opslagcapaciteit zou er als volgt uit kunnen zien:

Figuur 1 - Weergave opslagcapaciteit in ontwikkeling en het verwachte aanbod aan afgevangen CO₂, tot 2050



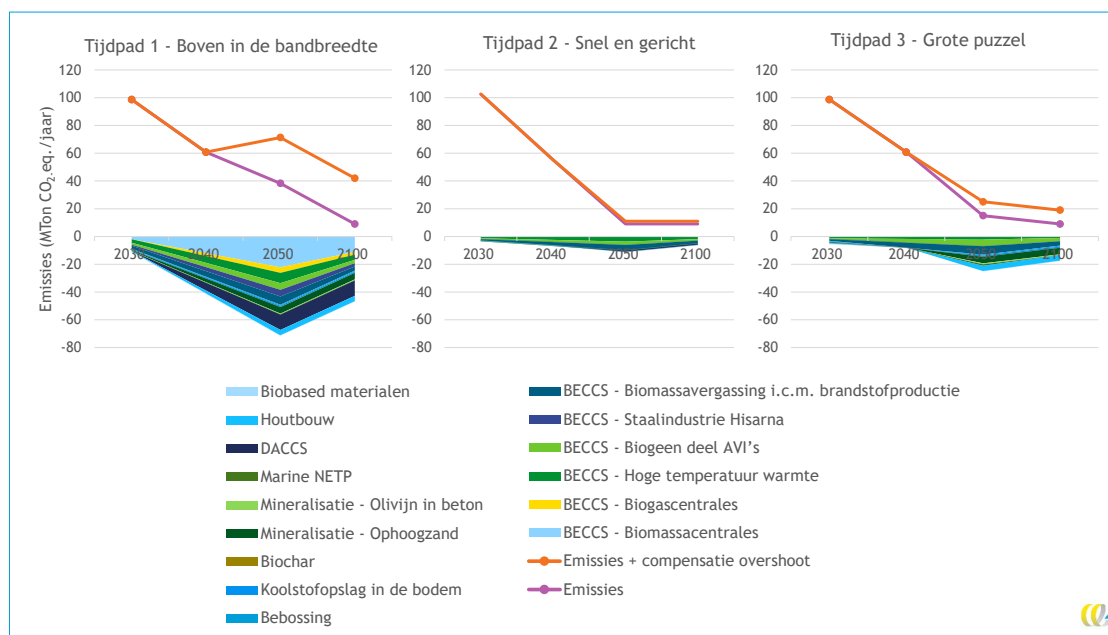
Naar verwachting is er voldoende capaciteit in offshore-gasvelden voor opslag van CO₂ tot 2050. Daarvoor is echter een continue toevoer aan nieuwe opslaglocaties nodig om de verwachte groei in het aanbod van CO₂, van zowel emissiereductie als negatieve emissies, te kunnen opslaan. Uiteindelijk is CO₂-opslag een internationale activiteit. Er zal daarom tijdig internationale infrastructuur aangelegd moeten worden en regelgeving moeten worden ontwikkeld om dit te faciliteren.

Mogelijke ontwikkeling van negatieve emissies in de tijd

Om inzicht te krijgen in hoe de behoefte en het aanbod van negatieve emissies samen zouden kunnen komen in de tijd, hebben we drie tijdspaden ontwikkeld, met verschillende toekomstbeelden:

1. **Tijdspad 1 - Boven in de bandbreedte.** In dit tijdspad blijft er veel behoefte aan negatieve emissies doordat emissies niet snel genoeg afgebouwd worden. Om voor deze hoge uitstoot te compenseren is maximale inzet nodig op alle technologieën. Bovendien is er een grootschalige verdere uitbreiding van de CCS-opslagcapaciteit vereist.
2. **Tijdspad 2 - Snel en gericht.** Dit tijdspad is gekenmerkt door een snelle afbouw van emissies en een succesvolle transitie naar een fossielvrije economie. Daardoor is er een beperkte behoefte aan negatieve emissies. Die wordt gericht door CCS ingevuld, met name door bio-energie of biochemie met CCS (BECCS) en direct air capture met CCS (DACCS). Er is voldoende geologische opslagcapaciteit.
3. **Tijdspad 3 - Grote puzzel.** Hier wordt uitgegaan van een medium behoefte aan negatieve emissies. Er wordt geen biomassa of direct air capture specifiek voor negatieve emissies toegepast. De ontwikkeling van negatieve emissies is gericht op innovaties en het benutten van koppelkansen (synergie) met de circulaire economie.

Figuur 2 - Overzicht van de ontwikkeling van de behoefte en het aanbod aan negatieve emissies over de tijd in de drie tijdpaden, voor Nederland



Deze analyse laat zien dat hoe groter de behoefte aan negatieve emissies is, des te groter de uitdaging om voldoende aanbod te realiseren én des te groter het risico dat dit niet zal lukken. Het is zeer onwaarschijnlijk dat een groot aanbod aan negatieve emissies – zoals in het tijdpad ‘Boven in de bandbreedte’ – voor Nederland haalbaar is. Dat komt doordat een groot deel van de technieken nog verder ontwikkeld moet worden voordat ze grootschalig kunnen worden ingezet, maar ook door de onzekere ontwikkelingen in de industrie, de beperkte beschikbaarheid van biomassa en het risico dat de benodigde CCS-opslagcapaciteit niet tijdig beschikbaar komt. Reduceren van de restemissies en de overshoot van de mondiale klimaatdoelen moet daarom de kern blijven van het klimaatbeleid.

Knelpunten

We hebben verschillende typen knelpunten geïdentificeerd en per technologie globaal aangegeven of deze van toepassing zijn. Er zijn in de eerste plaats knelpunten die in hoge mate inherent zijn aan de technologie: ruimtegebruik, energiegebruik en de mate waarin de opslag tijdelijk of permanent is. Deze knelpunten kunnen niet met beleid opgelost worden, maar kunnen wel gemitigeerd worden door te kiezen voor technologieën die passen bij het beschikbare lokale aanbod van ruimte en energie, etc.

In de tweede plaats zijn er knelpunten die (grotendeels) met beleidsinstrumenten kunnen worden aangepakt. Dit slaat met name op het huidige gebrek aan regulering van negatieve emissies, en in het bijzonder het ontbreken van een financiële prikkel. Ook technologische innovatie kan (tot op zekere hoogte) via gericht beleid gerealiseerd worden.

Tot slot zijn er knelpunten die in wezen neerkomen op een botsing tussen de beleidsdoelen voor negatieve emissies en andere beleidsdoelen. Deze leiden tot beleidsdilemma's en *trade-offs*. Dit zien we bijv. bij de concurrentie om duurzame koolstof, de concurrentie om geologische opslagcapaciteit en bij de mogelijk nadelige effecten van sommige technologieën op het milieu en de biodiversiteit.

Beleidsimplicaties

Alles overziend concluderen we dat de ontwikkeling en realisatie van grootschalige, permanente koolstofverwijdering uit de atmosfeer cruciaal zijn om de mondiale en nationale klimaatdoelen te halen. Er blijven restemissies over die ook op de lange termijn (na 2050) verwijderd moeten worden om verdere klimaatverandering tegen te gaan.

Op dit moment bestaat er nog niet veel beleid dat specifiek gericht is op de ontwikkeling en daadwerkelijke realisatie van negatieve emissies. Gezien het belang van koolstofverwijdering voor het klimaatbeleid én de lange doorlooptijden van zowel de beleidsprocessen als de verschillende technologieën, is het dan ook sterk aan te bevelen om de beleidsontwikkeling hiervoor te de komende jaren te versnellen.

In dit rapport geven we een roadmap voor de ontwikkeling van beleid, veel aspecten daarvan vergen verdere uitwerking. Het gaat hierbij om het opzetten van een beleidskader met definities en uitgangspunten, het ontwikkelen van stimuleringsbeleid voor het realiseren en opschalen van negatieve emissies, R&D- en innovatiebeleid voor het marktrijp maken van technologieën met een lage TRL en het creëren van de juiste randvoorwaarden.

Daarbij is het van belang dat er in het beleid een duidelijk onderscheid wordt gemaakt tussen permanente en tijdelijke opslag van koolstof. We bevelen daarbij aan om alleen permanente koolstofverwijdering te zien als compensatie van restemissies. Tijdelijke opslag van koolstof, met een tijdelijk effect op het klimaat, kan als positief neveneffect worden beschouwd van bijv. houtbouw of opslag in de bodem, maar dient andere doelen.

Bij het onderwerp negatieve emissies komen veel verschillende beleidsterreinen samen. De verdere ontwikkeling van negatieve emissies vergt dan ook een integrale aanpak en een visie van de rijksoverheid op de rol van koolstofverwijdering in het klimaatbeleid van de toekomst. Op deze manier kunnen de kansen voor synergie met de transitie naar een klimaatneutrale en circulaire economie worden benut, en kunnen negatieve neveneffecten (trade-offs) worden voorkomen of worden beperkt.

Dit onderzoek laat zien dat tijdige CO₂-reductie de kern moet blijven van het klimaatbeleid. Het verlagen van de (rest)emissies om de klimaatdoelen te halen, en het beperken van de mondiale overschrijding van de 1,5°C-doelstelling blijft cruciaal. De ontwikkeling en opschaling van negatieve emissies naar een niveau dat voldoende is om de restemissies en mondiale overshoot te compenseren, gaat veel tijd en inspanning kosten, en gaat met significante onzekerheden gepaard. Vanuit de klimaatdoelen geredeneerd concluderen wij dan ook dat het onverstandig is om een zekere uitstoot nu te compenseren met een onzekere verwijdering in de toekomst.

Afkortingen

Afkorting	Betekenis
BECCS	Biobased Economy with Carbon Capture and Storage (soms ook: Bio-energy with Carbon Capture and Storage)
BKG	Broeikasgas
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
DAC(CS)	Direct air capture (and carbon storage)
EC	Europese Commissie
ETS	European Emission Trading System
EU	Europese Unie
II3050	Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KEV	Klimaat- en Energieverkenning
LCA	Levenscyclusanalyse
LULUCF	Land use, land-use change and forestry
NETP	Negative emissions technologies and practices
NPE	Nationaal plan energiesysteem
SRL	Storage Readiness Levels
TRL	Technology Readiness Levels

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Negatieve emissies – processen waarbij broeikasgassen uit de atmosfeer permanent of langdurig worden verwijderd – worden steeds vaker gezien als een onderdeel in de gereedheidskist om klimaatneutraliteit te bereiken. Het voorkomen van CO₂-uitstoot blijft de primaire route om de klimaatdoelen te halen. Echter, wetenschappelijke studies tonen aan dat zonder negatieve emissies het tijdig behalen van deze doelen moeilijk tot niet haalbaar zal zijn. Allereerst omdat er ook bij succesvolle aanscherping van het klimaatbeleid nog emissies van broeikasgassen over zullen blijven. Sommige emissies in de landbouw en industrie zijn bijvoorbeeld niet of heel lastig te vermijden. Maar ook omdat er nog slechts een beperkt koolstofbudget ‘over’ is voor uitstoot van broeikasgassen om de ergste opwarming van de aarde te voorkomen. Als de mondiale uitstoot te langzaam afneemt en de wereld over dat klimaatbudget heen gaat kunnen negatieve emissies ook bijdragen aan reductie van broeikasgassen in de atmosfeer. De opwarming van de aarde en de effecten van klimaatverandering kunnen daarmee op de langere termijn worden beperkt.

Hoewel de omvang van de behoefte aan negatieve emissies in de toekomst nog onzeker is, wordt het belang ervan steeds duidelijker. De afgelopen jaren wordt er dan ook steeds meer onderzoek gedaan naar de manier waarop negatieve emissies kunnen worden gerealiseerd. Er is nog maar weinig beleid waarmee negatieve emissies worden gestimuleerd, al neemt de interesse in de politiek en bij beleidsmakers wel toe. Kansrijke technieken zijn al wel geïdentificeerd, maar vergen veelal nog verder onderzoek en ontwikkeling. Zo heeft PBL in 2018 een eerste verkenning uitgevoerd naar het potentieel voor negatieve emissies in Nederland (PBL, 2018), waarna Royal HaskoningDHV in 2022 een Quickscan heeft uitgevoerd naar de onderzoeksbehoefte op dit terrein (Royal HaskoningDHV, 2022). Hierin zijn de zeven belangrijkste negatieve emissieconcepten geïdentificeerd, die elk hun eigen technische ontwikkeling, monitoring en wellicht beleid nodig zullen hebben. Ook in recente Europees beleidsvoorstellen en strategiedocumenten is er aandacht voor dit beleidsveld.

In deze studie gaan we dieper in op vrijwel alle aspecten van dit onderwerp:

- de toekomstige behoefte aan negatieve emissies in Nederland, Europa en mondiaal (Hoofdstuk 2);
- het potentiële aanbod van negatieve emissies (Hoofdstuk 3);
- de mogelijkheden voor geologische (ondergrondse) opslag van CO₂ in Nederland (Hoofdstuk 4);
- de mogelijke ontwikkeling van negatieve emissies in de tijd (Hoofdstuk 5);
- knelpunten en belemmering voor de realisatie van negatieve emissies (Hoofdstuk 6);
- beleidsimplicaties en -conclusies (Hoofdstuk 7);
- overkoepelende conclusies van deze studie.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Deze studie is uitgezet om ondersteuning te bieden aan het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE).

1.2 Beleidscontext

In scenarioanalyses wordt de noodzaak voor negatieve emissies voor de langere termijn al enkele jaren onderkend, maar op dit moment is er nog weinig beleid op geïmplementeerd. Klimaatbeleid is tot zo ver vooral gericht op vermindering van de uitstoot van broeikasgassen.

Nederland

In Nederland is er geen specifiek beleid voor negatieve emissies, maar de noodzaak van negatieve emissies wordt wel ingezien. In de Kamerbrief 'Contouren Nationaal plan energiesysteem' (Ministerie van EZK, 2022) en de Kamerbrief 'Naar een beleidsagenda voor een klimaatneutraal Nederland' (Ministerie van EZK, 2023) wordt onderkend dat negatieve emissies de resterende emissies in 2050 moeten compenseren om klimaatneutraal te zijn, en dat zij na 2050 moeten zorgen voor een per saldo negatieve uitstoot. Het belang van biogene koolstofvastlegging in bossen, land, bouwmaterialen en chemie én van CCS om CO₂ uit biogene bronnen op te slaan, ook al ruim voor 2050, wordt daarbij benoemd. Ook de noodzaak om koolstofvastlegging in de toekomst te belonen, bij voorkeur op Europees niveau, wordt benoemd. Verdere uitwerking van dit onderwerp wordt verwacht in het Nationaal Plan Energiesysteem en in het herziene klimaatplan 2024, die mede op deze studie zullen worden gebaseerd.

Europa

Ook de Europese Unie ziet een rol voor het afvangen en vastleggen van CO₂ om haar klimaatdoelen te halen. In Artikel 2.1 van de Europese Klimaatwet is de doelstelling als volgt geformuleerd: *De in het Unierecht geregelde emissies en verwijderingen van broeikasgassen in de hele Unie zijn uiterlijk in 2050 binnen de Unie in evenwicht, zodat de netto-uitstoot tegen die datum tot nul kan worden herleid, en de Unie streeft daarna naar negatieve emissies.* In Art. 2.2 staat vervolgens: *De relevante instellingen van de Unie en de lidstaten nemen de nodige maatregelen, respectievelijk op het niveau van de Unie en op nationaal niveau, om de collectieve verwezenlijking van de in lid 1 genoemde doelstelling inzake klimaatneutraliteit mogelijk te maken, rekening houdend met het belang van het bevorderen van zowel rechtvaardigheid en solidariteit tussen de lidstaten als kosteneffectiviteit bij het verwezenlijken van deze doelstelling.*

In de langetermijnstrategie voor een klimaatneutrale economie (EC, 2018a) geeft de Europese Commissie (EC) aan dat het creëren van negatieve emissies, zowel via natuurlijke koolstofputten als via de ontwikkeling van een bio-economie, cruciaal is om de doelstelling van klimaatneutraliteit in 2050 te halen. Ook in de EU-scenario's die zijn ontwikkeld in het kader van de Green Deal spelen negatieve emissies een rol, waarbij nadrukkelijk een duidelijke rol is weggelegd voor natuurlijke vormen van koolstofopslag (bijv. koolstofopslag in bossen en landbouwgrond), naast industriële vormen van negatieve emissies.

Op het onderwerp van natuurlijke oplossingen voor negatieve emissies via landgebruik, bestaat op Europees niveau al enige tijd het LULUCF-beleid (Land Use, Land Use Change and Forestry). De Commissie heeft een herziening van de LULUCF-verordening gepubliceerd in 2021 (EC, 2021b). Hierin is een aparte doelstelling voor de EU opgenomen voor natuurlijke vormen van koolstofopslag in bossen, bodems en landgebruik, van 310 Mton CO₂-eq. in 2030. Om dit te verwezenlijken bevat het voorstel ook bindende doelen voor lidstaten.

Wat de transitie van fossiele naar duurzame koolstofcycli betekent voor de EU heeft de Commissie in 2021 in grote lijnen uiteengezet in de Mededeling ‘Duurzame koolstofcycli’ (EC, 2021c). In dat document wordt ook de prioritering beschreven van klimaatbeleid:

1. **Drastische reductie van de afhankelijkheid van fossiele koolstof**, door middel van efficiëntieverbeteringen, vraagvermindering en emissiereductie, met een broeikasgasreductiedoelstelling van 55% in 2030 t.o.v. 1990 en 95% reductie van het gebruik van fossiele energie t.o.v. het huidige gebruik.
2. **Circulariteit**: Hergebruik van koolstof uit afvalstromen, uit biomassa of direct uit de atmosfeer, als vervanger van fossiele koolstof.
3. **Negatieve emissies**: Opschaling van koolstofverwijdering en -vastlegging, waarbij CO₂ uit de atmosfeer wordt afgevangen en voor de lange termijn wordt opgeslagen, via natuurlijke oplossingen zoals natuurbescherming en koolstoflandbouw, of door industriële oplossingen.

Recent heeft de EC ook een voorstel gepubliceerd voor een certificeringskader voor koolstofverwijdering (EC, 2022). Dit kan worden gezien als een eerste stap in de concrete beleidsontwikkeling en een uitwerking van de mededeling over duurzame koolstofcycli. Deze certificering kan de basis vormen voor integratie van opties voor negatieve emissies in het EU-beleid na 2030. De inhoud van dit voorstel staat samengevat in de volgende tekstbox.

Verder is de Renewable Energy Directive (RED) relevant vanwege de doelstellingen en criteria voor duurzame biomassa. In verschillende mededelingen en strategieën heeft de Commissie daarnaast denkrichtingen en beleidsdoelen uiteengezet die ook raken aan het onderwerp negatieve emissies. Soms wordt hier ook bepaalde wetgeving in aangekondigd. In Tabel 4 staat een overzicht van de meest relevante niet-wetgevende Commissie-documenten en wat daarin over negatieve emissies wordt gezegd.

Tabel 4 - Relevante Commissiemededelingen die raken aan het thema negatieve emissies

Commissiemededeling (strategie)	Relatie met negatieve emissies
Duurzame koolstofkringloop	Om duurzame koolstofkringen te realiseren is het afvangen en langdurig opslaan van CO ₂ uit de atmosfeer nodig. Aankondiging van certificeringskader voor koolstofverwijdering (inmiddels gepubliceerd, zie tekstbox).
Van Boer tot Bord (Farm-to-Fork)	Boeren dienen beloond te worden voor het vastleggen van koolstof in de bodem. Aankondiging van Climate Farming Initiative.
Bodemstrategie	Voor het bereiken van klimaatneutraliteit is herstel en beter beheer van bodems noodzakelijk.
Bossenstrategie	Bosbeheer moet bijdragen aan LULUCF-doelstelling. Roadmap om 3 miljard extra bomen te planten tot 2030. Aankondiging van voorstel om het klimaatvoordeel van hout als bouw materiaal robuust vast te stellen.
Bauhaus-initiatief en renoveringsgolf	De bouwsector moet netto-CO ₂ gaan opslaan in plaats van uitstoten.
Langetermijnstrategie voor een klimaatneutrale economie	Natuurlijke koolstofopslag dient vergroot te worden. Via CCS kunnen overige restemissies gecompenseerd worden. Echter geen aandacht voor negatieve-emissietechnologieën.
Strategie voor energiesysteemintegratie	Opschaling van afvang van koolstof nodig voor het produceren van synthetische brandstoffen, mogelijk via het Innovatiefonds.
Actieplan Circulaire Economie	Koolstofverwijdering kan via natuurlijke processen of door verlengde circulariteit van (bouw)materialen. Aankondiging van het certificeringsraamwerk.
Biodiversiteitsstrategie	Biodiverse oude bossen slaan het meeste koolstof op. Ook andere koolstofrijke ecosystemen zoals veengronden en mangroves moeten strikt beschermd worden.

Tekstbox: Samenvatting EU-voorstel certificeringskader voor koolstofverwijdering

Certificeringskader voor koolstofverwijdering (Commissievoorstel)

Op 30 november 2022 heeft de Europese Commissie een voorstel gepubliceerd voor een vrijwillig certificeringskader voor verwijdering van koolstof uit de atmosfeer. Het doel van dit voorstel is om een standaard vast te leggen waaraan elk certificeringsschema binnen de EU zou moeten voldoen, om zo op betrouwbare wijze 'hoogwaardige' koolstofverwijdering te faciliteren. Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie typen koolstofverwijdering: permanente opslag, koolstoflandbouw en opslag in producten en materialen.

In het voorstel worden vier criteria voor certificeringsmechanismen beschreven:

1. Kwantificering, waarbij de netto-koolstofverwijdering wordt berekend op basis van de opgeslagen koolstof, de emissies die bij het afvangen en opslaan vrijkomen en een referentiescenario.
2. Additionaliteit. Dit betekent dat de activiteit verder moet gaan dan wettelijk verplicht en een gevolg is van het stimulerende effect van de certificering.
3. Langetermijnopslag. Dit wordt in feite opgehangen aan de monitoring van de opslag; zodra deze stopt wordt de koolstof beschouwd als weer vrijgekomen naar de atmosfeer.
4. Duurzaamheid. De activiteit moet op bepaalde duurzaamheidsaspecten minimaal een neutraal effect hebben (geen verslechtering).

Verder bevat het voorstel eisen waar een certificeringsschema aan moet voldoen. Een koolstofverwijderingsactiviteit kan alleen een certificaat verkrijgen als aan bovenstaande criteria is voldaan en de koolstofverwijdering onafhankelijk is geverifieerd. Hoewel het voorstel een aantal keer refereert aan de mogelijke opbrengsten van certificaten, beperkt het zich tot de regels omtrent een certificeringsmechanisme en gaat het niet over het creëren van een financiële prikkel of een markt voor deze certificaten.

Er zijn enkele kritiekpunten op het voorstel naar voren gebracht vanuit ngo's (o.a. Carbon Market Watch, Bellona). Zo omvat de definitie van koolstofverwijdering in het Commissievoorstel ook de reductie van emissies uit biogene reservoirs (zoals veen), terwijl dat emissiereductie betreft en geen negatieve emissies. Verder maakt het voorstel niet duidelijk hoe het onderscheid tussen permanente en tijdelijke opslag terugkomt in de typen certificaten. Daarnaast is het criterium additionaliteit lastig vast te stellen en mist een vereiste van de fysieke additionaliteit van de koolstofverwijdering.

In de recent gepubliceerde consultatie over Europese klimaatdoelstellingen voor 2040 is er specifieke aandacht voor de rol die negatieve emissies (carbon dioxide removal - CDR) in het toekomstige Europese klimaatbeleid gaan spelen. Het gaat dan onder andere over welke opties voor negatieve emissies het meest kansrijk zijn, en over de vraag of er één doelstelling voor netto-broeikasgasemissies moet komen, of aparte doelstellingen voor emissies en voor vastleggingen (negatieve emissies). Ook de optie om onderscheid te maken tussen negatieve emissies gebaseerd op natuurlijke processen en industriële negatieve emissies met permanente vastlegging komt aan bod (Pickstone, z.d.). De Commissie wil begin 2024 een voorstel publiceren voor een doelstelling voor broeikasgasreductie in 2040. Na verwachting volgt hierop de ontwikkeling van het raamwerk voor het klimaatbeleid post-2030, mede op basis van deze consultatie.

Tot slot heeft de Commissie ook diverse onderzoeks- en innovatieprogramma's waarmee de ontwikkeling en implementatie van negatieve-emissietechnologieën worden ondersteund, zoals Horizon Europe² en het European Strategic Energy Technology Plan (SET Plan).

² Zie bijvoorbeeld het [NEGEM-project](#)



Mondiaal

De belangrijkste mondiale beleidscontext is het Klimaatakkoord van Parijs, dat in 2016 mede namens Nederland is ondertekend door de Europese Unie. Doel van het akkoord is om de opwarming van de aarde te beperken tot ruim onder 2 graden Celsius, met een duidelijk zicht op 1,5 graden Celsius. In hoeverre hier negatieve emissies voor nodig zijn is niet gespecificeerd in het akkoord, maar mondiale klimaatscenario's van het IPCC en de IEA geven hier wel inzicht in. Dit wordt verder besproken in Paragraaf 2.5.

1.3 Een aantal belangrijke termen en definities

Een aantal termen die we in dit rapport gebruiken zijn wellicht niet geheel eenduidig maar wel dermate belangrijk dat het zinvol is om er hier expliciete definities van te geven waarmee we beschrijven hoe wij ze in deze studie definiëren. In de volgende hoofdstukken gaan we nader op deze termen in, en in het hoofdstuk Beleidsimplicaties wordt de definitie oftewel afbakening van negatieve emissies afzonderlijk behandeld als beleidsvraagstuk.

1.3.1 Negatieve emissies

Negatieve emissies: Maatregelen die als doel hebben om CO₂ langdurig of permanent aan de atmosfeer te onttrekken.

Het is belangrijk om een robuuste definitie van negatieve emissies te hanteren. In de literatuur worden verschillende definities gebruikt. Aspecten die in vrijwel alle definities terugkomen zijn dat het moet gaan om een netto-onttrekking van CO₂ aan de atmosfeer en dat deze CO₂ vervolgens wordt vastgelegd. Waar de definities in verschillen is de tijdsduur van deze vastlegging. Sommige definities laten ruimte voor tijdelijke ('langdurige') opslag, andere vereisen dat de opslag 'permanent' is. Hieraan gerelateerd verschillen de definities in de genoemde media waarin de CO₂ kan worden opgeslagen: alleen geologisch, of ook in de bodem of in materialen. Een aspect dat in sommige definities expliciet wordt toegevoegd is dat het bij negatieve emissies moet gaan om de verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer door *menselijk handelen*, in tegenstelling tot processen die op natuurlijke wijze plaatsvinden.

We lichten hier kort enkele definities uit die gehanteerd worden in enkele belangrijke bronnen uit de literatuur.

In het rapport 'The State of Carbon Dioxide Removal' (Smith, S. M. & et al., 2023) wordt verwezen naar een definitie van negatieve emissies van het IPCC. Volgens deze definitie zijn negatieve emissies 'menselijke activiteiten waarbij CO₂ wordt afgevangen uit de atmosfeer en langdurig wordt opgeslagen in geologische reservoirs, op land of in de oceaan'. Er wordt toegevoegd dat natuurlijke processen die door de mens worden versterkt hier onder vallen, maar natuurlijke processen zonder menselijke interventie niet.

(Tanzer, S. E. & Ramirez, A., 2019) gaan uitgebreid in op het belang van de procesketen in de afbakening van negatieve emissies. Ze laten zien dat de netto-emissies variëren afhankelijk van de keuze van welke processen wel en niet worden meegenomen. Daarnaast geven ze de volgende vier principes voor de afbakening van negatieve emissies (Tanzer, S. E. & Ramirez, A., 2019):

- CO₂ wordt fysiek uit de atmosfeer gehaald.
- De CO₂ wordt buiten bereik van de atmosfeer opgeslagen, met de bedoeling van permanente opslag.

- Emissies van broeikasgassen in de gehele procesketen ('upstream' en 'downstream'), die het gevolg zijn van de negatieve-emissietechnologie, worden zo goed mogelijk geschat en meegenomen in de emissiebalans.
- De totale hoeveelheid CO₂ die uit de atmosfeer is gehaald en permanent is opgeslagen is groter dan de totale hoeveelheid CO₂ die als gevolg van de negatieve-emissie-technologie wordt uitgestoten.

Principes 1 en 2 zijn screeningcriteria; een technologie die hier niet aan voldoet is geen negatieve-emissietechnologie. Principes 3 en 4 onderstrepen het belang van het beschouwen van de gehele keten van afvang tot opslag, waarbij emissies in de keten moeten worden meegenomen in de bepaling van de netto-verwijdering van CO₂ uit de atmosfeer.

De PBL-studie (PBL, 2018) geeft als definitie 'het actief verwijderen en vastleggen van CO₂ uit de atmosfeer'. In de Quickscan (Royal HaskoningDHV, 2022) wordt voorgesteld om de randvoorwaarde te gebruiken voor een mogelijk onderzoeksprogramma dat een techniek leidt tot aantoonbare permanente vastlegging van CO₂ voor een periode van minimaal 100 jaar, in water, bodem, grondstoffen of producten.

Ook in de gangbare methodiek voor levenscyclusanalyse (LCA) wordt voor permanente opslag een tijdsduur van 100 jaar genomen. Om de CO₂-vastlegging over een kortere periode mee te nemen in een LCA wordt soms een correctiefactor toegepast (bijvoorbeeld, bij 50 jaar opslag is de uitstootreductie 50%). Dit wordt nader toegelicht in (TNO, 2021).

Een recente Duitse studie (Fuss, S. et al., 2021) kiest in dit kader voor een interessante variant met betrekking tot de tijdsduur van de opslag. Fuss et al. redeneren dat een limiet van 100 of 1.000 jaar altijd willekeurig is, omdat dan veel natuurlijke opslagprocessen dan niet goed kunnen worden meegenomen. In plaats daarvan zou alle opslag van koolstof voor een periode langer dan een verslagjaar van de broeikasgasinventaris aan het UNFCCC moeten meetellen als negatieve emissies. Daarbij dient dan de negatieve emissie over de gemiddelde opslagduur 'afgeschreven' te worden. Op basis daarvan kan dan een rapportagemethode voor negatieve emissies worden ontwikkeld die aansluit bij de broeikasgasinventaris.

In de Europese (beleids)literatuur is er nog geen duidelijk consensus over dat negatieve emissies 'permanent' moeten worden opgeslagen, soms wordt ook de term 'langdurig' gebruikt zonder expliciet te maken wat daarmee bedoeld wordt.

Bij sommige technologieën wordt de koolstof permanent vastgelegd, en is er de komende eeuwen geen, of vrijwel geen, risico op emissies naar de atmosfeer als broeikasgas. Een voorbeeld hiervan is ondergrondse opslag van CO₂ (carbon capture and storage, CCS). Deze technologieën vallen in elk geval onder de definitie van negatieve emissies. Aan de andere kant van het spectrum zijn sommige vormen van kortdurende CO₂-opslag, waarbij de CO₂ al snel alsnog wordt uitgestoten – denk aan CO₂-gebruik in de glastuinbouw of frisdranken, of biogene koolstof in gewassen voor voedsel of veevoer. Deze technologieën leiden niet tot negatieve emissies. Maar er is ook een grijs gebied van langdurige maar toch tijdelijke opslag, waar het een aantal jaren of decennia kan duren voordat de koolstof alsnog als broeikasgas in de atmosfeer komt. Voorbeelden hiervan zijn houten bouwmaterialen of meubels, of kunststofmaterialen voor auto's die uit biomassa zijn geproduceerd. Ook natuurlijke koolstofopslag in bijv. bossen kan weliswaar langdurig zijn maar er is een risico dat de koolstof op termijn weer vrijkomt als broeikasgas door natuurlijke processen.

Het recente voorstel van de EC voor een raamwerk voor certificering van negatieve emissies (EC, 2022) gaat hier vrij soepel mee om. Het voorstel bevat de volgende definitie van wat er onder ‘carbon removals’ wordt verstaan (Article 2):

- ‘Carbon removal’ means either the storage of atmospheric or biogenic carbon within geological carbon pools, biogenic carbon pools, long-lasting products and materials, and the marine environment, or the reduction of carbon release from a biogenic carbon pool to the atmosphere.

Hierbij dient te worden opgemerkt dat de toevoeging van emissiereductie vanuit ‘carbon pools’ een ongewenste opening vormt richting voorkomen van emissies (in plaats van CO₂-verwijdering): principe 1 van (Tanzer, S. E. & Ramirez, A., 2019) wordt hier geschonden.

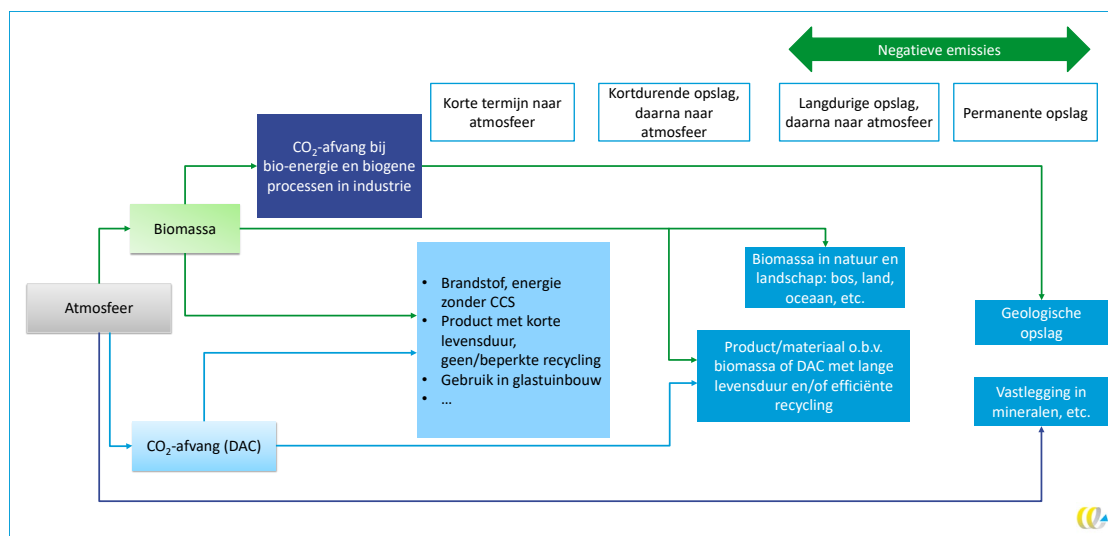
De voorgestelde certificeringsmethodiek houdt wel rekening met het langdurige maar tijdelijke karakter van sommige technieken, de certificering is dan geldig voor een bepaalde periode (gekoppeld aan de tijdsduur van monitoring) en risico’s op vroegtijdige emissies moeten zoveel mogelijk worden verkleind.

In de recente Kamerbrief ‘Naar een beleidsagenda voor een klimaatneutraal Nederland’ (Ministerie van EZK, 2023) worden negatieve emissies gedefinieerd als het ‘langs biologisch, chemische of technische weg verwijderen van CO₂ uit de atmosfeer met vastlegging in vegetatie, bodems, in gesteenten en materialen (mineralisatie) en opslag in ondergrondse reservoirs (zoals gasvelden of waterhoudende lagen (aquifers))’. In deze definitie wordt niet expliciet ingegaan op de vraag hoe permanent de vastlegging moet zijn, al worden er wel twee methoden genoemd (vegetatie en bodem) waarbij de vastlegging normaliter niet permanent is. Ook valt op dat in deze definitie niet wordt aangegeven dat het om menselijk handelen moet gaan, wat met name bij vastlegging in vegetatie en bodems wel nodig is om negatieve emissies van natuurlijke processen te onderscheiden.

Omdat deze studie een brede verkenning is naar negatieve emissies kiezen we niet voor een al te strenge afbakening van het begrip, maar sluiten aan bij de definities die in de recente beleidsliteratuur worden gebruikt, inclusief de definitie voor carbon removal uit (EC, 2022).

In volgende figuur geven we deze definitie schematisch weer.

Figuur 3 - Negatieve emissies - een schematisch overzicht van de definitie



1.3.2 Restemissies

Restemissies: De emissies van broeikasgassen naar de atmosfeer in een tijd waarin Nederland klimaatneutraal zou moeten zijn. Exclusief eventuele fossiele CO₂ die door CCS is opgevangen en opgeslagen, en exclusief kortcyclische broeikasgassen.

Volgens het huidige Coalitieakkoord moet Nederland in 2050 klimaatneutraal zijn.

We gebruiken 2050 daarom als belangrijk zichtjaar om de behoefte aan negatieve emissies te bepalen.

We kunnen hierbij twee soorten restemissies onderscheiden:

1. Restemissies die niet te voorkomen zijn, zoals de gevolgen van natuurlijke processen in bossen en andere natuur.
2. Restemissies die technisch gezien wel te voorkomen zijn, bijvoorbeeld door verdere inkrimping van de landbouw of extra maatregelen in de industrie, maar nog wel worden uitgestoten. Bijvoorbeeld doordat beleid onvoldoende is aangescherpt, of omdat verdere reductie zeer hoge kosten met zich meebrengt.

Maar ook hier is een grijs gebied. Zo zijn emissies van de veesector bijvoorbeeld in 2050 theoretisch gezien wellicht helemaal te vermijden als niemand meer vlees of dierlijke producten eet, maar het is zeer de vraag of dat realistisch of maatschappelijk wenselijk is. Welk deel van de veeteelt ‘onvermijdelijk’ is en welke niet zien we als een politiek vraagstuk, waar we in het hoofdstuk over Beleidsimplicaties verder op ingaan. Vergelijkbare overwegingen spelen bij meer sectoren en processen een rol.

Kortcyclische broeikasgassen zijn bijvoorbeeld emissies van CO₂ die vrijkomen bij verbranding van snelgroeiende biomassa. De biomassa neemt de CO₂ op tijdens de groei, als die CO₂ vervolgens weer wordt uitgestoten bij verbranding, is er per saldo geen toe- of afname van de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer. Als er een significante periode zit tussen opname van de CO₂ en uitstoot, bijvoorbeeld bij hout, is er sprake van een ‘carbon debt’: er zit dan enkele jaren tot decennia tussen opname en uitstoot van de CO₂.

In deze studie baseren we ons op de meest actuele (openbare) literatuur en scenariostudies van gerenommeerde instituten om een goede inschatting van de restemissies te kunnen geven. Daarnaast geven we bandbreedtes in de resultaten, om de onzekerheden te laten zien.

1.3.3 Potentieel van negatieve-emissietechnologieën

We onderscheiden in dit rapport twee soorten potentieel:

- het technische potentieel, dat mogelijk gerealiseerd kan worden onder de juiste omstandigheden (bijv. beleid, succesvolle technische ontwikkeling, maatschappelijk draagvlak).
- het realistisch potentieel, dat ook rekening houdt met verwachtingen over toekomstige marktomstandigheden, beleid en maatschappelijk draagvlak.

Het inschatten van deze potentiëlen is inherent onzeker, met name voor de lange termijn. We hebben hier te maken met technologieën die nog veel verder onderzoek en innovatie nodig hebben, en de toekomstige markt- en beleidsomstandigheden zijn nog erg onzeker.

In deze studie baseren we ons op de meest actuele (openbare) literatuur en scenariostudies van gerenommeerde instituten om een goede inschatting van deze potentiëlen te kunnen geven. Daarnaast geven we bandbreedtes in de resultaten, om de onzekerheden te laten zien.

2 Behoeftte aan negatieve emissies

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk brengen we de behoefte aan negatieve emissies in kaart. De behoefte aan negatieve emissies komt enerzijds voort uit het doel klimaatneutraliteit in 2050. Uitgangspunt hiervoor zijn de restemissies (zie tekstkader) in verschillende klimaatneutrale scenario's voor Nederland en Europa.

Definitie van restemissies

Zoals in hoofdstuk 1 beschreven, definiëren we restemissies als de emissies van broeikasgassen naar de atmosfeer in een toekomst waarin de doelstelling is dat Nederland klimaatneutraal is. Dit zijn dus de resterende emissies van CO₂ en andere broeikasgassen, na aftrek van eventuele fossiele CO₂ die door CCS is opgevangen.

In alle klimaatneutrale scenario's blijven beperkte restemissies over. Deze restemissies komen voor in sectoren die moeilijk te verduurzamen zijn, zelfs tegen 2050. Om toch de doelstelling van klimaatneutraliteit te verwezenlijken, gaan de verschillende scenario's uit van een bepaalde mate van negatieve emissies om deze restemissies te compenseren. Dit is de 'behoefte' die we in dit hoofdstuk kwantificeren.

De definitie van restemissies zoals gedefinieerd in dit rapport is niet direct uit de klimaatneutrale modellen te destilleren. Dat komt omdat de modellen veelal de netto-restemissies geven (waarbij fossiele CCS en negatieve emissies niet uit elkaar gehaald kunnen worden) of omdat de scenario's betrekking hebben op de volledige koolstofhuishouding van de economie waarbij CO₂ ook wordt opgeslagen in producten of bunkerbrandstoffen (die niet meetellen in de uitstootbalans van Nederland).

Anderzijds komt de behoefte aan negatieve emissies voort uit overschrijding van het koolstofbudget. Uit de IPCC-scenario's blijkt dat negatieve emissies nodig zijn om een eventuele overschrijding van het koolstofbudget, dat bij het Klimaatakkoord van Parijs hoort, te compenseren. Deze zijn dan nodig om in lijn te blijven met het doel om de wereldwijde temperatuurstijging tot 1,5°C te beperken, en komen bovenop de behoefte aan negatieve emissies voor compensatie van restemissies.

2.2 Behoeftte aan negatieve emissies in Nederland

In de volgende paragrafen zullen de restemissies in 2050 worden beschreven. Voor Nederland is voor 2050 gekeken naar ADAPT en TRANSFORM en naar II3050.

2.2.1 Vooronderstellingen van gebruikte scenario's

Aangezien er veel onzekerheid bestaat met betrekking tot de situatie in 2050 zijn in dit rapport de resultaten van verschillende scenario's uit de recente literatuur opgenomen, met uiteenlopende aannames. Inzicht in de behoefte aan negatieve emissies in Nederland is bepaald met behulp van de vier scenario's in II3050 (Berenschot, 2023) en de TNO-scenario's ADAPT/TRANSFORM (2022)³. Voor Europa maken we gebruik van scenario's van de Europese commissie (EC, 2020b). De scenario's geven een beeld van de restemissies -

³ PBL is bezig aanvullende scenario's op te stellen voor klimaatneutraliteit in 2050 (TKVN), maar deze zijn nog niet beschikbaar tijdens dit onderzoek.

oftewel moeilijk te voorkomen emissies - in de verschillende sectoren, onder verschillende aannames.

- **Scope:** II3050 bestaat uit vier scenario's die gericht zijn op een klimaatneutraal energiesysteem. ADAPT/TRANSFORM zijn gericht op de uitvoering van de doelstelling om in 2050 klimaatneutraal te zijn en nemen ook broeikasgasemissies buiten het energiesysteem mee.
- **Tijdpaden:** ADAPT/TRANSFORM heeft uitstootscenario's voor 2030, 2040 en 2050. II3050 heeft alleen betrekking op CO₂, ADAPT/TRANSFORM nemen alle broeikasgassen mee in het model (TNO, 2022a).

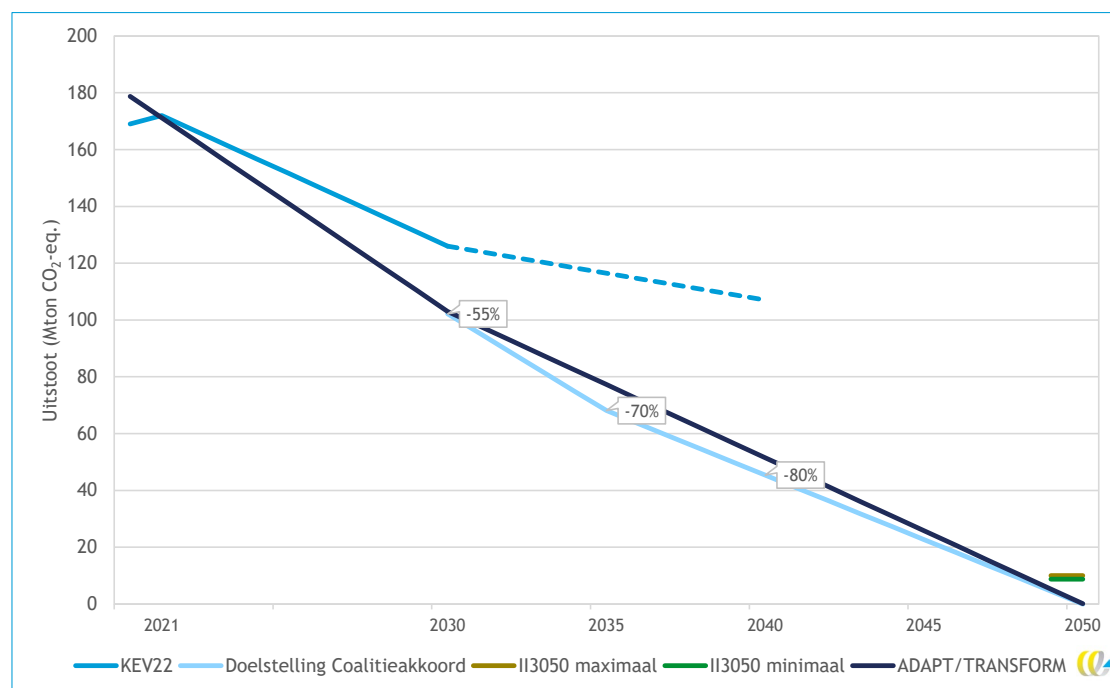
In volgende tabel is weergegeven welke sectoren of aspecten onderdeel uitmaken van de uitstootcijfers in de gebruikte scenario's. Uit de tabel blijkt dat negatieve emissies reeds een integraal onderdeel vormen van elk scenario. Binnen de scenario's zijn deze echter niet altijd expliciet gemaakt. De precieze inkadering van de scenario's en de aannames voor de verschillende sectoren worden in de volgende paragrafen besproken.

Tabel 5 - Overzicht van opgenomen sectoren in emissiescenario's

Uitstoot door:	II3050	ADAPT/TRANSFORM	EU-scenario's
Landbouw en -gebruik	ja	Ja	Ja
Productie internationale bunkers	Nee	Ja	nee
Fossiele brandstoffen als grondstof industrie	Ja (alleen binnenlands deel)	Ja	ja
CCS voor fossiele uitstoot	Ja	Ja	ja
LULUCF	ja	Ja	ja
Negatieve emissie (BECCS en/of DACCS)	Zeet gering	ja	ja

Bij de verschillende scenario's horen ook emissiereductiepaden of -doelstellingen. In Figuur 4 is weergegeven hoe de reductiepaden van ADAPT/TRANSFORM en het huidige Coalitieakkoord eruitzien. ADAPT/TRANSFORM valt nagenoeg samen met de huidige doelstellingen van de Nederlandse regering. Voor II3050 zijn de minimale (scenario internationaal) en maximale (scenario Europees) waardes voor 2050 getoond.

Figuur 4 - Projecties voor broeikasgasuitstoot van Nederland volgens de KEV, het coalitieakkoord (waar ADAPT/TRANSFORM mee samenvalt) en II3050. De lijn van ADAPT/TRANSFORM is gebaseerd op de volledige energie- en grondstoffenbalans



Ter referentie zijn ook de prognose uit de KEV op basis van vastgesteld en voorgenomen beleid in deze figuur opgenomen. Hieruit is duidelijk te zien dat de huidige prognose van emissiereductie niet toereikend is om de doelstelling van (bijna) klimaatneutraliteit in 2050 te halen. Er is dus aanvullend beleid nodig voor emissiereductie richting 2030, maar ook daarna om in lijn te blijven met de in dit rapport gebruikte scenario's. In Bijlage B is verdere duiding gegeven van de emissiereductie in de KEV.

2.2.2 Restemissies in 2050 volgens II3050

II3050 is een integrale infrastructuurverkenning opgesteld in opdracht van Netbeheer Nederland ter oriëntatie op het energiesysteem van 2050 (Netbeheer Nederland, 2021b). In april 2023 wordt er een herziening van II3050 gepubliceerd. De gegevens daarvan zijn reeds in dit rapport opgenomen.

II3050 bevat vier scenario's voor een klimaatneutrale energievoorziening in 2050. De vier scenario's geven de richtingen weer waarin de maatschappij en het (inter-) nationaal beleid zich kunnen ontwikkelen. Op deze wijze zijn er 'vier hoeken van het speelveld' geschetst voor de behoefte aan energie- en infrastructuurvoorziening in 2050. De vier scenario's bouwen voort op de vier sturingsrichtingen uit de eerste versie van II3050. De belangrijkste uitgangspunten van de vier scenario's zijn weergegeven in Figuur 5.

Figuur 5 - Belangrijkste uitgangspunten van de vier scenario's in II3050

	Elektrificatie	Grootschalige duurzame opwek: • Wind • Zonneparken	Kleinschalige duurzame opwek: • Zon op dak • Geothermie	Omvang energie-intensieve industrie en export	Energy hubs, decentr. balans, batterij-opslag, warmtenetten, decentr. P2G	H ₂ ombouw distributienetten
 Decentrale initiatieven	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●
 Nationaal Leiderschap	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●
 Europese Integratie	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●
 Internationale Drijfveren	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●

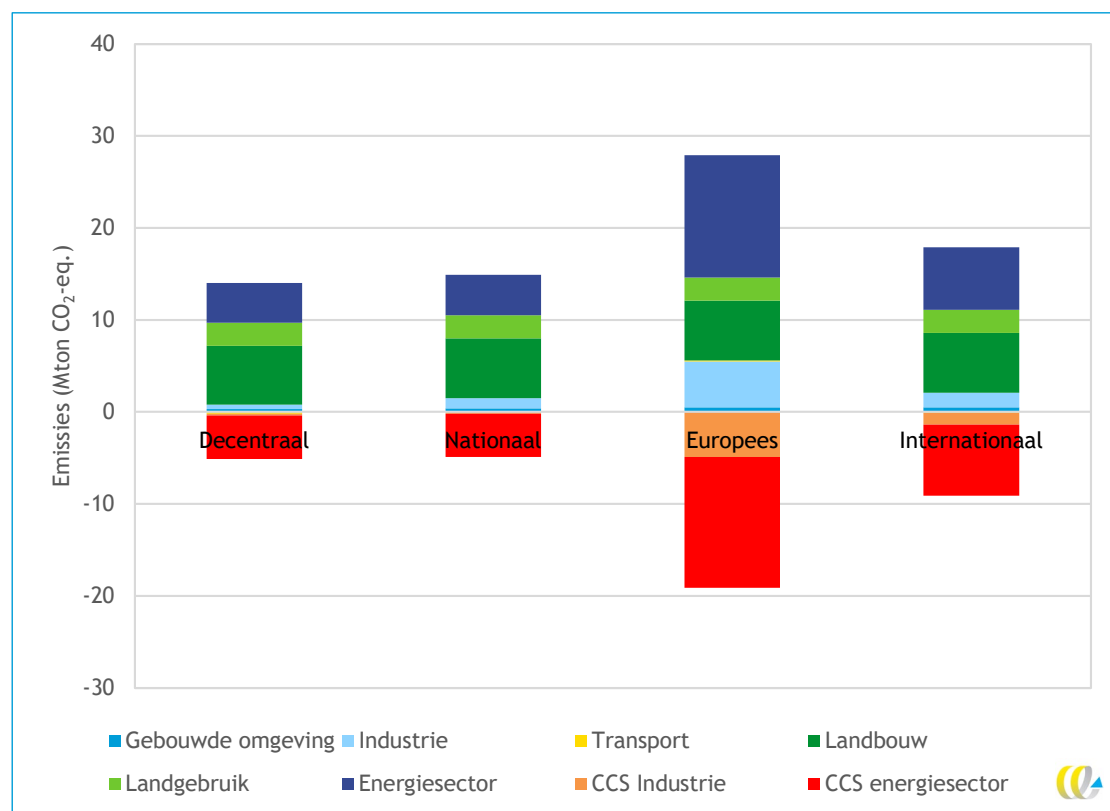
Bron: (Netbeheer Nederland, 2021a).

II3050-2 bevat wel gegevens over de volledige primaire energievraag (inclusief bunkers en export), maar in het onderhavige rapport maken wij alleen gebruik van de binnenlandse energievraag. Dus zonder de bijdrage door export van producten en consumptie van bunkerbrandstoffen. Indien de huidige bunkeringspositie van Nederland behouden blijft (incl. productie) en de overstap gemaakt wordt van fossiel naar hernieuwbaar (nagenoeg volledig waterstof gebaseerd), zou dit wel een groot (additioneel) beslag leggen op de productiecapaciteit van wind op zee. Hiernaast zullen er nieuwe opslagfaciliteiten nodig zijn (Netbeheer Nederland, 2021b). Anderzijds zal de uitstoot van Nederland sterk toenemen als de fossiele energie voor bunkers en export wordt meegeteld op de Nederlandse balans, ook in de II3050 scenario's.

De tweede versie van II3050 bevat ook een uitwerking van reductiemaatregelen in de landbouw. De emissies in die sector en door landgebruik worden voor 2050 geschat op 9 CO₂-eq. Mton. In II3050 wordt geen gebruikgemaakt van DAC en zeer beperkt van BECCS. Er wordt wel fossiele CO₂ afgevangen en opgeslagen. Daarnaast wordt CO₂ geïmporteerd uit het buitenland, wat vervolgens deels wordt gebruikt in de industrie en deels wordt opgeslagen. In de scenario's wordt geen onderscheid gemaakt tussen fossiele CCS en BECCS.

De restemissies per scenario zijn weergegeven in Figuur 6.

Figuur 6 - Restemissies per II3050 scenario (excl. uitstoot voor aardolie ingezet als grondstof voor export en bunkers), CCS is exclusief de geïmporteerde CO₂



De restemissies naar de atmosfeer (dus restemissies per sector na aftrek van CCS) in 2050 bedragen in deze scenario's tussen de 8,8 en 10 Mton CO₂-eq.

Tabel 6 - Restemissies in II3050 zonder bunkers en export (in Mton CO₂-eq.)

	Sector	Decentraal	Nationaal	Europees	Internationaal
Restemissies	Gebouwde omgeving	0,3	0,4	0,5	0,5
	Industrie (voor aftrek CCS)	0,5	1,1	5	1,6
	Transport ⁴	-0,2	0	0,1	-0,1
	Landbouw (niet energetisch)	6,4	6,5	6,5	6,5
	Landgebruik	2,5	2,5	2,5	2,5
	Energiesector (voor aftrek CCS)	4,3	4,4	13,3	6,8
	Totaal restemissies	13,8	14,9	27,9	17,8
CO ₂ -opslag	CCS industrie	-0,2	-0,2	-4,9	-1,3
	CCS energiesector	-4,7	-4,7	-14,2	-7,7
	Totaal CCS	-4,9	-4,9	-19,1	-9,0
Restemissies na aftrek CCS		8,9	10	8,8	8,8

⁴ In sommige scenario's komt transport uit op negatieve restemissies. Dit komt waarschijnlijk voort uit de manier waarop waterstof verrekend wordt, maar voert te ver om hier dieper op in te gaan.

Binnen het energiesysteem, dus exclusief landbouw en landgebruik, zijn deze scenario's zo goed als klimaatneutraal. Uitstoot vindt nog plaats door kolen, aardolie en CO₂-equivalenten in landbouw en landgebruik. In de hier getoonde scenario's van II3050 wordt geen DACCS toegepast. De restemissies per sector worden besproken in Paragraaf 2.3.

2.2.3 Restemissies in 2050 volgens ADAPT en TRANSFORM

ADAPT en TRANSFORM zijn twee door TNO ontwikkelde scenario's die gericht zijn op klimaatneutraliteit voor Nederland in 2050. In die zin vallen de scenario's samen met de huidige coalitiedoelstellingen. Terwijl bij ADAPT de Nederlandse economie haar huidige structuur behoudt en er geen ingrijpende verandering van levensstijl optreedt, is dit bij TRANSFORM juist wel het geval en wordt Nederland daardoor minder energie-intensief (TNO, 2022a). In het TRANSFORM-scenario is verondersteld dat chemicaliën en kunststoffen grotendeels geproduceerd worden uit niet-fossiele koolstof. In het ADAPT-scenario blijven hiervoor fossiele brandstoffen gebruikt worden. Ook is een veel ruimer gebruik van CCS in ADAPT verondersteld dan voor TRANSFORM. De belangrijkste karakteristieken van ADAPT en TRANSFORM zijn weergegeven in Figuur 7.

Figuur 7 - Eigenschappen van ADAPT en TRANSFORM

	ADAPT	TRANSFORM
Nationaal broeikasgasreductiedoel 2030 t.o.v. 1990, excl. LULUCF	55%	55%
Nationaal broeikasgasreductiedoel 2050 t.o.v. 1990, incl. LULUCF	100%	100%
Broeikasgasreductiedoel in 2050 voor internationale luchtvaart (t.o.v. 2005) en scheepvaart (t.o.v. 2008)	50%	95%
Aandeel niet-fossiele koolstof in producten in 2050	0%	90%
Brandstofprijzen	Constant vanaf 2030	Constant vanaf 2030
Industrie		
Energievraag	↑	↓
Productie	↑	↓
Energievraag dienstensector	↑	↑ ↑
Energievraag agrarische sector	↑	↓
Mobiliteitsvraag		
Binnenland	↑	↓
Internationaal	↑	↓
Biomassa beschikbaarheid		
Binnenland	+++	++
Import	+++	++
Gebruik CO ₂ -opslag	+++	+
Gebruik kolencentrales	Nee	Nee

Onderscheidende invoerparameters in de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's

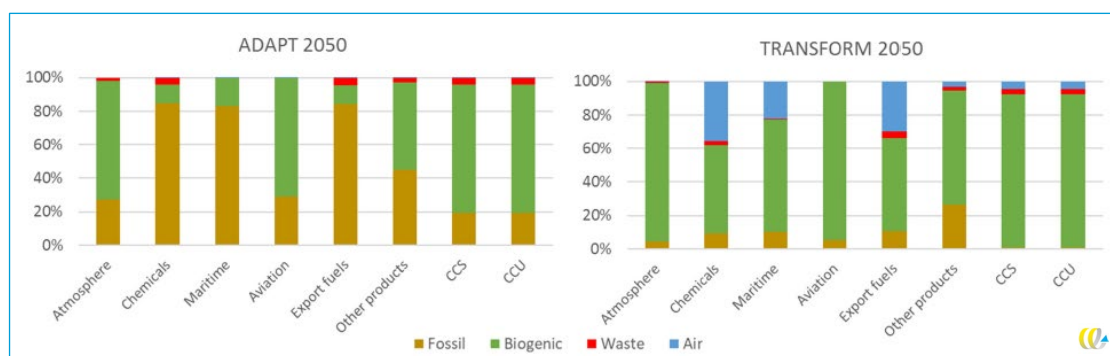
↑ betekent groei, extra groei ↑ ↑ en ↓ krimp; +++ betekent ruime, ++ matige en + beperkte beschikbaarheid

Bron: (TNO, 2022a).

In tegenstelling tot IJ3050 is in de emissiebalans van ADAPT en TRANSFORM wel de uitstoot door productie van brandstoffen voor internationale lucht- en zeevaart opgenomen en ook het niet-energetisch verbruik in de industrie. In ADAPT wordt voor grondstof in de industrie in 2050 nog fossiele koolstof gebruikt, in TRANSFORM wordt naast hergebruik van plastics tevens hernieuwbare koolstof gebruikt (uit biomassa, gerecycled biobased plastics of uit de lucht) waardoor 90% hernieuwbaar wordt.

De netto-uitstoot (van het volledige systeem van energie en grondstoffen) voor ADAPT en TRANSFORM in 2030, 2040 en 2050 is nagenoeg gelijk, omdat ze dezelfde beleidsdoelen als uitstootplafond hanteren. De verdeling over sectoren en de verdeling tussen uitstoot en opname/opslag is verschillend. De eigenschap van de ingezette CO₂ per sector in ADAPT en TRANSFORM is weergegeven in onderstaande figuur. Hier is de afgevangen en opgeslagen CO₂ niet verdisconteerd per sector. Uit de figuur komt wel naar voren dat fossiele koolstof bij ADAPT in 20% tot 80% van de behoefte voorziet, en bij TRANSFORM nog in maximaal 25% (bij 'other products'). De sectorale restemissies zullen voor ADAPT en TRANSFORM hieronder apart worden beschreven.

Figuur 8 - Eigenschap van koolstof per sector voor ADAPT en TRANSFORM in 2050, incl. internationale bunkers. 'Other products' refereert aan koolstof als grondstof in industriële productie buiten de chemische sector (bijv. koolstof bij staalproductie) (TNO, 2022c)



ADAPT

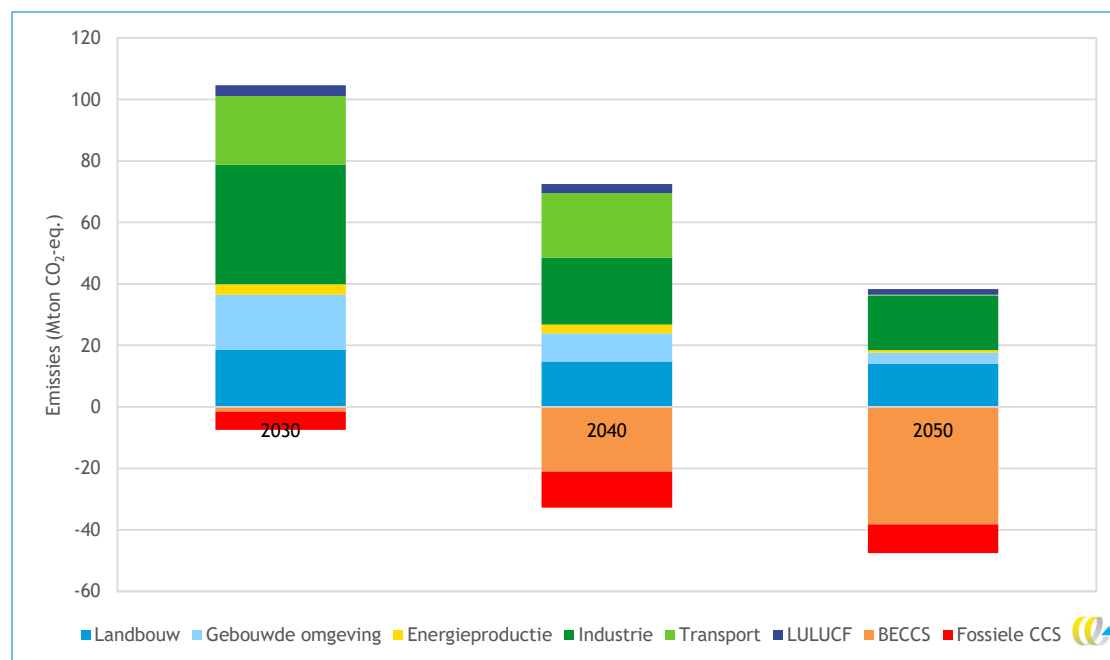
De uitstoot per sector in ADAPT voor 2030, 2040 en 2050 is weergegeven in Tabel 7. In de onderste twee rijen zijn de balans en de restemissies getoond. De uitstootbalans geeft weer dat in 2050 klimaatneutraliteit is bereikt, de restemissies worden dus in het scenario reeds gecompenseerd door negatieve emissies. In dit scenario is het in 2022 aangescherpte klimaatbeleid voor 2030 nog niet meegenomen: zo is het doel voor de industrie aangescherpt naar 34,4 Mton in 2030, terwijl dat in dit scenario nog hoger ligt.

Tabel 7 - Emissies per sector in ADAPT (Mton CO₂-eq.)

	Sector	2030	2040	2050
Restemissies	Landbouw	19	15	14
	Gebouwde omgeving	18	9	4
	Energieproductie	3	3	1
	Industrie (voor aftrek CCS)	39	22	18
	Transport	22	21	0
	LULUCF	4	3	2
	Totaal restemissies	105	73	38
CO ₂ -opslag	Fossiele CCS	-6	-12	-9
	BECCS	-2	-21	-38
	Totaal CCS	-8	-33	-47
Netto-restemissies	Na aftrek fossiele CCS	99	61	29
	Na aftrek fossiele CCS en negatieve emissies	97	40	-9
Volledige energie- en grondstoffenbalans		103	51	0,1

In ADAPT zullen in 2050 alleen de landbouw (14 Mton CO₂-eq.) en de industrie (18 Mton CO₂-eq. zonder CCS) nog voor significante (bruto) emissies zorgen. In het scenario worden de restemissies geheel gecompenseerd door fossiele CO₂-afvang en -opslag en negatieve emissies door middel van 38 Mton/jaar aan BECCS. In ADAPT speelt Direct Air Capture geen rol. Voor grondstof in de industrie wordt nog vrijwel volledig fossiele koolstof gebruikt. Het gebruik van niet-fossiele CO₂ als grondstof is praktisch afwezig, terwijl er dus in 2050 jaarlijks 50 Mton CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen. De uitstootbalans is schematisch weergegeven in Figuur 9. Hier zijn ook de emissies weergegeven die worden afgevangen en opgeslagen of gebruikt.

Figuur 9 - Restemissies per sector in ADAPT voor 2030, 2040 en 2050 (Mton CO₂-eq.)



TRANSFORM

In TRANSFORM zijn de bruto-emissies van de landbouw in 2050 meer dan gehalveerd ten opzichte van ADAPT tot 6 Mton CO₂-eq. De bruto-uitstoot van de industrie is in 2050 beperkt afgenomen ten opzichte van 2040, maar de fossiele koolstof is voor 90% vervangen door niet-fossiele koolstof. Ter compensatie wordt er in 2050 zowel CO₂-opslag, -gebruik als Direct Air Capture ingezet. DAC is weliswaar een dure techniek, maar noodzakelijk om in de schaarste aan koolstof te voorzien. DAC wordt dus vrijwel volledig ingezet om in de grondstoffenbehoefte te voorzien (CCU) en nauwelijks voor permanente opslag (CCS).

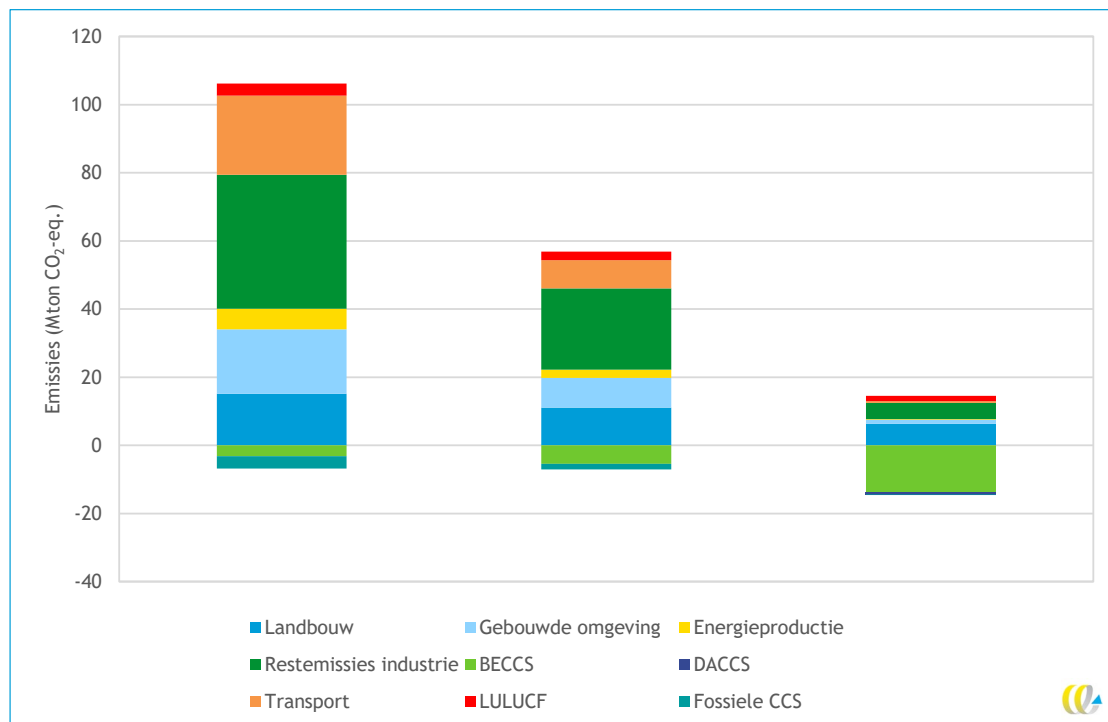
Bij TRANSFORM wordt er in 2050 jaarlijks 15 Mton CO₂ opgeslagen, rond de 30 Mton CO₂ wordt hergebruikt in de chemie. De restemissies bedragen nog ongeveer 14 Mton in 2050, die door de negatieve emissies (in totaal 14,4 Mton/jaar) geheel worden gecompenseerd.

Tabel 8 - Emissies per sector voor TRANSFORM in 2030, 2040, 2050 (in Mton CO₂-eq.)

	Sector	2030	2040	2050
Restemissies	Landbouw	15	11	6
	Gebouwde omgeving	19	9	1
	Energieproductie	6	2	0
	Industrie	39	24	5
	Transport	23	8	1
	LULUCF	3	3	2
	Totaal restemissies (zonder fossiele CCS en BECCS/DACCS)	106	57,9	14,5
CO ₂ -opslag	Fossiele CCS	-4	-2	-0,12
	BECCS	-3,16	-5,4	-13,73
	DACCS	0	0	-0,71
	Totaal CCS	-7	-7	-15
Netto-restemissies	Na aftrek fossiele CCS	103	55	14
	Na aftrek fossiele CCS en negatieve emissies	99	50	0
Volledige energie- en grondstoffenbalans		103	51	0,1

De uitstootbalans is schematisch weergegeven in Figuur 10. Hier zijn ook de emissies weergegeven die worden afgevangen en opgeslagen of gebruikt.

Figuur 10 - Emissies per sector in TRANSFORM voor 2030, 2040 en 2050 (Mton CO₂-eq.)



2.3 Oorzaken van restemissies per sector

Alle klimaatneutrale scenario's bevatten nog CO₂-eq.-restemissies, vooral in industrie (CO₂) en landbouw (CH₄). De verdeling per sector en de oorzaken zullen voor industrie en landbouw hieronder afzonderlijk beschreven worden. De restemissies in transport (minder dan 1 Mton CO₂) vinden plaats bij enkele in de scenario's niet nader omschreven modaliteiten.

De emissies per sector ontwikkelen zich in alle scenario's volgens dezelfde principes.

- 1. Restemissies uit elektriciteitsproductie.** De uitstoot van veel sectoren hangt samen met hun energieverbruik. Een kernvraag daarbij is of de elektriciteitsproductie klimaatneutraal kan worden. Technisch kan dit ruim voor 2050 (in 2035 al bijvoorbeeld). Alle scenario's gaan er daarom vanuit dat tegen 2050 de elektriciteitsvoorziening (nagenoeg) volledig klimaatneutraal is.
- 2. Restemissies uit de landbouw.** De belangrijkste bron van uitstoot van broeikasgassen in de landbouw is de veeteelt, daarbij gaat het hoofdzakelijk om lachgas en methaan. Afbouw van de veeteelt is veruit de belangrijkste maatregel om broeikasgasuitstoot in de landbouw te verminderen. Daarmee wordt zowel rechtstreekse uitstoot door de dieren als uitstoot via mestaanwending voorkomen. Daarnaast is afbouw van fossiele energie die gebruikt wordt voor voertuigen (zoals tractoren), gebouwen (ventilatie van veestallen) en in de glastuinbouw (verwarming en verlichting) belangrijk om rechtstreekse CO₂-uitstoot te verminderen.
- 3. Restemissies uit de industrie.** Restemissies in de industrie zijn met name afhankelijk van resterend fossiel energie en -grondstoffenverbruik. Alle hier gebruikte scenario's gaan ervan uit dat in 2050 een deel van de fossiele CO₂-emissies in de industrie worden afgevangen, maar zolang er gebruik wordt gemaakt van fossiele energie en grondstoffen zal er uitstoot plaatsvinden. Met name in ADAPT en TRANSFORM zien we dat effect. Als de industrie niet geheel fossielvrij wordt zijn de restemissies in Nederland ook

afhankelijk van de toekomstige ontwikkelingen in de Nederlandse industrie. De eerste bepalende factor is de energie-intensiteit van de toekomstige industrie. Restemissies zullen lager zijn als de huidige energie-intensieve industrie (zoals staal-, zink- en aluminiumproductie) in Nederland vermindert of verdwijnt, en overige industrie (zoals de papier- en voedingsindustrie) efficiëntie- en verduurzamingsmaatregelen doorvoert. Als bepaalde industrieën verdwijnen, betekent dit dat Nederland producten zoals staal en aluminium zal importeren. Het voorkomen van carbon leakage, d.w.z. verplaatsing van CO₂-uitstoot naar het buitenland, is dan een aandachtspunt. De tweede belangrijke ontwikkeling is de omschakeling naar biogebaseerde grondstoffen en recyclage, zowel uit oogpunt van klimaatbeleid als ook om circulaire economie te creëren. De huidige fossiele raffinage, bijvoorbeeld, zal op termijn volledig verdwijnen. In plaats daarvan kan biogebaseerde raffinage worden ontwikkeld, en nieuwe industrie rond verregaande recyclage (bijvoorbeeld hoogwaardige chemische recycling) en hergebruik. Hoe minder fossiele grondstoffen in de industrie gebruikt worden, hoe lager de restemissies en hoe lager de behoefte voor afvang van fossiele CO₂.

4. **Restemissies gebouwde omgeving en (nationale) mobiliteit.** De emissies in deze sectoren zijn hoofdzakelijk afhankelijk van de mate waarin hun energievoorziening klimaatneutraal wordt. Gezien de energievoorziening tegen 2050 volgens alle scenario's nagenoeg volledig klimaatneutraal kan worden, zijn de restemissies in deze sectoren laag. Dit gaat gepaard met veel elektrificatie (van warmte en mobiliteit) in combinatie met hernieuwbare elektriciteitsproductie, aangevuld met andere hernieuwbare energiebronnen. De belangrijkste sectorspecifieke vragen zijn de mate van verduurzaming van de warmtevoorziening, van efficiëntie, met name isolatie, in de gebouwde omgeving en het aantal reisbewegingen voor de nationale mobiliteit.
5. **Restemissies internationale luchtvaart en zeevaart.** Deze emissies worden vaak niet aan een land toegekend, maar dragen wel bij aan de mondiale uitstoot en dus aan de opwarming van de aarde. Er is nog veel onzekerheid hoe, wanneer en of deze sectoren netto-nul-emissies zullen bereiken. Gezien hun internationaal karakter, is beleid moeilijk en daarmee ook het creëren van prikkels om uitstoot te beperken. Bij de verdeling van het mondiale koolstofbudget is 21,7 Gton in mindering gebracht voor internationale luchtvaart en zeevaart. De veronderstelling is daarbij wel dat deze sectoren in 2050 klimaatneutraal zijn. Zal dat niet het geval zijn, betekent dat een grotere overshoot en een groter aandeel benodigde negatieve emissies.

Industrie

Noch II3050, noch ADAPT/TRANSFORM gaat uit van het verdwijnen van de grote industrieën in Nederland (staal, chemie, kunstmest, raffinage). In de scenario's worden voor deze sectoren verschillende duurzame ontwikkelpaden geschetst, die we hieronder samenvatten.

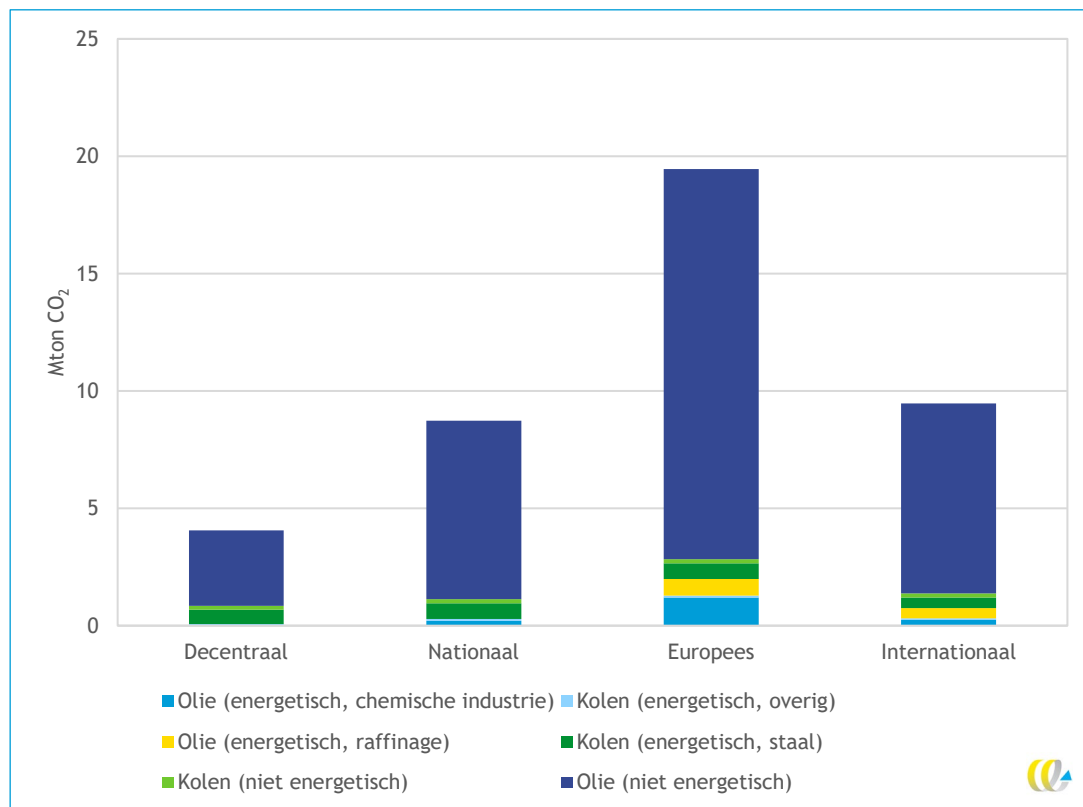
Koolstof zal nodig blijven als grondstof in de chemische industrie en het is lastig om dit volledig met een niet-fossiele variant in te vullen. Veel van de hieraan gerelateerde emissies worden echter niet meegeteld de uitstoot van de sector industrie, omdat deze deels onder scope 3 vallen. Bovendien verdwijnt een groot deel van de producten (en daarmee de koolstof) naar het buitenland (waar het uiteindelijk verwerkt wordt en de CO₂ wel vrijkomt). Het deel dat in Nederland in AVI's wordt verbrand telt wel mee.

Industrie (II3050)

In de industrie blijft er een behoefte aan koolstof en het is nog niet volledig bekend of alle processen op circulair of biogeen kunnen draaien in plaats van op fossiele grondstoffen (TNO, 2022a). De II3050 scenario's gaan ervan uit dat er in de staalindustrie ook in 2050 nog een klein deel kolen wordt gebruikt, hoewel het overgrote deel van de energie en grondstof

in die sector uit (groene) waterstof bestaat. In geen van de II3050-scenario's is er nog een non-ferro-metaalindustrie (o.a. aluminium) in Nederland. Er wordt in II3050 voorzien dat nog een klein deel aardolie in de raffinagesector wordt gebruikt en ook in de transport-sector wordt nog een klein deel aardolie gebruikt.

Figuur 11 - Restemissies in de industrie per fossiele energiedrager in II3050 (zonder bijdrage CCU/S)

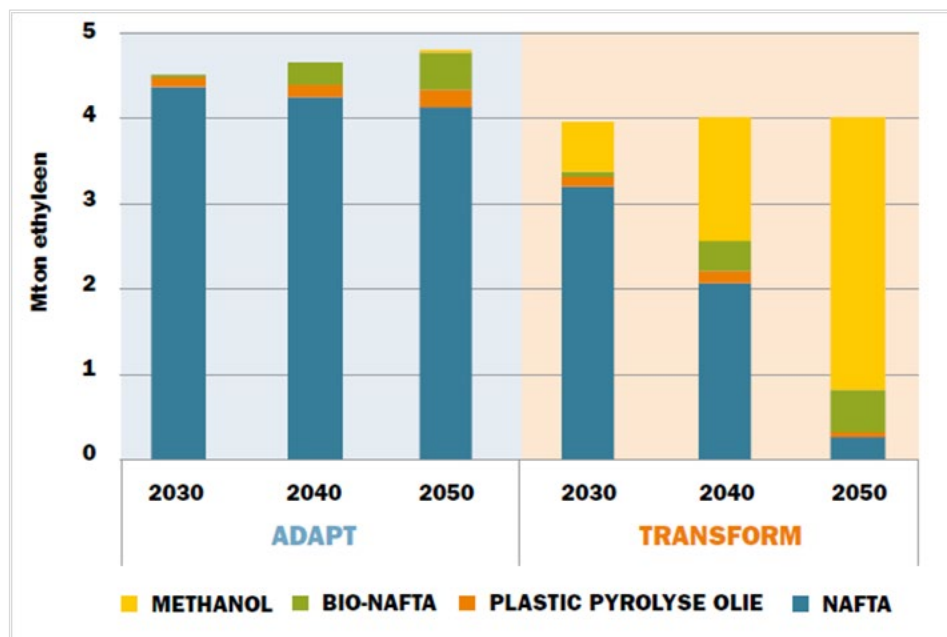


Industrie (ADAPT/TRANSFORM)

In ADAPT/TRANSFORM zorgt de industrie nog voor 5 tot 8 Mton CO₂-uitstoot (incl. CCS, exclusief negatieve emissies en grondstoffen). De staalproductie maakt in ADAPT gebruik van kolen in combinatie met CCS. In TRANSFORM wordt voor de staalproductie gebruikgemaakt van een elektrochemisch proces (TNO, 2022a). De kunstmestindustrie maakt in ADAPT ook gebruik van afvang van CO₂, terwijl in TRANSFORM (groene) waterstof wordt ingezet. In ADAPT/TRANSFORM zijn grondstoffen en bunkerbrandstoffen integraal opgenomen. In ADAPT zijn de emissies van internationale brandstoffen met 50% afgenomen, in TRANSFORM met 95%. Een belangrijk verschil met II3050 is dat in ADAPT/TRANSFORM de productie van bunkers en (export van) chemische producten volledig is opgenomen in de uitstootbalans van het scenario.

In Figuur 12 is de opbouw van grondstoffen in de ethyleenproductie weergegeven in zowel het ADAPT- als TRANSFORM-scenario. Ethyleen kan als representatief worden gezien voor de belangrijkste groep basischemicaliën die de Nederlandse industrie produceert (TNO, 2022a). Uit deze groep worden onder meer kunststoffen gemaakt.

Figuur 12 - Ethyleenproductie in ADAPT/TRANSFORM



Bron: (TNO, 2022a).

In ADAPT/TRANSFORM wordt de behoefte aan koolstof deels ingevuld met fossiel (nafta), maar speelt ook biomassa, e-methanol en recycling een grote rol. In TRANSFORM is aangenomen dat al het plastic in Nederland wordt gerecycled (chemisch dan wel mechanisch) en het verbruik van aardolie als grondstof is al geminimaliseerd (nog 3 Mton CO₂ in grondstofgebruik), maar *virgin* fossiel blijft vooralsnog nodig voor sommige producten, omdat niet duidelijk is of alle processen in staat zijn te draaien 100% niet-fossiele koolstof. De reeds zeer ingrijpende transformatie van de economie in dat scenario duidt erop dat dit de absolute ondergrens is.

In ADAPT/TRANSFORM wordt de behoefte aan koolstof deels ingevuld met fossiel (nafta), maar speelt ook biomassa, e-methanol en recycling een grote rol. In TRANSFORM is aangenomen dat al het plastic in Nederland wordt gerecycled (chemisch dan wel mechanisch) en het verbruik van aardolie als grondstof is al geminimaliseerd (nog 3 Mton CO₂ in grondstofgebruik), maar *virgin* fossiel blijft vooralsnog nodig voor sommige producten, omdat niet duidelijk is of alle processen in staat zijn te draaien 100% niet-fossiele koolstof. De reeds zeer ingrijpende transformatie van de economie in dat scenario duidt erop dat dit de absolute ondergrens is.

Landgebruik en Landbouw

Landbouw (vooral akkerbouw en veeteelt) en landgebruik zorgen naar verwachting nog voor enkele CO₂-eq restemissies in 2050, ondanks een afname vanaf 2030. De glastuinbouw maakt volgens de scenario's gebruik van duurzame warmte in 2050. In II3050 worden emissies aangehouden voor de landbouw van ca. 6,4 Mton CO₂-eq. Dit cijfer is gebaseerd op een halvering van de uitstoot ten opzichte van 2017.

Een ingrijpende verandering van de landbouwsector (en het wereldwijd dieet) zou de uitstoot in die sector verder kunnen verlagen. Dit is echter afhankelijk van de maatschappelijke en economische structuur die verwezenlijkt wordt in 2050. Hiernaast is het mogelijk

dat de productie van voedsel verplaatst naar buiten de EU met risico's voor voedselveiligheid, koolstoflekage en ontbossing.

TRANSFORM gaat uit van enige gedragsverandering waardoor een verkleining van de vee-stapel wordt gerealiseerd.

Recent heeft ook de WUR prognoses gemaakt van de emissies van landbouw en landgebruik in Nederland (WUR, 2023a)). Deze zijn samen met de prognoses uit II3050 en ADAPT/TRANSFORM gegeven in Tabel 9. De restemissies in de scenario's liggen in dezelfde ordegrrootte, al komen de restemissies van landbouw wel duidelijk hoger uit dan in de andere scenariostudies. Hierbij moet echter ook worden opgemerkt dat de studie van de WUR een duidelijk andere doelstelling en opzet heeft, de resultaten zijn dan ook niet direct vergelijkbaar. In het vervolg van dit rapport gaan we derhalve uit van emissies uit de II3050 en TNO-scenario's.

De WUR studie geeft wel een concreter beeld van waar de restemissies in deze sectoren vandaan komen, deze zijn met name afkomstig van:

- Methaanemissies veehouderij. Bij koeien gaat dit met name om pensfermentatie. Naast een vermindering van het aantal koeien zijn voeradditieven en het fokken op lage methaanemissie belangrijke maatregelen. In de varkenshouderij heeft methaan uit mestopslagen en mestbewerking de grootste emissie, stalaanpassingen zijn belangrijk om dit te verminderen.
- Lachgasemissies (N₂O) uit bodems, afkomstig van bemesting (met name kunstmest, dierlijke mest en weidemest). Deze emissies nemen in de WUR scenario's af door o.a. toepassing van grasklaver, efficiëntere bemesting en nitrificatieremmers.
- Emissies uit veenweidegebied door ontwatering.

Tabel 9 - Restemissies van landbouw en landgebruik in 2050 in verschillende scenario's (Mton CO₂-eq./jaar)

	II3050	ADAPT	TRANSFORM	WUR-referentie-scenario	WUR-scenario maximale reductie
Landbouw	6,5	14	6	18	10
Landgebruik	2,5	2	2	2	0,2

2.3.1 Conclusie: behoefte aan negatieve emissies in Nederland

De in deze paragraaf geanalyseerde scenario's hebben tot doel een (bijna) klimaatneutrale economie te realiseren in 2050. Voor alle scenario's is uitgangspunt dat de belangrijke industrieën, zoals staal, chemie en kunstmest behouden blijven en verduurzamen. Het zijn vooral de grootgebruikers van fossiel (staal, kunstmest, raffinage) die in de klimaatneutrale scenario's overstappen naar duurzame processen op basis van elektriciteit, waterstof en biomassa. Toch houden alle scenario's nog rekening met een beperkte hoeveelheid aardolie in de raffinage- en transportsector en ADAPT gaat uit van een beperkte hoeveelheid kolen in de staalindustrie. De landbouw blijft door veeteelt en akkerbouw verantwoordelijk voor niet-fossiele broeikasgasuitstoot.

In elk scenario blijven daarmee beperkte restemissies over, vooral in industrie en landbouw/landgebruik. In ADAPT/TRANSFORM worden alle restemissies gecompenseerd door negatieve emissies, inclusief de grondstoffenstroom voor bunkerbrandstoffen en export van chemische producten, waardoor de totale energie- en grondstoffenbalans op nul emissies uitkomt. De in dit rapport opgenomen scenario's van II3050 maken de negatieve emissies niet expliciet, en nemen ook de grondstoffen voor bunkers en export niet mee.

In Tabel 10 zijn de restemissies per scenario gegeven, evenals de hoeveelheid CCS waarvan is uitgegaan. De restemissies na aftrek van fossiele CCS vormen de behoefte aan negatieve emissies. In de vier II3050-scenario's is de hoeveelheid BECCS niet expliciet opgenomen, dus zouden deze nog bij deze behoefte moeten worden opgeteld.

Tabel 10 - Restemissies, CCS en behoefte aan negatieve emissies per scenario in 2050 in Mton CO₂-eq.

Emissies	II3050				TNO	
	Decentraal	Nationaal	Europees	Internationaal	ADAPT	TRANSFORM
Totaal restemissies (voor aftrek CCS)	13,8	14,9	27,9	17,8	38,4	14,5
CCS uit fossiel (*)	-4,9	-4,9	-19,1	-9,0	-9,3	-0,1
CCS uit BECCS/DACCS	niet expliciet	niet expliciet	niet expliciet	niet expliciet	-38,0	-14,4
Restemissies na aftrek fossiele CCS = behoefte aan negatieve emissies	8,9 (+)	10,0 (+)	8,8 (+)	8,8 (+)	29,1	14,4

(*) In de II3050-scenario's is geen onderscheid gemaakt tussen fossiele CCS, BECCS en DACCS. In deze tabel is alle CCS onder fossiele CCS geschaard.

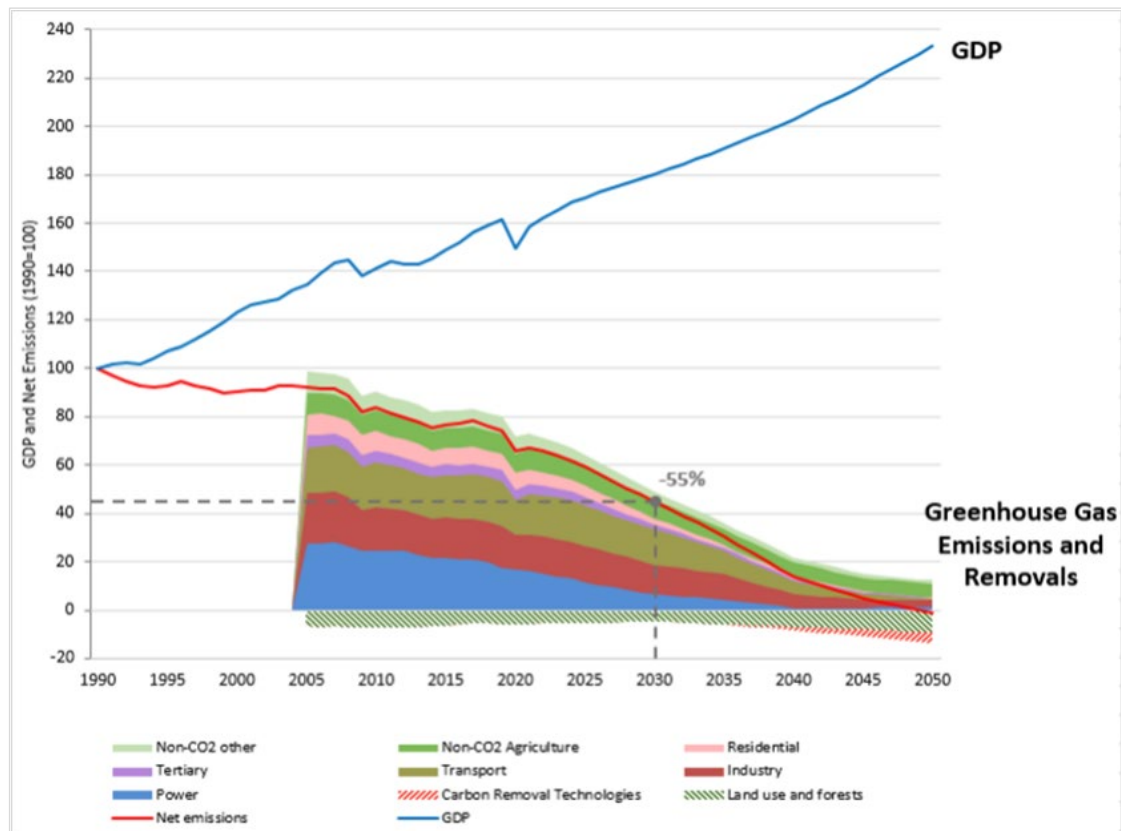
(+) Plus BECCS in scenario.

2.4 Behoefte aan negatieve emissies in Europa

In deze paragraaf wordt in kaart gebracht hoe de behoefte aan negatieve emissies eruitziet voor de EU. Hierbij wordt gekeken naar enkele scenario's van de Europese Commissie, gericht op 2050.

De huidige doelstelling van de EU is om in 2030 55% van de uitstoot te reduceren en in 2050 de situatie van klimaatneutraliteit te realiseren. Hierbij wordt uitgegaan van een stabiele stijging van het BBP en een omgekeerd evenredige reductie van de broeikasgasuitstoot, zie Figuur 13. De sectoren die momenteel de meeste uitstoot genereren (elektriciteit, industrie en transport) zullen tegen 2050 vrijwel volledig verduurzaamd zijn. Uit de grafiek komt ook naar voren dat er een toename van koolstofopname door land en bos wordt voorzien evenals een toepassing van negatieve-emissietechnologie vanaf eind jaren '30.

Figuur 13 - EU-scenario richting klimaatneutraal in 2050 (voornamelijk gebaseerd op het MIX-scenario dat gericht is op 2030)

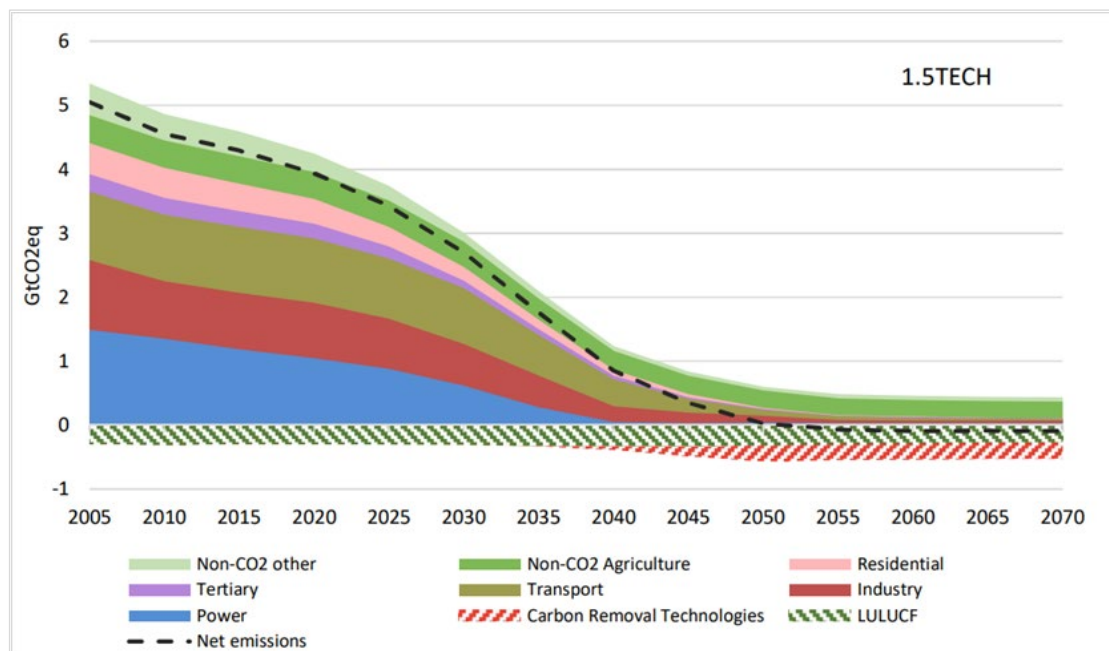


Bron: (EC, 2020b).

Voor het bereiken van klimaatneutraliteit in 2050 heeft de Europese Commissie drie scenario's ontwikkeld: 1.5TECH, 1.5LIFE en 1.5LIFE-LB. Alle drie leveren ze (incl. LULUCF) een 100% CO₂.eq.-reductie op ten opzichte van 1990. Het eerste scenario wordt voornamelijk gerealiseerd dankzij technologische oplossingen en ook BECCS speelt een grote rol. In 1.5TECH wordt meer dan 200 Mton CO₂ jaarlijks uit de lucht gehaald en bijna 300 Mton wordt jaarlijks onder de grond opgeslagen. Het tweede scenario gaat meer uit van een veranderend consumptiepatroon en een circulaire economie. Het derde scenario is een gevoeligheidsanalyse die gebaseerd is op 1.5LIFE, maar waarin de bijdrage van biomassa gereduceerd is en er weer meer nadruk ligt op technologie. In alle scenario's is de toename van LULUCF cruciaal (EC, 2018b, 2020b). De restemissies variëren in 2050 van 541 Mton in 1.5LIFE tot 602 Mton in 1.5TECH.

Ter illustratie zie Figuur 14, waarin de (rest)emissies en de negatieve emissies zijn gegeven richting en na 2050 voor 1.5TECH. 1.5LIFE heeft een grotere bijdrage van LULUCF en kleinere bijdrage van negatieve-emissietechnologie.

Figuur 14 - Restemissies en negatieve emissies richting en na 2050 voor 1.5TECH

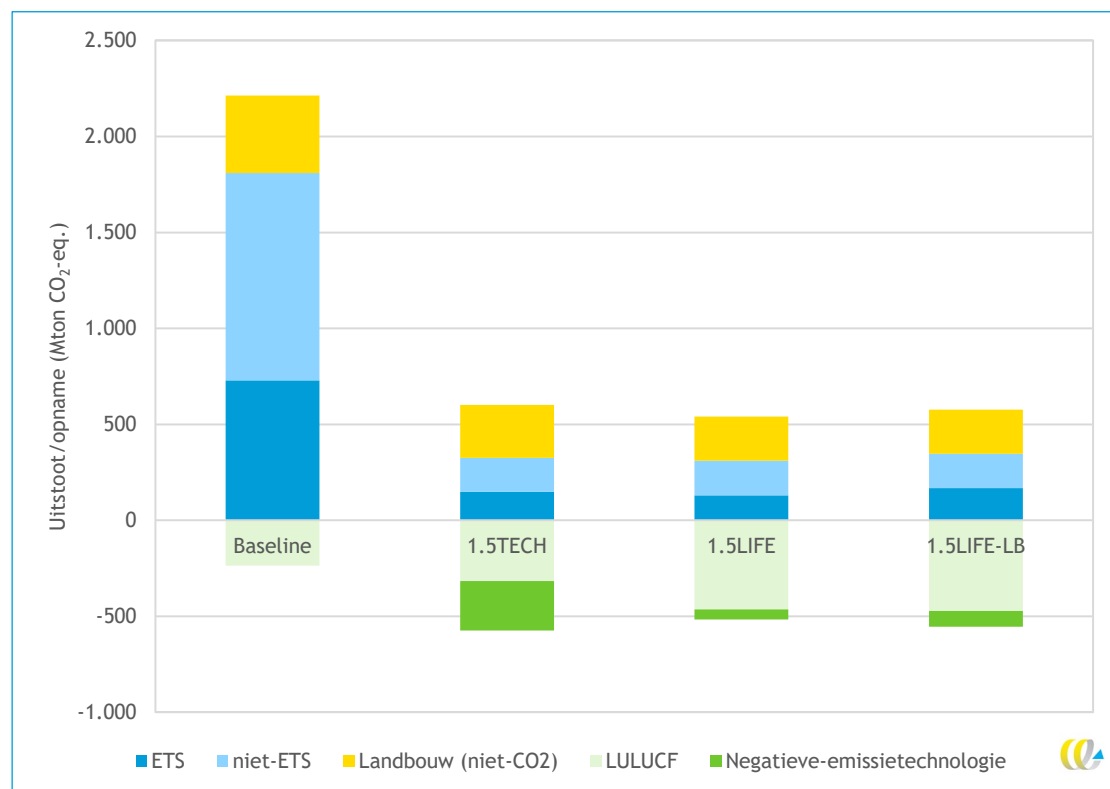


Bron: (EC, 2020b).

2.4.1 Restemissies per sector

In Figuur 15, is per scenario de uitstootbalans in 2050 weergegeven, verdeeld tussen ETS, niet-ETS, landbouw en negatieve emissies. Hierbij is de volledige industrie en elektriciteits-sector als ETS-plichtig opgevat. Ter vergelijking is ook het baseline 2050-scenario getoond dat uitgaat van de EU-doelstellingen van vóór de EU Green Deal (40% reductie in 2030, en nog weinig aanvullend beleid voor de periode erna).

Figuur 15 - Uitstootbalans EU in 2050 volgens baseline en drie klimaatneutrale scenario's



Elk klimaatneutraal scenario heeft in 2050 nog restemissies, door zowel ETS als niet-ETS-sectoren en de landbouw, zie Tabel 11. De restemissies liggen tussen de 541 en 602 Mton in 2050. De scenario's zijn wel zo opgesteld dat een groot deel van de restemissies reeds gecompenseerd wordt door LULUCF en negatieve emissies. De cijfers achter Figuur 15 zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 - Sectorale emissies en uitstootbalans in de EU in 2050 per scenario (in Mton CO₂-eq.)

		Baseline	1.5TECH	1.5LIFE	1.5LIFE-LB
Restemissies	Gebouwde omgeving	130	12	11	13
	Dienstensector	78	19	19	19
	Transport	667	86	95	90
	Industrie	484	110	100	106
	Energiesector	246	38	30	62
	Niet-CO ₂ (landbouw)	404	277	230	230
	Niet-CO ₂ (anders, vnl. afval)	205	60	56	56
	Totaal restemissies	2.214	602	541	576
Negatieve emissies	LULUCF	-236	-317	-464	-472
	Negatieve-emissietechniek	0	-258	-53	-82
Uitstootbalans		1.978	27	24	22

Fossiel verbruik in 2050

Fossiel verbruik komt voor in verschillende sectoren en wordt vooral veroorzaakt door aardolie als grondstof en in mindere mate aardgas. De verdeling van fossiele energiedragers per sector is weergegeven in Tabel 12. Aardolie wordt voor een groot deel nog toegepast in de chemische industrie als grondstof en voor een klein deel in de transportsector (luchtvaart, zwaar transport, binnenvaart). De gegevens betreffen consumptie dus een deel van uitstoot wordt opgevangen met CCS.

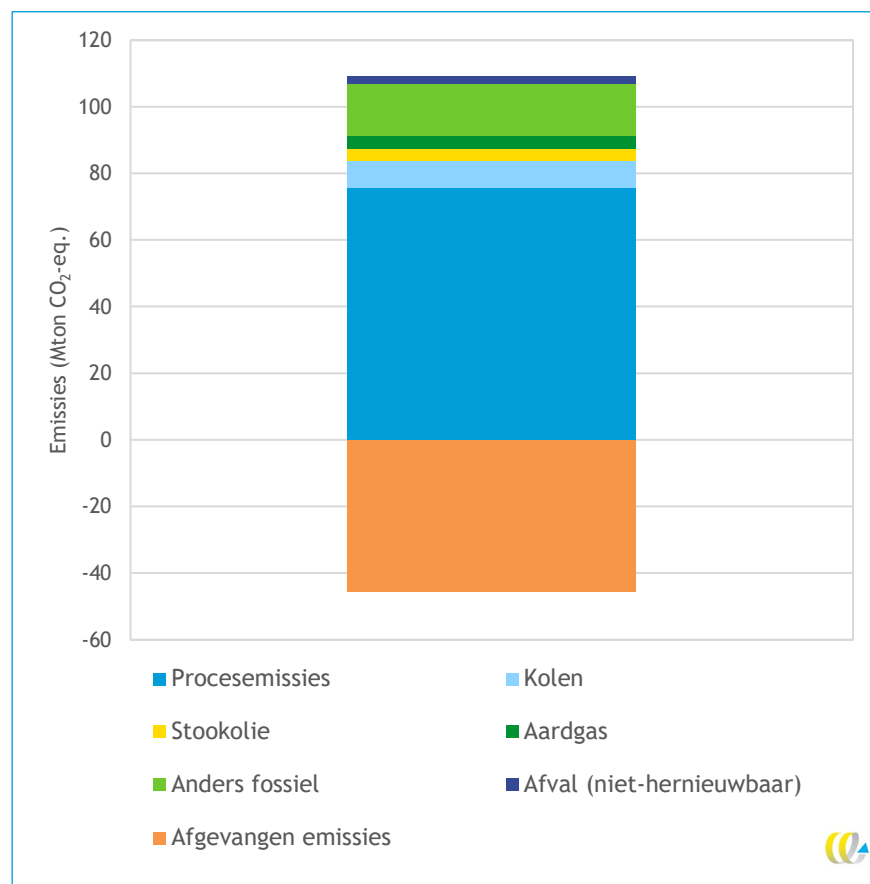
Tabel 12 - Consumptie van fossiele energiedragers per sector (Mtoe, voor het 1.5LIFE-LB-scenario (dat veel overeenkomsten vertoont met 1.5LIFE) waren geen gegevens beschikbaar)

Mtoe		Baseline	1.5TECH	1.5LIFE
Aardgas	Niet-energetisch	20	15	15
	Energie	80	31	13
	industrie	64	4	4
	Gebouwde omgeving	75	7	7
	Transport	16	4	3
	Anders energie	4	1	1
	<i>Totaal</i>	<i>259</i>	<i>62</i>	<i>43</i>
Aardolie	Transport	208	26	30
	Grondstof	218	165	161
	<i>Totaal</i>	<i>425</i>	<i>191</i>	<i>191</i>
Kolen	Gebouwde omgeving	0,6	0,5	0,4
	Overig	25,4	1,4	1,1
	<i>Totaal</i>	<i>26</i>	<i>1,9</i>	<i>1,5</i>
Totaal fossiel		710	255	236

Industrie

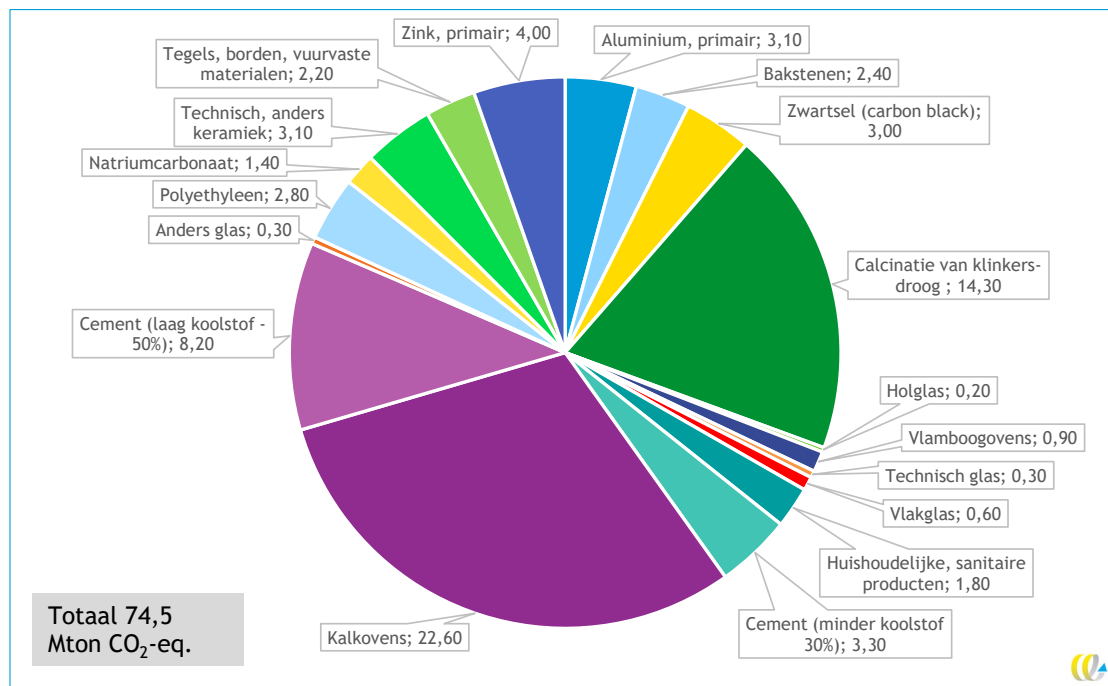
Verdere specificatie van de fossiele restemissies in de door PRIMES ontwikkelde 1.5TECH- en 1.5LIFE-scenario's is niet beschikbaar. Dit is wel het geval voor het FORECAST-model dat ook onderdeel uitmaakt van de 2050 langetermijnstrategie, maar een meer bottom-up-aanpak heeft. Binnen FORECAST vertoont het Mix95-scenario qua doelstelling de meeste overeenkomsten met 1.5TECH en 1.5LIFE. In het Mix95-scenario zijn het nog voornamelijk procesemissies die uitstoot genereren in 2050, zie Figuur 16. De uitstootbalans voor de industrie ligt rond de 64 Mton CO₂-eq.

Figuur 16 - Uitstoot en afvang in de EU-industrie in Mix95-scenario in 2050



De procesemissies (totaal 74,5 Mton CO₂-eq.) komen voor in een hele reeks van voornamelijk kleinschalige industriële sectoren zoals de klinker-, tegel- en baksteenindustrie-, de glassector, de (duurzame) cementindustrie en de non-ferro-metaalindustrie.

Figuur 17 - Procesemissies per deelsector (in Mton CO₂-eq.)



Niet-CO₂-uitstoot komt in 2050 voornamelijk door afval (CH₄ en N₂O) en koeling, airconditioning en blusschuim (F-gassen). Een klein deel van de uitstoot is nog toe te schrijven aan transport en distributie van aardgas en raffinage.

Landbouw en landgebruik

De belangrijkste bron van niet-CO₂-broeikasgas is in 1.5LIFE en 1.5TECH de landbouw (vooral akkerbouw en veeteelt). Hoewel er noodzaak is om de uitstoot van de sector zo veel mogelijk te reduceren, wijst de Europese Commissie ook op het risico voor de voedselzekerheid en het risico dat landbouw verplaatst naar landen met lagere klimaatambities, wat leidt tot koolstoflekkage (EC, 2018b). Een aanpassing in het dieet, minder voedselverspilling en verschillende technische of efficiëntie maatregelen in veeteelt en management kunnen een bijdrage leveren aan het verminderen van de broeikasuitstoot in de landbouw.

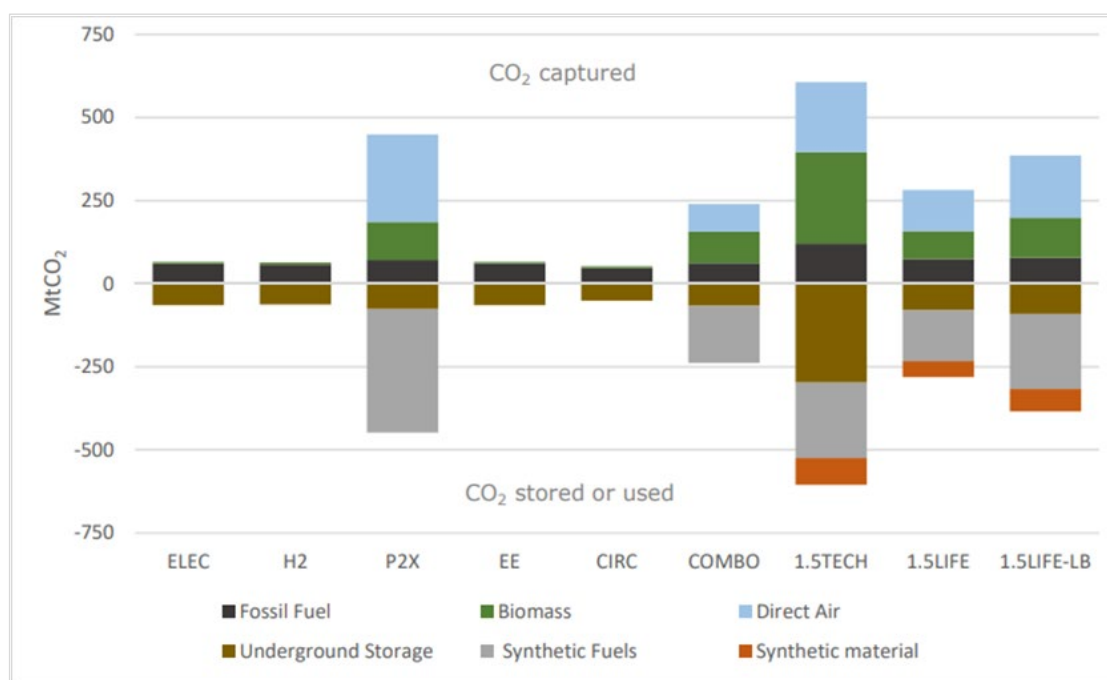
In beide klimaatneutrale scenario's (1.5LIFE en 1.5TECH) wordt er minder Europese grond gebruikt voor landbouw, terwijl er meer bosbouw plaatsvindt er een deel van het land gebruikt wordt voor de teelt van energiegewassen.

CCS/U en negatieve emissies

Zoals beschreven, wordt er in de scenario's CCS toegepast, maar ook hergebruik van CO₂ en negatieve emissies. Bij de 1.5TECH- en 1.5LIFE-scenario's wordt de behoefte aan koolstof vervuld met fossiel, biomassa en DAC. Hiervan wordt een deel onder de grond opgeslagen, een deel gebruikt voor synthetische brandstoffen en een deel voor synthetisch materiaal. Hiervan telt alleen de ondergronds opgeslagen CO₂ min de fossieluitstoot als negatieve emissie. De negatieve emissies genoemd in Tabel 11 komen overeen met dit aandeel.

Voor de genoemde scenario's - maar ook voor andere, niet in dit rapport behandelde scenario's - is de balans voor CO₂ (af)gevangen en opgeslagen/gebruikt, weergegeven in Figuur 18.

Figuur 18 - CO₂-balans met CO₂-afvang, -opslag en -gebruik in 2050 voor verschillende scenario's



Bron: (EC, 2020a).

2.4.2 Conclusie: behoefte aan negatieve emissies in de EU

In alle scenario's zitten restemissies in de industrie, transport en landbouw, deze blijven bestaan na 2050 maar worden grotendeels gecompenseerd door LULUCF en negatieve emissies. In de industrie vindt nog beperkte uitstoot plaats in chemie en verscheidene kleine sectoren. In de landbouw worden restemissies veroorzaakt door niet-fossiele uitstoot van veeteelt en akkerbouw. Deze uitstoot is nauw verweven met de voedselvoorziening.

Na 2050 voorzien de scenario's geen verdere reductie van de uitstoot, maar een relatief constant niveau van de restemissies, variërend van 541 Mton in 1.5LIFE tot 602 Mton in 1.5TECH. Ook de bijdrage van LULUCF en negatieve emissies blijft na 2050 constant.

2.5 Compensatie van overshoot: Negatieve emissies wereldwijd bij een koolstofbudget voor 1,5°C

In dit onderdeel is de wereldwijde behoefte aan negatieve emissies gekwantificeerd aan de hand van verschillende koolstofbudgetten voor een maximale opwarming van 1,5°C. De koolstofbudgetten zijn gebaseerd op de meest recente IPCC-rapporten.

Eerst wordt het koolstofbudget toegelicht en de rol die negatieve emissies daarbij (kunnen) spelen. Vervolgens wordt beschreven welke bijdrage Europa en Nederland kunnen leveren aan de noodzakelijke negatieve emissies, horend bij het koolstofbudget. Dit wordt in dit hoofdstuk niet als technisch vraagstuk besproken maar als verdelingsvraagstuk.

2.5.1 Het koolstofbudget

Een koolstofbudget gaat uit van een cumulatieve hoeveelheid CO₂ (door het IPCC gerekend vanaf 1850) en geeft weer hoeveel CO₂ er mondiaal nog uitgestoten mag worden binnen een bepaald mondiaal opwarmingsscenario. Vanwege het cumulatieve karakter (elke ton CO₂ telt even zwaar mee) verschilt een budget van een reductiedoelstelling in een bepaald jaar.

Een koolstofbudget heeft alleen betrekking op CO₂ en niet op andere broeikasgassen zoals methaan, lachgas of F-gassen. De reden hiervoor is ten eerste dat de CO₂ die niet door oceanen en de biosfeer wordt opgenomen, duizenden jaren in de atmosfeer blijft en niet wordt afgebroken. Ook als de uitstoot van CO₂ volledig stopt, zou het opwarmingseffect - door de reeds in de atmosfeer aanwezige concentratie CO₂ - stabiel blijven. Negatieve emissies kunnen ervoor zorgen dat de concentratie daalt waardoor ook het opwarmingseffect vermindert.

Andere broeikasgassen worden eerder afgebroken waardoor het bijhouden van een cumulatieve boekhouding lastiger is. Bovendien zijn lachgas en methaan deels natuurlijke emissies die niet volledig naar nul kunnen. Een groot deel van de uitstoot van overige broeikasgassen is echter gerelateerd aan de consumptie van fossiele brandstoffen en deze emissies zullen dus vanzelf afnemen bij beëindiging van het gebruik van fossiele brandstoffen. Bij het opstellen van de koolstofbudgetten is door het IPCC wel de aanname gemaakt dat andere broeikasgasemissies - voor zover mogelijk - ook worden gereduceerd.

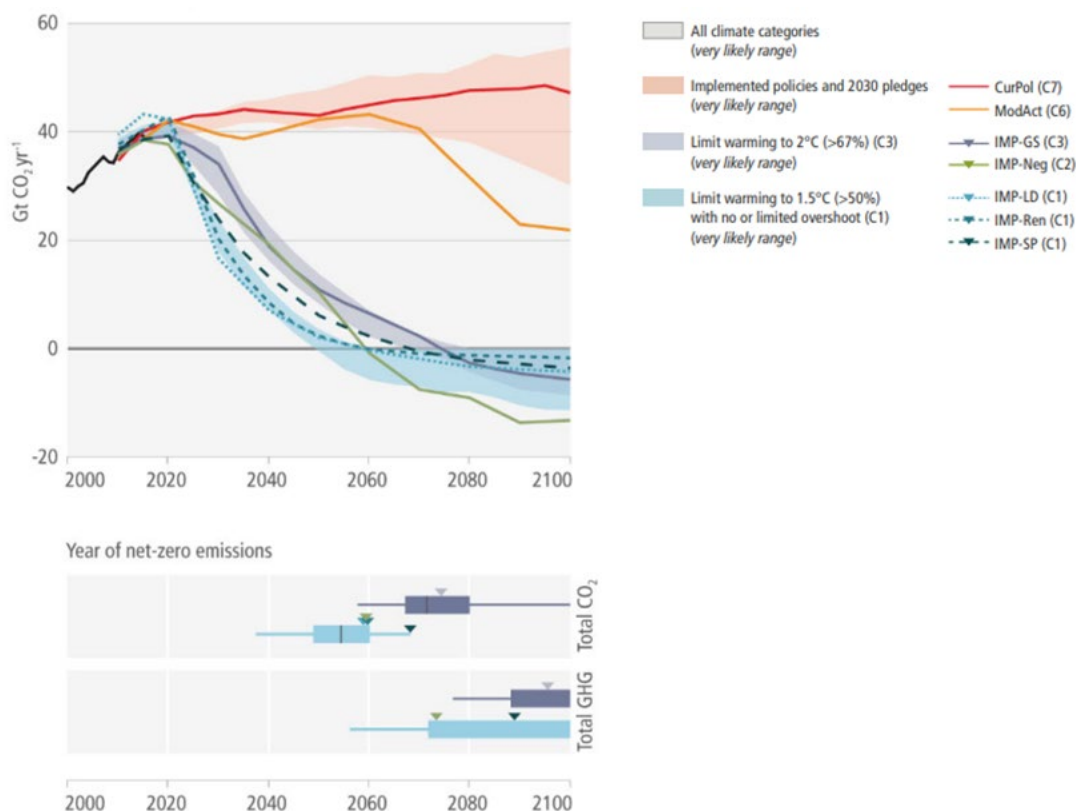
Het Akkoord van Parijs (2015) bepaalt dat het beperken van klimaatverandering dient te geschieden door middel van sterke emissiereductie teneinde in de tweede helft van deze eeuw een evenwicht te bereiken tussen uitstoot en opname van broeikasgassen. Het Akkoord bevat dus geen afspraken over een koolstofbudget (UN, 2015).

2.5.2 Het koolstofbudget en negatieve emissies

De behoefte aan negatieve emissies bestaat bij elk wereldwijd 1,5°C (en 2°C)-scenario. De benodigde hoeveelheid negatieve emissies hangt af van het moment waarop wereldwijd een netto-nul-uitstoot is bereikt en van de eventuele tijdelijke overschrijding van de 1,5°C-opwarming. In Figuur 19 zijn de IPCC-scenario's voor 1,5-gradopwarming (C1 en C2, met 50% zekerheid) en 2°C graden opwarming (C3, 67% zekerheid) getoond. De rode lijn (C7) toont het verloop van de CO₂-uitstoot volgens huidig beleid. Voor zowel het 1,5- als 2-gradenscenario zijn in de tweede helft van deze eeuw netto-negatieve emissies nodig. Hierbij moet wel worden opgemerkt: Hoe hoger echter de overschrijding van 1,5°, hoe sterker de onomkeerbare gevolgen die de natuurlijke koolstofopname verzwakken (door plantensterfte, dooi permafrost, afsterven veengebieden, bosbranden). Deze gevolgen zijn

niet alleen onomkeerbaar, ze maken ook de bijdrage van de natuur aan negatieve emissies minder sterk (IPCC, 2023).

Figuur 19 - Mondiale CO₂-uitstoot en projecties volgens huidig beleid (rode lijn), 1,5-gradenopwarming (lichtblauwe bandbreedte), 2 graden opwarming (paarse bandbreedte)



Bron: (IPCC, 2022).

Bij de verschillende scenario's voor 1,5°C horen verschillende koolstofbudgetten en behoefte aan negatieve emissies, weergegeven in Tabel 10. Voor de scenario's van 1,5°C kijkt het IPCC uitsluitend naar de mediaan in het model (d.w.z. 50% kans op meer dan 1,5, en 50% kans op minder dan 1,5).

Voor de vier 1,5°C-scenario's loopt het koolstofbudget van 2020 tot aan het jaar dat nul-emissie is bereikt van 460 tot 720 Gton wereldwijd, met respectievelijk 60 tot 360 Gton CO₂ aan cumulatieve negatieve emissies (vanaf het jaar dat de nulemissie situatie is bereikt tot 2100). Omdat een koolstofbudget betrekking heeft op cumulatieve emissies, kan een relatief klein verschil in jaarlijkse emissiereductie na verloop van tijd een groot verschil in overschrijding van het budget opleveren.

Tabel 13 - Behoefte aan mondiale negatieve emissies volgens verschillende scenario's voor 1,5°C, met 50% zekerheid (IPCC, 2022). In deze tabel is ook de broeikasgasuitstoot (BKG) getoond, in contrast met Figuur 19 waar alleen de CO₂ is weergegeven

IPCC-scenario categorie	Scenario	BKG-uitstoot (Gton)			Jaar van netto-nul-CO ₂	Cumulatieve CO ₂ -emissies 2020 tot jaar dat net-zero is bereikt (Gton)	Cumulatieve negatieve emissies vanaf jaar dat net-zero is bereikt tot 2100 (Gton)
		2030	2040	2050			
C1	1.5°C-scenario met geen of beperkte overschrijding	31	17	9	2050-2055	510	-220
C1a	... met netto-nul-BKG	33	18	8		550	-360
C1b	... zonder netto-nul-BKG	29	16	9		460	-60
C2	1.5°C-scenario met grote overschrijding	42	25	14	2055-2060	720	-360

De negatieve emissies zoals gegeven in de tabel horen bij scherpe mondiale emissie-reducties waardoor tussen 2050 en 2060 er wereldwijd een netto-nul-CO₂-situatie wordt bereikt. Voorlopig stijgen echter de wereldwijde emissies nog steeds elk jaar, ondanks de inzet van veel landen (zie rode lijn in Figuur 1). Uitgaand van de projectie in de International Energy Outlook 2021 zal de CO₂-uitstoot stijgen van 34 Gton in 2020 tot ongeveer 43 Gton per jaar in 2050 (EIA, 2022). De aangekondigde klimaatplannen zijn hierbij verdisconteerd. De wereldwijde stijging van de uitstoot is volledig toe te schrijven aan niet-OECD-landen. Als dit werkelijkheid wordt, zal de behoefte aan negatieve emissie in 2050 nog veel groter zijn dan in de scenario's van het IPCC.

Indien het minimale en maximale koolstofbudget met een zekerheid van 50% wordt vergeleken met de huidige prognose voor de mondiale CO₂-uitstoot, zal het budget tussen 2032 en 2038 uitgeput zijn. In 2050 zal het budget met ongeveer 486 tot 746 Gton overschreden zijn. In dit scenario bestaat er in 2050 dus niet alleen een behoefte aan negatieve emissies, maar ook nog aan emissiereductie om tot netto-nul te geraken.

Kortom, de wereldwijde behoefte aan negatieve emissies na 2050, ter compensatie van de overschrijding van het koolstofbudget passend bij de 1,5°C, hangt sterk af van het gevolgde emissiereductie scenario. Bij het meest gunstige mondiale emissiereductiescenario (met de scherpste daling van de uitstoot) is er van 2050 tot 2100 nog behoefte aan 60 Gton cumulatieve negatieve emissies. Bij het minst gunstige IPCC-scenario zijn er nog 360 Gton negatieve emissies noodzakelijk. Bij voorzetting van het huidige beleid is dit veel hoger: 486 tot 746 Gton CO₂.

2.5.3 Bijdrage van Europa en Nederland aan compensatie van overschrijding koolstofbudget

Het koolstofbudget opgesteld door het IPCC geldt per definitie voor de gehele wereld. Er bestaat geen wetenschappelijke of algemeen geaccepteerde methode om het mondiale budget toe te delen aan landen (CE Delft, 2022a). Desalniettemin hebben landen een verschillende bijdrage geleverd aan de huidige atmosferische concentratie CO₂. Terwijl

ontwikkelde landen verantwoordelijk zijn voor een groot deel van de historische uitstoot, zijn het momenteel de ontwikkelende landen die een sterke en groeiende bijdrage leveren aan de uitstoot. Hoewel vanuit het standpunt van historische rechtvaardigheid ontwikkelde landen een grotere verantwoordelijkheid dragen, bestaat er geen juridische basis om historische verantwoordelijkheid aan landen toe te wijzen (Rajamani, L. et al., 2021). Bovendien wordt de vooruitgang die fossiele economieën hebben opgeleverd voor de gehele wereld (mobiliteit, communicatie, gezondheidszorg, etc.) doorgaans niet verdisconteerd in het budget. Een andere complexiteit bij het toedelen van een koolstofbudget is dat het ongewenst zou zijn als het resterende budget wordt ingezet voor de opbouw van nieuwe fossiele economieën (die dan uiteindelijk weer de omslag moeten maken naar duurzaam).

Het mondiale budget om nog CO₂ uit te stoten gaat hand in hand met een hoeveelheid CO₂ als negatieve emissies. Een verdeling van het mondiale koolstofbudget, leidt dus ook tot een verdeling van de bijdrage aan negatieve emissies.

Internationale lucht- en zeevaart

De internationale lucht- en zeevaart opereert wereldwijd en valt niet binnen de emissieboekhouding van nationale staten. In dit rapport is de veronderstelling dat de sector zich ook in lijn met de 1,5-graaddoelstelling ontwikkelt en in 2050 klimaatneutraal is. Bij de verdeling van het budget naar landen hebben we eerst 21,7 Gton in mindering gebracht bij het mondiaal budget. Deze hoeveelheid correspondeert met de benodigde hoeveelheid van de lucht- en zeevaartsector als die vanaf nu richting 2050 lineair de emissies reduceert.

Verschillende verdelingsleutels

Aangezien er geen algemeen geaccepteerde methode is om het koolstofbudget naar landen te verdelen, worden in dit rapport de twee methodologisch het meest voor de hand liggende verdeelsleutels behandeld: per capita en per aandeel CO₂-uitstoot (CO₂-intensiteit/inwoner) (CE Delft, 2022a). Aangezien er geen algemeen geaccepteerde methode is om het koolstofbudget naar landen te verdelen, worden in dit rapport de twee methodologisch het meest voor de hand liggende verdeelsleutels behandeld: per capita en per aandeel CO₂-uitstoot (CO₂-intensiteit/inwoner) (CE Delft, 2022a). Andere verdelingsleutels (zoals op basis van BBP, emissiereductiepotentieel of historische uitstoot) staan nog heviger ter discussie en zijn hier daarom niet meegenomen.

De ‘**per capita-benadering**’ gaat ervan uit dat elk mens op de wereld recht heeft op een gelijk aandeel van het resterende budget. Het is een eenvoudige de controversiële incorporatie van historische emissies vermijdt, maar wel leidt tot de situatie waarin CO₂-reductie van landen met veel uitstoot per capita veel scherper moet zijn dan van ontwikkelingslanden die niet zoveel uitstoten per capita op jaarbasis (en dus minder snel door hun budget heen raken).

Toedeling op basis van het **aandeel in de huidige uitstoot** neemt de status-quo als uitgangspunt, waardoor het voor elk land het beste aansluit bij de startsituatie (deze methode wordt ook wel ‘grandfathering’ genoemd). Deze benadering accepteert het huidige uitstootniveau als gegeven, en biedt in principe een gelijk relatief reductiepad voor elk land. Uitgedrukt in absolute emissiereducties zullen ontwikkelde landen een scherper reductiepad moeten volgen. De economieën van ontwikkelde landen zijn immers veel afhankelijker van fossiele bronnen, met een hogere emissie-intensiteit per inwoner. Hier volgt ook uit dat emissiereductie vaak goedkoper gerealiseerd kan worden in ontwikkelingslanden.

De kenmerken die gelden voor de verdeling van een koolstofbudget gelden omgekeerd voor de verdeling van negatieve emissies. Dit zou kunnen gaan over de verplichting om negatieve emissies te realiseren, die landen mogelijk ook (kosteneffectief) in andere landen zouden kunnen realiseren.

Tabel 14 geeft het koolstofbudget in vier IPCC-scenario's en de daaruit voortkomende behoefte aan negatieve emissies voor de wereld⁵ en deelt deze toe aan Nederland en de EU volgens bovengenoemde twee methoden. De verdeling per capita levert voor Nederland een klein budget op. De verdeling per aandeel in de huidige uitstoot zorgt voor een ongeveer tweemaal zo groot aandeel koolstofbudget voor Nederland en Europa, en dus ook een relatief groot aandeel in de te realiseren negatieve emissies.

Tabel 14 - Koolstofbudget en negatieve emissies voor de hele wereld en toegedeeld aan Nederland en de EU volgens twee verschillende methoden. Bevolkingsaandelen gebaseerd op gemiddelde 2020-2050 (Eurostat, 2019); (World Bank, 2022)

Scope	Weergave	Verdeelsleutel	Aandeel	IPCC 1,5 °C-scenario			
				C1	C1a	C1b	C2
		Jaar van netto-nul-CO ₂		2050-2055			2055-2060
Wereld	Budget	Cumulatieve CO ₂ -emissies 2020 tot jaar dat net-zero is bereikt (Gton)	100%	488	528	438	698
	Negatieve emissies	Cumulatieve negatieve emissies vanaf jaar dat net-zero is bereikt tot 2.100 (Gton)		-220	-360	-60	-360
Nederlands aandeel (cumulatief)	Budget	Per capita (Mton)	0,21%	1.085	1.170	979	1.532
	Negatieve emissies			-422	-720	-81	-720
	Budget	Per aandeel uitstoot (Mton)	0,46%	2239	2.423	2.010	3.203
	Negatieve emissies			-1.009	-1651	-275	-1.651
Europees aandeel (cumulatief)	Budget	Per capita (Mton)	5,11%	24.963	27.008	22.407	35.699
	Negatieve emissies			-11.248	-18.405	-3.068	-18.405
	Budget	Per aandeel uitstoot (Mton)	9,11%	44.480	48.124	39.925	63.611
	Negatieve emissies			-20.042	-32.795	-5.466	-32.795

⁵ Van elk mondiaal budget is een vaste hoeveelheid (21,7 Gt) afgetrokken ten behoeve van de internationale lucht- en zeevaart, met de aanname dat die sector in 2050 ook klimaatneutraal is.

2.6 Conclusie: overzicht van de behoefte aan negatieve emissies

In dit hoofdstuk is onderzocht hoe de behoefte aan negatieve emissies eruitziet voor Nederland, Europa en de wereld. In deze studie gebruiken we scenario's die in lijn liggen met de doelstellingen van het kabinet en de EU, en dus in 2050 zowel in Nederland als in Europa klimaatneutraliteit veronderstellen. We zien dat de meeste toekomstscenario's richting 2050 aannemen dat CCS zowel voor fossiel als voor negatieve emissies beschikbaar zal zijn. Daarmee liggen deze scenario's in lijn met recente studies die stellen dat het bereiken van 1,5°C-opwarming onrealistisch is zonder CO₂-verwijdering en opslag. Alleen extremere scenario's met zeer sterke aanpassing van leefstijl en economische activiteiten gaan uit van beperkte tot geen opslag van CO₂. Scenario's waarbij klimaatneutraliteit niet behaald wordt, zijn in deze studie niet meegenomen.

De meeste scenario's en studies voor technologische ontwikkelingen hebben 2030 of 2050 als ankerpunt. In scenariostudies zijn de zichtjaren 2030 en 2040 vaak tussenjaren op weg naar 2050, waarbij de aanname is dat veranderingen lineair plaatsvinden vanaf het huidige punt. De periode na 2050 wordt vaak niet uitgebreid belicht. De impliciete aannames in scenariostudies zijn dat klimaatneutraliteit behaald is, en dat de energietransitie daarmee "af" is. Mogelijk resterende uitstoot wordt opgevangen en opgeslagen.

Een overzicht van de restemissies per scenario is gegeven in Tabel 15. Het bepalen van de restemissies per scenario stuit op het knelpunt dat ADAPT en TRANSFORM reeds negatieve emissies incalculeren. De scope van de ADAPT/TRANSFORM is daarnaast verschillend van II3050 waardoor deze niet direct vergelijkbaar zijn.

De restemissies in Nederland liggen tussen de 8,8 en 29 Mton CO₂ per jaar. Restuitstoot zit in de landbouw, industrie en transport. De landbouw met niet-fossiele broeikasgasuitstoot zorgt in alle scenario's voor een groot aandeel in de restemissies. In ADAPT zijn er meer negatieve emissies nodig dan restemissies om op een volledige energie- en grondstoffenbalans van nul uit te komen, in dat scenario komen de negatieve emissies uit op 38,3 Mton/jaar.

Tabel 15 - Restemissies in Nederland na aftrek fossiele CCS volgens verschillende scenario's

Scenario		Restemissies	Behoefte aan negatieve emissies
II3050	Decentraal	8,9	8,9
	Nationaal	10,0	10,0
	Europees	8,8	8,8
	Internationaal	8,8	8,8
TNO	ADAPT	29,1	38,3
	TRANSFORM	14,4	14,4
Bandbreedte		8,8-29	8,8-38,3

Tabel 16 - Overzicht van netto-uitstoot en restemissies in EU-scenario's (in Mton CO₂-eq.)

Scenario	Uitstootbalans 2050	Restemissies 2050
Baseline	1.978	2.214
1.5TECH	27	602
1.5LIFE	24	541
1.5LIFE-LB	22	576

De behoefte aan negatieve emissies voor compensatie van de mondiale overshoot van broeikasgasemissies is bepaald aan de hand van het koolstofbudget. Het koolstofbudget refereert aan de hoeveelheid CO₂ die wereldwijd nog uitgestoten kan worden om onder de 1,5°C-opwarming te blijven. In hoeverre dit budget wordt overschreden, hangt sterk af van het gevolgde emissiereductiescenario. Hierbij dient ook opgemerkt te worden dat overschrijding van 1,5°C niet zonder onomkeerbare gevolgen zal blijven. De impact van die gevolgen (toegenomen bosbranden, afsterven van planten en veengebieden, dooi van permafrost, afzwakken van natuurlijke koolstofopname) zal het compenseren van de overschrijding moeilijker maken (IPCC, 2023).

Er is geen algemeen geaccepteerde methode om het wereldwijd budget toe te rekenen naar landen. In Tabel 17 zijn de koolstofbudgetten en daaruit voortkomende behoefte aan negatieve emissies volgens twee methodes (per capita en per aandeel in huidige uitstoot) toegerekend aan Nederland.

Tabel 17 - Cumulatief koolstofbudget (tot 2050) en cumulatieve behoefte aan negatieve emissies (tot 2100) voor vier wereldwijde 1,5 graden opwarmingsscenario's, toegerekend naar Nederland volgens per capita (onderkant bandbreedte) en per aandeel uitstoot (bovenkant bandbreedte).

IPCC 1,5°C-scenario	Koolstofbudget	Behoefte negatieve emissies cumulatief (Mton)	Behoefte negatieve emissies Mton/jaar (2050-2100)
C1: 1.5°C-scenario met geen of beperkte overschrijding	1.085-2.239	-422 tot -1.009	-8,4 tot -20,2
C1a: ... met netto-nul-BKG	1.170-2.423	-720 tot -1.651	-14,4 tot -33
C1b: ... zonder netto-nul-BKG	979-2.010	-81 tot 275	-1,6 tot -5,5
C2: 1.5°C-scenario met grote overschrijding	1.532-3.203	-720 tot -1.651	-14,4 tot -33

De negatieve emissies die voortkomen uit het koolstofbudget komen boven op de behoefte aan negatieve emissies om de restemissies te compenseren. Als zowel de compensatie voor restemissies als het Nederlands aandeel in het mondiale koolstofbudget bij elkaar wordt opgeteld ligt de totale behoefte aan negatieve emissies tussen 10,4 Mton CO₂ en 67 Mton CO₂ per jaar na 2050.

3 Aanbod van negatieve emissies

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk geven we een overzicht van de beschikbare technieken voor negatieve emissies in Nederland en Europa. Welke technieken zijn er, in hoeverre kunnen zij bijdragen aan negatieve emissies op Nederlands en Europees niveau? Welke belemmeringen en kansen zijn er voor hun verdere ontwikkeling en grootschalige toepassing, zijn er eventuele (positieve of negatieve) neveneffecten te verwachten en wat zijn de kosten van de negatieve-emissietechnologieën? Hierbij baseren we ons zoveel mogelijk op de meest actuele literatuur. Voor elke techniek hebben we een apart factsheet ontwikkeld met de belangrijkste informatie.

Om tot een inschatting te komen van het totale aanbod aan negatieve emissies spelen ook een aantal overkoepelende onderwerpen een rol, die apart worden besproken. Zo maakt een flink deel van de technieken gebruik van biomassa. Dit roept een aantal vragen op, zoals is er voldoende duurzame biomassa beschikbaar voor al deze technieken of concurreren zij met elkaar om dezelfde grondstoffen? Hoe passen deze toepassingen van biomassa in het Duurzaamheidskader biograndstoffen (Ministerie van I&W, 2020)? Een enigszins vergelijkbaar vraagstuk speelt bij direct air capture (DAC): welk deel van de met DAC afgevangen CO₂ kan voor negatieve emissies worden gebruikt, hoe groot wordt de vraag naar deze CO₂ voor andere toepassingen?

In welke mate deze technieken de komende decennia in de praktijk kunnen worden ingezet, incl. onderlinge prioritering, komt later aan bod, in Hoofdstuk 5.

3.2 Selectie van technieken

In het rapport 'Negatieve Emissies' van PBL (PBL, 2018) zijn de beschikbare technieken voor negatieve emissies in kaart gebracht. Hierop voortbouwend, en op basis van categorisering die in internationale literatuur gevonden is, zijn in de Quicksan (Royal HaskoningDHV, 2022) vervolgens zeven concepten voor negatieve emissies onderscheiden: I. bebossing en herbebossing; II. bio-economie met CCS (BECCS); III. koolstofopslag in de bodem; IV. biochar; V. versnelde verwerking mineralen; VI. mariene CO₂-opslag en VII. directe CO₂-verwijdering (DACCS).

Voor deze studie hebben we deze indeling echter uitgebreid en aangepast. Allereerst omdat wij een iets ruimere definitie en scope van 'negatieve emissies' gebruiken (zie Paragraaf 1.3). Hierbinnen nemen we ook houtbouw en andere biobased bouwmaterialen en biobased kunststoffen mee. Deze twee technieken zorgen weliswaar niet voor permanente opslag van CO₂ uit de atmosfeer zoals bij de technieken waarin de CO₂ geologisch wordt opgeslagen, maar ze kunnen wel koolstof langdurig opslaan - mits ze een lange levensduur hebben en/of langdurig en efficiënt worden gerecycled. Dit laatste is het doel van de ontwikkeling van een circulaire economie, maar hoe efficiënt dit circulaire systeem uiteindelijk gaat worden voor deze biogene producten is nog onzeker.

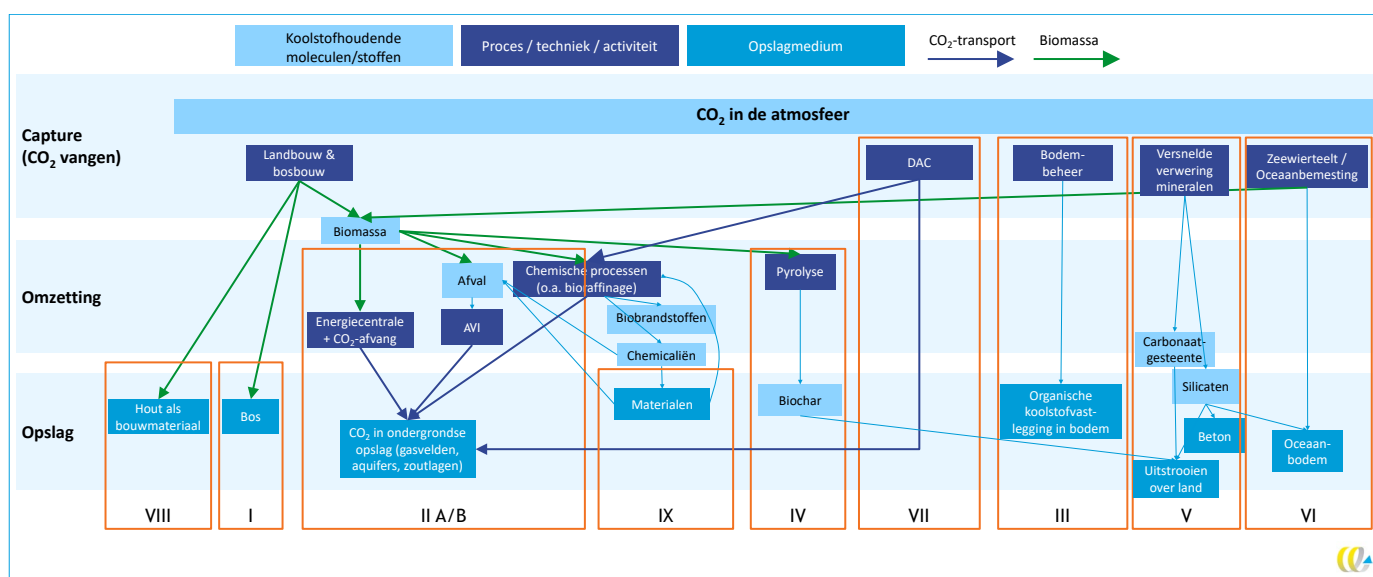
Daarnaast splitsen wij techniek II, Bio-economie met CCS, in tweeën: II-a bio-energie met CCS (inclusief AVI's) en II-b biochemische processen met CCS. Dit zijn twee verschillende routes, die elk op een andere plek staan in het Duurzaamheidskader Biograndstoffen van I&W. Verder hebben we, voor de duidelijkheid en consistentie met de andere routes,

technologie VII Direct Air Capture vervangen door Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS). De door DAC afgevangen CO₂ kan ook op een andere manier worden toegepast, net als de biogene CO₂ uit de BECCS-routes. In dit rapport kijken we echter bij beide technologieën naar geologische opslag van de afgevangen CO₂ omdat dit de meest kosteneffectieve en permanente route is om met deze CO₂ negatieve emissies te realiseren. De vastlegging in de plasticringloop behandelen we onder biomaterialen.

We kijken derhalve in deze studie naar in totaal tien routes voor negatieve emissies:

- i. Bebossing
- ii. Biobased economy met CCS (BECCS):
 - A. Bio-energie met CCS
 - B. Biochemische processen met CCS
- iii. Koolstofopslag in de bodem.
- iv. Biochar.
- v. Mineralisatie.
- vi. Mariene CO₂-opslag.
- vii. Directe CO₂-verwijdering met geologische opslag (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS).
- viii. Houtbouw.
- ix. Biomaterialen.

Figuur 20 - Schematisch overzicht van CO₂-verwijderingstechnieken



3.3 De verschillende routes op een rij

Voor elke route zijn de belangrijkste kenmerken in kaart gebracht, o.b.v. een analyse van de recente literatuur. Om tot een consistent overzicht te komen hebben we een factsheet opgezet die we voor de verschillende technologieën hebben uitgewerkt. De uitgewerkte factsheets, met vermelding van de gebruikte bronnen, zijn opgenomen in Bijlage A.

In dit hoofdstuk behandelen we per route:

- TRL;
- voor- en nadelen, risico's;
- potentieel (in Mton CO₂/jaar);
- kosten.

Zoals ook aangegeven in de factsheets zijn een aantal factoren die medebepalend zijn voor het potentieel niet gekwantificeerd per technologie. Het gaat hierbij om meer overkoepelende parameters zoals de beschikbaarheid van geologische CO₂-opslagcapaciteit, CO₂ uit duurzame biomassa en CO₂ uit de atmosfeer voor negatieve emissies. Meerdere routes maken namelijk gebruik van dezelfde biomassa en CO₂-opslagcapaciteit én concurreren daarnaast met andere toepassingen van biomassa en CO₂ en gebruik van opslagcapaciteit, waardoor er overlap tussen de routes bestaat. Vanwege deze overlap behandelen we deze aspecten met een breder perspectief dan per techniek in de volgende paragrafen en hoofdstuk.

3.3.1 Bebossing en bosbeheer

Met (her)bebossing ontstaan negatieve emissies door (blijvende) toename in het areaal van bos en door en door bijgroei in bestaand (nog niet 'volgroeid') bos.

TRL: Bebossing wordt al wijdverspreid toegepast.

Voor- en nadelen: Herbebossing, waarbij voorheen bebost land weer bos wordt, heeft zeer veel positieve neveneffecten, bijvoorbeeld voor biodiversiteit, ecologie, recreatie en volksgezondheid. Het potentieel ervan (maximaal 9,1 ton CO₂/ha/jaar) is door het ruimtegebruik beperkt. Belangrijke randvoorwaarde voor negatieve emissies is dat het bos behouden blijft. Het tempo van CO₂-verwijdering is beperkt door de groeisnelheid van de bomen. Bebossing, waarbij niet bebost land wordt omgezet in bos, kan negatieve neveneffecten met zich meebrengen voor biodiversiteit.

Potentieel: De vastlegging in 2030 ten gevolge van het Actieplan bos en hout uit 2016 is door PBL geschat op 0,5-1 Mton CO₂/jaar en in 2050 1,2 Mton/jaar. De huidige Bossenstrategie van het Ministerie van LNV (uit 2020) kan volgens berekeningen van de WUR leiden tot 0,35 Mton/jaar vastlegging in 2030 en 0,7 Mton/jaar in 2050.

De klimaatbijdrage van Europese bossen was in 2020 293 Mton CO₂/jaar. Volgens verschillende inschattingen zou dit kunnen toenemen met 100-540 Mton/jaar.

Kosten: Het Actieplan Bos en Hout (2016) schat de kosten van bosbeheer op 1,3 €/tCO₂ en de uitbreiding van het areaal met 100.000 ha op 166,9 €/tCO₂ in 2050. Gemiddeld schatten zij de kosten van de maatregelen voor bosbeheer en uitbreiding in het Actieplan op 50,3 €/tCO₂ in 2050.

3.3.2 A: Bio-energie met CCS

CO₂ die vrijkomt bij verbranding van biomassa voor productie van elektriciteit of warmte wordt afgevangen, gecomprimeerd en vervolgens permanent opgeslagen in ondergrondse opslaglocaties⁶. Er zijn verschillende varianten van bio-energie met CCS. De CO₂ kan worden afgevangen bij:

- biomassacentrales die vaste biomassa verbranden voor elektriciteits- en warmteproductie;
- biogascentrales die biogas of biomethaan (groengas) verbranden voor elektriciteits- en warmteproductie;
- bioketels voor de productie van hogetemperatuurwarmte uit biomassa of biogas in de industrie;
- afvalverbrandingscentrales (waarbij alleen de CO₂ van biogeen afval biogene CO₂ is).

Deze bio-energie routes zijn allemaal post-combustion-routes.

TRL: De TRL van BECCS o.b.v. biomassacentrales, biogascentrales, hogetemperatuurwarmte uit biomassa en AVI's is 8.

Voor- en nadelen, risico's, randvoorwaarden, Onzekerheden: Belangrijke randvoorwaarden hebben betrekking op de duurzaamheid en dat zit hem vooral in het verkrijgen van biomassa en de duurzame herkomst, productie en landgebruik. Bij gebruik van biomassa die niet aan de biomassa duurzaamheidseisen voldoet kan de daadwerkelijke CO₂-emissiereductie beperkt zijn, en kunnen er ook nadelige effecten optreden voor de vruchtbaarheid van de grond, de biodiversiteit en koolstofopslag in bossen en grond.

Potentieel: Het potentieel van deze vorm van BECCS hangt af van het toekomstig gebruik van bio-energie in het energiesysteem. Verbranding van biomassa wordt gezien als een laagwaardige toepassing van biomassa, subsidie voor nieuwe biomassacentrales is derhalve gestopt. Als deze beleidstrend doorzet blijft bio-energie met CCS nog wel kansrijk bij afvalverbranding (AVI's), alhoewel de hoeveelheid biogeen afval naar verwachting zal afnemen naarmate de circulaire economie doorzet. Daarnaast kan er potentieel ontstaan bij hogetemperatuurwarmteproductie uit biomassa in de industrie, en wellicht ook bij biogascentrales.

Zonder biomassacentrales komt het realistisch potentieel aan negatieve emissies uit op ca. 4 Mton in 2030 (2,5 Mton hogetemperatuurwarmte en 1,4 Mton bij AVI's), en 16,2 Mton voor 2050 (4 Mton biogascentrales, 7,4 Mton ht-warmte en 4,8 Mton AVI's).

Er zijn nog geen onderbouwde schattingen van het EU potentieel voor BECCS o.b.v. bio-energie. Een bron schat het totale potentieel van BECCS in op ca. 200 Mton CO₂, op basis van biomassa uit Europa zelf. Dit is niet verder gespecificeerd naar energieproductie of chemie/industrie.

Kosten: De kosten voor de verschillende routes zijn door PBL (2018) geschat op 40-60 €/tCO₂ (kolencentrales naar biomassa met CCS) tot 60-110 €/tCO₂ (hogetemperatuurwarmte). Ook heeft het transport en opslag van CCS bijkomende kosten. Andere inschattingen geven een range voor de totale kosten van 15-400 €/tCO₂.

⁶ Dit in tegenstelling tot de 'gangbare' CCS, waar CO₂ van fossiele oorsprong ondergronds wordt opgeslagen. CCS is een maatregel waarmee de uitstoot van fossiele CO₂ wordt voorkomen, maar leidt niet tot negatieve emissies.

3.3.3 B: Biochemische processen met CCS - Biobased Economy + CCS (BECCS).

Deze categorie omvat afvang van (biogene) CO₂ bij industriële processen die biomassa gebruiken als grondstof. Hierbij wordt de biomassa niet verbrand, maar omgezet d.m.v. chemische processen. Bij een aantal van deze processen komt zuivere CO₂ vrij, die kan worden afgevangen, gecomprimeerd en vervolgens permanent opgeslagen in ondergrondse opslaglocaties. Potentiële kansrijke varianten voor Nederland van deze vorm van BECCS zijn staalproductie o.b.v. het Hisarna-proces met biomassa als grondstof⁷, vergassing van biomassa, bio-ethanolproductie en bioraffinage. De tijdelijke of langdurige opslag van deze koolstof in de materialen zelf behandelen wij onder biomaterialen.

TRL: Biomassavergassing heeft een TRL van 6 tot 7 (afhankelijk van de techniek), Hisarna komt uit op een TRL van 6-8. Ethanolproductie is TRL 9.

Voor- en nadelen: Vergeleken met bio-energie met CCS is biochemie met CCS hoger op de duurzaamheidsladder, omdat de biomassa hoogwaardiger wordt ingezet. Aan de andere kant komt er minder koolstof vrij omdat de koolstof juist zoveel mogelijk wordt behouden in de productie van biobrandstoffen, plastics en andere producten.

Potentieel: Voor 2030 komt het realistisch potentieel uit op ca. 3 Mton CO₂/jaar. Dit bestaat voor 75% uit CO₂-afvang en -opslag van vergassing van biomassa, de rest zou met staalproductie d.m.v. Hisarna kunnen worden gerealiseerd. Voor 2050 kan dit potentieel oplopen naar bijna 11 Mton CO₂/jaar negatieve emissies, door flinke opschaling van beide routes, maar de onzekerheid is groot.

Er zijn nog geen onderbouwde schattingen van het EU potentieel voor BECCS o.b.v. biochemische processen. Zoals eerder gemeld schat een bron in dat het totale potentieel van BECCS uitkomt op ca. 200 Mton CO₂, op basis van biomassa uit Europa zelf. Dit is niet verder gespecificeerd naar energieproductie of chemie/industrie.

Kosten: Afhankelijk van de specifieke processen, schaalgrootte en locatie, veelal in de range 40 tot 110 €/tCO₂.

3.3.4 Koolstofopslag in de bodem

Koolstofopslag in de bodem vindt plaats doordat landbouwresten en ander organisch materiaal wordt opgenomen in de bodem en dit materiaal langzamer afbreekt dan dat nieuw materiaal wordt toegevoegd. Dit kan worden bevorderd met aanpassing van landbouwbeheermaatregelen. Een andere variant is de aangroei van veen in veenweidegebied.

TRL: 8 tot 9

Onzekerheden: Er is onzekerheid over de potentie van deze techniek, omdat er nog kennis ontbreekt over langdurige koolstofopslag en de effectiviteit van specifieke maatregelen en omdat permanente opslag afhankelijk is van aanhoudende uitvoering van de aangepaste landbouwbeheermaatregelen.

Potentieel: Het onderzoeksprogramma Slim Landgebruik heeft het potentieel aan koolstofvastlegging van verschillende maatregelen in kaart gebracht. De maatregelen tellen op tot circa 0,9 Mton/jaar. Het maximale beleidsscenario van de WUR komt uit op 0,32 Mton/jaar in 2035. We hanteren daarom een middenwaarde (0,6 Mton/jaar) voor het realistisch potentieel in 2030 en het volledige potentieel van 0,9 Mton/jaar in 2050.

⁷ Hoewel Tata Steel momenteel inzet op het DRI proces (direct reduced iron) op basis van waterstof.

In Europa is het realistisch potentieel voor de periode 2020-2050 ingeschat op 100 Mt/jr voor landbouwgrond en grasland en op 54 Mt/jr voor veenweidegebied.

Kosten: De realisatiekosten zijn ingeschat op 0 tot 50 €/tCO₂.

3.3.5 Biochar

Biochar is het product van pyrolyse of vergassing van organisch materiaal zoals hout, maar ook reststromen zoals rioolslib. De koolstof in biochar kan gedurende eeuwen of millennia opgeslagen blijven. Biochar kan worden ingezet voor verschillende toepassingen, waaronder als bodemverbeteraar in de landbouw of als materiaal voor asfalt.

TRL: Pyrolyse met cogeneratie van biochar en warmte wordt al langdurig gebruikt op meerdere locaties en heeft daarom een TRL van 9. Toepassing van biochar in de bodem is echter nog niet zo ver ontwikkeld, PBL schat de TRL hiervan op 3-6.

Onzekerheden: In theorie is hoogste potentieel te behalen als bodemverbeteraar, echter is de meerwaarde van biochar voor de Nederlandse bodem niet evident. Waarschijnlijk is biochar beter toepasbaar bij verarmde landbouwgrond. Het potentieel van biochar hangt daarnaast af van de beschikbaarheid van biomassa. Idealiter kunnen laagwaardige afvalstromen zoals rioolslib ingezet worden. Dit resulteert echter in vervuilde biochar die ongeschikt is voor toepassingen in de landbouw. Voor toepassingen in bijvoorbeeld asfalt maakt de vervuiling minder uit, maar het potentieel hiervan is nog onbekend. Biochar uit hout is met het oog op het duurzaamheidskader waarschijnlijk niet wenselijk.

Potentieel: PBL schat voor Nederland in dat na 2030 biochar mogelijk een bijdrage kan leveren van maximaal 1 Mton CO₂ per jaar. Om dit te bereiken is er 340 kton biochar nodig, hiervoor is ongeveer 1,2 Mton of 18 PJ biomassa nodig (PBL, 2018). Deze hoeveelheid komt bijvoorbeeld overeen met 40% van de theoretisch oogstbare bijgroei uit 650.000 ha natuur en landschap (dit is inclusief de bossen). Voor de EU is het theoretisch potentieel 845 Mton CO₂ per jaar als biochar over het gehele in gebruik zijnde landbouwareaal zou kunnen worden uitgestrooid.

Kosten: De kosten voor biochar variëren van € 200 per ton voor lage kwaliteit biochar tot € 1.500 per ton voor hoge kwaliteit met loofhout als grondstof.

3.3.6 Mineralisatie

Bij mineralisatie reageert natuurlijk alkalisch gesteente (met name silicaten, zoals olivijn, of calciumhydroxide) met CO₂. Deze CO₂ kan afkomstig zijn uit de atmosfeer, industriële restgassen of DAC. Van nature gebeuren deze chemische processen aan de oppervlakte van gesteente heel langzaam; dit kan worden versneld door het mineraal te vermalen en te verspreiden over grote oppervlakten (versnelde verwerking, in het Engels *enhanced weathering*). Het ontstane materiaal kan vervolgens toegepast worden in bestrating, kustverdediging of in de landbouw. Bepaalde industriële reststromen zoals bodemmassen en hoogovenslak hebben vergelijkbare toepassingen.

TRL: Het TRL hangt af van de toepassing. Kleinschaligere toepassingen op land zoals bestrating zijn momenteel operationeel en hebben daarom een TRL 8-9. Toepassing van olivijnzand in kustwateren kent een TRL 4 tot 5 en landbouwtoepassingen voor verbetering van bodemvruchtbaarheid kent daarom een TRL van 4.

Onzekerheden: Er is onzekerheid over de potentie van deze techniek, omdat er nog kennis ontbreekt over de grootschalige inzet van vermaalde silicaten. Mogelijk zijn er voordelen voor de landbouw (bodemverbetering), maar meer onderzoek is nodig naar reactiemechanisme en het mogelijk vrijkomen van metalen zoals nikkel. Grind- of zandpaden met vermaalde mineralen zijn wel kansrijk, al is mogelijk de toepassing hiervan wel kleinschaliger. Een mogelijke belemmering is het vrijkomen van metalen in de bodem of water. Meer onderzoek is nodig voor veilig gebruik. Vanuit transport oogpunt is het logischer om de mineralen daar toe te passen waar ze worden gewonnen.

Potentieel: Als olivijn wordt gebruikt voor de vervanging van ophoogzand bij kustverdediging en dit vanaf 2023 wordt opgeschaald tot 26 Mton ophoogzand in 2050, kan daarmee volgens PBL in 2050 maximaal 4,7 Mton/jaar worden vastgelegd. Het gebruik van olivijn ter vervanging van rivierzand in beton heeft een potentieel van 0,2 Mton/jaar in 2030 en 0,7 Mton/jaar in 2050.

Kosten: De meerkosten van olivijn ten opzichte van zand vertalen zich in 50-70 euro/ton CO₂ (PBL, 2018). Een internationale schatting geeft 80-180 USD/tCO₂ voor China, India, de VS en Brazilië.

3.3.7 Mariene CO₂-opslag

Mariene CO₂-opslag is een verzamelterm voor een aantal verschillende routes om CO₂ vast te leggen in zee of op de oceaانبodem. De voornaamste zijn het stimuleren van bestaande mariene ecosystemen (blauwe koolstof) of kunstmatige alkalinisatie van de oceanen.

TRL: Kunstmatige alkalinisatie heeft een TRL van 4-5, blauwe koolstof van 5-6.

Onzekerheden en risico's: Het oplossen van olivijn in oceanen leidt tot verhoogde concentraties van verschillende metalen. Deze zouden een effect op de gehele voedselketen en ecosystemen kunnen hebben. Nikkel is potentieel toxisch en zou bij grootschalige toepassing problemen kunnen opleveren. Verschillende zeeorganismen zouden niet in staat kunnen blijken om te gaan met verhoogde alkalinisatie. Deze negatieve effecten van kunstmatige alkalinisatie op ecosystemen zijn waarschijnlijk groter dan de positieve effecten op mitigatie van klimaatverandering. Een duurzaamheidskader is niet afdoende. Blauwe koolstof een positief effect kunnen hebben op o.a. vissen en waterzuivering, maar het is ook mogelijk dat bestaande ecosystemen erdoor verstoord worden.

Potentieel: De maximale wereldwijde capaciteit van blauwe koolstof ligt rond 0,13-0,8 Gton/jaar en bij kunstmatige alkalinisatie rond de 8,43-12,15 Gton/jaar. Omdat blauwe koolstof en alkalinisatie meestal uitgaat van de diepe oceaan, gaan we er niet vanuit dat er realistisch potentieel in Nederland is voor deze vorm van negatieve emissies.

Kosten: Het onderzoeksprogramma NEGEM schat de kosten van olivijnoplossing op 3-160 €/tCO₂ (NEGEM, 2022). De kosten van blauwe koolstof worden geschat op 9 €/tCO₂.

3.3.8 Directe CO₂-verwijdering met geologische opslag (DACCS).

Directe CO₂-verwijdering is de directe afvang van CO₂ uit de lucht, gevolgd door gebruik of permanente geologische opslag in bijv. lege gasvelden. De combinatie met opslag wordt ook wel 'direct air capture and carbon storage (DACCS)' genoemd. Bij gebruik kan de afgevangen CO₂ op zowel langdurige als kortere termijn worden opgeslagen, bijvoorbeeld in chemicaliën en plastics. Het kan ook voor transportbrandstof (synfuels) worden gebruikt, maar dan is het geen negatieve emissie.

TRL: Laboratoriumfase, TRL 4-8.

Voor- en nadelen: DACCS wordt met name gehinderd door hoge kosten en hoog energieverbruik.

Potentieel: Door de hoge kosten en hoge energievraag hangt het potentieel zeer sterk af van de beschikbaarheid van CO₂-vrije energie en de waarde van negatieve emissies. In het TRANSFORM-scenario gaat TNO voor Nederland uit van 18 Mton per jaar vanaf 2050. Maar vanwege de uitdagingen schat PBL (2018) bij de huidige verwachtingen het realistisch potentieel voor 2050 in als nihil. Bij 30-100 €/tCO₂ is het wereldwijd maximaal potentieel van DAC in combinatie met opslag ongeveer 5 Gton CO₂/jaar.

Kosten: De totale kosten van DAC (incl. CCS) zijn grofweg 1.600-2.080 \$/tCO₂, waarvan ca. tweederde CAPEX en een derde OPEX (Smith, P. & et al., 2015). In PBL (2018) wordt de schatting gegeven van CAPEX € 425/tCO₂ en OPEX 240 €/tCO₂. Ricardo citeert kosten van 85-209 €/tCO₂ voor DAC m.b.v. de eerste hoofdmethode (liquid DAC), en 540 €/tCO₂ voor de tweede hoofdmethode (solid DAC). IEA schat voor 'first-of-a-kind' DACCS-projecten de kosten tussen de 400 en 700 \$/tCO₂, dit kan mogelijk dalen tot 150-200 \$/tCO₂ (IEA, 2021).

3.3.9 Houtbouw

Door het toepassen van houtproducten in de bouw wordt biogene koolstof tijdelijk vastgelegd. Bij producten met een lange levensduur zoals constructief hout komt de koolstof pas na 50 jaar of langer vrij. Bij volledig hergebruik van bouwmaterialen wordt de periode zelfs nog verlengd. Op deze manier zorgen biobased materialen voor het (tijdelijk) onttrekken van CO₂ aan de atmosfeer.

Er is veel discussie over het meetellen van hout en biobased materialen als negatieve emissies omdat het geen permanente opslag behelst. De koolstofvastlegging vindt plaats bij het produceren van het hout (bosbouw). Aan het einde van de levensduur komt de CO₂ weer vrij, tenzij het product hergebruikt wordt of CO₂ na verbranding (of vergassing) wordt opgevangen en opgeslagen (BECCS).

TRL: 8-9

Voor- en nadelen: Houtbouw leidt tot vermeden emissies door het vermijden of verminderen van het gebruik van staal en beton. Ook heeft het voordelen op milieu- en comfortgebied. Nadelen van houtbouw zijn vooral gerelateerd aan het landgebruik voor bosbouw (wat kan leiden tot 'indirect land use change' effecten) en de schaarste van biomassa. Voor het verbouwen van houtige biomassa wordt vaak monocultuur toegepast.

Potentieel: In Nederland zou in 2030 400 kton CO₂ kunnen worden opgeslagen als 10% van alle nieuwbouw biobased wordt uitgevoerd. Als in 2050 alle nieuwbouw biobased wordt uitgevoerd, kan 3.900 kton CO₂/jr worden opgeslagen. Dit potentieel is o.a. afhankelijk van de hoeveelheid nieuwbouw, de daadwerkelijke toepassing van houtbouw, en de beschikbaarheid (en dus kosten) van duurzaam hout. De belangrijkste drivers zijn beleid om de toepassing van houtbouw te stimuleren, zoals de methodiek voor de berekening van de milieuprestatie.

Het technisch potentieel voor houtbouw in renovatie en nieuwbouw in Europa is ingeschat op 24 Mton/jaar, dit is een gemiddelde over 2025-2050.

Kosten: De kosten van biobased bouwmaterialen liggen momenteel meestal wat hoger (10-20%) dan conventionele bouwmaterialen, maar kunnen ook goedkoper uitvallen.

3.3.10 Biobased kunststoffen

Biomaterialen zijn een vorm van tijdelijke koolstofvastlegging in de economie. De vastlegging duurt zo lang het materiaal wordt hergebruikt. Er zijn vele type materialen met allerlei verschillende levensduren. Biobased bouwmaterialen zijn al eerder apart besproken, maar hier focussen we ons op biobased kunststoffen.

Als materialen (of hout) aan het eind van de levensduur worden verbrand in een AVI en CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen, dan valt het onder BECCS (II).

TRL: De TRL verschilt per type materiaal en feedstock, van een TRL van 4-5 voor PLA-productiemethoden met tweede generatie feedstocks tot een TRL van 8-9 voor eerste generatie feedstocks (landbouwgewassen).

Onzekerheden: Net als bij houtbouw is het duurzaam verkrijgen van de biograndstoffen de belangrijkste randvoorwaarde. Daarnaast is het onzeker hoeveel groei aan materiaalgebruik er zal zijn in een circulaire economie, hoeveel kunststoffen er biobased zullen worden geproduceerd, en de levensduur en het hergebruik dat wordt gerealiseerd.

Potentieel: De hoeveelheid negatieve emissies t.g.v. vastlegging als kunststof staat gelijk aan de netto-toename van biobased kunststoffen vermenigvuldigd met de CO₂-intensiteit van het kunststof (vastgelegde CO₂ per kg materiaal). Uitgaande van een groei in gebruik van kunststoffen van 1.058 kton/jaar (CE Delft, 2022) en een percentage biobased van 1% tot 15% (in twee verschillende scenario's) is de jaarlijkse CO₂-opslag in kunststoffen in 2030 dan 29 kton CO₂ (scenario Autonome ontwikkeling) of 403 kton CO₂ (scenario Geüpdatete transitieagenda).

Voor 2050 geeft de studie geen inschatting. Beleidsdoelen richting de circulaire economie sturen echter niet op méér materiaalgebruik. Er zou aangenomen kunnen worden dat er in 2050 geen netto-toename meer is aan materialen in de economie. Daarom hanteren we hier in 2050 een potentieel van nul.

Kosten: Ervan uitgaande dat biobased kunststoffen sowieso deel zijn van een biobased circulaire economie, heeft het meetellen als negatieve emissies geen meerkosten.

3.4 Overzicht potentieel aanbod van negatieve emissies

Het potentieel van de verschillende routes is samengevat in volgende tabel. Waar geen cijfer staat kon geen goede data voor worden gevonden.

Tabel 18 - Potentieel, kosten en TRL van verschillende routes

Nr.	Technologie		Nederlands potentieel (Mton/jr)				Europees potentieel (Mton/jr)			Kosten (€/ton)	TRL
			Techn	Realistisch 2030	Realistisch 2050	Cumulatief tussen 2030-2050	Techn	Realistisch 2030	Realistisch 2050		
I	Bebossing		3,6	0,35	0,7	10,5	600	50	45	50-1.000	N.v.t.
IIA	Bio-energie met CCS - BECCS	Biomassacentrales	12-19	>0*	>0*	>0*	200 (totaal IIA en IIB)			40-100	8
		Biogascentrales		0	4	40				50-100	
		Hogetemperatuurwarmte	50-60	2,5	7,4	99				60-110	
		Biogeen deel AVI's		1,4	4,8	62				60-80	
IIB	Biochemie met CCS - BECCS	BECCS - Staalindustrie Hisarna		0,7	4,8	55	Zie boven			0	5-9
		BECCS - Biomassavergassing i.c.m. brandstofproductie		2,3	6	83					
IV	Koolstofopslag in de bodem		2,3	0,6	0,9	15	314	154	154	0-50	8-9
V	Biochar		5,5 (cum. 110 Mton)	0	0,05 (cum. 1 Mton)	0,5				200-1.500	3-6
VI	Mineralisatie		14	0,7	5,4	61				50-70 (NL) 80-180 (int'l)	4-9
VII	Marine NETP		N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	0	0,13-12,15 (wereld)	N.v.t.	N.v.t.	3-160	4-6
VIII	DACCS		17	0	>0**	>0**	100-200	0	>0	85-540	4-8
IX	Houtbouw		3,9	0,4	3,9	43	24 (cum. 600 Mton)	N.b.	N.b.	Goedkoper tot 20% duurder	8-9
X	Biomaterialen (chemie)			0,4	0	4					4-9
	Totaal			9,35	38	473					
	Waarvan CCS			6,9	27	339					

* Het realistisch potentieel van BECCS uit biomassacentrales is sterk afhankelijk van beleid.

** Het potentieel van DACCS is erg onzeker.

Hierbij is het belangrijk om op te merken dat er verschil is tussen de routes die koolstof permanent opslaan, en de routes die dat tijdelijk doen (waarna de koolstof alsnog als broeikasgas vrijkomt). Bebossing, houtbouw en biomaterialen kunnen over de jaren bijdragen aan negatieve emissies, als het totale volume aan bossen, houtbouw en biomaterialen toeneemt. In de praktijk zullen in die periode bomen worden gekapt of op een natuurlijke wijze vergaan, en (bouw)materialen zullen in een AVI of vergasser belanden om te worden verbrand of omgezet in een groengas of grondstof voor de chemie. Alleen een toename van het totale volume zal zorgen voor extra negatieve emissies.

3.5 Potentieel van biomassa- en DAC-routes: het bredere perspectief

Zoals beschreven is een deel van het potentieel van de verschillende technieken direct gerelateerd aan de techniek zelf: kosten, TRL-niveau, risico op negatieve gevolgen van de techniek op bijv. de biodiversiteit, beschikbare CCS-opslagcapaciteit, etc. Daarnaast zijn er echter ook nog andere aspecten buiten de techniek om, die bepalend kunnen zijn voor het potentieel. Een daarvan bespreken we in het volgende: beschikbaarheid voor negatieve emissies van biogene en atmosferische CO₂ (uit biomassa en uit DAC resp.). Er zijn vele andere toepassingen van deze hernieuwbare koolstof in de klimaatneutrale en circulaire economie van de toekomst. Het is dan de vraag hoeveel van deze koolstof beschikbaar komt voor de negatieve-emissietechnieken.

3.5.1 Beschikbaarheid van duurzame biomassa

Een groot deel van de negatieve-emissietechnologieën gebruikt biomassa als bron voor de CO₂-afvang en -opslag:

- I. Bebossing en herbebossing - Afforestation/reforestation (AR).
- II. A Bio-energie met CCS - Biobased Economy (BBE).
B Biochemische processen met CCS
- III. Koolstofopslag in de bodem - Soil carbon sequestration (SCS).
- IV. Biochar (BC).
- VIII. Houtbouw
- IX. Biomaterialen

Bij deze routes is de beschikbaarheid van duurzame biomassa een potentieel belemmerende factor. Omdat niet alle biomassa tot netto-broeikasgasreductie leidt en de productie ervan ook negatieve effecten op bijv. biodiversiteit kan hebben, zijn zowel in het Europese als ook het Nederlandse beleid voor duurzame energie duurzaamheidscriteria opgenomen. Om deze reden wordt ook het gebruik van sommige soorten biomassa voor de productie van o.a. biobrandstoffen en bio-energie steeds verder afgebouwd, en wordt gebruik van reststromen – biomassa uit afvalstromen van bijv. de voedsel- en veevoerindustrie, papierindustrie, bosbouw, etc. – gestimuleerd. Reststromen hebben in het algemeen een veel kleinere CO₂-footprint dan geteelde biomassa, mits zij geen andere toepassingen hebben. Tot nu toe gelden de duurzaamheidseisen overigens alleen voor biomassa voor duurzame energie, en niet voor biomassa als grondstof (of voor fossiele grondstoffen).

Vele soorten biomassa en biograndstoffen

In dit rapport gebruiken we vaak de overkoepelende termen 'biomassa' en 'biograndstoffen'. Er zijn echter vele verschillende soorten biomassa, zoals:

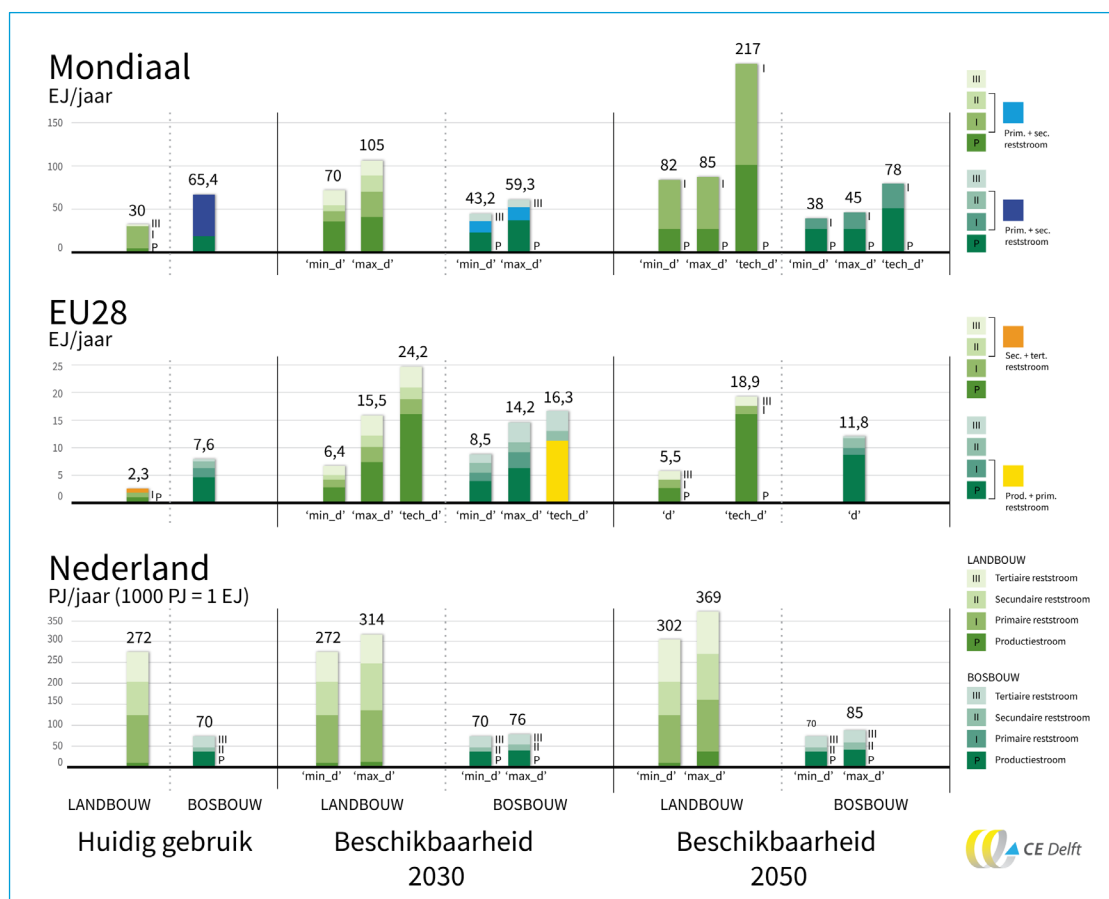
- geteelde gewassen zoals mais, suiker, koolzaad, enz.;
- houtproductie;
- restanten houtproductie (takken, e.d.);
- reststromen van de landbouw en landschapsbeheer (een grote verscheidenheid aan stromen);

- groente, fruit en tuinafval;
- rioolwaterzuiveringsslib.

Niet elke soort leent zich voor elke toepassing, vaak vergt een bepaald proces een specifieke biograndstof, met specifieke eigenschappen. In de factsheets van de verschillende negatieve emissie wordt dit deels benoemd, maar het voert voor dit rapport te ver om hier in veel detail op in te gaan.

Ondanks de vele studies en literatuur naar biomassabeschikbaarheid voor gebruik in de economie is de onzekerheid in de cijfers relatief groot. De resultaten van een uitgebreide literatuurstudie naar biomassabeschikbaarheid in Nederland, de EU (EU 27 + het Verenigd Koninkrijk) en mondiaal zijn gegeven in volgende figuur (Bron (PBL, 2020), o.b.v. (CE Delft & HaskoningDHV, R., 2020)). Waar de data dit toeliet is hierbij onderscheid gemaakt tussen verschillende soorten biomassa, van landbouw en bosbouw. Met name voor de EU en mondiaal is de range in de data groot, bovendien is niet goed op voorhand te voorspellen hoeveel van die biomassa zou kunnen worden geïmporteerd naar Nederland.

Figuur 21 - Huidige en toekomstige (2030 en 2050) beschikbaarheid van biomassa uit landbouw- en bosbouwstromen voor energie- en materiaaltoepassingen in de wereld, de Europese Unie en in Nederland. Min_d en max_d zijn respectievelijk de minimale en maximale duurzame beschikbaarheid, tech_d is de technisch duurzame beschikbaarheid. Uit (PBL, 2020), o.b.v. (CE Delft & HaskoningDHV, R., 2020)



In dezelfde studie is ook de toekomstige vraag vanuit Nederland naar biomassa in kaart gebracht, zie Tabel 19. Hierbij is alleen gekeken naar vraag die ontstaat door de behoefte om de CO₂-uitstoot te reduceren en fossiele grondstoffen te vervangen door hernieuwbare/circulaire. Een eventuele extra behoefte voor negatieve emissies is niet meegenomen.

Tabel 19 - Biomassabehoefte in Nederland voor verschillende toepassingen. De behoefte voor materialen is beperkt meegenomen omdat er vrijwel geen schattingen bestaan voor 2030 en 2050. Uit (PBL, 2020), o.b.v. (CE Delft & HaskoningDHV, R., 2020)

PJ/jaar	Huidig	2030 Min	2030 Max	2050 Min	2050 Max
Feedstock chemische industrie	3	3	200	90	368
Mobiliteit en transport	49	62	1.022	164	2.402
Warmtebehoefte industrie	24	23	23	-	88
Warmtebehoefte GO en glastuinbouw	25	-	438	-	911
Elektriciteitsproductie	50	30	30	-	159
Materialen	83	143	143	>143	>143
Toepassing in landbouw	90	90	101	90	101
Totaal	323	150	1.956	>486	>4.170

Uit de vergelijking van toekomstige vraag en aanbod concludeert de studie (CE Delft & HaskoningDHV, R., 2020) o.a. dat Nederland niet in de eigen biomassabehoefte kan voorzien, en importstromen vanuit de EU en mondiaal nodig zijn. Of er voldoende aanbod is om aan de vraag te voldoen hangt af van veel factoren, waaronder duurzaamheidsbeleid, biomassaprijzen en de wenselijkheid van gebruik in Nederland van een relatief groot deel van het mondiale potentieel.

Deze inzichten waren mede aanleiding voor het Kabinet om in 2020 een Duurzaamheidskader biograndstoffen op te stellen (Ministerie van I&W, 2020), wat recent verder is uitgewerkt in een Kamerbrief over de beleidsinzet biograndstoffen (Ministerie van EZK & Ministerie van I&W, 2022). De beleidsinzet in Nederland is daarbij gericht op vergroting van de inzet voor hoogwaardige toepassingen zoals de bouw, chemie en grond-, weg- en waterbouw, en als biobrandstof in sectoren met weinig alternatieven, zoals zwaar wegtransport, luchtvaart en zeevaart. Tegelijkertijd wordt de inzet van houtige biograndstoffen voor laagwaardige energietoepassingen (zoals elektriciteitsproductie en lagetemperatuurwarmte) afgebouwd.

Ondanks deze beleidskeuzes op dit moment is het echter nog onzeker welke rol de verschillende soorten biograndstoffen op de lange termijn (2050) zullen hebben. Uit de bovenstaande tabel blijkt dat biograndstoffen als vervanger voor fossiele brandstoffen en grondstoffen in veel sectoren een belangrijke bijdrage kan leveren aan de CO₂-reductie die nodig is om de klimaatdoelen te halen. Een deel van de negatieve-emissietechnologieën maakt hier gebruik van:

- de onderzochte BECCS-routes omvatten CO₂-afvang bij biomassagebruik voor de warmtebehoefte industrie en elektriciteitsproductie.
- BECCS kan ook worden toegepast bij een aantal processen o.b.v. biomassa in de chemische industrie (waar CO₂ vrijkomt bij de processen).
- Een groot deel van de biogene koolstof die wordt gebruikt als feedstock chemische industrie of voor materialen zal in producten worden vastgelegd, die deels voor langdurige opslag van de biogene CO₂ kunnen zorgen. Dit zijn de negatieve-emissietechnologieën koolstofopslag in houtbouw en biomaterialen.
- Als deze producten op termijn in een AVI eindigen kan BECCS worden toegepast. Dit zorgt voor permanente opslag van de CO₂,

Maar als de beschikbaarheid van duurzame biomassa in de toekomst beperkt blijkt te zijn (m.a.w., aan de onderkant van de inschattingen zit) zal dit een beperking zijn voor al deze toepassingen – en daarmee voor het BECCS-potentieel via deze routes.

Daarnaast zal biomassagebruik voor biobrandstoffen vanuit de sector mobiliteit en transport, voor warmte in de gebouwde omgeving (GO) en voor warmte en CO₂ in de glastuinbouw zich waarschijnlijk niet lenen CO₂-afvang voor negatieve emissies. CO₂-afvang en -opslag is alleen kosteneffectief bij stationaire, grotere installaties, vanwege de kosten van CO₂-infrastructuur en -transport over langere afstanden.

Het toekomstige potentieel van BECCS hangt dus sterk samen met de toekomstige beschikbaarheid van duurzame biomassa, én het toekomstige gebruik van biomassa in de economie.

Verder speelt nog een andere factor een (beperkende) rol: een toename van de koolstofinhoud van bossen en bodems (technieken I en III) staat in gespannen verhouding tot een toename van BECCS, biochar, houtbouw en biomaterialen. Bij die laatste worden er immers biomassa uit de bossen of land(bouw) verwijderd, waardoor het biomassavolume - en daarmee het koolstofgehalte - in bossen en land minder zal toenemen dan zonder deze activiteiten. De effecten van deze potentiële concurrentie/tegenstelling zijn nog niet goed onderzocht en gekwantificeerd.

3.5.2 Beschikbaarheid van CO₂ uit DAC voor negatieve emissies

Bij DAC speelt iets vergelijkbaars: naast geologische opslag zijn er ook andere mogelijke toepassingen voor uit de atmosfeer afgevangen CO₂. Vanwege de mogelijk grote behoefte aan duurzame en klimaatneutrale CO₂ voor bijvoorbeeld synfuels zal er rekening moeten worden gehouden met deze eventuele concurrerende vraag naar uit de atmosfeer afgevangen CO₂.

Het potentieel van negatieve emissies via DAC zal in eerste instantie afhangen van de technologieontwikkeling, zoals wordt beschreven in de factsheet. Maar daarnaast blijkt uit de klimaatneutrale scenario's voor de EU en Nederland dat ook voor andere toepassingen de vraag naar hernieuwbare koolstof/CO₂ sterk zal stijgen. Een grote vraag naar deze CO₂ kan bijvoorbeeld ontstaan als ook de lucht- en scheepvaart over gaat stappen naar duurzame, niet-fossiele brandstoffen. In deze sectoren wordt veel verwacht van hernieuwbare synfuels, brandstoffen die worden geproduceerd uit groene waterstof (geproduceerd uit duurzame elektriciteit) en eventueel CO₂, als noodzakelijk aanvulling op het beperkte potentieel aan duurzame biobrandstoffen. Door DAC geproduceerde CO₂ kan ook dienen als grondstof voor de chemische industrie, als vervanger van fossiele koolstofbronnen.

3.5.3 Beleid bepaald waar de biogene en DAC CO₂ wordt ingezet

De toepassing van de biogene of met DAC afgevangen CO₂ kan in theorie aan de markt worden overgelaten. Dan bepaalt de prijs die eindgebruikers bereid zijn te betalen voor deze CO₂ uiteindelijke toepassing. Wordt het gebruikt voor duurzame brandstoffen, voor duurzame materialen of wordt het ondergronds vastgelegd voor negatieve emissies? Omdat al deze markten echter sterk zullen worden bepaald door overheidsbeleid (klimaatbeleid en beleid voor circulaire economie), kan de overheid hier in sturen. De beleidsprioritering van de Mededeling van de Europese Commissie over duurzame koolstofcycli (EC, 2021c) – eerst drastische reductie van CO₂-uitstoot, dan circulariteit en dan pas negatieve emissies – kan hierbij richtinggevend worden. Daaruit volgt dat eventuele CO₂ die is afgevangen uit de atmosfeer eerst zou moeten worden ingezet in synfuels, als vervanger fossiele brandstoffen, en als grondstof voor materialen. Ook duurzame

biograndstoffen worden dan vooral ingezet waar ze nodig zijn voor CO₂-mitigatie en de circulaire economie. Pas als er overschotten zijn, of deze toepassingen in de praktijk niet nodig zijn omdat er alternatieve verduurzamingstechnieken zijn, kan deze hernieuwbare CO₂ voor negatieve emissies worden gebruikt. Deze beleidsvragen en mogelijke beleidsmaatregelen komen uitvoerig aan bod in Hoofdstuk 7.

4 Geologische opslag van CO₂

4.1 Inleiding

Gezien de grote volumes aan CO₂ die, om tot negatieve emissies te komen, permanent aan de atmosfeer onttrokken dienen te worden, is ondergrondse opslag waarschijnlijk hiervoor de technologie met het grootste potentieel. De Nederlandse ondergrond heeft een aanzienlijke capaciteit voor de opslag van CO₂, voldoende voor enkele tientallen jaren van opslag van CO₂ uit eigen emissiebronnen. Naar verwachting zullen in de periode tot 2030 enkele CO₂-opslagprojecten in de Nederlandse sector van de Noordzee starten met injectie van afgevangen CO₂ op industriële schaal en daarmee een significante bijdrage leveren aan de beoogde vermindering van de uitstoot van broeikasgassen. Deze projecten zullen een begin maken met de exploitatie van de opslagcapaciteit onder de Noordzee door de aanleg van een transport- en opslaginfrastructuur. CO₂ uit negatieve-emissietechnieken kan daarmee worden vervoerd en opgeslagen.

Om een antwoord te geven op de vraag in hoeverre Nederland opslagcapaciteit in de diepe ondergrond heeft voor CO₂ afgevangen bij negatieve-emissieprocessen, is een analyse van de verwachte CO₂-volumes als gevolg van afvang voor emissiereductie nodig, net als een schatting van CO₂-stromen uit naburige landen met weinig of geen eigen opslagmogelijkheden.

Dit hoofdstuk start met een uitleg van opslagcapaciteit en van de tijdslijnen die horen bij de ontwikkeling van opslagprojecten. De vraag naar CO₂-opslagcapaciteit volgt uit een aantal recente studies, waaruit een scenario van CO₂-afvang tot 2050 samengesteld wordt. Hierbij wordt een schatting voor de invoer van CO₂ voor opslag uit naburige landen meegenomen. Dit is van belang omdat opslagcapaciteit voor CO₂ in de diepe ondergrond niet evenredig over Europa verdeeld is. Landen, zoals België, met beperkte of geen opslagcapaciteit door minder gunstige geologie, zullen moeten samenwerken met landen als Nederland, met ruimere opslagmogelijkheden. Deze aanbodsscenario's worden aangevuld met een overzicht van beschikbare opslagcapaciteit, voornamelijk te vinden in gasvelden onder de Noordzee. Uitgaande van opslagprojecten die op dit moment ontwikkeld worden en naar verwachting in de periode 2026-2030 operationeel zullen zijn, wordt een scenario gebouwd van het te verwachten aanbod aan opslagcapaciteit. Een vergelijking tussen vraag naar en aanbod van opslagcapaciteit toont de noodzaak aan van extra inspanningen die vanaf 2030 nodig zijn om aan de vraag te voldoen. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een aantal conclusies en aanbevelingen om de opslag van CO₂, uit emissiereductie of ten behoeve van negatieve emissies, op de te verwachten schaal te kunnen uitvoeren.

4.2 Definities van opslagcapaciteit

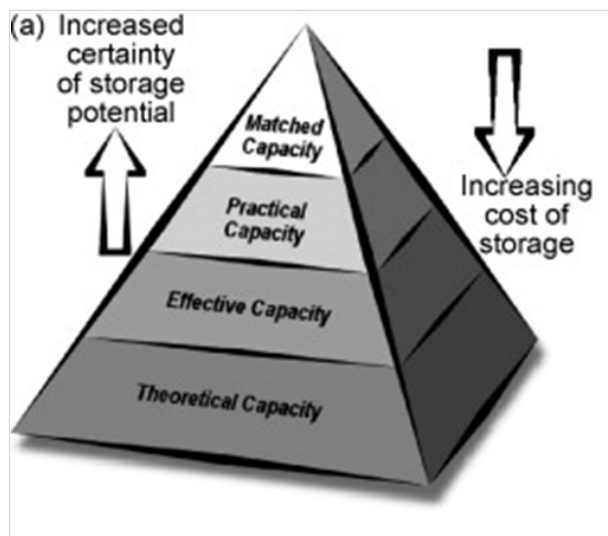
Voorafgaand aan een bespreking van de opslagcapaciteit voor CO₂ in het Nederlandse deel van de Noordzee is het van belang om duidelijk te maken dat de betekenis van de term 'opslagcapaciteit' afhangt van kennis van de ondergrond en van specifieke potentiële opslaglocaties. De terminologie die gebruikt wordt voor het beschrijven van opslagcapaciteit kan variëren en schattingen voor opslagcapaciteit kunnen onvergelijkbaar zijn voor locaties van verschillende niveaus van ontwikkeling.

Op basis van een internationale studie van de definitie van opslagcapaciteit (Bachu, S. et al., 2007) wordt deze in diverse bronnen beschreven als:

1. Theoretisch: dit representeert een eerste-orde-schatting van de hoeveelheid CO₂ die een potentiële opslaglocatie kan opslaan. De schatting wordt veelal gebaseerd op het geschatte totale volume aan porieruimte en wordt gezien als een bovengrens.
2. Effectief: dit representeert de opslagcapaciteit, waarbij geologische en praktische beperkingen in acht zijn genomen. Naar gelang er meer gegevens en kennis over een site beschikbaar komt of wordt verzameld, kan het duidelijk worden dat delen van de theoretische capaciteit niet beschikbaar zijn of ontwikkeld kunnen worden.
3. Praktisch: dit is de opslagcapaciteit, die overblijft na een analyse van niet-technische factoren van diverse aard, zoals regelgeving en beleid, infrastructurele overwegingen en economische haalbaarheid.
4. Passend: dit is uiteindelijke, bewezen haalbare capaciteit, gebaseerd op een 'matching' met bronnen van CO₂ op basis van de debieten van CO₂-aanvoer en potentiële injectiesnelheden.

Zoals geïllustreerd in Figuur 22 neemt de zekerheid over de bestaande opslagcapaciteit toe naarmate de kennis over potentiële opslaglocaties toeneemt. Door betere kennis over de ondergrond zal naar verwachting een deel van de opslaglocaties wegvallen.

Figuur 22 - Een representatie van de techno-economische piramide van opslagcapaciteit, waarin opslagcapaciteit van locaties met verschillende niveaus van kennis en zekerheid zijn weergegeven



Bron: (Bachu, S. et al., 2007).

Het concept getoond in Figuur 22 is ook gerelateerd aan het systeem van 'storage readiness levels' (SRL). Dit systeem van SRL is goed vergelijkbaar met dat van 'technical readiness levels' (TRL): opslaglocaties op het niveau van SRL 9 zijn klaar voor injectie van CO₂, of al operationeel, en locaties met SRL 1 hebben niet meer dan een schatting van de opslagcapaciteit met een zeer grote mate van onzekerheid.

Figuur 23 - SRL-categorieën in het proces van het ontwikkelen van een opslaglocatie volgens (Akhurst, M. et al., 2021). De onderscheiden stappen op technisch gebied zijn in groen aangegeven, de stappen naar het indienen en verkrijgen van een opslagvergunning in bruin

SRL number	Description/title of SRL	Stages and thresholds in the storage site permitting process	Stages and thresholds in technical appraisal & project planning
SRL 1	First-pass assessment of storage capacity at country-wide or basin scales	Gathering information for an exploration permit, if needed*	Technical appraisal
SRL 2	Site identified as theoretical capacity		
SRL 3	Screening study to identify an individual storage site & an initial storage project concept		
SRL 4	Storage site validated by desktop studies & storage project concept updated		
SRL 5	Storage site validated by detailed analyses, then in a 'real world' setting	Exploration permit	Well confirmation, if needed* Outline planning for development Technical risk reduction completed
SRL 6	Storage site integrated into a feasible CCS project concept or in a portfolio of sites (contingent storage resources)	Planning & plan iteration for a storage permit ♦	
SRL 7	Storage site is permit ready or permitted	Storage permit ♦ application & iteration	
SRL 8	Commissioning of the storage site and test injection in an operational environment	Storage permit ♦ required Injection permit application, if needed	All planning work completed Construction & testing
SRL 9	Storage site on injection	Injection permit	Site construction completed Operation & monitoring

♦ Equivalent of storage permit relevant to national jurisdiction

* Een exploratievergunning of een exploratieput kan achterwege blijven bij hergebruik van een uitgeproduceerd olie- of gasveld voor de opslag van CO₂.

Het SRL-systeem (Akhurst, M. et al., 2021) wordt in dit hoofdstuk gebruikt om de context van de schattingen van opslagcapaciteit in het Nederlandse deel van de Noordzee geven. Het SRL-niveau geeft aan in welke mate de haalbaarheid van opslag op een bepaalde locatie is bestudeerd⁸, zoals hieronder verder toegelicht wordt.

4.3 Tijdslijn van de ontwikkeling van opslaglocaties

Het verhogen van het 'storage readiness level' vereist het doorlopen van een karakterisatieproces - een studie van de geologische structuren in de diepe ondergrond en de respons daarvan op injectie van CO₂ - dat een investering van zowel tijd als geld betekent. Tabel 20 geeft een indicatie van de ontwikkeltijd van een aantal opslaglocatie in Europa.

⁸ There is also the more commercial "Storage Resource Management System" (which is available at [CO₂ Storage Resources Management System \(spe.org\)](https://spe.org/)) This also helps classify storage sites following a similar system already used in the oil & gas industry.

Tabel 20 - Voorbeelden van ontwikkeltijden van CO₂-opslaglocaties in de Noordzee

Site FEED study or theoretical assessment		Duration of appraisal	Total time to storage permitting (incl. appraisal)	SRL at start	SRL at end
Duration	White Rose FEED (National Grid, 2016a)	30 months	33 months	2	7
	Peterhead Feed (Shell, 2016a)	16 months	20 months	2/3	7
	P18-4 pre-FEED (ROAD, 2018)	24 months	48 months	2/3	7
Estimated duration	S-SAP (Pale Blue Dot, 2016)	3 years	3 years	2/3/4	8
	SiteChar (Gruson et al., 2015)	Min. of 2 years	2 years	1	8
	CO ₂ ReMoVe (Groenenberg et al., 2008)	4 years	4 years	1	8
	Government Response to the Proposed Offshore licensing regime (DECC, 2010)	4 years (depleted hydrocarbon field) 6 years (saline aquifer)	5 years	1	8
	FE/NETL Saline Storage Cost Model (Grant et al., 2017)	Min. of 4 years (saline aquifer)	Min. of 6 years (saline aquifer)	1	8

Bron: (Akhurst, M. et al., 2021).

Tabel 20 laat zien dat het ontwikkelen van een CO₂-opslaglocatie, vanaf een eerste analyse van CO₂-opslagcapaciteit (SRL 1 of 2) tot het indienen van de aanvraag voor een opslagvergunning (SRL 7) of het starten van de bouw van de injectiefaciliteiten (SRL 8) vele jaren in beslag neemt. Voor leeggeproduceerde gasvelden, zoals voor het Peterhead-project, waarvan de kennis na afloop van gasproductie groot is, kan de doorlooptijd korter zijn dan die voor zoutwatervoerende lagen (aquifers, zoals NETL), waarvan het kennisniveau in het algemeen relatief laag is.

Belangrijke factoren voor de investering in zowel tijd als geld voor de ontwikkeling van een opslaglocatie zijn de volgende (Akhurst, M. et al., 2021):

- De ligging van een locatie: er is waarschijnlijk meer informatie en kennis over de diepe ondergrond beschikbaar voor locatie in de buurt van bestaande olie- of gasproductie. De aanwezigheid van een geologische dienst en een geschiedenis van kartering op bekkenschaal vergroten de kans op beschikbaarheid van relevante geologische data.
- Beschikbare data: voor de ontwikkeling van CO₂-opslag relevante data omvat data uit putten (informatie over diepe geologische lagen) of seismische data, die mogelijk uit eerdere exploratieactiviteiten zijn verkregen.
- Eerder uitgevoerde haalbaarheidsstudies: eerder werk is mogelijk gedaan om lagere SRLs te bereiken, of een locatie is voor een andere toepassing al bestudeerd.
- Type opslagreservoir: in het algemeen is er veel data en kennis beschikbaar over olie- en gasvelden, uit de periode van productie. Voor zoutwatervoerende lagen is het kennisniveau in het algemeen laag en zal er data moeten worden verzameld (bijv. een seismische survey om de diepe structuren in kaart te brengen).

In Nederland vindt de ontwikkeling van opslaglocatie vooral plaats door hergebruik van uitgeproduceerde olie- of gasvelden, waarvoor het niveau van kennis en van beschikbare data hoog is. In veel mindere mate is dit het geval voor zoutwatervoerende lagen, waarvoor de investering voor ontwikkeling van CO₂-opslaglocaties groter is en de doorlooptijd langer.

Op basis van een verdeling in ‘decision gates’ (Tabel 21), geeft (Neele, F. et al., 2012) een tijdslijn voor de ontwikkeling van opslaglocaties.

Tabel 21 - Summary of storage site development workflow

Decision Gate 0: begin van haalbaarheidsstudie	
Fase 1	Eerste inventarisatie van haalbaarheid van en risico's geassocieerd met CO ₂ -opslag in een specifieke locatie. Kortste fase - indien data beschikbaar is. Zo niet, dan is er grote investering nodig voor het schieten, verwerken en interpreteren van seismische data.
Decision Gate 1: begin van de pre-FEED	
Fase 2	Opzetten van geologische modellen van de ondergrond en detailstudie van opslag. Afhankelijk van beschikbare data: zetten van een exploratieput, draaien van well logs, verzamelen van boorkernen en uitvoeren van een injectietest.
Decision Gate 2: FEED & bouw	
Fase 3	Gericht op het verkrijgen van een opslagvergunning en het starten van constructie van de opslaglocatie. Opzetten van MER, indien nodig boren van extra putten of aanpassen van bestaande putten, constructie van locatie (platform) en transportinfrastructuur (zoals pijpleidingen).

Uitgeproduceerde olie- of gasvelden versus zoutwatervoerende lagen

Figuur 24 schetst de tijdslijn van ontwikkeling van een opslaglocatie, op basis van de indeling in fasen als in Tabel 21 gegeven. De tijdslijn voor opslag in een zoutwatervoerende laag is enkele jaren langer dan die voor opslag in een uitgeproduceerd olie- of gasveld.

Figuur 24 - Tijdlijnen van ontwikkeling van een opslaglocatie in uitgeproduceerde olie- of gasvelden (blauw) versus die voor een locatie in een zoutwatervoerende laag



Bron: (Neele, F. et al., 2012).

Zoals duidelijk wordt uit Tabel 20 varieert de ontwikkeltijd van project tot project. Naast de beschikbaarheid van data zijn er andere factoren die de tijdsduur beïnvloeden:

- tijd nodig voor het zekerstellen van subsidie en verkrijgen van financiële zekerheid;
- het ontwikkelen van de hele CCS keten en de afstemming tussen ketenonderdelen;
- de duur van het vergunningstraject;
- publieke acceptatie van het opslagproject.

Mogelijkheden voor het verkorten van de ontwikkeltijd van CO₂-opslag

De duur van een haalbaarheidsstudie voor CO₂-opslag wordt voornamelijk bepaald door de beschikbaarheid van data, zoals hierboven beschreven. Aangezien CCS een zich nog ontwikkelende markt is, zijn partijen die opslaglocaties kunnen ontwikkelen (hierna: 'opslag-partijen') en opereren terughoudend met het doen van de hiervoor benodigde investe-

ringen. Door de relatief lange aanlooptijd vallen dergelijke investeringen ruim vóór een tijdstip waarop een industriële partij een verplichting voor levering van CO₂ aan kan gaan. Op dit moment leidt dit in sommige gevallen tot een kip-en-ei-situatie en een onbalans tussen de vraag naar en aanbod van CO₂-opslagcapaciteit.

Hierbij komt een beperking aan het aantal opslaglocaties dat tegelijkertijd ontwikkeld kan worden. Hoewel de meeste opslagpartijen de benodigde kennis in huis hebben, is er een beperkt aantal specialisten dat kan worden ingezet en een beperkt aantal locaties waaraan een opslagpartij kan werken. Er is een significante investering nodig, tijd en geld, voor de opleiding ten behoeve van ontwikkeling van opslaglocaties.

Meer helderheid zou kunnen worden geschapen in het vergunningsproces. Het Porthos-project⁹ diende een opslagvergunningsaanvraag in 2019 in, maar heeft de benodigde omgevingsvergunningen nog altijd niet rond. Dit houdt het investeringsbesluit en daarmee de start van constructie tegen. Porthos is het eerste project in zijn soort in Nederland ('first-of-a-kind') en loopt waarschijnlijk tegen inefficiënties in procedures aan, leidend tot onzekerheid en langere doorlooptijden. Volgende projecten zullen naar verwachting hun voordeel doen met verbeterde en duidelijkere processen.

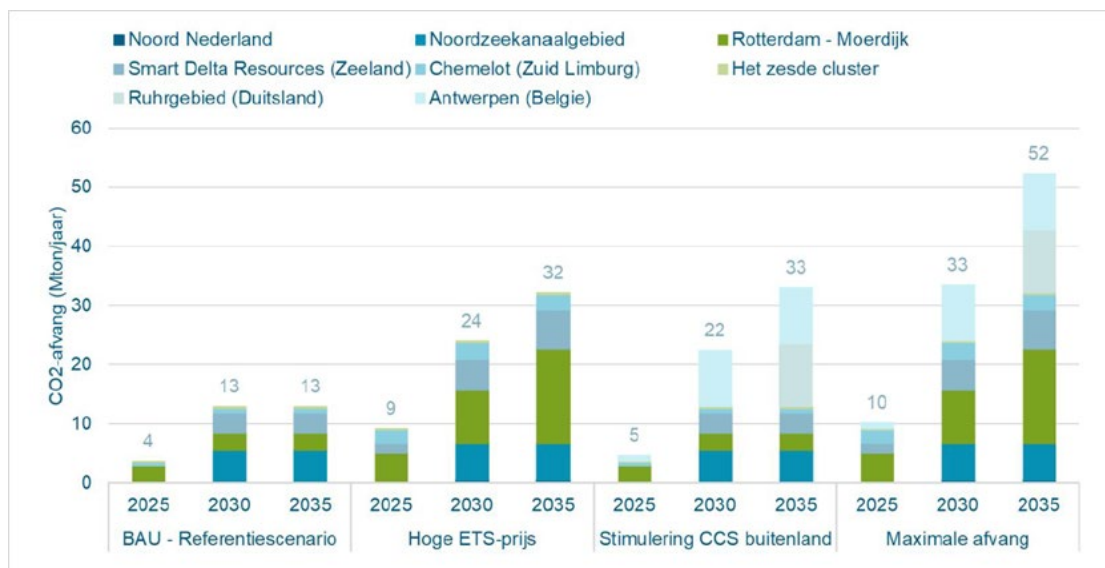
4.4 De vraag naar opslagcapaciteit in Nederland

Deze sectie levert een samenvatting van de vraag naar CO₂-opslagcapaciteit zoals die tot 2050 verwacht wordt voor 'fossiele' CO₂. De extra vraag naar opslagcapaciteit met inbegrip van CO₂ uit processen die tot negatieve emissies moeten leiden volgt in het volgende hoofdstuk. Er moet worden opgemerkt dat in een zich ontwikkelende CCS markt het grootste deel van de tegen 2030 af te vangen en op te slaan CO₂ enige vorm van subsidie, nationaal of vanuit de EU, nodig zal zijn. Tegen de achtergrond van een langzaam stijgende, maar ook sterk variërende ETS-prijs, betekent de financiële onzekerheid op dit gebied dat niet kan worden aangenomen dat CO₂-afvang en -opslag zich ontwikkelt op basis van alleen klimaatdoelstellingen of interesse vanuit de markt. Daarbij komt onzekerheid over stabiele politieke steun, zeker richting en voorbij 2050, waardoor de vraag naar opslagcapaciteit op die termijn hoogst onzeker is. Dit is in nog sterkere mate het geval voor vraag naar opslagcapaciteit in Nederland voor CO₂ uit de ons omringende landen. De scenario's in deze studie zijn opgesteld op basis van publieke bronnen, waarbij de onderliggende aannames bij de analyse worden belicht.

Het vooruitzicht op de volumes aan afgevangen en op te slaan CO₂ is gebaseerd op een recente studie naar de vraag naar opslag, uitgevoerd voor het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (Royal HaskoningDHV, 2021). Gezien het feit dat deze studie van recente datum is (2021), zijn de aannames die gedaan zijn in die studie zijn relevant. Een samenvatting van die studie is weergegeven in Figuur 25. Het rapport bevindt zich in het publieke domein; de aannames en overwegingen die aan de studie ten grondslag liggen worden hier niet herhaald. Omdat de scenario's in de Royal HaskoningDHV-studie slechts tot 2035 lopen, zijn andere bronnen geraadpleegd voor een vooruitzicht tot 2050.

⁹ Het Porthos-project beoogt opslag van CO₂ uit de haven van Rotterdam in offshore-gasvelden. Zie <https://www.porthosco2.nl/>.

Figuur 25 - Verwachte hoeveelheden CO₂ in meerdere scenario's voor de jaren 2025, 2030 en 2035



Bron: (Royal HaskoningDHV, 2021).

De hoeveelheden CO₂, zoals weergegeven in Figuur 26, zijn in overeenstemming met een recente studie naar de ontwikkeling van opslagcapaciteit in uitgeproduceerde gasvelden (EBN; Gasunie, 2018). Het 'mid-case'-scenario in die studie kwam tot een volume aan afgevangen CO₂ van 20 Mton/jaar in 2030, in industriële sectoren van hogetemperatuur-warmte, cement- en staalproductie en raffinaderijen (Figuur 27). Dit niveau werd in de EBN-Gasunie studie aangehouden tot 2060. In de huidige studie wordt daarom ook het niveau van afvang voor 2035 tot 2050 en daaraan voorbij voortgezet.

De hoeveelheden voor 2030 en 2050 zijn ook in overeenstemming met de hoeveelheden CO₂ die in de TRANSFORM- en ADAPT-scenario's (TNO, 2022c) worden voorzien, waarbij het ADAPT-scenario meer CO₂-afvang en -opslag tot gevolg heeft, en het TRANSFORM-scenario minder.

Figuur 26 - Analyse van de vraag naar CO₂-opslagcapaciteit tot 2060

Overzicht afgevangen hoeveelheid CO ₂ per jaar in 2030 en als cumulatieve hoeveelheid tot 2060						
	Low case [Mt/j]	Mid case [Mt/j]	High case [Mt/j]	Low case [Mt]	Mid case [Mt]	High case [Mt]
Maasvlakte Industrie	7	7	7	235	233	233
Maasvlakte Energie		7	7		229	229
IJmuiden	7	6	8	241	192	253
Eemshaven			8			249
Totaal	14	20	30	476	654	964

Bron: (EBN-Gasunie, 2017).

Gezien de lange doorlooptijd van de ontwikkeling van opslagcapaciteit zal naar verwachting de opslagcapaciteit in 2030 gegeven zijn door de opslagprojecten die nu in ontwikkeling zijn. De markt voor CCS in Nederland is gevormd door en afhankelijk van overheidssubsidies (naast subsidies vanuit de EU). SDE++-subsidies hebben de ontwikkeling van het Porthos-project mogelijk gemaakt. Voorgaande SDE++-rondes kenden een subsidieplafond van 7,2 Mton/jaar voor afvang bij industriële processen en 3 Mton/jaar voor afvang bij afval-verbrandingsinstallaties. De nieuwe SDE++-regeling heeft geen maximum voor afgevangen CO₂ meer; de verwachting is dat een hogere ETS-prijs tot meer afvangprojecten zal leiden. De SDE++-regeling heeft geleid tot subsidies voor emissiereductie van 2,3 Mton/jaar gerelateerd aan het Porthos-project en 2,86 Mton/jaar gerelateerd aan opslag door het Aramis-consortium. Niettemin zijn de enige opslagvergunningen waarvoor een aanvraag is ingediend voor de Porthos- en Aramis-projecten; de verwachting is dat ruim vóór 2030 beschikbare opslagcapaciteit door die projecten geleverd wordt.

Dit betekent dat in 2030 Porthos een opslagcapaciteit van 2,5 Mton/jaar levert, en de leden van het Aramis-consortium een verdere 5 Mton/jaar. Deze capaciteit neemt dan toe tot een maximum van 22 Mton/jaar geleverd door Aramis – de maximumcapaciteit van de geplande Aramis-pijpleiding. Aan de CO₂-aanbodkant wordt het ‘referentiescenario’ uit Figuur 26 aangehouden, met in 2030 13 Mton/jaar aan CO₂ uit Nederland.

CO₂-import uit omliggende landen

Nederland heeft ruime opslagcapaciteit (geschatte totale capaciteit in offshore-gasvelden is 1.700 Mt; EBN-Gasunie, 2017), in tegenstelling tot buurlanden België en Duitsland. De ontwikkeling van de Porthos- en Aramis-projecten wordt mede ondersteund door hun status als ‘Projects of Common Interest’¹⁰ (PCI). PCI’s zijn projecten waarin CO₂-transport- en opslag-infrastructuur wordt ontwikkeld met relevantie voor meerdere EU-lidstaten. België en Duitsland hebben het belang van CCS voor het halen van klimaatdoelen kenbaar gemaakt, maar hebben door zowel geologische als maatschappelijke barrières beperkte mogelijkheden voor opslag van CO₂ in eigen land. Internationale samenwerking op het gebied van

¹⁰ [Projects of Common Interest \(europa.eu\)](https://european-council.europa.eu/media/113074/1/attachmentData/binary/113074/1/PCI%20list%202021.pdf)

CO₂-opslag is daarom nodig en dit kan middels aan het PCI-systeem gelieerde subsidies verwezenlijkt worden.¹¹

De vraag naar opslagcapaciteit van België en Duitsland is hoogst onzeker, door zowel de nog onduidelijke politieke steun voor het inzetten van CCS, als de vraag met welke opslag-project(en) zal worden samengewerkt indien CCS inderdaad onderdeel wordt van de maatregelen voor emissiereductie. Naast de opslagprojecten in Nederland zijn er ook in Denemarken, Noorwegen en het Verenigd Koninkrijk opslagprojecten in ontwikkeling, waar CO₂ uit andere landen kan worden opgeslagen.

Tegen deze achtergrond wordt in deze studie de schatting van CO₂-aanvoer uit België en Duitsland uit de Royal HaskoningDHV-studie gebruikt (Figuur 27). In dit ‘stimulating abroad’-scenario start de invoer vanuit België in 2025; gezien de geplande startdatum van Porthos (2026¹²) is dat in deze studie vertraagd naar 2027. De invoer in dat jaar vanuit België/Duitsland wordt op 2,5 Mton/jaar gezet, geleidelijk toenemend naar de 20 Mton/jaar in 2035 zoals verwacht in de Royal HaskoningDHV-studie.

Hieronder wordt nader ingegaan op de scenario's van CO₂-aanvoer vanuit België en Duitsland. Opslag door zich ontwikkelende projecten buiten Nederland wordt ook besproken.

Figuur 27 - Vraag naar opslagcapaciteit in Nederland vanuit België en Duitsland (Royal HaskoningDHV, 2021)

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Ruhrgebied (Duitsland)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,6
Antwerpen (België)	0	0	0	1	2	4	8	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5

4.4.1 Duitsland

Duitsland ziet sinds kort een groei van politieke steun voor CCS. CO₂-afvang en -opslag wordt in Duitsland gereguleerd door de Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG), aangenomen in 2012, waarin CCS op diverse manieren wordt beperkt. Een recent rapport van de Duitse federale overheid (december 2022) meldt dat de bepalingen in de KSpG tegen het licht wordt gehouden, gezien de in de omringende landen op stapel staande CCS-projecten. De huidige beperkingen aan CO₂-afvang en -opslag in Duitsland staan emissiereductie, met name van de proces-gerelateerde CO₂-uitstoot, in de weg. Een aangepaste KSpG wordt in de loop van 2023 verwacht (BMWK, 2022).

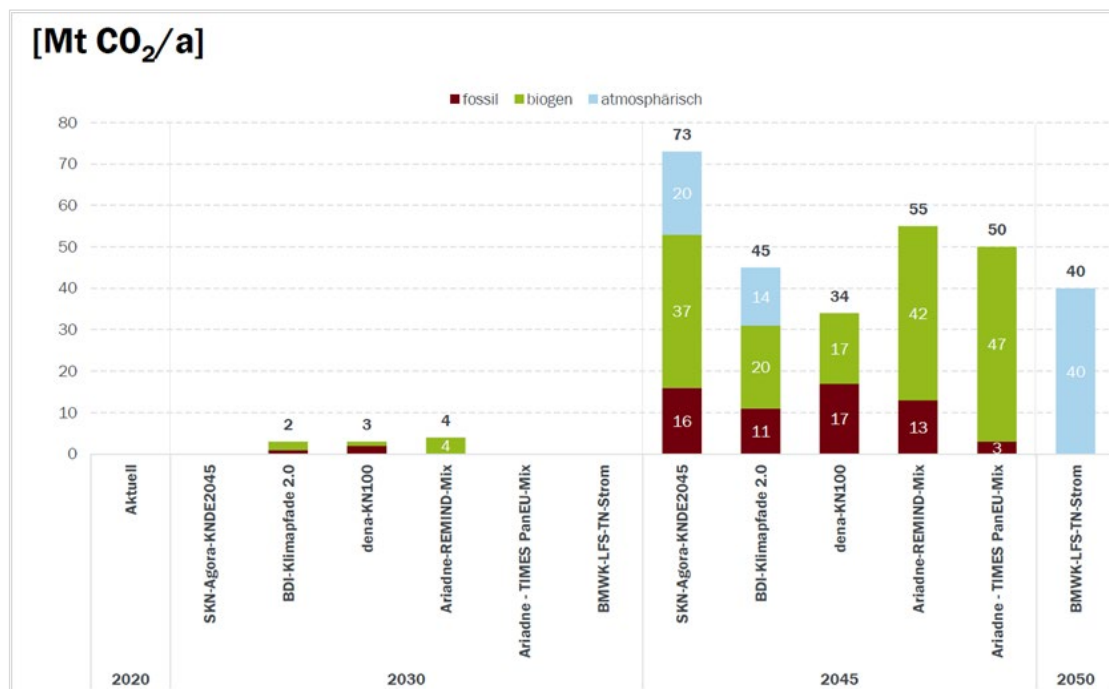
Langetermijnsenario's voor CO₂-opslag in Duitsland komen tot volumes van 37-73 Mton/jaar in 2045¹³ (Lübbers, S. et al., 2022), waarbij naast CO₂ uit fossiele en biogene bronnen ook direct air capture is inbegrepen (Figuur 28).

¹¹ De lijst kandidaten voor de 6de PCI lijst (2023) omvat, naast CO₂ TransPorts (een consortium met daarin ook Porthos) en Aramis ook andere projecten die ‘cross-border’ CO₂-opslag beogen op te zetten. Hieronder vallen ook projecten waarin CO₂ afgevangen in Nederland elders moet worden opgeslagen, en projecten waarin CO₂ uit België of Duitsland voor opslag naar Noorwegen moet worden getransporteerd.

¹² Zie [Project - Porthos \(porthosco2.nl\)](https://porthosco2.nl/)

¹³ 30 Mton/jaar in 2045 wordt ook vermeld in de Energy Post: [Germany is developing a strategy for Carbon Capture and Storage to meet its 2045 net zero target - Energy Post](https://www.energy-post.com/germany-is-developing-a-strategy-for-carbon-capture-and-storage-to-meet-its-2045-net-zero-target/)

Figuur 28 - Schattingen voor de vraag naar CO₂-opslag vanuit diverse emissiebronnen in Duitsland



Bron: (Lübbers, S. et al., 2022).

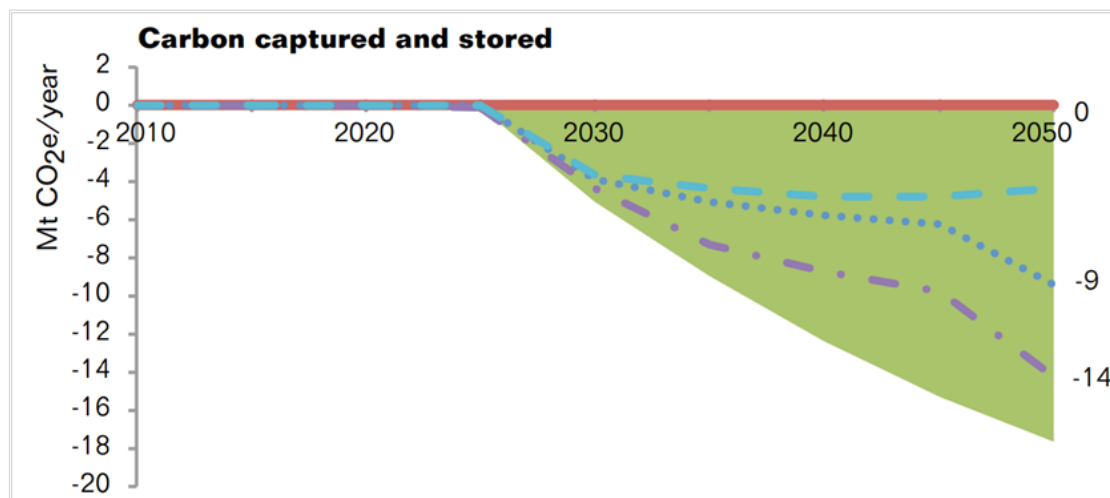
4.4.2 België

De vraag naar opslagcapaciteit in België is naar verwachting kleiner dan in Duitsland. De federale overheid kwam tot een schatting van de maximale hoeveelheid afgevangen CO₂ van 16 Mton/jaar in 2045 (Belgian Federal Government, 2013); zie Figuur 29.

Opslagmogelijkheden in eigen land zijn zeer beperkt door de voor opslag minder gunstige eigenschappen van diepe geologische lagen en de lage SRL (SRL 1) van de meeste potentiële locaties (Welkenhuysen, K. et al., 2011, Welkenhuysen, K. et al., 2013).

De ligging van industriële gebieden, zoals Antwerpen, maakt een verbinding met CO₂-netwerken in omliggende landen voor de hand liggend. Zoals hierboven al aangegeven, er lopen op dit moment diverse initiatieven, in de vorm van PCI's, om Belgische emissiebronnen aan opslagcapaciteit op de Noordzee te koppelen, waarbij zowel opslagprojecten in Nederland als daarbuiten in beeld zijn.

Figuur 29 - Schattingen voor de vraag naar opslagcapaciteit vanuit diverse emissiebronnen in België



Bron: (Belgian Federal Government, 2013)

Rode lijn: referentiescenario; blauw gestreepte curve: El-integratiescenario; blauw gestippelde curve: CORE-scenario; paarse curve: -95% GHG-scenario; groen gebied: bereik van 3-80% 'GHG low carbon'-scenario.

Andere ontwikkelingen in transport en opslag

Zoals hiervoor al genoemd lopen er diverse initiatieven voor de ontwikkeling van CO₂-opslagcapaciteit, vooral onder de Noordzee, waarbij CO₂ uit landen als België en Duitsland naar opslaglocaties in de Nederlandse, Deense en Noorse sectoren van de Noordzee wordt vervoerd. Figuur 30 geeft een representatie van de kandidaten voor Projects of Common Interest (PCI) of Projects of Mutual Interest (PMI) voor de 6de PCI/PMI-lijst. Hoewel sommige initiatieven zich nog in een vroeg stadium van ontwikkeling bevinden, geeft hun aantal duidelijk aan dat de markt voor opslag van CO₂ naar verwachting aantrekkelijk wordt. De initiatieven geven ook aan dat er meerdere mogelijkheden worden onderzocht om CO₂ uit landen als België en Duitsland op verschillende locaties in de Noordzee op te slaan. Dit illustreert de onzekerheid over het volume aan CO₂ dat op termijn uit deze landen voor opslag naar Nederland komt. Een relevante PCI, in dit verband, is de 'Delta Rhyne Corridor' (zie Figuur 31), dat een pijpleidingnetwerk beoogt te construeren tussen Rotterdam en meerdere industriegebieden in Nederland en Duitsland, met als doel te CO₂ op te slaan onder de Noordzee.

Het is de verwachting, zie ook in de volgende secties in dit hoofdstuk, dat op de langere termijn, na 2050, grootschalige opslag van CO₂ onder de Noordzee zich zal richten op het Verenigd Koninkrijk¹⁴ en Noorwegen. Deze landen hebben tientallen gigatonnen aan opslagcapaciteit in zoutwatervoerende lagen en in (op termijn) lege gasvelden. Naast de al lopende Sleipner- en Snøhvit-projecten, zal het Northern Lights-project is naar verwachting het volgende project in Noorwegen zijn dat deze capaciteit ontwikkelt. Figuur 30 laat zien dat er meerdere projecten op stapel staan om dit voorbeeld te volgen.

¹⁴ Het is op dit moment nog niet mogelijk om CO₂ dat onder het ETS in Europa is afgevangen in het Verenigd Koninkrijk (VK) op te slaan. Naar verwachting zal regelgeving op termijn aangepast worden om opslagprojecten op de Noordzee met elkaar en vooral met die in het VK te verbinden.

Figuur 30 - Weergave kandidaatprojecten 6de lijst van Projects of Common Interest (PCI) of Projects of Mutual Interest (PMI)



Bron: (CATF, 2022).

4.5 Samenvatting van de vraag naar opslagcapaciteit in 2030 en 2050

Tabel 22 geeft een overzicht van de hier gebruikte scenario's voor de schatting van de vraag naar opslagcapaciteit in Nederland richting 2050. De schattingen voor 2030 zijn gebaseerd op de studie van Royal HaskoningDHV (2021). De schattingen voor 2050 hebben een grotere onzekerheid, vanwege de afhankelijkheid van toekomstige politieke keuzes en marktontwikkeling. Het volume aan in Nederland afgevangen CO₂ is in deze studie 20 Mton/jaar, wat in 2035 gehaald wordt; dit niveau wordt volgehouden tot 2050.

Indien Nederland zich positioneert als internationaal CO₂-opslagknooppunt, dan zou een extra volume hieraan worden toegevoegd, van 38 Mton/jaar in 2050.

Deze volumes komen goed overeen met een recente studie (Netbeheer Nederland, 2023), waarin het 'Europese integratie'-scenario komt tot een hoeveelheid van bijna 44 Mton/jaar in 2050, terwijl het scenario 'Internationale handel' op 20 Mton/jaar in 2050 uit komt.

Tabel 22 - Overzicht van geschatte vraag naar opslagcapaciteit voor CO₂ van emissiebronnen van fossiele CO₂ (in Mton/jaar). Aanvoer vanuit België en Duitsland wordt meegenomen, vanwege beperkingen aan opslagcapaciteit in die landen

Jaar	Geschatte volumes aan afvang van fossiele CO ₂ bij NL- emissie-bronnen	Verwachte import van CO ₂ uit DE (uitgezonderd wat elders wordt opgeslagen)	Verwachte import van CO ₂ uit België (uitgezonderd wat elders wordt opgeslagen)	Geschatte opslag buiten NL door emissiebronnen in BE en DE	Totale vraag naar opslagcapaciteit in NL
2030	13 ¹⁵	0 ⁹	7 ¹⁶	0	20
2050	20 ¹⁷	28 ¹⁸	9,5 ¹⁹	Ongeveer 25 ²⁰	57,5

4.6 Beschikbare opslagcapaciteit in Nederland

Het meest recente overzicht van de opslagcapaciteit in de Nederlandse sector van de Noordzee is te vinden in de studie van EBN-Gasunie (2017), waarin de beschikbare ruimte voor CO₂ in vooral gasvelden is geïnventariseerd. Figuur 31 en Figuur 32 laten zien dat er een groot aantal potentieel geschikte gasvelden is, rond de honderd, waarvan het merendeel ten noorden van Den Helder ligt. De totale capaciteit voor CO₂-opslag in deze velden is zo'n 1.700 Mt. De capaciteit van de velden die door het Porthos-project en door de partners in het Aramis-consortium worden ontwikkeld representeert een gedeelte van de 1.700 Mt. Daarnaast is het belangrijk te vermelden dat totale capaciteit van 1.700 Mt ook velden omvat die bij nadere studie ongeschikt voor conversie naar opslaglocaties zullen blijken te zijn.

De capaciteit in gasvelden onder land wordt geschat op zo'n 1.100 Mt (EBN-Gasunie, 2017)²¹. Onshore-capaciteit wordt hier buiten beschouwing gelaten, in overeenstemming met het beleid van de regering om CO₂-opslag offshore te ontwikkelen.

Opslagcapaciteit in zoutwatervoerende lagen (saliene aquifers) is veel moeilijker te schatten, omdat het kennisniveau daarvan in het algemeen laag is. Terwijl opslagcapaciteit in leeggeproduceerde gasvelden ontstaat door onttrekking van aardgas uit (en daardoor drukverlaging in) het gasveld, heeft opslag in aquifers een drukverhoging tot gevolg. Zeer grote aaneengesloten geologische formaties met voor opslag gunstige eigenschappen zijn nodig om significante opslagcapaciteit te behalen. In het Verenigd Koninkrijk en Noorwegen bevinden zich dergelijke structuren en wordt opslag daarin voorbereid - Northern Lights in Noorwegen is daarvan een voorbeeld. Een studie door TNO gaf een schatting van opslagpotentieel in aquifers van bijna 1.500 Mt (Neele, F. et al., 2013), met de aantekening dat

¹⁵ Gebaseerd op (Royal HaskoningDHV, 2022).

¹⁶ Gebaseerd op (Belgian Federal Government, 2013)

¹⁷ Gebaseerd op EBN 2017.

¹⁸ Gebaseerd op (Lübbbers, S. et al., 2022) en onder de aanname van aanzienlijke opslagcapaciteit buiten Nederland.

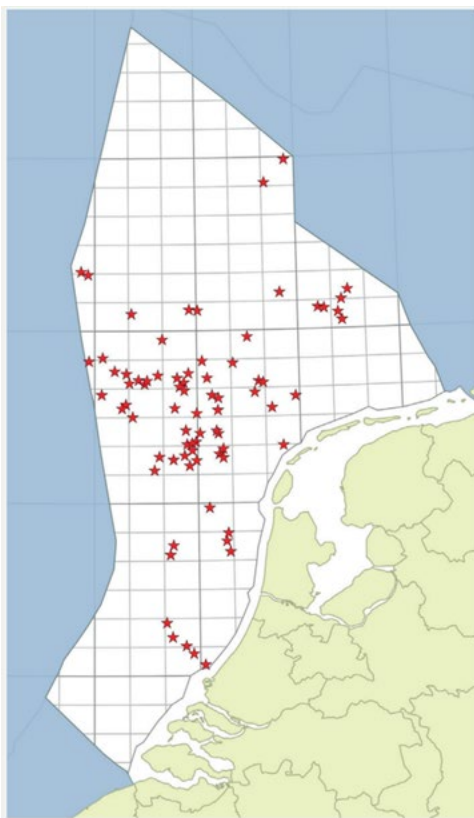
¹⁹ Gebaseerd op (Royal HaskoningDHV, 2022) en (Belgian Federal Government, 2013) en onder de aanname van aanzienlijke opslagcapaciteit buiten Nederland.

²⁰ Benodigde opslagcapaciteit buiten Nederland, voor een totale hoeveelheid CO₂ uit Duitsland van 40 Mton/jaar (Lübbbers, S. et al., 2022) en totale hoeveelheid uit België van 13 Mton/jaar (Belgian Federal Government, 2013)

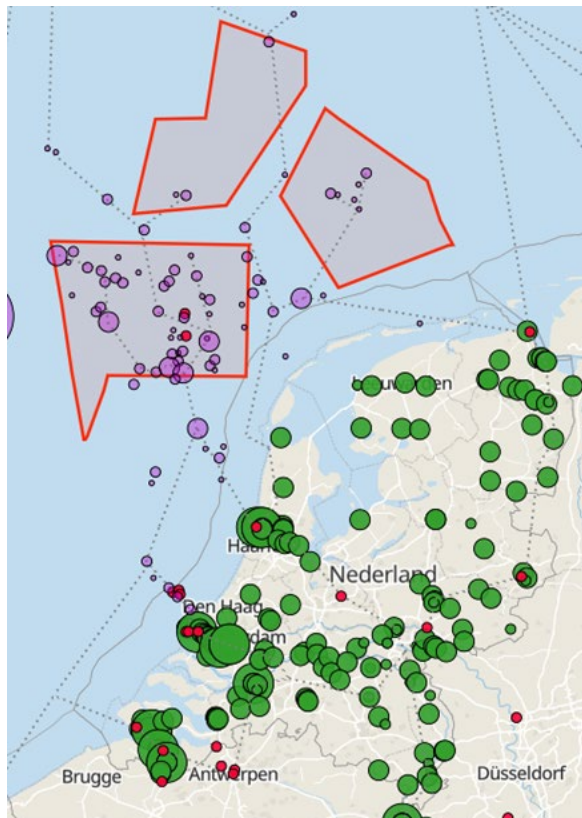
²¹ Hierin is het Groningen gasveld niet meegenomen.

de aanwezigheid van grote aaneengesloten formaties zeer onzeker is. Als de voor opslag geschikte formaties door breuken in van elkaar geïsoleerde stukken zijn verdeeld, kan de opslagcapaciteit per locatie te klein worden en daarmee te duur. Zoals hiervoor gesteld, kost het bewijzen van aquiferopslagcapaciteit een grote investering, in acquisitie van seismische data, het boren van exploratieputten en uitvoeren van injectietesten.

Figuur 31 - De positie van offshore-platformen die toegang geven tot de gasvelden die bijdragen aan de totale 'praktische' opslagcapaciteit van 1.700 Mt
Bron: EBN-Gasunie (2017)



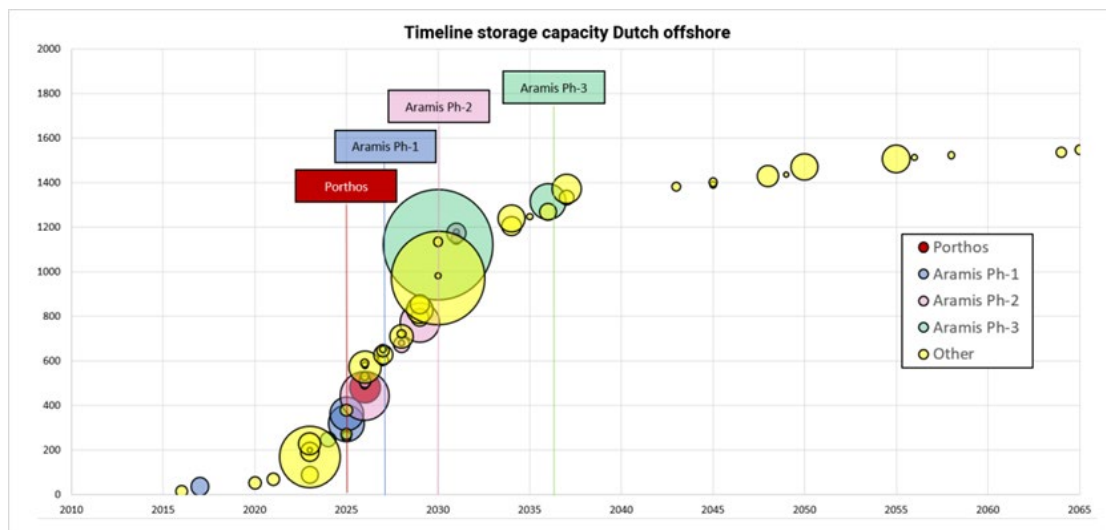
Figuur 32 - Opslagknooppunten (roodomrande gebieden in de Noordzee) zoals voorgesteld in het North Sea Energy-programma Bron: (North Sea Energy, 2020). Rode stippen geven huidige CCS-projecten weer; paarse cirkels zijn gasvelden; groene cirkels zijn industriële emissiepunten. De afmeting van cirkels geeft capaciteit of emissievolume aan



Naast de tijdsduur van ontwikkeling van opslagcapaciteit is de beschikbaarheid van leeg-geproduceerde velden een belangrijke randvoorwaarde. In principe kan opslag starten zodra productie is voltooid. Als de tijd tussen het eind van productie en de start van injectie niet te lang is, kan hergebruik van platform en putten (en eventueel pijpleidingen) tot een kostenbesparing leiden. Als injectie te lang op zich laat wachten, moeten platform en putten verwijderd of geabandonneerd worden en zal een latere toepassing van het veld voor opslag de bouw van nieuwe faciliteiten vereisen. Voor een tijdige studie van de geschiktheid van een leeg veld voor opslag en van de haalbaarheid van hergebruik van platform, putten en pijpleidingen is een zo vroeg mogelijke overdracht van data en kennis noodzakelijk. Gezien de lange doorlooptijd van opslagontwikkeling en de mogelijkheid van kostenbesparing door hergebruik vindt een dergelijke studie het best plaats tijdens de laatste fase van productie.

Hoeveel van de 1.700 Mt opslagcapaciteit zoals gerapporteerd door EBN-Gasunie (2017) uiteindelijk zal of kan worden ingezet voor opslag van CO₂ hangt daarom ook af van de duur van productie. Een hoge gasprijs, zoals in 2023, leidt tot een langere economische levensduur van velden, waardoor deze later beschikbaar komen voor nieuwe toepassingen. Figuur 33 toont de verwachte beschikbaarheid van opslagcapaciteit in lege gasvelden in de Nederlandse sector van de Noordzee.

Figuur 33 - Vrijgekomen praktische opslagcapaciteit offshore over de tijd; hierbij dient de tijd nodig voor ontwikkeling tot opslaglocatie te worden opgeteld



Bron: Carbon Collectors (2023)²².

²² [CarbonCollectors: CO₂ straight from source to sink \(presentation at EBN Carbon Storage Dialogues, February 2023\)](#)

Gebaseerd op deze informatie geeft de volgende tabel een overzicht van de opslagcapaciteit op verschillende niveaus van ontwikkeling, met een schatting van de duur tot operationele beschikbaarheid.

Tabel 23 - Overzicht van beschikbare opslagcapaciteit in Nederland (gebaseerd op EBN-Gasunie, 2017)

	Locatie (& operator wanneer bekend)	Storage Readiness Level (SRL)	Capaciteit Mton/jaar	Totale capaciteit (Mt)	Tijd tot vergunning	Geschatte start injectie
Lopende projecten	Porthos	7/8	2,5	40	Ingediend, deels toegekend	2026
	Aramis Fase 1 (*)	7/8	7,5	600	Aanvragen ingediend	2027
	Aramis Fase 2 (*)	4+	22 (**)		In ontwikkeling	2030+
Theoretische capaciteit	Offshore lege gasvelden (geen lopende projecten)	2-4	Niet bekend	1.100	5-7 jaar	Figuur 34 toont huidige beste schatting
	Q1 aquifer	3		100		
Nog te ontwikkelen capaciteit	Offshore- aquifers	1	Niet bekend	>1.300	7 jaren	2030+ Zeer onzekere capaciteit - nadere studie en meer data zijn nodig
	Onshore capaciteit (lege velden & aquifers)	1-2	Niet bekend	> 1.000	7+	Ontwikkeling op korte termijn niet waar- schijnlijk

(*): De totale capaciteit van 600 Mt voor Aramis Fase 1 en 2 omvat de velden van Shell, TotalEnergies, Neptune Energy en Wintershall.

(**): De capaciteit voor 'Aramis Fase 2' wordt gelimiteerd door de capaciteit van de Aramis-pijpleiding, die gepland is Rotterdam te verbinden met de offshore-K- en L-blokken.

Een aantal projecten ontwikkelt capaciteit voor de opslag van CO₂ die op korte termijn beschikbaar komt. Een korte opsomming van deze projecten is de volgende:

- **EBN:** EBN heeft namens de Staat een belang in gasproductieactiviteiten in Nederland. Met Nederlandse Gasunie en het Havenbedrijf Rotterdam ontwikkelt EBN het Porthos-project; met Shell, Total en Nederlandse Gasunie werkt het aan de Aramis-transportleiding van Rotterdam naar de offshore-K- en L-blokken. Het Porthos-project gebruikt de P18-gasvelden: totale opslagcapaciteit van bijna 40 Mt, met een injectiesnelheid van 2,5 Mton/jaar. Het Porthos-project start injectie van CO₂ naar huidige verwachting in 2026; het project is in afwachting van de afronding van een besluit rondom een stikstof-emissievergunning. Vier industriële partijen in de Rotterdamse haven zijn van plan CO₂ aan het Porthos-project te leveren en vullen daarmee de gehele capaciteit van het project in.

- **Shell:** Shell is zowel als CO₂-emitter, als in de rol van opslagoperator actief in diverse CCS-projecten over de hele wereld. In Nederland ontwikkelt Shell enkele velden in de offshore-K-blokken voor opslag van CO₂, die aan de Aramis-transportleiding gekoppeld gaan worden. De opslagcapaciteit van deze velden is ongeveer 50 Mt, met injectiecapaciteit van 2,5 Mton/jaar,²³ naar verwachting operationeel vanaf 2027, wanneer de Aramis-pijpleiding operationeel is.²⁴
- **TotalEnergies:** TotalEnergies is betrokken bij meerdere CCS-projecten wereldwijd en ontwikkelt in Nederland enkele velden in K- en L-blokken, met een totale capaciteit van ongeveer 40 Mt en injectiecapaciteit van 2,5 Mton/jaar. Zowel Shell als TotalEnergies hebben meer offshore-gasvelden in productie, die mogelijk in volgende fasen van offshore-opslag ontwikkeld kunnen worden. Ook deze capaciteit wordt verwacht vanaf 2027 – vanaf het eerste transport door de Aramis-pijpleiding.
- **Neptune Energy:** Neptune werkt aan de conversie van enkele gasvelden in het L10-complex. Deze velden hebben een aanzienlijke opslagcapaciteit (120-150 Mt). Neptune vermeldt een geplande injectiecapaciteit van 5 Mton/jaar. Eerste injectie wordt verwacht in 2026.²⁵ De velden zullen worden aangesloten op de Aramis-pijpleiding.
- **Wintershall Dea CMS:** De onlangs opgerichte 'Carbon Management Solutions' werkt aan een aantal CCS-projecten in Europa. In Nederland voorziet Wintershall Dea opslag in de Q1-B- en P6-velden, waarvoor opslagvergunningaanvragen in voorbereiding zijn.²⁶ Opslagcapaciteit wordt geschat op 60-70 Mt (Neele, F. et al., 2011).

De opslagcapaciteit die door de eerste projecten (Porthos, Shell, TotalEnergies) naar verwachting in 2026-2027 geleverd kan worden is ongeveer 130 Mt, met een injectiecapaciteit van zo'n 7,5 Mton/jaar. Shell en TotalEnergies rapporteren een totale opslagcapaciteit van ruim 400 Mt²⁷; het is te verwachten dat deze in fases beschikbaar komt.

Op een vergelijkbare termijn vergroot Neptune Energy de opslagcapaciteit van Porthos en de eerste fase van Shell en TotalEnergies met de L10-velden; de eerste injectie wordt ook voorzien voor 2026, met een injectiecapaciteit die waarschijnlijk vergelijkbaar zal zijn met die van de andere opslagaanbieders, zo'n 2,5 Mton/jaar. Daarna (mogelijk vanaf 2027) worden de velden van Wintershall DEA CMS verwacht en vanaf 2030 kunnen ook volgende velden van Shell en TotalEnergies klaar staan, net als andere velden in het L10-cluster van Neptune Energy. De totale opslagcapaciteit die door deze projecten aangeboden kan worden is ruim 600 Mt.

In Tabel 23 zijn de volumes die door Shell, TotalEnergies, Neptune Energy en Wintershall DEA CMS worden ontwikkeld ondergebracht in de tot 22 Mton/jaar die op termijn ('Aramis Fase 1', 'Aramis Fase 2') door de Aramis-pijpleiding wordt getransporteerd.

Vergelijking vraag naar en aanbod van opslagcapaciteit

De huidige CCS-markt in Europa is gebaseerd op een combinatie van toenemende ETS-prijzen en subsidies en financiering van overheden. Bijdragen vanuit overheden waren gericht op het aanjagen van CO₂-afvang door de industrie. Er is echter op dit moment geen

²³ Zie de Notitie Reikwijdte en Detailniveau: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2022-11/Vaststelling-NRD-en-Nota-van-Antwoord-concept-NRD-Aramis.pdf>

²⁴ [Aramis - The CCUS Hub \(ogci.com\)](https://www.ogci.com/aramis-the-ccus-hub)

²⁵ Zie [L10 CCS project \(neptuneenergy.com\)](https://www.neptuneenergy.com/l10-ccs-project)

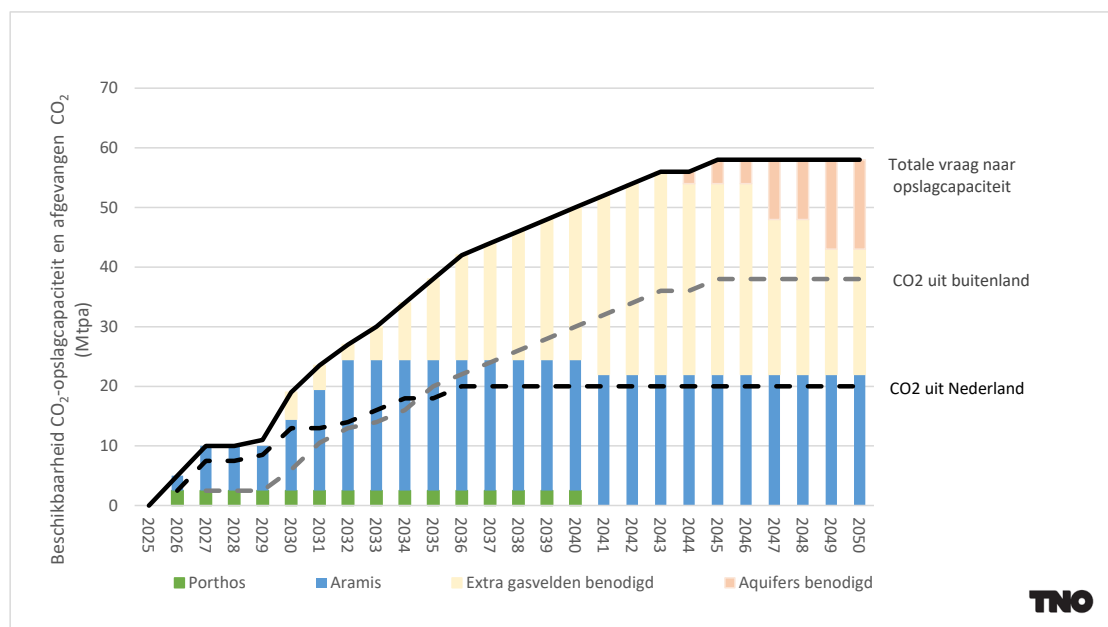
²⁶ [Building-a-CCS-business-in-North-West-Europe_Klaus-Langemann.pdf \(ebn.nl\)](#)

²⁷ [Aramis - The CCUS Hub \(ogci.com\)](https://www.ogci.com/aramis-the-ccus-hub)

aanleiding voor potentiële opslagoperators om opslagcapaciteit te ontwikkelen voordat er contracten zijn gesloten met industriële partijen die afgevangen CO₂ zullen leveren. De lange ontwikkeltijd van opslagcapaciteit leidt tot een ‘kip-en-ei’ situatie, waarin ten tijde van een investeringsbeslissing operators van opslag geen zekerheid over toevoer van CO₂ hebben, en operators van afvangfaciliteiten geen toegang tot gecertificeerde opslag. Dit kan leiden tot een discrepantie tussen het verwachte aanbod aan afgevangen CO₂ en de op termijn beschikbare opslagcapaciteit.

Figuur 34 toont een weergave van de hierboven besproken scenario's van afvang van CO₂ en toevoer vanuit naburige landen, versus huidige en verwachte activiteiten rondom de ontwikkeling van opslagcapaciteit. In vergelijking met de TRANSFORM- en ADAPT-scenario's (TNO, 2022a) ligt het niveau aan CO₂-opslag in 2050 iets hoger, wat verklaard kan worden uit de invoer van CO₂ uit de ons omringende landen.

Figuur 34 - Weergave opslagcapaciteit in ontwikkeling en het verwachte aanbod aan afgevangen CO₂, tot 2050



De volgende aannames liggen ten grondslag aan de scenario's in bovenstaande figuur:

1. Voor Nederland wordt een volume van afgevangen CO₂ van 13 Mton/jaar tot 2030 aangehouden, afgaande op de huidige stijging van de ETS-prijs en de SDE++-subsidie.
2. Porthos zal vanaf 2026 een hoeveelheid van 2,5 Mton/jaar opslaan.
3. De opslagcapaciteit zoals ontwikkeld door Shell en TotalEnergies komt volgens de huidige plannen in 2027 beschikbaar. Dit betekent een injectiecapaciteit van 5 Mton/jaar.
4. De eerste van de L10-velden van Neptune Energy komen ook online in 2026, wat een injectiecapaciteit van 2,5 Mton/jaar toevoegt.
5. Uitgaande van transport via de Aramis-pijpleiding is er een maximum capaciteit van 22 Mton/jaar. Deze wordt bereikt in 2032, waarna transport via de leiding constant blijft tot 2050. De totale capaciteit van ruim 600 Mt, zoals hierboven gemeld, is dan nog niet bereikt.

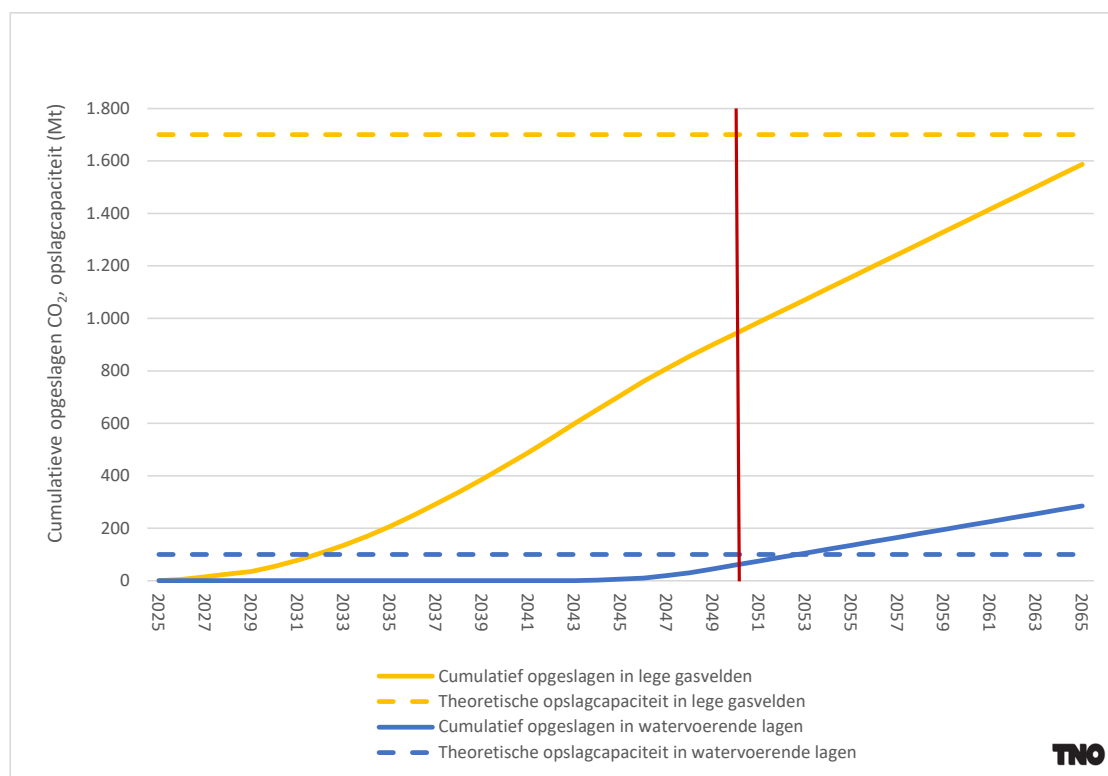
6. Zowel Wintershall DEA CMS als Neptune Energy werken aan transport per schip direct naar offshore-platformen. Dit zou de limiet aan transportcapaciteit, die nu door de Aramis-leiding wordt bepaald, kunnen verhogen. Op dit moment is transport per schip en offshore-injectie vanaf een schip (of vanaf een lokale bufferopslag) nog niet operationeel en daarmee onvoldoende bekend om in deze studie mee te nemen.²⁸
7. Tot 2030 toont het scenario in Figuur 34 geen vraag naar opslag, maar meer een samenvatting van de projecten die nu in ontwikkeling zijn: Porthos, Aramis (Shell en TotalEnergies) en Neptune Energy. De aanname is dat er tot 2030 geen afvangprojecten worden ondernomen als er geen gecertificeerde opslagcapaciteit gecontracteerd kan worden. Tot 2030 is daarom het aanbod aan opslagcapaciteit gelijk aan het aanbod van afgevangen CO₂.
8. Opslag in aquifers begint pas na 2040. De aanname is dat opslag in lege gasvelden voldoende capaciteit levert. Toenemende kennis over aquiferstructuren en ruim voldoende CO₂-aanbod leveren de randvoorwaarden voor de start van opslag in aquifers vanaf ongeveer 2044. Niettemin is er nu al interesse in de haalbaarheid van opslag in aquifers. Recentelijk zijn er exploratielicenties aangevraagd om geschikte offshore-aquifers te zoeken; EBN is een analyse begonnen van beschikbare kennis.²⁹
9. Invoer van CO₂ voor opslag begint in 2027 vanuit België, zoals gesuggereerd door PCI-projecten als CO₂ TransPorts. Het volume neemt van 2,5 Mton/jaar in 2027 toe tot 38 Mton/jaar in 2045, volgens de studies zoals hierboven zijn genoemd: 10 Mton/jaar uit België, 28 Mton/jaar uit Duitsland. De onzekerheid in deze volumes is aanzienlijk.
10. Het volume aan afgevangen CO₂ in Nederland neemt toe van 13 Mton/jaar in 2030 tot 20 Mton/jaar vanaf 2036 (gebaseerd op EBN-schattingen).

Figuur 35 geeft de verdeling weer tussen cumulatieve opslag in lege velden en in aquifers. Het hier gebruikte scenario laat zien dat de maximale opslagcapaciteit in leeggeproduceerde velden tegen 2060 dichtbij komt, zeker in het geval van opslag in watervoerende lagen zoals in het hier gebruikte scenario wordt voorzien. In aanmerking nemende dat een deel van de 1.700 Mt aan capaciteit zal afvallen omdat sommige velden minder geschikt zullen blijken voor opslag (bijv. door hoge kosten), en gezien de verwachte grote jaarlijkse opslagvolumes rond 2050, betekent dit dat ruim op tijd (rond 2050) er een alternatieve opslaglocatie voor de binnenlandse en buitenlandse CO₂ gezocht moet worden, om een soepele overgang van opslag in Nederland naar opslag in een naburig land mogelijk te maken. Alternatieve opslaglocaties zullen te vinden zijn in andere delen van de Noordzee, zoals de sectoren van het Verenigd Koninkrijk, Denemarken of Noorwegen, waar enorme opslagcapaciteit in zowel lege gasvelden als in aquifers voorhanden is.

²⁸ Het project Greensand (Denemarken) is in 2023 begonnen met een testinjectie van CO₂ vanaf een schip in een leeggeproduceerd, offshore-olieveld, zie www.offshore-energy.biz/history-written-offshore-denmark-first-co2-storage-in-the-north-sea/.

²⁹ Unverhaun, P., CCS storage potential in saline aquifers, EBN Exploration Day, November 2022, www.ebn.nl/wp-content/uploads/2022/11/UNVERHAUN_20221117_ExplDay_CCUS.pdf.

Figuur 35 - Cumulatieven van opslag in lege gasvelden en aquifers volgens het scenario in Figuur 34. Voorbij 2050 zijn de trends van 2050 gebruikt



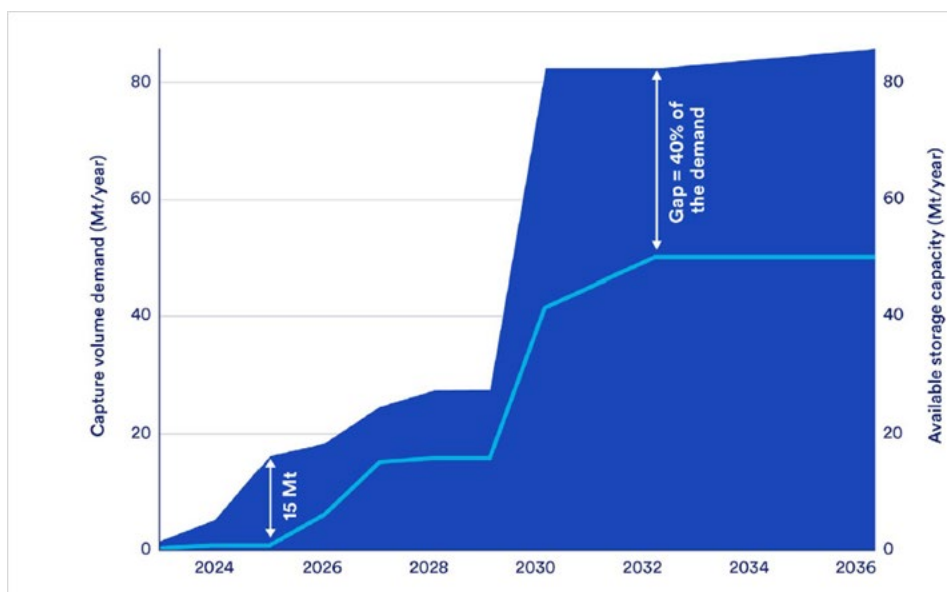
De plannen voor de inzet van CCS voor het behalen van klimaatdoelen in naburige landen (België, Duitsland) laten al zien dat er een grote vraag naar opslagcapaciteit in Noordwest Europa zal komen. Zoals in Figuur 34 geïllustreerd wordt, zullen er vanaf 2030 nieuwe opslaglocaties moeten worden ontwikkeld om aan de vraag naar opslagcapaciteit te voldoen. Dit betekent dat de haalbaarheid van opslag in nieuwe velden in de periode 2023-2025 zal moeten worden gestart. Het scenario omvat een totaal van ongeveer 1.000 Mt CO₂, tot 2050. Dit is ruim minder dan het totaal aan capaciteit van 1.700 Mt.

Met de huidige ontwikkeltijden (5-7 jaar voor lege velden) moeten de projecten die nu op stapel staan zo snel mogelijk het werk aan de volgende serie opslaglocaties beginnen, dan wel een toename in injectiecapaciteit van de nu ontwikkelde velden bewerkstelligen. De figuren laten zien dat een continue, grote inspanning nodig is om opslagcapaciteit te ontwikkelen, om een mismatch tussen vraag en aanbod te voorkomen.

De kans op zo'n mismatch bestaat ook op internationale schaal. De CCS-markt in Europa wordt gestimuleerd via het ETS, waarvan de koers sterk stijgt, maar ook sterk variabel is. De kip-en-ei-situatie zoals hiervoor besproken bestaat ook op Europese schaal, waarbij het grensoverschrijdende aspect van opslag in naburige landen een extra horde toevoegt voor het sluiten van contracten voor de levering van CO₂ voor opslag.

Figuur 36 geeft een illustratie van het tekort aan operationele opslagcapaciteit in de komende tien jaar, gebaseerd op aankondigingen door projecten.

Figuur 36 - Illustratie van het toenemende tekort aan opslagcapaciteit (lichtblauwe curve) in vergelijking met de vraag naar opslagcapaciteit (donkerblauw). Schattingen zijn gebaseerd op recente aankondigingen door projecten



Bron: CATF (2022).

4.7 Benodigde acties om de 2030 en 2050 doelen te halen

De diepe geologie in de Nederlandse sector van Noordzee is geschikt voor de opslag van CO₂. Er is voldoende opslagcapaciteit voor een belangrijke rol van CCS in het halen van de nationale emissiereductiedoelen. De Nederlandse overheid ziet CCS als een belangrijke technologie, die echter waarschijnlijk in de periode na 2050 langzaam uitgefaseerd wordt. De analyse zoals hier gepresenteerd laat zien dat opslagcapaciteit voor emissies gerelateerd aan fossiele bronnen tot 2050 waarschijnlijk voorhanden is. De internationale component van het scenario is echter onzeker.

Als de vraag naar opslagcapaciteit die voortkomt uit CO₂-import groot is (bijv. meer dan 50 Mton/jaar), dan zal de grens van opslagcapaciteit in lege velden eerder in zicht komen en moet er eerder uitgeweken worden naar opslaglocaties elders op de Noordzee. De volumes van import zijn echter onzeker, zeker gezien de vele initiatieven om CO₂ uit de ons omringende landen in opslaglocaties in Noorwegen, Denemarken of het Verenigd Koninkrijk op te slaan. Opslag in aquifers is in deze studie beperkt meegenomen. Schattingen voor de capaciteit in aquifers zijn voorhanden, maar hoogst onzeker.

De injectiecapaciteit die in huidige projecten wordt ontwikkeld, bereikt een maximum van 24,5 Mton/jaar: de capaciteit van het Porthos-project plus de capaciteit van de Aramis-pijpleiding. Extra capaciteit zal nodig zijn om aan de vraag vanuit CO₂-invoer te voldoen, omdat een groot deel van deze 24,5 Mton/jaar gevuld kan worden met fossiel-gerelateerde CO₂ uit Nederland. De schaal waarop CCS wordt ingezet in Figuur 35 is ambitieus, met ongeveer 3 Mton/jaar nieuwe injectiecapaciteit toegevoegd elk jaar tussen 2030 en 2045. Dit betekent dat drie nieuwe putten, met elk 1 Mton/jaar capaciteit, elk jaar online moeten komen, met de daarbij horende pijpleidingen, platformen en velden.

De lange aanlooptijden van opslagontwikkeling leiden tot deze acties om voldoende opslagcapaciteit voorhanden te hebben tot ongeveer 2035:

- **Coherente visie op de nationale rol en ontwikkeling van CO₂-opslag**
Na publicatie van het nieuwe SDE++-schema (in 2023) zal er meer duidelijkheid zijn over de capaciteit van nieuwe CCS-projecten. Een duidelijke strategie en visie over het gebruik van de Noordzee voor de opslag van CO₂ is nodig om projectontwikkelaars meer zekerheid te geven.
- **Eerste inventarisatie en atlas van opslaglocaties**
De hierboven genoemde strategie en visie kan in sterke mate worden ondersteund met een atlas van potentiële opslaglocaties. Deze kan worden gebruikt voor een eerste onderzoek naar de haalbaarheid van opslag in de potentieel beste locaties – wat neer zou komen op het verhogen van het SRL en daarmee het verlagen van het risico van verdere investeringen in en het verkorten van de tijd van verdere ontwikkeling van die locaties. Het verzamelen van kennis en informatie over aquifers zou deel moeten uitmaken van het opzetten van de atlas.
- **Steun en garanties voor potentiële opslagoperators**
Onderzoek naar de haalbaarheid van opslag vereist een investering van tijd en geld. De succesvolle locaties zullen na verloop van tijd CO₂ opslaan, maar ten tijde van de haalbaarheidsstudie zullen er nog geen contracten met afvangprojecten gesloten kunnen worden. Enige vorm van financiële ondersteuning kan projectoperators overhalen dit werk te starten.
- **Duidelijkheid over het vergunningstraject**
De opslagvergunningen voor de P18-4-velden zijn op dit moment de enige toegekende vergunningen. Een aantal vergunningsaanvragen wachten op goedkeuring. De doorlooptijd tussen (eerste) indiening en toekenning is momenteel een jaar of langer. Duidelijkheid over de eisen aan een vergunningsaanvraag zal een snellere ontwikkeling van opslaglocaties tot gevolg hebben.³⁰

4.8 Bredere context

Een analyse van de mate waarin de totale theoretische opslagcapaciteit kan worden gebruikt vergt ook een studie van de bredere context van het gebruik van de Noordzee richting 2050. Een voordeel van CO₂-opslag is zijn relatief beperkte ruimtegebruik, zeker in vergelijking met offshore-windparken. Platforms zullen echter nodig zijn voor de injectie van CO₂ en grotere, lege velden hebben mogelijk meerdere injectielocaties om het volle potentieel van de velden te kunnen inzetten. Een goede vuistregel is dat één put ongeveer 1 Mton/jaar kan opslaan. Dit betekent dat voor een niveau van 20 Mton/jaar in 2030 (Figuur 34) ongeveer 20 putten nodig zullen zijn, en tussen de 5 en 10 platformen (met enkele putten per platform). Deze platforms moeten bereikbaar zijn en hun locatie moet passen in de overige toepassingen van de Noordzee.

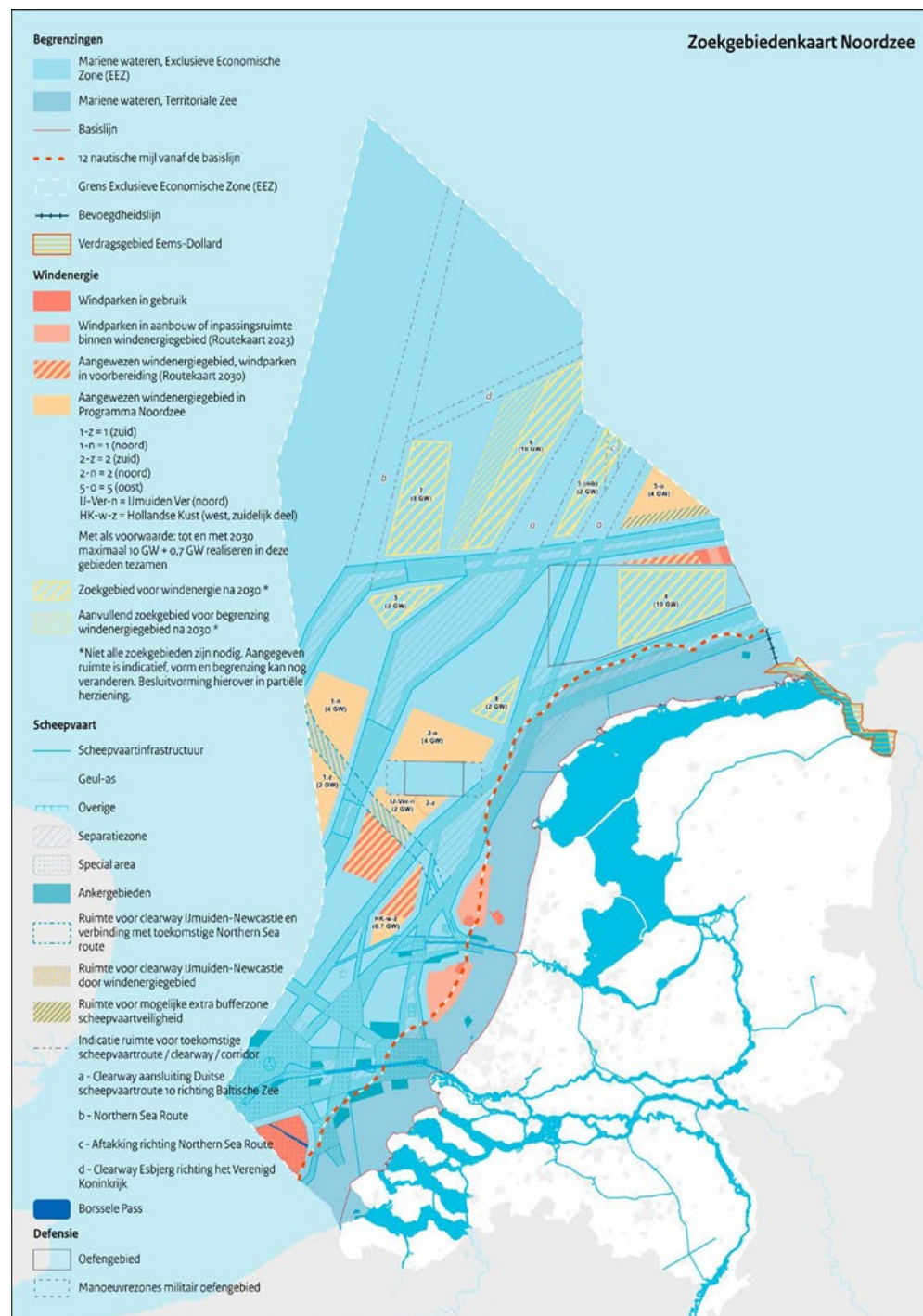
Zoals Figuur 37 laat zien is de Nederlandse sector van de Noordzee druk wordt. Geplande windparken hebben een groot ruimtebeslag. Aangezien het grootste deel van CO₂ naar verwachting in lege velden zal worden opgeslagen, gebruikmakende van ofwel bestaande

³⁰ De Net Zero Industry Act (NZIA) die de Europese Commissie in maart 2023 publiceerde en die naar verwachting later in 2023 door het Europese Parlement zal worden behandeld, schrijft een maximale termijn van achttien maanden voor. Duidelijkheid over deze termijn helpt projecten om hun activiteiten te plannen.



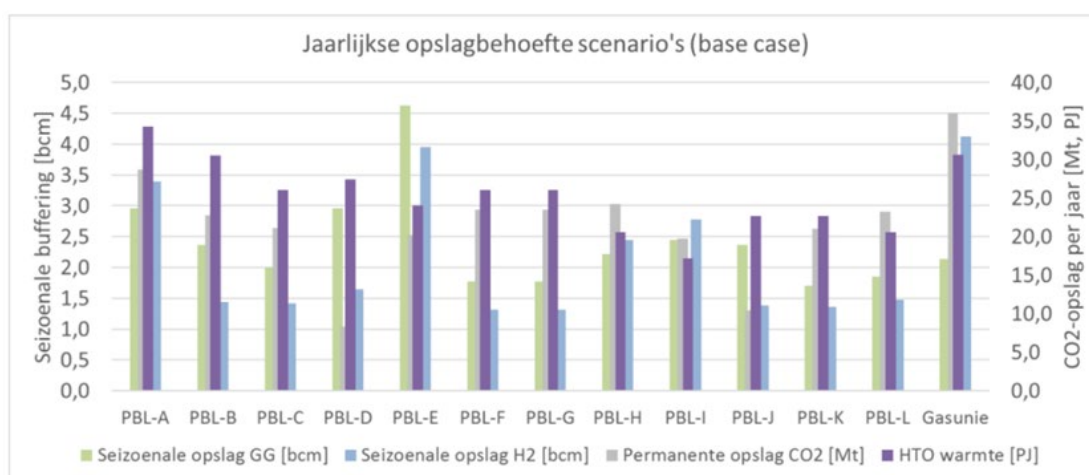
putten en platforms, ofwel van nieuwe platforms die mogelijk op dezelfde locatie geplaatst kunnen worden, waardoor er mogelijk minder beperkingen aan de inzet van CO₂-opslag zouden kunnen komen. De effecten van inpassing in ruimtegebruik zijn op dit moment nog niet duidelijk.

Figuur 37 - Zoekgebiedenkaart, (Noordzeeloket, 2022)



De enige andere technologie die ondergrondse opslagruimte gebruikt is opslag van waterstof. Figuur 38 toont voor een aantal scenario's voor de ontwikkeling van de energietransitie (ontwikkeld door PBL) de vraag naar opslag in de ondergrond van waterstof, groengas, hogetemperatuuropslag en CO₂. Voor de offshore zijn waarschijnlijk alleen waterstof en CO₂ relevant; op jaarbasis is de vraag naar waterstofbuffering (seizoensopslag) veel kleiner dan de vraag naar permanente opslag van CO₂. Door de kleinere volumes en de vraag naar buffering (waterstof) in plaats van naar permanente opslag (CO₂) zullen de voor waterstof geschikte sites waarschijnlijk kleiner zijn en dichter bij de kust liggen, of zelfs op land. Zoutcavernes zijn een voor de hand liggende oplossing voor waterstof. Concurrentie om (offshore) opslagcapaciteit tussen waterstof en CO₂ zal daarom beperkt zijn.

Figuur 38 - Resultaten voor vraag naar ondergrondse opslag in 2050 voor een reeks aan scenario's ontwikkeld door PBL: opslagvraag voor groengas (groen, linkerass), waterstof (blauw, linkerass), hogetemperatuuropslag (paars, rechterass) en CO₂ (grijs, rechterass)



Bron: TNO (2018).

4.9 Conclusies met betrekking tot beschikbaarheid van opslagcapaciteit voor CO₂ uit negatieve-emissieprocessen

1. Voldoende opslagcapaciteit

De analyse in dit hoofdstuk laat zien dat er in principe voldoende capaciteit is in offshore-gasvelden voor opslag van CO₂ tot 2050. Het aanbod van CO₂ in de gebruikte scenario's zal voor een deel uit negatieve emissies bestaan; er is ruimte voor zowel een groter aandeel in het verwachte aanbod aan fossiel CO₂ als een groter volume aan negatieve emissies. De capaciteit voor opslag in leeggeproduceerde gasvelden vormt waarschijnlijk geen beperking – een groot deel van de velden zal na het eind van productie tussen 2030 en 2040 beschikbaar komen.

2. Transport en opslaginfrastructuur is in ontwikkeling

De zich op dit moment ontwikkelende CCS-projecten zullen vooral CO₂ uit afvang van op fossiele grondstoffen of brandstoffen-gebaseerde processen opslaan en zullen dus leiden tot emissiereductie. De infrastructuur die deze projecten zullen opbouwen zal klaar staan om ook CO₂ uit negatieve-emissieprocessen te verwerken. Naar verwachting zal in de loop van de tijd het aandeel 'negatieve' CO₂ groeien en het aandeel fossiele CO₂ afnemen; dit zal niets veranderen aan de eisen aan de voor transport en opslag benodigde infrastructuur.

3. Continue ontwikkeling nieuwe opslaglocaties nodig

De zich nu ontwikkelende CO₂-opslagprojecten zullen naar verwachting een volume van 10 Mton/jaar in 2030 kunnen verwerken. Er is echter een continue toevoer aan nieuwe opslaglocaties nodig om de verwachte groei in het aanbod van CO₂, van zowel emissie-reductie als negatieve emissies, te kunnen opslaan. Dit vereist een duidelijk vergunningstraject en ondersteuning tijdens de voorbereiding van vergunningsaanvragen (de 'pre-competitieve' fase).

4. CO₂-opslag is een internationale activiteit

Ondergrondse structuren die geologische opslag van CO₂ mogelijk maken zijn niet evenredig verdeeld over Europa. Landen met weinig of geen eigen opslagmogelijkheden zullen moeten samenwerken met landen met voor opslag gunstige geologie, om voor elke lidstaat het halen van klimaatdoelen mogelijk te maken met behulp van CCS en om het doel van een 'net-zero'-continent in 2050 te kunnen halen. Ons omringende landen, als België en Duitsland, zullen voor een deel van hun opslagbehoefte gebruik willen maken van Nederlandse capaciteit. De schaal waarop dit zal gebeuren is moeilijk te voorspellen, maar zal naar verwachting vergelijkbaar zijn met het CO₂-volume uit Nederland. Hierbij kan worden opgemerkt dat een deel van de geïmporteerde CO₂ uit negatieve-emissieprocessen zal komen.

5. Tijdige actie is nodig om verbinding te maken met capaciteit elders op de Noordzee

Naar verwachting zullen de grenzen aan de Nederlandse opslagcapaciteit rond 2060 bereikt worden. Ruim voor die tijd zullen de omstandigheden moeten worden geschapen – op gebieden van regelgeving, bilaterale overeenkomsten op nationaal niveau, en van technische compatibiliteit van de systemen – waaronder een verbinding kan worden gelegd met opslagcapaciteit elders op de Noordzee. Fysieke verbindingen over grenzen heen tussen transport- en opslagnetwerken verbeteren de bedrijfszekerheid van de afzonderlijke systemen, en maken een overstap op termijn van Nederlandse opslaglocaties naar locaties elders mogelijk. Een en ander dient zo vroeg mogelijk geregeld te worden, zodat de overgang naar opslag elders zonder barrières kan worden uitgevoerd.

5 Ontwikkeling van negatieve emissies in de tijd

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk geven we drie mogelijke tijdspaden waarin de behoefte en het aanbod van negatieve emissies zich zouden kunnen ontwikkelen. De tijdspaden zijn bedoeld om inzichten te creëren in hoe de toekomst van negatieve emissies eruit zou kunnen zien. Ze zijn niet vormgegeven in termen van waarschijnlijkheid van de toekomst. Tijdspad 1 geeft inzicht in de ontwikkelingen van behoefte en aanbod bij trage beperking van emissies. Tijdspad 2 focust op een snelle afbouw van emissies en nadruk op negatieve emissies via CCS. Tijdspad 3 gaat uit van een iets minder snelle afbouw van emissies dan in Tijdspad 2, en van inzet van innovatieve oplossingen voor negatieve emissies. Samen geven de tijdspaden de breedte van de onzekerheden en de mogelijkheden weer. Overkoepelend volgt hier duidelijk uit dat beperking van emissies centraal moet staan, negatieve emissies kunnen te trage afbouw van uitstoot van broeikasgassen niet compenseren.

We geven in de paragraaf hieronder eerst het overzicht van de behoefte, aanbod en opslagcapaciteit van negatieve emissies in Nederland. In de volgende paragrafen gaan we in op de tijdslijnen.

5.2 Bepalende factoren

De vorige hoofdstukken geven de losse puzzelstukjes waaruit we een aantal mogelijke tijdspaden kunnen samenstellen. Verschillende factoren bepalen in hoeverre restemissies en overshoot plaatsvinden, en in hoeverre ze kunnen worden gecompenseerd. De belangrijkste bepalende factoren hiervoor kunnen als volgt samengevat worden:

- **Toekomstige structuur, energie-intensiteit en energiebronnen van de economie.** Dit bepaalt in grote mate de restuitstoot van de industrie en landbouw, en daarmee de noodzaak voor negatieve emissies. De restemissies in de industrie worden grotendeels bepaald door de mate waarin de industrie fossiele energie en grondstoffen vervangt door hernieuwbare. De uitstoot van de landbouw is lager als er minder vlees wordt geproduceerd.
- **Consumptiepatronen.** Ook dit bepaalt de restuitstoot van de industrie en landbouw. De consument heeft hier invloed op door de vraag naar (nieuwe) producten en vlees. Hoe kleiner de vraag naar producten of diensten die niet of moeilijk klimaatneutraal te maken zijn, hoe kleiner de restemissies zijn.
- **Mate van overshoot.** De snelheid waarmee de wereld netto-nul-emissies bereikt en de mogelijke overschrijding van de 1,5°C-grens bepalen de wereldovershoot van CO₂-emissies die gecompenseerd moet worden door negatieve emissies. Daarnaast is het aandeel voor Nederland afhankelijk van de berekenmethode.
- **Biomassa- en DAC-inzet.** Biomassa kan ingezet worden voor verschillende toepassingen, zoals grondstof voor de chemie, bouw materiaal, biobrandstoffen en voor verbranding. Een vergelijkbare concurrentie verwachten we ook voor DAC. De keuze voor inzet bepaalt de beschikbaarheid voor negatieve emissies.
- **Ontwikkeling CCS-opslagcapaciteit i.c.m. de hoeveelheid fossiele CCS.** Het potentieel van de BECCS- en DACCS-routes hangt niet alleen af van het aanbod aan duurzaam geproduceerde biomassa en energie, maar ook van de beschikbare injectiecapaciteit,

d.w.z. de infrastructuur en ontwikkelde opslagcapaciteit om de biogene of DAC CO₂ op te slaan.

- **Innovaties.** Een aanzienlijk deel van het potentieel voor negatieve emissies vereist nog verdere technologische ontwikkeling, kostenreducties en grootschalige uitrol van technologieën die nu nog niet of nog niet op grote schaal worden toegepast.

Al deze factoren zijn sterk bepaald door **beleid**. Dit is daarom wellicht de belangrijkste bepalende factor voor behoefte, aanbod en uiteindelijke realisatie van negatieve emissies. In dit hoofdstuk gaan we echter nog niet in op mogelijke beleidsmaatregelen, die komen aan bod in Hoofdstuk 7.

5.3 Speelveld tijdpaden

Uit de voorgaande hoofdstukken is duidelijk dat er nog veel onzekerheden zijn in zowel de behoefte als ook het aanbod van negatieve emissies. Om toch inzicht te kunnen geven in de mogelijke rol van negatieve emissies in het toekomstige klimaatbeleid hebben we drie tijdpaden ontwikkeld, waarin we de effecten van verschillende mogelijke ontwikkelingen in kaart brengen. Elk tijdpad werkt toe naar klimaatneutraliteit in Nederland in 2050, en een bijdrage van Nederland aan de compensatie van de mondiale overshoot van de 1,5°C-doelstelling van het Klimaatakkoord van Parijs.

Elk pad gaat daarbij uit van een bepaalde set aannames – ontwikkeling van restemissies, van technieken, van CO₂-opslagcapaciteiten, enz. Op deze manier gaan we voor elk tijdpad uit van een andere behoefte aan negatieve emissies, die we vervolgens invullen met verschillende pakketten van beschikbare technologieën. Op deze manier kunnen we de belangrijkste randvoorwaarden in kaart brengen waaraan voldaan moet worden om behoefte en aanbod samen te brengen.

We streven er in deze tijdpaden naar om de negatieve emissies op Nederlands grondgebied te realiseren. Dit geldt echter niet over de gehele keten: we gaan bijvoorbeeld wel uit van de mogelijkheid van import van biomassa. Voor tijdpaden met een grote bijdrage van BECCS en/of DACCS zal geologische opslagcapaciteit in het buitenland nodig zijn, naast groot-schalige uitbreiding van de opslag in Nederland. We reflecteren op deze internationale context in Paragraaf 5.8.

Deze tijdpaden zijn verkenningen van de toekomst op basis van de kwalitatieve en kwantitatieve resultaten uit de vorige hoofdstukken. De tijdpaden geven inzicht in het belang van randvoorwaarden, in de bepalende factoren en in interacties tussen de verschillende onderdelen van het systeem. We leggen de focus hierbij op Nederland, en nemen de factoren vanuit Europa en de wereld mee wanneer ze bepalend zijn voor de Nederlandse situatie.

De drie tijdpaden vatten we als volgt samen:

1. **Tijdpad 1 - Boven in de bandbreedte.** In dit tijdpad blijft er veel behoefte aan negatieve emissies doordat emissies niet snel genoeg afgebouwd worden. Om voor deze hoge uitstoot te compenseren is maximale inzet nodig op alle technologieën. Bovendien is er een grootschalige verdere uitbreiding van de CCS-opslagcapaciteit vereist.
2. **Tijdpad 2 - Snel en gericht.** Dit tijdpad is gekenmerkt door een snelle afbouw van emissies en een succesvolle transitie naar een fossielvrije economie. Daardoor is er een beperkte behoefte aan negatieve emissies. Die wordt gericht door CCS ingevuld, met name door BECCS en DACCS. Er is voldoende geologische opslagcapaciteit.

3. **Tijdpad 3 - Grote puzzel.** Medium behoefte aan negatieve emissies, geen biomassa of DAC specifiek voor negatieve emissies maar inzet op innovaties en koppelkansen met de circulaire economie.

Tabel 24 vat de belangrijkste elementen van behoefte, aanbod en opslag per tijdpad samen. Elk van de drie tijdspaden wordt hieronder verder uitgewerkt.

Om de tijdspaden te kunnen kwantificeren op basis van beschikbare data, maken we een aantal aannames. Dit zijn ruwe aannames, die in de toekomst verder verfijnd moeten worden, maar op basis van beschikbare kennis nu waardevolle inzichten opleveren.

De aannames zijn:

- Een lineaire afname in behoefte tussen 2030 en 2050.
- Afname van restemissies na 2050 is ook lineair, tot een restemissie van 9 Mton/jaar is bereikt. Op basis van huidige kennis lijkt dat een minimumwaarde.

Tabel 24 - De belangrijkste uitgangspunten bij de drie tijdspaden

Tijdpad	Behoefte	Aanbod	CCS-opslag
Tijdpad 1 <i>Boven in de bandbreedte</i>	• Maximale behoefte • Emissies aan de bovenkant van de scenario's • Hoge restemissies in industrie en landbouw • Grote overshoot	• Maximale inzet op alle aanbod met potentieel • Sterke ontwikkeling (R&D) en uitrol van de aanbodkant • Duurzame biomassa en DAC (grotendeels import) in grote hoeveelheden vereist	• Grootschalige uitbreiding van de CCS-opslagcapaciteit (binnen en/of buiten NL) • Veel fossiele CCS, ook op de langere termijn
Tijdpad 2 <i>Snel en gericht</i>	• Minimale behoefte • Emissies aan de onderkant van de scenario's • Industrie fossielvrij, landbouwemissies sterk teruggebracht • Beperkte overshoot	• Focus op realisatie van BECCS- en DACCS-potentieel	• Voldoende CCS-opslagcapaciteit • Snelle afbouw fossiele CCS na 2030
Tijdpad 3 <i>Grote puzzel</i>	• Medium behoefte • Emissies midden van de scenariobereiken • Beperkte restemissies industrie en landbouw • Medium overshoot	• Inzet van breed scala aan aanbodmogelijkheden • Inzet op innovaties en koppelkansen met circulaire economie • Geen biomassa of DAC specifiek voor negatieve emissies	• Voldoende CCS-opslagcapaciteit, • Verdere uitbreiding van de capaciteit op de lange termijn • Fossiele CCS naar nul in 2050.

5.4 Tijdpad 1 - Boven in de bandbreedte

Tijdpad 1 is het meest pessimistische van de drie tijdspaden, gezien vanuit verduurzaming. Emissies in de verschillende economische sectoren worden niet snel afgebouwd. Dit zorgt zowel voor hoge restemissies na 2050 als een hoge overshoot van de cumulatieve emissies. Hierdoor is er veel behoefte aan negatieve emissies. Om voor deze hoge uitstoot te compenseren is maximale inzet nodig op alle technologieën. Bovendien is er een grootschalige verdere uitbreiding van de CCS-opslagcapaciteit vereist. CCS wordt daarbij zowel voor negatieve emissies als voor opslag van fossiele CO₂ ingezet.

Behoefte

Het tijdpad 'Boven in de bandbreedte' gaat uit van de bovenkant van de bandbreedte van schattingen van emissies. Dat werkt door in zowel de restemissies (CO₂, methaan en lachgas) als voor de overshoot:

- **Restemissies.** Voor de restemissies gaan we uit van het ADAPT-scenario. Dit scenario neemt aan dat de huidige economische activiteiten zoals energie-intensieve industrie, landbouw en mobiliteit grotendeels behouden blijven in 2050. In industrie en transport blijven fossiele brandstoffen en grondstoffen ook op de langere termijn een rol spelen. De omvang van de veeteelt blijft ook in 2050 vrijwel gelijk. Daarom blijven er ook in deze sector relatief veel restemissies over. In het ADAPT-scenario komen de totale restemissies uit op 38,3 Mton CO₂-eq./jaar in 2050.
- **Overshoot.** Voor dit tijdpad gaan we ook uit van een hoge overshoot. In onze analyse komen we in het ongunstigste geval uit op ca. 33 Mton/jaar, bij een relatief grote overshoot, en met een relatief grote toerekening aan Nederland.

Dat we van beide aspecten de bovenkant van de schattingen meenemen is niet onlogisch: als de transitie naar klimaatneutraal en fossielvrij mondiaal langzaam gaat, is het voor Nederland lastiger om te versnellen dan wanneer de rest van de wereld ook snel verduurzaamt.

Tabel 25 - Behoefte aan negatieve emissies in 2050 tot 2100 voor Tijdpad 1 'Boven in de bandbreedte'.

Tijdpad	Restemissies (Mton CO ₂ -eq./jaar)	Overshoot compensatie (Mton CO ₂ -eq./jaar)	Behoefte totaal (Mton CO ₂ -eq./jaar)
Tijdpad 1 <i>Boven in de bandbreedte</i>	38,3	33	71,3

Aanbod

Omdat de behoefte aan negatieve emissies in dit tijdpad zeer groot is, moet alles uit de kast worden gehaald om een groot aanbod aan negatieve emissies te realiseren. Het geschatte realistisch potentieel uit Hoofdstuk 3 bedraagt in totaal 38 Mton CO₂-eq./jaar in 2050, exclusief bio-energiecentrales met CCS en exclusief DACCS (Tabel 18). Deze 38 Mton CO₂-eq./jaar zijn haalbaar onder zeer optimistische aannames over de randvoorwaarden (beleid, technologische ontwikkeling, veel biomassagebruik in de industrie, etc.).

Dit is bijna voldoende om de 38,3 Mton restemissies in Nederland te compenseren, maar als ook de compensatie voor de overshoot wordt meegenomen blijft er een tekort over van ruim 3 Mton CO₂-eq.-negatieve emissies per jaar, in 2050. Om dit gat tussen behoefte en aanbod aan negatieve emissies te dichten is er in dit tijdpad derhalve meer nodig. Hier zijn een aantal potentiële opties voor:

- grootschalige inzet van biomassacentrales met CCS;
- grootschalige inzet van DACCS;
- grootschalige mariene NETP
- sterke vergroting van de het potentieel van een (of meer) van de andere technologieën, ten opzichte van wat in deze studie is ingeschat.

Grootschalige inzet van BECCS met biomassacentrales en van DACCS waren eerder afgefallen omdat zij concurreren met CO₂-reductiemaatregelen in andere sectoren. Als we vasthouden aan het beleidsprincipe dat CO₂-reductie en circulariteit een hogere prioriteit hebben dan negatieve emissies, wordt de koolstof en CO₂ uit biomassa en DAC allereerst

gebruikt voor toepassingen in de industrie, voor biobrandstoffen en synfuels. Alleen wat over is, komt in aanmerking voor negatieve emissies.

Om aan de grote behoefte aan negatieve emissies in dit tijdpad te voldoen kunnen we echter niet zonder deze technologieën. Hier valt ook wel wat voor te zeggen, de behoefte in dit tijdpad sluit ten slotte aan bij scenario's waarin de economie in 2050 (nog) niet fossielvrij is. De industrie en landbouw hebben hier nog niet de grote systeemverandering doorgemaakt die in andere scenario's wel is meegenomen. We veronderstellen daarom in dit tijdpad dat CO₂ uit biomassa en DAC beschikbaar komt voor negatieve emissies. Dit tijdpad vereist daarbij import van grote hoeveelheden duurzame biomassa én een succesvolle ontwikkeling van DAC op basis van hernieuwbare elektriciteit³¹.

Grootschalige inzet van mariene NETP nemen we niet mee. We doen dat omdat het huidige TRL-niveau laag is en er te veel onzekerheden zijn rondom de mogelijke negatieve neven-effecten van deze technologieën.

Een overzicht van de technieken voor negatieve emissies die in dit tijdpad worden ingezet, en de aannames t.a.v. hun potentiële bijdrage in 2030 en 2050 is opgenomen in Tabel 26 en Figuur 39. Hierbij wordt voor de meeste technologieën uitgegaan van het maximale realistische potentieel voor 2030 en 2050 (uit Hoofdstuk 3). Voor BECCS uit biomassa-centrales is een bijdrage aangenomen van 22,2 Mton (2/3 van wat er nog extra nodig is), voor DACCS 11,1 Mton in 2050 (1/3). Hiermee wordt het gat van 33,3 Mton gedicht. Deze bijdragen zijn vrij willekeurig gekozen. De belangrijkste boodschap hierachter is dat er in dit tijdpad een fors volume aan negatieve emissies moeten worden gerealiseerd bovenop het al optimistische 'realistisch potentieel' dat we hebben geïdentificeerd. De inzet van mariene NETP is op nul ingeschat.

Met deze mix van maatregelen komt het totaal in 2050 uit op de 71,3 Mton negatieve emissies per jaar waar behoefte aan is in dit tijdpad. Omdat een groot deel van deze opties gebaseerd is op CCS, is er in dit tijdpad grote behoefte aan CCS-transport- en opslag-capaciteit voor BECCS en DACCS: die loopt op tot ruim 60 Mton CO₂/jaar in 2050.

³¹ Of het dan voor de hand ligt om de DACCS op Nederlands grondgebied komt of in het buitenland, waar de hernieuwbare elektriciteit goedkoper is, laten we hierin het midden. Zie ook Paragraaf 3.5.2.

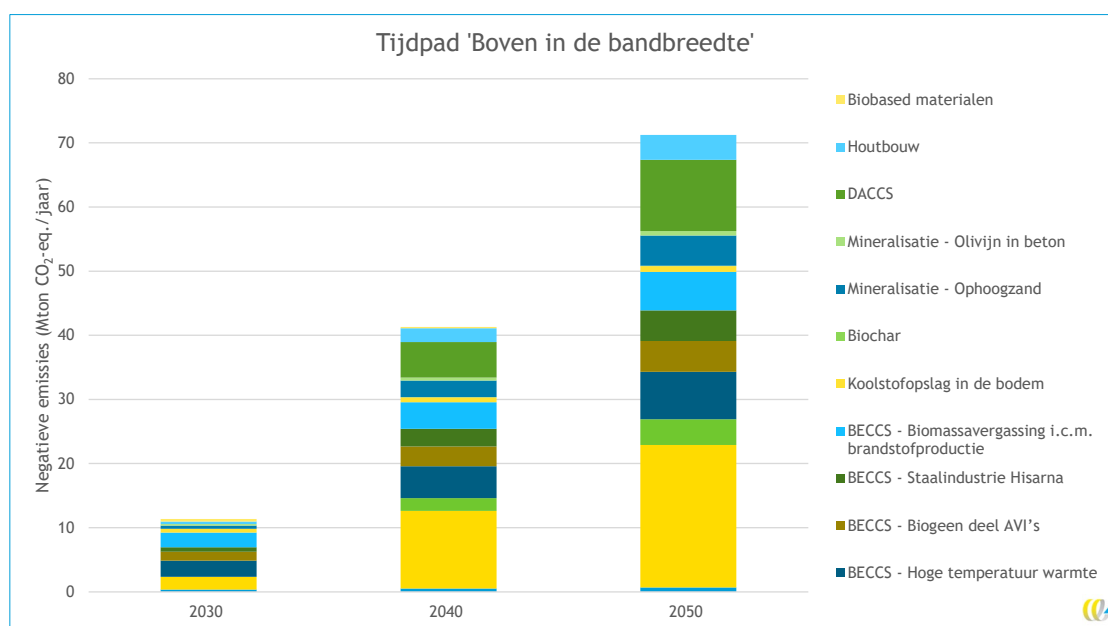
Tabel 26 - Inzet van negatieve-emissietechnologieën in het tijdpad 'Boven in de bandbreedte', tot 2050

Nr.	Techniek	Negatieve emissies (Mton/jaar)			Toelichting/aanname
		2030	2040	2050	
I.	Bebossing	0,4	0,5	0,7	Max potentieel, gestage toename over de jaren
II.	BECCS - Biomassacentrales	2,0	12,1	22,2	2050 gericht op voldoen aan grote behoefte aan neg. em., gestage toename over de jaren
II.	BECCS - Biogascentrales	0,0	2,0	4,0	Max potentieel, gestage toename over de jaren
II.	BECCS - Hogetemperatuurwarmte	2,5	5,0	7,4	Max potentieel, gestage toename over de jaren
II.	BECCS - Biogeen deel AVI's	1,4	3,1	4,8	Max potentieel, gestage toename over de jaren
II.	BECCS - Staalindustrie Hisarna	0,7	2,8	4,8	Max potentieel, gestage toename over de jaren
II.	BECCS - Biomassavergassing i.c.m. brandstofproductie	2,3	4,2	6,0	Max potentieel, gestage toename over de jaren
III.	Koolstofopslag in de bodem	0,6	0,8	0,9	Max potentieel, gestage toename over de jaren
IV.	Biochar	0,0	0,0	0,1	Max potentieel, gestage toename over de jaren
	Mineralisatie - Ophoogzand	0,5	2,6	4,7	
V.	Mineralisatie - Olivijn in beton	0,2	0,5	0,7	Max potentieel, gestage toename over de jaren
VI.	Marine NETP	0,0	0,0	0,0	Niet toegepast, te onzeker
VII.	DACCS	0,0	5,6	11,1	Gestage toename over de jaren
VIII.	Houtbouw	0,4	2,2	3,9	Max potentieel, gestage toename over de jaren
IX.	Biobased materialen	0,4	0,2	0,0	Max potentieel, gestage toename over de jaren
Totaal		11,4	41,3	71,3	
Waarvan CCS		8,9	34,6	60,3	

Om aan de enorme behoefte aan negatieve emissies te voldoen, moet het aanbod van alle negatieve-emissietechnieken sterk toenemen de komende decennia. Gezien geen van deze technieken op dit moment nog wordt toegepast voor negatieve emissies moet dit tijdspad uitgaan van veel innovatie, investeringen en stimulering van een grote diversiteit aan technieken voor negatieve emissies. Ook de monitoring van koolstofverwijdering via al deze routes moet worden opgezet.

Daarnaast kan het totaal aan 71,3 Mton negatieve emissies alleen worden gehaald door ook gebruik te maken van de technieken die CO₂ langdurig vastleggen. Deze niet-permanente technieken dragen voor 8% bij aan het totaal in 2050.

Figuur 39 - Opbouw aan negatieve-emissietechnieken voor Tijdspad 'Boven in de bandbreedte' tussen 2030 en 2050



Opslag

Het Tijdspad 'Boven in de bandbreedte' vereist grote hoeveelheden opslag van CO₂ voor negatieve emissies in geologische lagen: 8,9 Mton/jaar in 2030, toenemend naar 60,3 Mton in 2050. Tot 2050 komt dit neer op 692 Mton CCS in totaal (cumulatief). Dit komt bovenop de fossiele CCS in deze periode.

Zoals beschreven in het vorige hoofdstuk heeft Nederland theoretisch een grote opslagcapaciteit voor CO₂. De totale offshore-capaciteit van nog niet ontwikkelde velden is 1.500 Mton, de capaciteit van velden in ontwikkeling is 400 Mton. Onshore is theoretisch opslag van nog eens ongeveer 1.100 Mton mogelijk, bovendien kan Nederland wellicht ook gebruikmaken van opslagcapaciteit elders op de Noordzee (met name bij Noorwegen en VK). Bij elkaar is de bottleneck voor opslag tot 2050 daarom niet de totale theoretische geologische opslagcapaciteit, maar de tijdige ontwikkeling ervan, alsook de ontwikkeling van voldoende afvang

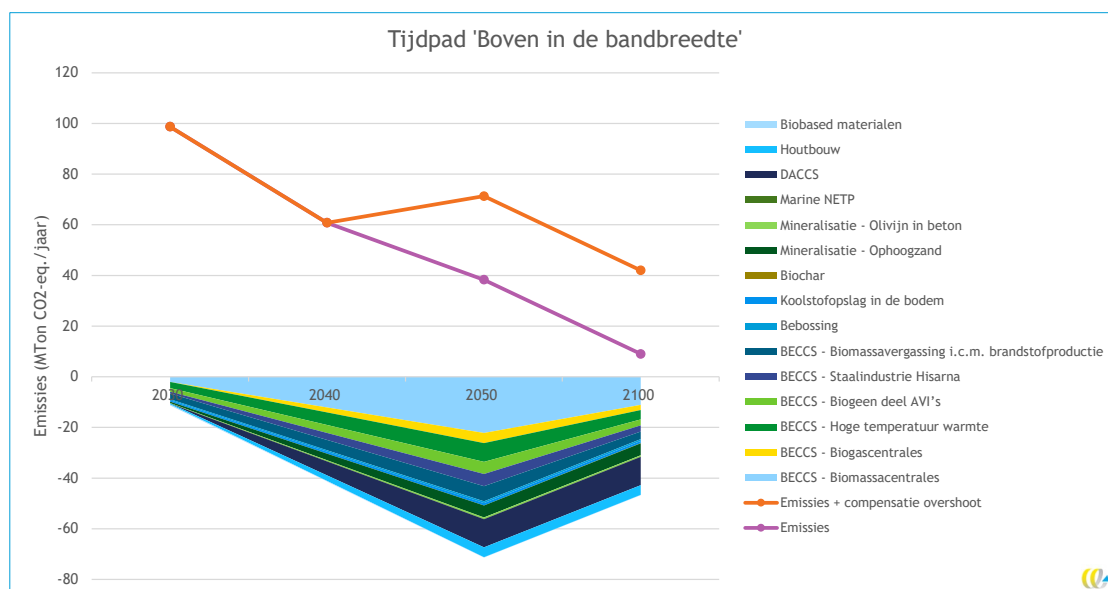
Op langere termijn loopt dit tijdspad wel tegen fysieke beperkingen van opslag aan. Over de periode 2030 tot 2100 is de cumulatieve behoefte aan opslag voor negatieve emissies zo'n

2.700 à 2.800 Mton CO₂. Deze hoeveelheid komt bovenop de vraag naar opslag vanuit CO₂ die is afgevangen voor emissiereductie. Het is duidelijk dat deze hoeveelheden de capaciteit van opslag in de Nederlandse Noordzee overstijgen en dat aansluiting bij opslagprojecten elders op de Noordzee nodig zal zijn.

Samenvatting tijdpad

Figuur 40 toont de visualisatie van dit tijdpad. Emissies (vanaf 2050 gedefinieerd als 'restemissies') alsook de som van emissies en compensatie voor de mondiale overshoot staan in de bovenste helft van de grafiek. In de onderste helft van de grafiek staat de gestapelde combinatie van de aanbodtechnieken. Hoewel de emissies duidelijk dalen in deze grafiek, gebeurt dat niet snel genoeg en is een enorme inzet van negatieve emissies nodig. Daarvoor moeten alle technieken zo snel mogelijk ontwikkeld en in de praktijk ingezet worden. Zowel het aanbod als de jaarlijkse opslag moeten verzesvoudigen tussen 2030 en 2050. Gegeven ontwikkel- en realisatietijden die tot tien jaar kunnen duren is het zaak zo snel mogelijk in te zetten op de aanbod- en opslagkant.

Figuur 40 - Visualisatie Tijdpad 1 - Boven in de bandbreedte



Conclusies en randvoorwaarden

Dit tijdpad is naar onze inschatting onhaalbaar. De realisatie van voldoende aanbod aan negatieve emissies vergt in dit tijdpad te veel optimistische aannames. Als ook maar één van de technieken met groot potentieel niet gerealiseerd kan worden – bijv. doordat DACCS, Hisarna o.b.v. biomassa of versnelde verwerking van mineralen toch niet op deze schaal beschikbaar komen in 2050, kan niet aan de behoefte worden voldaan. We hebben alleen maritieme opslag achter de hand om eventuele tegenvallende resultaten van een techniek op te vangen. Aangezien op dit moment nog geen enkele van deze technologieën daadwerkelijk wordt toegepast, en alle technieken knelpunten en risico's op tegenvallende resultaten met zich meebrengen, lijkt het onverstandig om realisatie van dit tijdpad te vertrouwen.

Dit onderstreept het belang van tijdige en verregaande CO₂-emissiereductie, nationaal en mondiaal, om de toekomstige behoefte aan negatieve emissies te beperken.

5.5 Tijdpad 2 - Snel en gericht

Tijdpad 2 schetst een heel ander beeld van Tijdpad 1. Het is vanuit klimaat oogpunt een veel optimistischer tijdpad, dat gekenmerkt is door een snelle afbouw van emissies en een succesvolle transitie naar een fossielvrije economie. Daardoor is er een beperkte behoefte aan negatieve emissies. Die wordt gericht ingevuld door technieken die gebruikmaken van CCS, m.a.w. door BECCS en DACCS. Er is voldoende geologische opslagcapaciteit.

Behoefte

Dit tijdpad gaat uit van een snelle transitie en op termijn lage emissies, nationaal en mondiaal. Dit zien we in zowel de restemissies na 2050 als in de overshoot:

- **Restemissies.** De economie maakt een grote en snelle verandering door. Dit gebeurt door snelle en doortastende veranderingen in beleid, alsook aanzienlijke aanpassingen in consumptiepatronen. Economische activiteiten worden aanzienlijk minder energie-intensief, fossiele energie en grondstoffen worden vervangen door hernieuwbare, circulariteit krijgt een centrale rol. Klimaatneutraliteit wordt behaald door in te zetten op de transitie naar volledig duurzame energiebronnen en grondstoffen. Ook de landbouwemissies nemen sterk af, o.a. door vermindering van de veeteelt. Onder deze omstandigheden zijn de restemissies beperkt in 2050, en blijven vooral de emissies van de landbouw over. Deze uitgangspunten zijn de basis voor alle vier nieuwe II3050 scenario's, restemissies komen daarin uit op 8,8 tot 10 Mton CO₂-eq./jaar in 2050 (zie Hoofdstuk 2). Voor dit tijdpad kiezen we daarom voor restemissies van 9 Mton/jaar in 2050.
- **Overshoot.** De bijdrage van Nederland aan de compensatie van mondiale overshoot van de doelen van het Klimaatakkoord van Parijs valt in dit Tijdpad fors kleiner uit dan in Tijdpad 1. We nemen de gunstigste uitkomst uit onze analyse in hoofdstuk 2 aan, wat neerkomt op 1,6 Mton/jaar. Dit cijfer gaat uit van stevig mondiaal klimaatbeleid waardoor de overshoot relatief beperkt blijft, en daarnaast een beperkte bijdrage van Nederland aan de compensatie van deze overshoot.

Tijdpad	Restemissies (Mton CO ₂ -eq./jaar)	Overshoot compensatie (Mton CO ₂ -eq./jaar)	Behoefte totaal (Mton CO ₂ -eq./jaar)
Tijdpad 2 <i>Snel en gericht</i>	9	2	11

Aanbod

Om aan deze behoefte voor negatieve emissies van 11 Mton CO₂/jaar in 2050 te voldoen, is er keuze in de in te zetten technieken. We kiezen ervoor om hier uit te gaan van een focus op de negatieve-emissietechnieken die gebruikmaken van geologische opslag van CO₂, d.w.z. BECCS en DACCS. We rekenen in dit tijdpad dus niet op grootschalige negatieve emissies door de andere technologieën. Die kunnen in de praktijk wel ingezet worden als BECCS of DACCS in de komende 5 à 10 jaar toch minder realistisch blijkt, of als Nederland een extra bijdrage wil leveren (bijvoorbeeld voor buurlanden met minder potentieel).

De som van het maximum realistisch potentieel voor alle BECCS-routes bij elkaar is 27 Mton/jaar, exclusief BECCS met biomassacentrales. Het realistisch potentieel van DACCS

was niet goed vast te stellen. Ook hier is dus keuze welke technieken ingezet kunnen worden. We kiezen ervoor om uit te gaan van beperktere beschikbaarheid van duurzame biomassa, en van de toepassing in lijn met het duurzaamheidskader voor biomassa (eerst inzetten voor hoogwaardige toepassingen, en in toepassingen zonder goed alternatief), waardoor alleen de volgende toepassingen van BECCS daadwerkelijk worden gerealiseerd:

- BECCS - Hogetemperatuurwarmte in de industrie;
- BECCS - Biogeen deel van AVI's;
- BECCS - Biomassavergassing.

Om wat ruimte te laten voor onverwachte ontwikkelingen gaan we uit van realisatie van de helft (voor hogetemperatuurwarmte en AVI's) tot tweederde (voor vergassing) van het maximaal realistisch potentieel voor 2050 dat we eerder hadden bepaald. Deze BECCS-technieken sluiten direct aan bij de transitie naar een circulaire economie. Biomassa wordt veel gebruikt als grondstof en warmtebron voor de industrie. Daarnaast wordt biomassa-vergassing de basis van een aantal productieketens, waarbij biogene CO₂ kan worden afgevangen en opgeslagen als negatieve emissies.

BECCS met biogascentrales valt af omdat deze veelal decentraal en relatief kleinschalig zijn waardoor CCS relatief duur wordt. Hisarna o.b.v. biomassa nemen we niet mee vanwege de grote onzekerheid of dit in de toekomst inderdaad wordt toegepast in Nederland (mocht dit in werkelijkheid wel het geval zijn, zou CCS op dit proces uiteraard wel goed passen bij dit tijdspad, en ook relatief eenvoudig worden toegepast). Bio-energiecentrales o.b.v. vaste biomassa vallen af omdat er in dit tijdspad voldoende alternatieve hernieuwbare energie beschikbaar is (o.b.v. wind, zon, etc.).

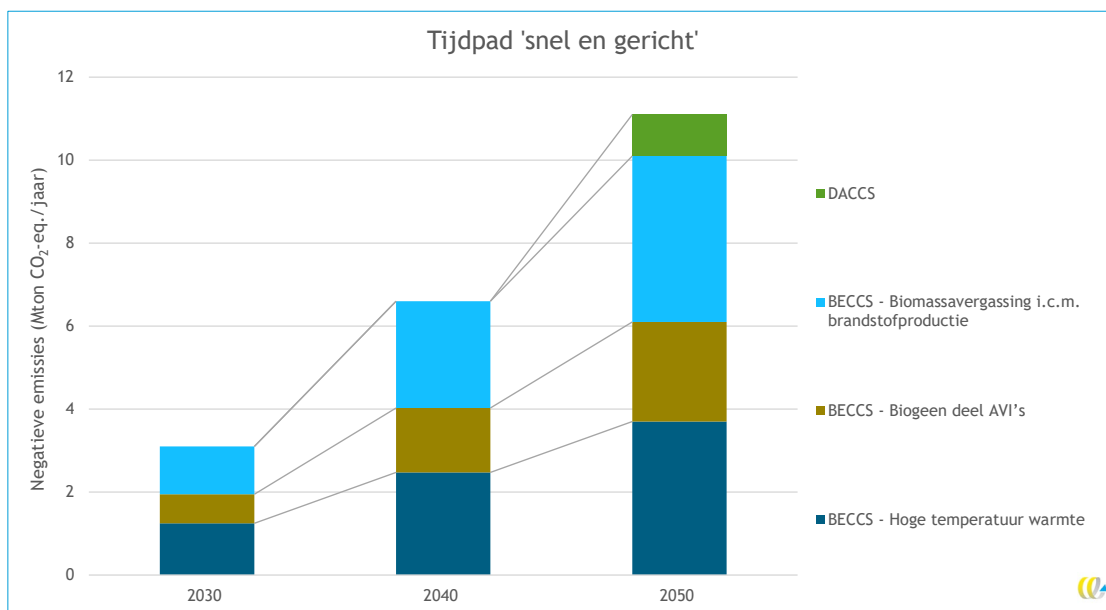
Naast deze BECCS-technologieën nemen we ook aan dat vanaf 2040 DACCS wordt ontwikkeld. Als met deze technologie in 2050 1 Mton CO₂/jaar wordt opgeslagen, wordt aan de behoefte van 11 Mton negatieve emissies per jaar (in 2050) voldaan. Omdat alle toegepaste technologieën gebruikmaken van CCS, is voor dit tijdspad ook 11 Mton/jaar CO₂-transport- en opslagcapaciteit nodig voor negatieve emissies. Alle negatieve emissies in dit tijdspad zijn permanent, er wordt geen gebruikgemaakt van niet-permanente opslagtechnieken.

Tabel 27 - Inzet van negatieve-emissietechnologieën in het tijdspad 'snel en gericht', tot 2050

Nr.	Techniek	Negatieve emissies (Mton/jaar)			Toelichting/aanname
		2030	2040	2050	
I.	Bebossing	0,0	0,0	0,0	
II.	BECCS - Biomassacentrales	0,0	0,0	0,0	
II.	BECCS - Biogascentrales	0,0	0,0	0,0	
II.	BECCS - Hogetemperatuurwarmte	1,3	2,5	3,7	Helpt van het max. potentieel, wat voorzichtigere inschatting
II.	BECCS - Biogeen deel AVI's	0,7	1,6	2,4	Helpt van het max. potentieel, wat voorzichtigere inschatting
II.	BECCS - Staalindustrie Hisarna	0,0	0,0		
II.	BECCS - Biomassavergassing i.c.m. brandstofproductie	1,2	2,6	4,0	Tweederde van het max. potentieel
III.	Koolstofopslag in de bodem	0,0	0,0	0,0	
IV.	Biochar	0,0	0,0	0,0	
V.	Mineralisatie - Ophoogzand	0,0	0,0	0,0	
V.	Mineralisatie - Olivijn in beton				
VI.	Marine NETP	0,0	0,0	0,0	

Nr.	Techniek	Negatieve emissies (Mton/jaar)			Toelichting/aanname
		2030	2040	2050	
VII.	DACCS	0,0	0,0	1,0	Aanname
VIII.	Houtbouw	0,0	0,0	0,0	
IX.	Biobased materialen	0,0	0,0	0,0	
Totaal		3,1	6,6	11,1	
Waarvan CCS		3,1	6,6	11,1	

Figuur 41 - Opbouw aan negatieve-emissietechnieken voor Tijdpad 2 tussen 2030 en 2050



Opslag

Dit Tijdpad 'Snel en gericht' vereist maar 1/5de van de geologische opslagcapaciteit dan Tijdpad 1. Bovendien gaat dit tijdpad uit van een snelle afbouw van fossiele energie en grondstoffen, waardoor de behoefte aan fossiele CCS afneemt over de jaren. Tussen 2030 en 2050 is een cumulatieve opslagcapaciteit van bijna 140 Mton CO₂ nodig. In vergelijking met de mogelijkheden voor opslag in deze periode (zie het vorige hoofdstuk) lijkt dit haalbaar. Het geeft in elk geval voldoende tijd en mogelijkheid om strategisch na te denken over de inzet van de nog te ontwikkelen geologische opslagcapaciteit.

Ook de cumulatieve opslag van CO₂-emissies op de lange termijn (zo'n 650 à 700 Mton tussen 2030 en 2100) past in de verwachte geologische capaciteit. Hiervoor moet na 2030 wel bijkomende capaciteit ontwikkeld worden, de huidige projecten volstaan nog niet.

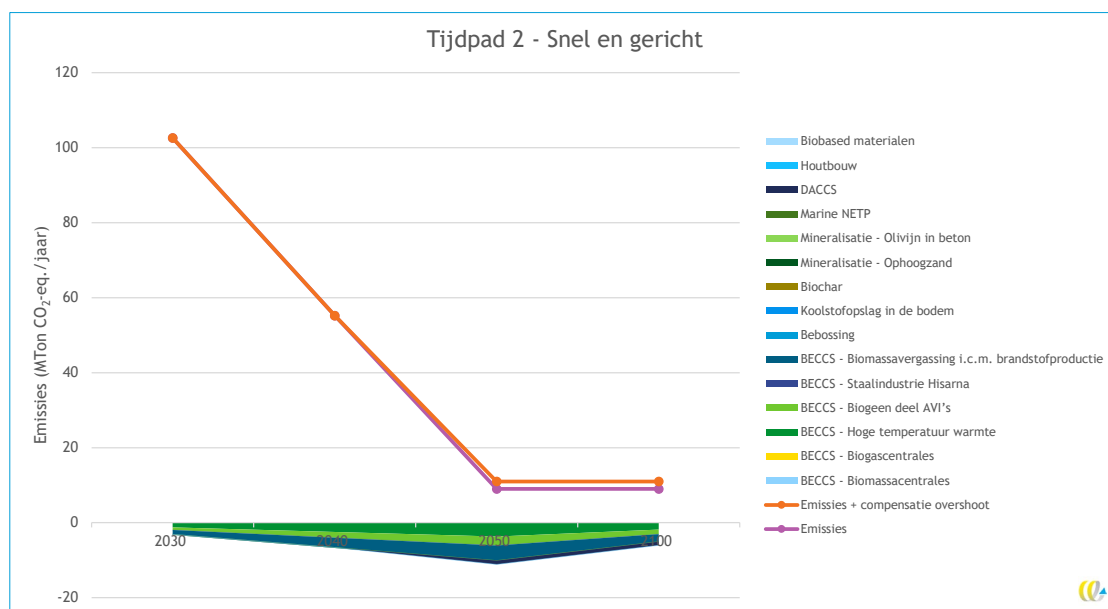
Samenvatting tijdpad

Figuur 42 toont de visualisatie van dit tijdpad. Emissies (vanaf 2050 gedefinieerd als 'restemissies') alsook de som van emissies en compensatie voor de mondiale overshoot staan in de bovenste helft van de grafiek. In de onderste helft van de grafiek staan de

gestapelde combinatie van de aanbodtechnieken. Het is duidelijk dat de emissies in dit tijdpad een snelle duikvlucht nemen. Dit gebeurt in Nederland, maar ook wereldwijd, waardoor de compensatie voor overshoot beperkt is vanaf 2050. Er is keuze in welke technieken ingezet kunnen worden. Aangezien geen van de technieken nu toegepast wordt, moet snel eerste beleidskeuzes gemaakt worden op welke technieken eerst ingezet wordt. Hier hebben we gekozen voor BECCS en DACCS. Indien op een termijn van ongeveer vijf jaar blijkt dat andere technieken sneller ontwikkeld worden, geeft dit tijdpad nog de ruimte om de switch te maken. De reeds ingezette trajecten voor opslag geven ruim de tijd om in de komende 10 tot 15 jaar de keuze te maken voor bijkomende opslagcapaciteit.

Het meest kritische onderdeel van dit tijdpad is de snelle omschakeling naar een duurzame en circulaire economie. Om de snelheid aan emissiereducties in dit tijdpad te realiseren moet het beleid snel en drastisch aangepast worden. Daarmee moeten we niet morgen, maar vandaag beginnen om dit tijdpad te realiseren.

Figuur 42 - Visualisatie Tijdpad 2 - Snel en gericht



Conclusies en randvoorwaarden

Dit tijdpad gaat uit van snel en doortastend beleid dat zorgt voor een volledige omschakeling van de economie naar een circulaire economie zonder gebruik van fossiele brandstoffen en grondstoffen. Dit is een zeer ambitieuze en daarmee de belangrijkste randvoorwaarde van dit tijdpad. Deze randvoorwaarde geeft veel meer lucht aan opties aan de aanbodkant, alsook voor de geologische opslag van CO₂.

Omdat de behoefte aan negatieve emissies in dit tijdpad relatief beperkt blijft – toe te schrijven aan een sterke inzet op CO₂-reductie en een succesvolle afbouw van gebruik van fossiele energie en grondstoffen in de gehele economie – kan aan de behoefte voor negatieve emissies worden voldaan met een beperkt aantal technieken.

Hier kiezen we ervoor om voldoende aanbod te creëren met een selectie van de CCS-routes: tot 2040 BECCS met HT-warmte, AVI's en biomassavergassing; na 2040 wordt ook DACCS marktrijp en in beperkte mate toegepast. Deze selectie heeft als voordeel dat er alleen

gebruik wordt gemaakt van permanente opslag van CO₂. Daarnaast maakt een beperkt aantal technieken het mogelijk om hier gericht beleid op te voeren, zodat dit potentieel ook daadwerkelijk wordt gerealiseerd. Bovendien sluiten deze BECCS-technieken aan bij de circulaire economie, waarbij steeds meer gebruik zal worden gemaakt van toepassingen van biomassa in de industrie.

Een keuze voor dit beperkte aantal technieken creëert echter ook een potentieel risico. Ook in deze technologieën zijn er nog grote onzekerheden, bijv. van realisatie van het DACCS-potentieel, van de succesvolle uitrol van biomassavergassing en van de beschikbaarheid van duurzame biomassa voor de hier gekozen toepassingen.

De aanbodkant van dit tijdpad is aanzienlijk eenvoudiger in te vullen dan in het ‘maximaal’ tijdpad – in plaats van 62 Mton/jaar is ‘slechts’ 11 Mton/jaar nodig. Maar ook dit potentieel komt er niet vanzelf, gericht beleid en stimulering is nodig om ervoor te zorgen dat dit potentieel daadwerkelijk wordt gerealiseerd.

5.6 Tijdpad 3 - Grote puzzel

Tijdpad 3 ligt qua behoefte aan negatieve emissies tussen Tijdpaden 1 en 2 in. Deze behoefte wordt ingevuld met een breed palet aan negatieve-emissietechnieken. We zetten daarbij in op innovaties en synergie met de circulaire economie. Er wordt geen biomassa of DAC specifiek voor negatieve emissies ingezet, er wordt wel gebruikgemaakt van koppelingen met de circulaire en biobased economie (zoals bij AVI's). Dit tijdpad heeft de laagste vraag naar CCS-opslagcapaciteit (12,7 Mton CO₂ per jaar in 2050).

Behoefte

Tijdpad 3 gaat uit van krachtig en effectief klimaatbeleid in Nederland en mondiaal. Wel zijn de aannames iets minder optimistisch dan in het Tijdpad ‘Snel en gericht’. Daardoor zijn zowel de Nederlandse restemissies als de mondiale overshoot hoger dan in Tijdpad 2.

- **Restemissies.** De restemissies komen in 2050 wat hoger uit dan we zien in de II3050-scenario's: we nemen 15 Mton CO₂-eq./jaar aan i.p.v. 9-10 Mton CO₂-eq./jaar.
- **Overshoot.** Voor de overshootcompensatie gaan we ook uit van een hogere mondiale uitstoot en een grotere bijdrage van Nederland: 10 Mton CO₂-eq./jaar i.p.v. 2 Mton CO₂-eq./jaar.

De totale behoefte komt daarmee uit op 25 Mton CO₂/jaar in 2050 – ruim het dubbele van de behoefte in Tijdpad ‘Snel en gericht’ maar slechts 40% van de behoefte in het Tijdpad ‘Boven in de bandbreedte’.

Tabel 28 - Behoefte aan negatieve emissies in 2050 tot 2100 voor Tijdpad 3 'Grote puzzel'.

Tijdpad	Restemissies (Mton CO ₂ -eq./jaar)	Overshoot compensatie (Mton CO ₂ -eq./jaar)	Behoefte totaal (Mton CO ₂ -eq./jaar)
Tijdpad 3 Grote puzzel	15	10	25

Aanbod

Ook in dit tijdpad is er keuze aan in te zetten technieken om aan de behoefte voor negatieve emissies te voldoen. We kiezen ervoor om niet uit te gaan van beschikbaarheid van biomassa of DAC voor negatieve emissies, waarmee we ook het gebruik van geologische opslag te beperken (bijvoorbeeld ingegeven door maatschappelijke perceptie van CCS).

Voor dit tijdpad gaan we uit van innovaties en combinaties van technieken:

- Grootschalige inzet van de natuurlijke opslagopties, met name bebossing en koolstofopslag in de bodem.
- Innovaties van technologieën die nu nog een lager TRL-niveau hebben, met name biomassavergassing, biochar, mineralisatie (ophoogzand en olivijn in beton) en marine NETP.
- Benutten van koppelkansen met biomassa waarvan het gebruik past in de circulaire economie (incl. houtbouw, en toename biogene CO₂ in AVI's met CCS),
- Benutten van koppelkansen in industriële processen door CCS toe te passen op plekken in de industrie waar biogene CO₂ kan worden afgevangen en opgeslagen. In dit rapport nemen we hiervoor CO₂-afvang bij biomassavergassing mee, maar CO₂-afvang bij andere grootschalige biogene processen kan uiteraard ook.

Een aantal aanbodopties nemen we expliciet niet mee, dit lichten we per optie hieronder toe:

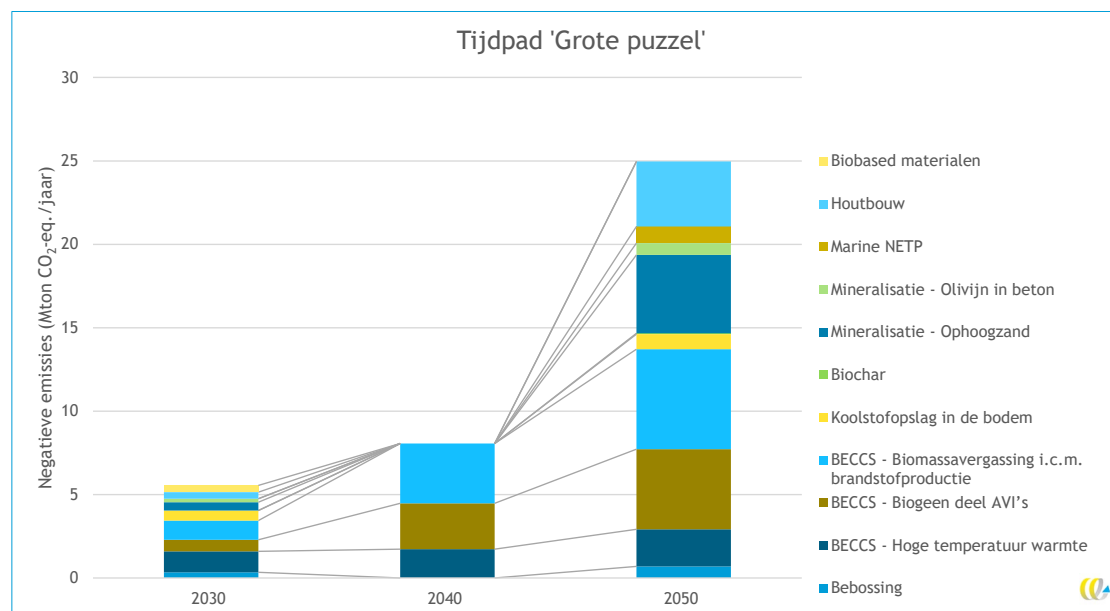
- Biomassacentrales zijn niet opgenomen in dit tijdpad omdat er voldoende andere aanbodmogelijkheden zijn. Deze keuze past bij het beleidsprincipe dat CO₂-reductie een hogere prioriteit geeft dan negatieve emissies. Het past ook bij de keuze om biomassa zoveel mogelijk voor materialen (koolstofstromen) te gebruiken.
- CCS voor biogascentrales valt af omdat de kosten relatief hoog zijn bij deze kleinschalige en decentrale vorm van energieopwekking.
- Biomassa voor hogetemperatuurwarmte speelt een beperktere rol dan in de eerdere tijdpaden, omdat de industrie in dit tijdpad meer gebruik kan maken van warmtepompen en van processen die minder hogetemperatuurwarmte nodig hebben.
- Staalproductie d.m.v. Hisarna met biomassa nemen we hier niet mee, we gaan ervan uit dat staalproductie o.b.v. alternatieve processen zal doorbreken in de toekomst.
- DACCS wordt hier niet voor negatieve emissies gebruikt omdat er grote behoefte is aan de hernieuwbaar geproduceerde CO₂ voor de productie van synfuels en als grondstof voor de (circulaire) industrie.

Met de resulterende mix aan technologieën komen we uit op ruim 25 Mton negatieve emissies per jaar in 2050. Dit tijdpad maakt relatief veel gebruik van niet-permanente opslagtechnieken zoals bebossing en houtbouw. In totaal 28% van de negatieve emissies in 2050 is o.b.v. langdurige, niet-permanente opslag.

Tabel 29 - Inzet van negatieve-emissietechnologieën in het tijdpad 'grote puzzel, tot 2050

Nr.	Techniek	Negatieve emissies (Mton/jaar)			Toelichting/aanname
		2030	2040	2050	
I.	Bebossing	0,4	0,0	0,7	Max. potentieel
II.	BECCS - Biomassacentrales	0,0	0,0	0,0	Biomassa wordt gebruikt voor andere toepassingen
II.	BECCS - Biogascentrales	0,0	0,0	0,0	Decentraal en dus relatief duur
II.	BECCS - Hogetemperatuurwarmte	1,3	1,7	2,2	Een derde van het max. potentieel
II.	BECCS - Biogeen deel AVI's	0,7	2,8	4,8	Max. potentieel
II.	BECCS - Staalindustrie Hisarna	0,0	0,0	0,0	Biomassa wordt gebruikt voor andere toepassingen
II.	BECCS - Biomassavergassing i.c.m. brandstofproductie	1,2	3,6	6,0	Max. potentieel
III.	Koolstofopslag in de bodem	0,6	0,0	0,9	Max. potentieel
IV.	Biochar	0,0	0,0	0,1	Max. potentieel
V.	Mineralisatie - Ophoogzand	0,5	0,0	4,7	Max. potentieel
V.	Mineralisatie - Olivijn in beton	0,2	0,0	0,7	Max. potentieel
VI.	Marine NETP	0,0	0,0	1,0	Eigen inschatting
VII.	DACCS	0,0	0,0	0,0	DAC wordt gebruikt voor andere toepassingen
VIII.	Houtbouw	0,4	0,0	3,9	Max. potentieel
IX.	Biobased materialen	0,4	0,0	0,0	Max. potentieel
Totaal		5,6	8,1	25,0	
Waarvan CCS		3,1	8,1	13,0	

Figuur 43 - Opbouw aan negatieve-emissietechnieken voor Tijdpad 3 tussen 2030 en 2050



Opslag

Dit Tijdpad ‘Grote puzzel’ vereist ook weer geologische opslag voor negatieve emissies, 8,1 Mton per jaar in 2040 en 13 Mton per jaar in 2050 – cumulatief ruim 160 Mton tussen 2030 en 2050. Als tussen 2030 en 2046 de fossiele CCS wordt afgebouwd past de vereiste opslag in de verwachte capaciteit van het Aramis-project. Dit geeft voldoende tijd en mogelijkheid om strategisch na te denken over de inzet van de nog te ontwikkelen geologische opslagcapaciteit.

De cumulatieve opslag van CO₂-emissies komt in dit scenario uit op zo’n 500 à 550 Mton tussen 2030 en 2100 (bovenop de opslag van fossiele CO₂). Dit past in de verwachte geologische capaciteit, al moet er hiervoor na 2030 wel bijkomende capaciteit ontwikkeld worden.

Samenvatting tijdpad

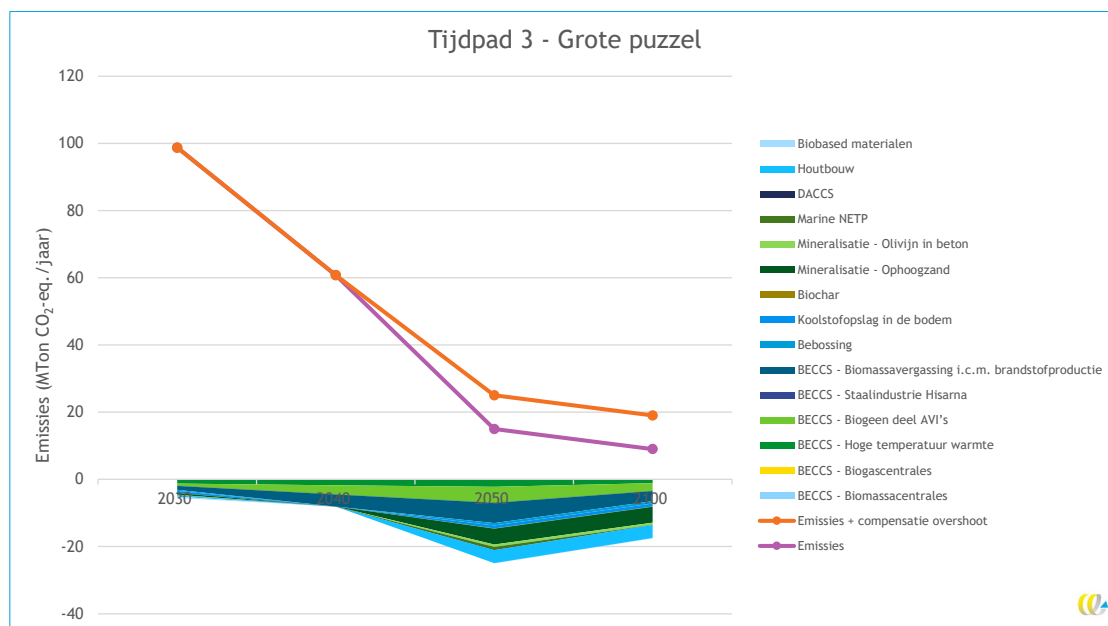
Figuur 44 toont de visualisatie van dit tijdpad. Emissies (vanaf 2050 gedefinieerd als ‘restemissies’) alsook de som van emissies en compensatie voor de mondiale overshoot staan in de bovenste helft van de grafiek. In de onderste helft van de grafiek staat de gestapelde combinatie van de aanbodtechnieken. De emissies dalen snel in dit tijdpad, maar minder snel dan in Tijdpad 2. Dat geldt zowel voor Nederland als de hele wereld. De overshoot is groter dan in Tijdpad 2, maar aanzienlijk kleiner dan in Tijdpad 1.

Aangezien dit tijdpad inzet op technieken met een lagere TRL, is het belangrijk dat deze technieken – met name biochemie met CCS en versnelde verwerking van mineralen, maar ook in mindere mate biochar en mariene CO₂-opslag – zo snel mogelijk verder ontwikkeld worden en in de praktijk toegepast worden.

Daarnaast staat of valt dit tijdpad, net als Tijdpad 2, met snel en ambitieus klimaatbeleid. Zonder de snelle omschakeling naar een duurzame en circulaire economie wordt dit tijdpad onhaalbaar en komt Tijdpad 1 meer in zicht. Ook voor dit tijdpad moet beleid snel en drastisch aangepast worden.

Net als in Tijdpad 2 hebben de reeds ingezette trajecten voor opslag de ruimte om in de komende 10 tot 15 jaar de keuze te maken voor bijkomende opslagcapaciteit.

Figuur 44 - Visualisatie Timpdad 3 - Grote puzzel



Conclusies en randvoorwaarden

Timpdad 3 vereist snel en ambitieus beleid voor een volledige omschakeling van de economie naar een circulaire economie zonder gebruik van fossiele brandstoffen en grondstoffen. De snelheid en mate van deze omschakeling zijn iets beperkter dan in Timpdad 2, maar nog altijd bijzonder ambitieus. De realisatie van een snelle afbouw van emissies is ook hier de belangrijkste randvoorwaarde van dit timpdad.

De tweede belangrijke voorwaarde voor dit timpdad is succesvolle innovatie op verschillende fronten. We gaan hier uit van de verdere ontwikkeling van negatieve-emissietechnieken met een lager TRL-niveau, zoals vergassing met CCS, versnelde verwerking van mineralen en mariene CO₂-opslag. Aangezien de ontwikkeling, toepassingen in pilots en volledige uitrol van technieken jaren tot decennia in beslag nemen, moet de ontwikkeling van deze technieken meteen ondersteund worden. Een beperkt aantal aanbodtechnieken in dit timpdad zit aan het einde van de onderzoeksfase (TRL 1-4), de meeste technieken zitten in de 'Death Valley'-risicozone (TRL 5-6) waarin onderzoek door kennisinstellingen beperkt is, maar commerciële toepassingen nog niet levensvatbaar zijn. Om innovatie en ontwikkeling van aanbodtechnieken te stimuleren, moet dus op drie domeinen ingezet worden:

- ondersteuning voor verder onderzoek naar technieken met een laag TRL-niveau (1-4).
- gerichte programma's en investeringsmogelijkheden zodat aanbodtechnieken de 'Death Valley'-zone kunnen doorkomen (TRL 5-6);
- ondersteuning van commercialisatie van technieken die vrij ver ontwikkeld zijn (TRL 7, 8 en eventueel 9).

Aan de aanbodkant van dit timpdad zit enige speling. Als ontwikkeling van sommige technieken minder snel verloopt, is het mogelijk om in te zetten op andere mogelijkheden. Ook voor geologische opslag blijft er speling over. De meest kritische randvoorwaarde is tijdige en ambitieuze afbouw van emissies. Ook in dit timpdad moet beleid zo snel mogelijk aangepast worden, inclusief monitoring, verificatie en stimulering.

5.7 Samenvattend overzicht van behoefte en aanbod in de tijdpaden

De overwegingen leiden tot de volgende aannames voor de behoefte aan negatieve emissies in 2050, in de verschillende tijdpaden:

Tabel 30 - De behoefte aan negatieve emissies in Nederland in 2050, voor de verschillende tijdpaden (in Mton CO₂-eq./jaar)

Tijdpad	Restemissies	Overshoot compensatie	Behoefte totaal
Boven in de bandbreedte	38,3	33	71,3
Snel en gericht	9	2	11
Grote puzzel	15	10	25

Voor de emissies gaan we in alle gevallen uit van een lineaire afname tussen nu en 2050. We gaan er verder van uit dat de restemissies van de tijdpaden 'Boven in de bandbreedte' en 'Grote Puzzel' na 2050 nog verder afnemen volgens dezelfde trend, totdat ook in die scenario's de 9 Mton/jaar restemissie is bereikt. Dit zijn uiteraard grove aannames (en niet in lijn met bijv. de KEV), maar voldoende detail voor deze eerste verkenning van tijdpaden voor negatieve emissies.

Aanbod

Op dit moment is er vrijwel geen sprake van negatieve emissies in Nederland of in de EU. Realisatie van het potentieel van de verschillende routes vergt nog de nodige investeringen, technologische ontwikkelingen en verandering van productieketens, zoals ook is besproken in Hoofdstuk 2. In elk van de drie tijdpaden die we hier ontwerpen maken we bepaalde aannames voor welke technologieën succesvol worden toegepast in de toekomst. Tabel 31 geeft een overzicht van de inzet van technieken in de verschillende tijdpaden in 2050.

Tabel 31 - De inzet van negatieve emissies in Nederland in 2050, voor de verschillende tijdpaden (in Mton CO₂-eq./jaar)

Nr.	Techniek	Boven in de bandbreedte	Snel en gericht	Grote puzzel
I.	Bebossing	0,7	0,0	0,7
II.	BECCS - Biomassacentrales	22,2	0,0	0,0
II.	BECCS - Biogascentrales	4,0	0,0	0,0
II.	BECCS - Hogetemperatuur-warmte	7,4	3,7	2,2
II.	BECCS - Biogeen deel AVI's	4,8	2,4	4,8
II.	BECCS - Staalindustrie Hisarna	4,8		0,0
II.	BECCS - Biomassavergassing i.c.m. brandstofproductie	6,0	4,0	6,0
III.	Koolstofopslag in de bodem	0,9	0,0	0,9
IV.	Biochar	0,1	0,0	0,1
	Mineralisatie - Ophoogzand	4,7	0,0	4,7
V.	Mineralisatie - Olivijn in beton	0,7		0,7
VI.	Marine NETP	0,0	0,0	1,0
VII.	DACCS	11,1	1,0	0,0
VIII.	Houtbouw	3,9	0,0	3,9
IX.	Biobased materialen	0,0	0,0	0,0
Totaal		71,3	11,1	25,0
Waarvan CCS		60,3	11,1	13,0

Met name het tijdpad ‘Boven in de bandbreedte’ is hierin erg ambitieus: de ontwikkeling van al dit potentieel vereist veel inspanning op alle fronten, incl. techniekontwikkeling, investeringen in CCS, en ruime beschikbaarheid van duurzame biomassa. Terwijl er juist in dit tijdpad minder voortgang is in verduurzaming, waardoor synergie (bijvoorbeeld met BECCS in de biochemie) beperkt zal zijn én er ook veel fossiele CCS nodig is. Deze knelpunten staan verder beschreven in Hoofdstuk 3 en de factsheets. Beleid waarmee deze knelpunten kunnen worden opgelost komt in de latere hoofdstukken aan bod.

5.8 De tijdpaden in internationale context

Zoals eerder aangegeven gaan we in deze tijdpaden in principe uit van realisatie van negatieve emissies op Nederlands grondgebied, in lijn met de nationale klimaatrapportage en -doelstelling. In de praktijk spelen deze ontwikkelingen zich natuurlijk wel af in een internationale context, binnen de EU en mondiaal.

Daar spelen een aantal aspecten die we hier kort beschouwen:

- a Hoe verhoudt zich de Nederlandse situatie ten opzichte van de andere landen in de EU?
- b Zijn er mogelijkheden voor Nederland om negatieve emissies buiten Nederlands grondgebied te realiseren, indien nodig? Kan Nederland bijvoorbeeld gebruikmaken van buitenlandse geologische opslagcapaciteit voor negatieve emissies, indien nodig?
- c Geologische opslagcapaciteit in internationaal perspectief

Ad a. Hoe verhoudt de Nederlandse situatie zich ten opzichte van de andere landen in de EU?

Uit de eerdere hoofdstukken blijkt dat Nederland relatief weinig potentieel heeft voor negatieve emissies via bebossing en koolstofopslag in de bodem. Dit zijn technieken die EU-breed fors bijdragen aan negatieve emissies, zo blijkt bijvoorbeeld uit het EU-scenario 1.5TECH in Figuur 14. LULUCF-maatregelen dragen hierin EU-breed bij aan meer dan de helft van de totale negatieve emissies vanaf 2050. In de periode tot 2040 is de bijdrage van overige technieken zelfs verwaarloosbaar. Het plaatje voor Nederland is wezenlijk anders, hier zien we juist meer mogelijkheden voor de overige technieken. Dit heeft vooral te maken met de relatief gunstige mogelijkheden voor CCS, en de potentieel grote volumes biogene CO₂ die kan worden afgevangen in de toekomstige (biobased) industrie in Nederland. Als we zoeken naar mogelijkheden voor Nederland om een bijdrage te leveren aan de realisatie van voldoende negatieve emissies voor andere landen binnen de EU, ligt het daarom voor de hand om te kijken naar mogelijkheden rondom BECCS.

Zoals blijkt uit de tijdpaden hoeft Nederland niet haar volle potentieel aan negatieve emissies te realiseren als de restemissies van Nederland sterk worden teruggedrongen – zoals in Tijdpad ‘Snel en Gericht’. In dat geval kan ruimte worden gecreëerd voor extra negatieve emissies, bovenop de behoefte voor Nederland zelf. Het kan dan bijvoorbeeld gaan om extra BECCS in Nederland, maar ook om de import van biogene of DAC CO₂ vanuit andere landen, die vervolgens in Nederlandse ondergrondse locaties wordt opgeslagen. Belangrijke randvoorwaarden hiervoor zijn voldoende CCS-opslagcapaciteit en voldoende beschikbaarheid van duurzame biomassa voor BECCS-routes. Zie ook de verdere beschrijving van dit tijdpad in Paragraaf 5.4, en de beschouwing over CCS-opslagcapaciteit hieronder.

Ad b. Zijn er mogelijkheden voor Nederland om negatieve emissies buiten Nederlands grondgebied te realiseren, indien nodig?

Andersom is het wellicht mogelijk dat Nederland gebruikmaakt van het buitenland om aan een deel van haar behoefte aan negatieve emissies te voldoen.

Het kan hierbij bijvoorbeeld gaan om gebruik van buitenlandse geologische opslagcapaciteit voor negatieve emissies via BECCS. Een andere potentiële mogelijkheid is dat een deel van de negatieve emissies volledig in het buitenland plaatsvinden, en Nederland daaraan bijdraagt door bijvoorbeeld financiering, of opkopen van negatieve-emissierechten.

Het huidige klimaatbeleid voorziet nog niet in de mogelijkheid om in het buitenland gerealiseerde negatieve emissies mee te mogen tellen in de nationale klimaatdoelstelling, maar wellicht is dit een beleidsoptie voor de toekomst. Nederland kan er wellicht ook voor kiezen om op deze manier bij te dragen aan de reductie van de overshoot van de 1,5°C-doelstelling.

Het is nog te vroeg om de mogelijkheden hiervoor precies in kaart te brengen, maar de kansen lijken in elk geval op korte tot middellange termijn (tot 2040) het grootst bij de nature-based-technieken zoals bebossing en koolstofopslag in de bodem. Landen met relatief veel bos en land, en weinig restemissies kunnen dan een extra bijdrage leveren (mits zij een goede boekhouding van hun emissies en koolstofstocks bijhouden). Inzet van DACCS in landen met relatief goedkope hernieuwbare elektriciteit én CO₂-opslagcapaciteit is wellicht ook een optie. Als het lukt om mariene opslagstechnieken verder te ontwikkelen en grootschalig uit te rollen zouden op dat vlak ook mogelijkheden kunnen ontstaan voor extra negatieve emissies, in samenwerking landen met landen langs de oceaan (in de EU: Portugal, Spanje, Frankrijk).

Verder onderzoek naar de ontwikkeling van behoefte en aanbod aan negatieve emissies in de verschillende landen en in de EU als geheel is nodig om de mogelijkheden hiervoor in kaart te brengen.

Ad c. Geologische opslagcapaciteit in internationaal perspectief

Nederland heeft een relatief grote geologische opslagcapaciteit ten opzichte van de grootte van zijn economie. Uit de gezamenlijke analyse van de opslagcapaciteit en de mogelijkheden om CO₂ af te vangen, blijkt dat de afvang sneller de limiterende factor is dan de opslagcapaciteit. De verwachting is dat als grensoverschrijdende opslag van CO₂ zal plaatsvinden in de toekomst, Nederland CO₂ zal importeren. Hier zien we momenteel de eerste stadia van met interesseverklaringen vanuit België en Duitsland om Belgische en Duitse CO₂ in Nederland op te slaan. In hoeverre Nederland in de praktijk in de toekomst daadwerkelijk ruimte zal hebben voor import van CO₂, is sterk afhankelijk van de reële behoeftes, technologische ontwikkelingen en beleidskeuzes.

De bestaande projecten voor opslag van CO₂ hebben een capaciteit van ongeveer 640 Mton. De totale opslagcapaciteit waar nog geen bestaande projecten voor zijn is in de grootteorde van 3.700 Mton: lege gasvelden zonder projecten (1.100 Mton), offshore-zoutaquifers (>1.400 Mton) en onshore-opslag (>1.000 Mton).

Uit de analyse van behoeftes aan negatieve emissies in 2050 komt een bereik van ca. 10 tot 67 Mton CO₂-opslag per jaar. Maximaal 11 Mton kan jaarlijks gecompenseerd worden via technieken die geen geologische opslagcapaciteit vergen. Indien dat maximum inderdaad ingezet kan worden, resteert er maximaal een behoefte van ca. 56 Mton aan negatieve emissies via CCS. De potentie van BECCS en biochemie met CCS samen is 27 Mton per jaar,

de potentie van DACCS is nog onbekend. Dit betekent dat voor een belangrijk deel van de scenario's niet de geologische opslagcapaciteit, maar de afvang- en injectiepotentie limiterend zijn.

Om een beeld te geven van wat er nodig is, kan een vergelijking met de capaciteit van een Porthos-, Aramis- of Neptune-project inzicht bieden. Op basis van die projecten is een schatting van de injectiecapaciteit van een gasveld 2-4 Mton/jaar. Dat betekent dat voor de drie tijdpaden een aantal opslagprojecten nodig is:

- 'Boven in de bandbreedte': 15-20 parallel lopende projecten;
- 'Snel en gericht': 4-10 projecten;
- 'Grote puzzel': 3-4 projecten.

De capaciteit van een enkel project kan natuurlijk groter zijn, maar dit geeft een eerste beeld en laat zien dat het aantal projecten en injectieputten dat nodig is voor deze tijdpaden, met name voor de eerste maar ook voor de tweede, groot is.

5.9 Conclusies

Negatieve emissies kunnen een bijdrage leveren aan de compensatie van restemissies en de overshoot van de mondiale klimaatdoelen, maar hoeveel precies is nog erg onzeker. Om hier toch inzicht in te verschaffen hebben we in dit hoofdstuk drie verschillende tijdpaden ontwikkeld, die alle drie passen bij een ander toekomstbeeld van de Nederlandse economie. Zij zijn alle drie in theorie mogelijk, maar hoe groter de behoefte aan negatieve emissies, hoe groter de uitdaging om voldoende aanbod te realiseren – en hoe groter het risico dat dit niet zal lukken.

Reduceren van de restemissies én de overshoot van de mondiale klimaatdoelen moeten daarom de kern blijven van het klimaatbeleid. Als de restemissies de komende decennia niet sterk worden gereduceerd, raakt het doel om klimaatneutraal te worden in 2050 uit zicht. Deze analyse laat zien dat het creëren van een groot aanbod aan negatieve emissies – zoals in het tijdpad 'Boven in de bandbreedte' – geen realistisch streven is. Belangrijke redenen hiervoor zijn de nog lage TRL van een groot deel van de technieken, de afhankelijkheid van de nog onzekere ontwikkelingen in de industrie, biomassabeschikbaarheid en de tijdige beschikbaarheid van de benodigde CCS-opslagcapaciteit.

Veel van de negatieve-emissietechnologieën moeten nog verder worden ontwikkeld en vervolgens, indien succesvol, grootschalig worden uitgerold. Dit zal tijd (en geld) kosten, en het risico bestaat dat niet alle innovatietrajecten daadwerkelijk het potentieel bereiken dat hier is ingeschat. Daar staat uiteraard tegenover dat een aantal van deze technologieën wellicht juist succesvoller zullen zijn dan we hier inschatten. Daar op vertrouwen brengt echter risico's met zich mee. Omdat niet op voorhand te zeggen valt welke technologie succesvol wordt, is het aan te raden om op veel verschillende technieken in te zetten. Zo kan het risico dat de klimaatdoelen niet worden gehaald worden beperkt.

Een potentieel kansrijke technologie om grote volumes aan negatieve emissies te realiseren in Nederland is grootschalige toepassing van BECCS, in welke vorm dan ook. Een deel van de BECCS-technieken is echter sterk afhankelijk van ontwikkelingen in de industrie. Als biomassa wordt gebruikt als grondstof voor de industrie (bijv. voor de chemie, brandstoffen of staalproductie) of voor hogetemperatuurwarmte ontstaan er kansen voor grootschalige toepassing van BECCS. Maar een deel van de industrie kan ook kiezen voor andere alternatieven, bijvoorbeeld voor groene waterstof voor hogetemperatuurwarmte, en DRI (direct reduced iron) voor staalproductie. Dan is er minder potentieel voor BECCS.

Een toename van bio-energie met CCS hoort ook tot de mogelijkheden om grote volumes aan BECCS te realiseren, dit speelt een grote rol in het eerste tijdpad. Biomassabeschikbaarheid kan daarbij wel een beperkende factor zijn, in combinatie met de vraag naar duurzame biomassa voor hoogwaardigere toepassingen en biobrandstoffen voor transportsectoren met weinig alternatieven.

Ook de beschikbaarheid van CO₂-opslag is een belangrijke randvoorwaarde voor BECCS, (en DACCS). De tijdpaden vragen deels forse hoeveelheden CO₂-opslagcapaciteit voor negatieve emissies, variërend van 137 Mton tot 593 Mton CO₂ tussen 2030 en 2050 (cumulatief, resp. in het tweede en het eerste tijdpad). Ook na 2050 blijft BECCS (en/of DACCS) noodzakelijk, in alle tijdpaden, waardoor de cumulatieve behoefte aan opslagcapaciteit blijft toenemen. De behoefte aan fossiele CCS, de technologische ontwikkelingen, de behoefte aan negatieve emissies via CCS en de eventuele import van CO₂ uit het buitenland zullen samen bepalen hoe snel de Nederlandse opslagcapaciteit gevuld zal worden. Voldoende en tijdige beschikbaarheid van CCS-opslagcapaciteit kan worden gewaarborgd door de verdere ontwikkeling van deze capaciteit, maar ook door de hoeveelheid fossiele CCS te beperken. 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 kan een belangrijke invloed uitoefenen op al deze aspecten.

Het is in de wetenschap nog de vraag of langdurige opslag ook onder de definitie van negatieve emissies valt. In twee van onze drie tijdpaden spelen de niet-permanente technologieën een rol: in 'boven in de bandbreedte' dragen zij voor 10% bij aan het totaal in 2050, in het tijdpad 'Grote puzzel' loopt hun bijdrage op tot 28%. Het gaat hierbij vooral om een potentieel flinke bijdrage van houtbouw (tot 3,9 Mton/jaar in 2050), gevolgd door bebossing en koolstofopslag in de bodem (1,2 en 1,0 Mton/jaar resp.). Dit zijn ook aantrekkelijke opties om te ontwikkelen uit oogpunt van andere beleidsdoelen (biodiversiteit, bodemkwaliteit, CO₂-mitigatie, circulaire economie). Zij vereisen wel een goede monitoring, verificatie en certificering, zodat het daadwerkelijke volume aan negatieve emissies meetelt voor de klimaatdoelen.

Er ontstaan in de toekomst wellicht ook kansen voor Nederland om negatieve emissies buiten het grondgebied te realiseren, in samenwerking met andere landen. Daarbij kan worden gedacht aan het gebruik van opslagcapaciteit voor CCS in bijv. Noorwegen, bebossing in andere landen of mariene opslag in landen aan de Atlantische Oceaan. Vanwege de huidige onzekerheid over zowel de behoefte alsook het aanbod aan negatieve emissies in andere landen, zijn deze mogelijkheden op dit moment nog niet te kwantificeren.

Het centrale thema in de tijdige ontwikkeling van negatieve emissies is het wegwerken van de vele onzekerheden. Dat vraagt overheidsregie en gericht beleid. Hier gaan we dieper op in in de verdere hoofdstukken.

6 Knelpunten en oplossingsrichtingen

6.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken lag de nadruk op de kwantitatieve analyse van behoefte aan en aanbod van negatieve emissies in de tijd en de beschikbare opslagcapaciteit. In dit hoofdstuk gaan we dieper in op wat er nodig is om een tijdige uitrol van voldoende negatieve emissies te kunnen realiseren. Welke knelpunten en belemmeringen liggen er om tijdig aan de behoefte aan negatieve emissies te voldoen, en welke oplossingsrichtingen bestaan hiervoor?

We kijken daarbij naar een breed scala aan typen knelpunten, zoals technische, financiële en ruimtelijke. Daarnaast nemen we ook neveneffecten van negatieve emissies mee: een knelpunt is immers niet alleen een knelpunt als het de realisatie van negatieve emissies in de weg staat, maar ook als de realisatie van negatieve emissies ongewenste effecten heeft op andere elementen in het energiesysteem, of andere beleidsdoelen tegenwerkt.

Nadat we de belangrijkste knelpunten hebben geïdentificeerd kijken we naar mogelijke oplossingsrichtingen. Sommige knelpunten zijn relatief eenvoudig via beleid aan te pakken, andere zijn inherent aan een technologie, daar is de vraag meer hoe er verstandig met het knelpunt kan worden omgegaan. Ook zijn er knelpunten waarbij verschillende beleidsdoelen botsen of niet tegelijkertijd kunnen worden gerealiseerd. Voor die categorie gaan we dieper in op de achterliggende dilemma's en *trade-offs*. In het volgende hoofdstuk behandelen we vervolgens de concrete beleidsimplicaties en -opties voor de verschillende typen knelpunten.

6.2 Identificatie van knelpunten

In Hoofdstuk 3 zijn in de factsheets van de beschikbare technieken voor negatieve emissies per techniek al mogelijke knelpunten geïdentificeerd. Daarnaast hebben we een werksessie georganiseerd met experts en stakeholders om onze eigen bevindingen te valideren en mogelijke andere knelpunten en belemmeringen te identificeren.

In Tabel 32 is voor de tien in dit rapport besproken technieken voor negatieve emissies (zie Hoofdstuk 3) op hoofdlijnen aangegeven of deze knelpunten van toepassing zijn. We maken hierbij onderscheid tussen de volgende typen knelpunten. Deze staan onder Tabel 32 uitgebreid toegelicht.

1. **Technisch.** Een te laag TRL-niveau belemmert grootschalige toepassing. We gaan ervan uit dat een TRL van 8 of hoger geen belemmering meer vormt.
2. **Permanentie.** Het is van belang dat emissies zo lang mogelijk, het liefst permanent, worden vastgelegd en dat dit via monitoring kan worden gecontroleerd.
3. **Economisch-financieel.** Het gaat hier met name om de financiële waarde die aan negatieve emissies kan worden toegekend door middel van bijv. certificaten.
4. **Energieverbruik.** Voor een aantal negatieve-emissietechnologieën is relatief veel energie nodig. Om extra emissies te voorkomen moet die energie hernieuwbaar zijn.
5. **Ruimtegebruik.** De technologieën zelf of de productie van de benodigde grondstoffen leggen een beslag op de (schaarse) ruimte.

6. **Concurrerende vraag naar grondstoffen en naar CCS.** Biomassa en CO₂ die worden gebruikt voor de productie van duurzame brandstoffen en materialen gebaseerd op duurzame koolstof zijn niet beschikbaar voor negatieve emissies. Hetzelfde geldt voor CCS waarbij fossiele CO₂ wordt afgevangen en opgeslagen.
7. **Neveneffecten.** Negatieve-emissietechnologieën kunnen negatieve neveneffecten op het milieu, het energiesysteem of aanpalende systemen (zoals voedselvoorziening) met zich meebrengen.

Tabel 32 - Potentiële knelpunten per technologie voor negatieve emissies

	Technisch	Permanentie	Econ.-fin.	Energie	Ruimte	Concur. vraag	Neven-effecten
I Be-/herbebossing		X	X		X		
IIA Bio-energie met CCS			X	X	X	X	X
IIB Biochemie met CCS	X		X	X	X	X	X
III Opslag in de bodem		X	X			X	
IV Biochar	X	X	X	X	X	X	X
V Versnelde verwerking	X	X	X	X	X		X
VI Mariene opslag	X	X	X				X
VII DACCS	X		X	X	X	X	
VIII Houtbouw		X	X		X		
IX Biomaterialen	X	X	X		X	X	X

6.3 Knelpunten nader toegelicht

Technische volwassenheid/TRL

Meerdere technologieën hebben nog niet het **TRL-niveau** waarop ze op grote schaal kunnen worden uitgerold. Soms zijn sommige varianten van een technologie al wel technisch volwassen, maar andere niet, zoals bij biochemie. CCS wordt in principe beschouwd als een volwassen technologie, al moet daarbij worden aangetekend dat de noodzakelijke infrastructuur vaak nog niet aanwezig is. Dit kan op korte termijn wel degelijk een knelpunt vormen, zeker in Nederland waar door de stikstofproblematiek voorlopig geen zicht is op de benodigde vergunningen.

Met name voor **DACCS** vormt de relatief lage TRL op dit moment een belemmering om een realistische inschatting te kunnen maken van het potentieel van deze technologie. Er zijn voor het principe van Direct Air Capture (DAC) verschillende technologieën in ontwikkeling, maar deze worden gekenmerkt door hoge kosten en een hoog energieverbruik per afgevangen ton CO₂. Mocht een van deze technieken op grote schaal beschikbaar komen tegen kosten die vergelijkbaar zijn met die van de andere technieken, dan is het potentieel van DACCS in theorie groot – het rapport *The State of Carbon Dioxide Removal* schat dit potentieel in op 5-40 Gton CO₂/jaar (Smith, 2023) – en zou het landschap van negatieve-emissietechnologieën wezenlijk veranderen.

Permanentie en monitoring

Bij een groot aantal technieken is de vastlegging **niet permanent en/of is niet goed te monitoren of de CO₂ daadwerkelijk nog is opgeslagen**. Dat vormt een knelpunt voor de betrouwbaarheid en het nut van de technologie.

Alleen voor geologische opslag van CO₂ geldt nu zonder meer dat deze als (vrijwel) permanent kan worden beschouwd en goed kan worden gemonitord. Voor de technologieën die niet met CCS werken is de opslag minder permanent (bijv. bebossing, houtbouw) en/of is moeilijk vast te stellen wat de omvang van het vastgelegde volume is en of de CO₂ niet weer vrijkomt in de atmosfeer (bijv. opslag in de bodem, mariene opslag). Dit zijn beperkingen die niet gemakkelijk op te lossen zijn en inherent zijn aan de gebruikte technologieën. Wel kan er in de beleidsvorming voor gekozen worden om anders om te gaan met permanente versus langdurige opslag, of om meer in te zetten op technologieën waarbij monitoring beter mogelijk is, zie daarvoor het volgende hoofdstuk.

Economisch-financieel

Op dit moment bestaat er nog geen mechanisme waarmee het realiseren van negatieve emissies **financieel wordt beloond** binnen een vaststaand wettelijk raamwerk, zoals via certificaten of emissierechten.³² Het is daarmee een activiteit waaraan geen economische waarde hangt (het is geen dienst waar een prijs voor gevraagd kan worden) en waar ook geen overheidsfinanciering voor beschikbaar is (benevens de SDE++ voor CCS). Er ontbreekt daarom een financiële prikkel voor de commerciële sector om in negatieve-emissie-technologieën te investeren: het is niet mogelijk er een businesscase voor te ontwerpen. Bovenstaande staat los van de specifieke technologie, daarom beschouwen we dit als knelpunt voor alle negatieve-emissietechnologieën.

Energiegebruik

Voor veel van de technologieën is relatief veel **energie** nodig. Dat geldt voor alle technieken die gebruikmaken van het afvangen en opslaan van CO₂ (CCS), maar bijvoorbeeld ook voor de pyrolyse waarmee biochar kan worden geproduceerd, voor het direct uit de atmosfeer halen van CO₂ (DAC) en voor de verguizing die nodig is voor versnelde verwerking. Om te voorkomen dat het opwekken van deze energie tot extra CO₂-emissies leidt, zou de benodigde energie hernieuwbaar moeten zijn. Hernieuwbare energie is echter schaars omdat er in een duurzaam energiesysteem veel concurrerende toepassingen zijn, zoals elektrificatie en productie van groene waterstof via elektrolyse. Ook neemt de opwek van hernieuwbare energie (bijv. via wind op zee) veel ruimte in en vormt de hoge energieprijs op zichzelf ook een knelpunt.

Ruimtegebruik

Naast de ruimte voor opwek van hernieuwbare energie doen veel technologieën ook op andere manieren een beroep op de beschikbare **ruimte**. Dit geldt met name voor de productie van bos en van biomassa voor de technieken die dat als grondstof gebruiken. Voor versnelde verwerking en mariene opslag is het ruimtegebruik in principe geen belemmering. Bij opslag in de bodem gaan we ervan uit dat er geen extra ruimte nodig is omdat

³² In Nederland is het wel mogelijk om SDE++-subsidie te ontvangen voor CCS bij een biomassaverbrandings-installatie, maar dat is niet specifiek omdat er negatieve emissies worden gerealiseerd. Er wordt bij de SDE++-subsidie simpelweg geen onderscheid gemaakt tussen biogene en fossiele CO₂.

van bestaande landbouwgrond gebruik wordt gemaakt. De mate waarin ruimte een belemmerende factor is voor een technologie hangt uiteraard af van de locatie. In Nederland is ruimte over het algemeen schaarser dan op Europese schaal.

Concurrerende vraag naar biomassa, CO₂ en opslag

Duurzame biomassa en uit de atmosfeer verkregen CO₂ zijn in een duurzaam energie-systeem een schaars goed, wat leidt tot **concurrentie tussen negatieve emissies en andere toepassingen**, bijvoorbeeld het produceren van duurzame brandstoffen en van biomaterialen. De mate waarin de toekenning van duurzame grondstoffen aan de verschillende toepassingen wordt gereguleerd of aan de markt wordt overgelaten, en welke prioriteit negatieve emissies dan krijgen, is een complexe afweging waar uiteindelijk de politiek een keuze in moet maken. Hier gaan we in de volgende paragraaf verder op in.

In de context van negatieve emissies speelt er ook een concurrentievraagstuk tussen **CCS waarbij negatieve emissies worden gerealiseerd en CCS met fossiele CO₂** afkomstig van de industrie, waarbij emissies alleen worden gereduceerd. Ook al is de totale theoretische capaciteit voor geologische opslag groot, op korte termijn is er het risico dat de velden die het eerst worden ontwikkeld voor CO₂-opslag zullen worden gebruikt voor fossiele CO₂, omdat plannen daarvoor al in een vergevorderd stadium zitten. Voor de opslag van biogene of uit de atmosfeer verkregen CO₂, waarmee negatieve emissies gerealiseerd zouden worden, zijn in dat geval pas op langere termijn geschikte locaties beschikbaar.

Neveneffecten

Het verschilt sterk per technologie welke **neveneffecten** er kunnen optreden. Voor alle technologieën die gebruikmaken van biomassa bestaan er risico's gerelateerd aan het landgebruik dat daarvoor nodig is. Wanneer biomassa geproduceerd wordt op landbouwgrond kan dit negatieve gevolgen hebben voor de voedselproductie. Wanneer biomassa-productie gevarieerd bos of andere natuur vervangt is er het risico dat door het gebruik van monoculturen de biodiversiteit onder druk komt te staan.

Voor alle technieken met een hoog energieverbruik geldt dat de extra benodigde opwek van hernieuwbare energie verschillende negatieve effecten kan hebben. Bij zon op land zijn er mogelijke effecten vanwege het veranderde landgebruik. Bij wind op zee gaat het om bijv. risico's voor de biodiversiteit en beperkingen voor de scheepvaart.

Daarnaast bestaan er bij bepaalde technologieën risico's op schadelijke emissies naar het milieu. Bij het gebruik van biochar kunnen, afhankelijk van de bron, zware metalen of organische microverontreinigingen vrijkomen, wat de biochar ongeschikt maakt als bodemverbeteraar. Voor versnelde verwerking moeten silicaten gemijnd worden, wat een lokale milieu-impact kan hebben. Ook de aanleg van infrastructuur kan emissies naar het milieu veroorzaken, bijvoorbeeld stikstofemissies bij de aanleg van CO₂-leidingen voor CCS, maar deze emissies zijn tijdelijk.

Voor mariene opslag geldt dat de directe risico's voor de lokale biodiversiteit en voor de mariene ecosystemen hoog zijn, zeker bij kunstmatige alkalinisatie.

Sommige technologieën kennen overigens ook *positieve* neveneffecten, zoals een hogere gewasopbrengst bij opslag in de bodem en (mogelijk) bij biochar. Omdat we hier naar knelpunten en belemmeringen kijken gaan we op deze positieve neveneffecten niet dieper in.

6.4 Oplossingsrichtingen

Tabel 32 en de toelichting hierboven geven een globaal overzicht van de typen knelpunten die er spelen en voor welke technologieën deze relevant zijn. De volgende vraag is hoe fundamenteel de knelpunten zijn en in welke mate ze, althans in theorie, kunnen worden opgelost.

Om daar iets over te kunnen zeggen analyseren we om te beginnen de genoemde typen knelpunten aan de hand van de mogelijke oplossingsrichting. We maken daarbij onderscheid tussen drie globale oplossingsrichtingen:

1. Het knelpunt is tot op zekere hoogte inherent aan de technologie en kan hoogstens gemitigeerd worden met behulp van beleid.
2. Het knelpunt is in principe via beleid op te lossen.
3. De kern van het knelpunt is dat verschillende beleidsdoelen botsen of niet tegelijkertijd zijn te realiseren. Bij deze categorie bestaat de ‘oplossing’ dus noodzakelijkerwijs altijd uit een afweging, waarbij het wegnemen van een knelpunt op de ene plek elders weer andere knelpunten teweegbrengt. We beschrijven de dilemma’s en *trade-offs* die daardoor ontstaan en beschouwen de vraag hoe hier in de Nederlandse situatie het best mee omgegaan kan worden.

Hieronder bespreken we welke oplossingsrichtingen bij welke knelpunten het meest voor de hand liggen. De eerste twee oplossingsrichtingen worden direct hieronder behandeld, de derde in een afzonderlijke paragraaf. In het volgende hoofdstuk gaan we vervolgens dieper in op de beleidsimplicaties van alle typen knelpunten.

Knelpunten inherent aan de technologieën

Een aantal knelpunten die we hierboven hebben geïdentificeerd is min of meer kenmerkend voor de betreffende technologie en kan daarom niet gemakkelijk worden weggenomen. Dit geldt zeker voor het ruimtegebruik en het energiegebruik. Ook de duur van de opslag (permanent of langdurig) en het gemak waarmee deze kan worden gemonitord zijn tot op grote hoogte inherent aan de technologie. De ‘oplossing’ van deze knelpunten bestaat er daarom met name uit om ze te accepteren en er zoveel mogelijk omheen te werken. Technieken met een groot ruimtegebruik kunnen bijvoorbeeld het best worden toegepast in gebieden waar veel ruimte beschikbaar is. Nederland heeft niet veel ruimte op land beschikbaar voor biomassaproductie, maar wel relatief veel ruimte op zee voor de opwek van hernieuwbare elektriciteit. Ook kan er worden gekozen voor import van bijvoorbeeld biomassa. Beleid kan dus wel een rol spelen, maar meer om de impact van deze knelpunten zoveel mogelijk lokaal te beperken, in plaats van ze weg te nemen (elders neemt de biomassaproductie immers nog steeds veel ruimte in).

De mate waarin een technologie is doorontwikkeld is voor een groot deel met beleid te beïnvloeden (en valt dus onder de 2de oplossingsrichting), maar ook hier zijn er inherente beperkingen. Niet elke conceptueel denkbare technologie kan in de praktijk kostenefficiënt worden gerealiseerd, zelfs niet met grote R&D-investeringen. Het is bijvoorbeeld denkbaar dat het pas over 50 jaar (of zelfs nooit) lukt om DAC op grote schaal van de grond te krijgen, of om mariene opslag zodanig te realiseren dat het voldoende controleerbaar is en de risico’s voor ecosystemen te overzien zijn.

Knelpunten die met beleid oplosbaar zijn

Het ontbreken van regulering van negatieve emissies, waardoor er geen economische of financiële prikkel is om negatieve emissies te realiseren, is op dit moment een van de belangrijkste knelpunten. Als enige staat dit knelpunt in Tabel 32 bij alle technologieën genoemd. Tegelijkertijd heeft dit knelpunt als voordeel dat het in principe via beleid op te lossen is. Dat zou bijvoorbeeld kunnen door een markt te creëren voor certificaten voor negatieve emissies of om negatieve emissies te integreren in het Europese emissiehandelsstelsel (ETS). Het goed ontwerpen van de economisch-financiële prikkel is geen makkelijke opgave en zou bij voorkeur op Europees niveau moeten gebeuren, maar uiteindelijk is het een beleidsvraagstuk. We gaan hier dan ook in het volgende hoofdstuk dieper op in.

Zoals al genoemd is ook het TRL-niveau van negatieve-emissietechnologieën deels met beleid te beïnvloeden. Er kunnen gericht R&D-fondsen worden vrijgemaakt om bepaalde (deel)technologieën verder te ontwikkelen en er kunnen internationale onderzoeksprogramma's worden opgezet om de beschikbare expertise bij elkaar te brengen. Ook kan erop ingezet worden om via technologisch onderzoek specifieke knelpunten voor negatieve emissies, zoals het energiegebruik, te mitigeren of om hele nieuwe technologieën te ontwikkelen die nu nog niet bekend zijn.

6.5 Dilemma's en *trade-offs*

Omdat er op dit moment nog nauwelijks beleid bestaat voor negatieve emissies, is nog niet eerder goed in kaart gebracht op welke manieren de (beleids)doelen voor negatieve emissies zich verhouden tot andere doelstellingen op het gebied van klimaat, energie, voedselvoorziening en biodiversiteit, en tot welke afwegingen, dilemma's en *trade-offs* dit leidt. Dit uit zich vooral in de laatste twee knelpunten in de tabel: concurrentie om biomassa, CO₂ en geologische opslag, en neveneffecten.

Duurzame koolstof als bouwsteen voor een nieuwe economie

Zoals in de Beleidscontext genoemd is dient volgens de prioriteitstelling van de Europese Commissie in de mededeling over duurzame koolstofcycli eerst ingezet te worden op het verminderen van de afhankelijkheid van fossiele koolstof, vervolgens op circulariteit (hergebruik van duurzame koolstof) en pas als *last resort* op negatieve emissies (European Commission, 2021). Dat betekent dat de productie van brandstoffen en materialen uit (onder andere) duurzame biomassa en duurzame CO₂, die nodig zijn voor de vervanging van fossiele brandstoffen en materialen, voorrang heeft op het permanent opslaan van die biomassa en CO₂.

Ondertussen zal de vraag naar duurzame biomassa en duurzame CO₂ voor economische toepassingen de komende decennia sterk toenemen. In feite wordt 'duurzame koolstof', dat in een klimaatneutrale en circulaire economie de basis is van bijna alle producten (schone brandstoffen, biobased plastics, houtbouw, etc.) een schaarse en daarmee kostbare grondstof. Het is daarom de vraag of het permanent opslaan van CO₂ uit biomassa of uit de atmosfeer, om daarmee negatieve emissies te realiseren, een aantrekkelijke economische activiteit wordt, zeker als dit aan de markt wordt overgelaten. Wel komt er bij het opwerken van biomassa tot hoogwaardige producten zoals brandstoffen en materialen veel CO₂ vrij, die opgeslagen zou kunnen worden en zo kan bijdragen aan negatieve emissies.

Er kunnen wel enkele nuances geplaatst worden bij de hierboven genoemde prioriteitsladder. In de eerste plaats spreekt de Commissie over het minder afhankelijk worden van koolstof als eerste sport op die ladder. Dat kan via het vervangen van fossiele processen door niet-fossiele, door efficiëntieverbeteringen, door in te zetten op circulariteit en door vraagvermindering. De keuzes die hierin gemaakt worden bepalen echter sterk de uitkomst van de prioriteitsladder. Als er alleen maar ingezet zou worden op het 1-op-1 vervangen van fossiele brandstoffen en materialen door duurzame varianten, zou dit een enorme vraag naar duurzame koolstof met zich mee brengen, waardoor er veel minder beschikbaar is voor negatieve emissies. Als er naast verduurzaming van brandstoffen en producten ook aandacht is voor emissiereductie door vraagvermindering, kan duurzame koolstof eerder worden ingezet voor negatieve emissies.

Daarnaast kan er, in plaats van het zoveel mogelijk reduceren van de emissies voordat er naar negatieve emissies gekeken wordt, toch voor gekozen worden om sommige rest-emissies, die zeer moeilijk te voorkomen zijn, te compenseren met extra negatieve emissies. Bijvoorbeeld als het reduceren van deze restemissies veel tijd in beslag zou nemen, maatschappelijke schade op zou leveren of per ton CO₂ veel duurder is dan het realiseren van het corresponderende volume aan negatieve emissies. Deze optie zou echter geen rechtvaardiging moeten vormen om emissies die wel tegen aanvaardbare (maatschappelijke) kosten voorkomen kunnen worden alsnog in stand te houden. In feite is het bepalen van wat aanvaardbare restemissies zijn uiteindelijk een politieke afweging (zie ook het volgende hoofdstuk). Tot slot zijn negatieve emissies niet alleen nodig om restemissies te compenseren, maar ook de overshoot (zie Hoofdstuk 2). Die opgave is potentieel heel groot, en het toezeggen van *extra* negatieve emissies is daarom niet zonder risico.

Een andere nuance heeft betrekking op de geografische verdeling van de verschillende elementen die een rol spelen bij negatieve emissies, zoals biomassa, geschikte locaties voor de opwek van hernieuwbare energie en geschikte ondergrondse opslag. Deze zaken zijn meestal niet allemaal op dezelfde plek aanwezig, en dat kan leiden tot een andere afweging dan het strikt volgen van de prioriteitsladder van de Commissie.

Een reden om toch voor negatieve emissies te kiezen kan bijvoorbeeld zijn dat de benodigde grondstof lokaal al aanwezig is. Zo bestaat de technologie van opslag in de bodem erin om met behulp van specifieke landbouwbeheersmaatregelen de al aanwezige biomassa beter door de bodem te laten opnemen, zodat netto-CO₂-opslag ontstaat. Het ligt niet voor de hand om op grond van de prioriteitsladder deze biomassa af te voeren om er elders biobrandstoffen van te maken, zeker niet gezien de lokale positieve neveneffecten zoals een hogere biodiversiteit en een vergrote infiltratiecapaciteit van de bodem.

Het kan ook gebeuren dat de verschillende toepassingen van de prioriteitsladder deels parallel op verschillende locaties plaatsvinden. Nederland heeft de beschikking over een relatief grote capaciteit aan geologische opslag vanwege de lege gasvelden onder de Noordzee, maar betrekkelijk weinig ruimte om biomassa te produceren. Een uitkomst zou bijvoorbeeld kunnen zijn dat alle Nederlandse biomassa aangewend wordt voor biobrandstoffen en biomaterialen, maar dat in Nederlandse gasvelden CO₂ wordt opgeslagen dat aangevoerd wordt vanuit andere locaties in Europa, waar wel biomassa beschikbaar is voor negatieve emissies. Zo'n uitkomst is dan het resultaat van bijvoorbeeld de verdeling van productielocaties voor biobrandstoffen en van lokale stimuleringsregelingen.

Tot slot speelt de doorlooptijd voor het realiseren van negatieve emissies een rol. Ook als de nadruk ligt op het reduceren van emissies dient er al nagedacht te worden over welke technologieën voor negatieve emissies waar gaan worden toegepast, en in welke volumes. Voor de ontwikkeling van lege gasvelden, het aanleggen van infrastructuur, maar ook het verkrijgen van de juiste vergunningen voor CCS is bijvoorbeeld veel tijd nodig³³. Voor technologieën die nog minder ver ontwikkeld zijn geldt dit nog sterker. De prioriteitsladder betekent dus niet dat er pas met het plannen van negatieve-emissiecapaciteiten kan worden begonnen op het moment dat alle denkbare reductiemaatregelen zijn uitgevoerd: dit dient al veel eerder te gebeuren om op tijd negatieve emissies te kunnen realiseren.

Concurrentie om beschikbare opslaglocaties

In Nederland vindt nog geen CCS plaats op grote schaal, maar er zijn wel vergevorderde plannen in die richting, zoals Porthos en Aramis (zie Hoofdstuk 4). Het betreft hier alleen CCS voor afvang en opslag van CO₂ dat bij fossiele industriële processen is vrijgekomen, en dus geen negatieve emissies.

Het kabinet ziet CCS primair als tijdelijke maatregel voor de industrie om aan de reductiedoelstellingen voor 2030 te voldoen, omdat het voor veel bedrijven op die termijn niet mogelijk wordt geacht om het productieproces volledig te verduurzamen. Vanwege de bestaande CCS-projecten en de druk om de reductiedoelen voor 2030 te halen is het niet waarschijnlijk dat er voor 2030 veel geologische opslagcapaciteit beschikbaar komt voor negatieve emissies, behoudens mogelijk die van biogene afvalstromen van AVI's. Gezien de voorziene tijdspaden voor negatieve emissies is dit in principe geen probleem: negatieve emissies zijn vooral van belang om klimaatneutraliteit in 2050 te realiseren, en de CO₂-concentratie na 2050 te stabiliseren of zelfs te doen afnemen. Bovendien is het reduceren van emissies tot aan 2050 een belangrijk instrument om het totale benodigde volumes aan negatieve emissies te beperken (zie Hoofdstuk 5) en geldt volgens de prioriteitsladder, zoals hierboven beschreven, dat emissiereductie in principe voorrang heeft op negatieve emissies.

In de periode 2030-2050 ontstaat wel een risico als CCS gebruikt blijft worden om de fossiele emissies van de industrie te reduceren, tenminste als er naar de opslagcapaciteit onder het Nederlandse deel van de Noordzee wordt gekeken. Omdat de geologische opslagcapaciteit geleidelijk beschikbaar komt, en elk leeg gasveld eerst gereedgemaakt moet worden om als opslag te kunnen gaan dienen (zie Paragraaf 4.3), is bij elk nieuw gasveld dat beschikbaar komt de vraag of dit voor de opslag voor fossiele CO₂ of voor negatieve emissies gebruikt gaat worden. Bovendien komen verreweg de meeste gasvelden vrij in de periode tot en met 2030, daarna gebeurt dit sporadisch (zie ook figuur 4.5 in (EBN, 2018)). De SDE++-subsidie voor CCS kent een tijdslimiet (2035, met een looptijd van 15 jaar), maar er bestaat op dit moment geen verplichting voor de industrie om het productieproces zelf te verduurzamen: sommige industriële sectoren zouden er dus voor kunnen kiezen om zonder subsidie CCS toe te blijven passen, in plaats van de emissies zelf te reduceren. Als hier geen nadere beleidskeuze in gemaakt wordt kan de vraag naar CCS-met-fossiel de vraag naar opslag voor negatieve emissies verdringen richting 2050, of zelfs daarna.

Als er wordt uitgezoomd naar het internationale niveau is het beeld wat anders maar tegelijkertijd lastig om voorspellingen over te doen. Op grotere schaal is de totale

³³ Voor het realiseren van CCS in lege gasvelden onder de Noordzee geldt in de SDE++ een doorlooptijd van 6 jaar (CE Delft, 2022b). Hier is de huidige stikstofproblematiek niet in meegenomen.

capaciteit aan geologische opslag waarschijnlijk niet snel limiterend, omdat er bijvoorbeeld in Britse en Noorse wateren potentieel grote volumes beschikbaar zijn. Aan de andere kant geldt ook daar dat zonder gericht beleid het niet zeker is of en wanneer deze capaciteit beschikbaar komt voor (Nederlandse) negatieve emissies, en dat andere internationale stromen van CO₂ het beeld nog complexer maken. Niet alleen Nederland zal dan immers een beroep willen doen op de aanwezige capaciteit, zowel voor opslag van fossiele CO₂ als voor negatieve emissies, omdat veel Europese landen over nog veel minder geologische opslagcapaciteit beschikken dan Nederland zelf (CO2GeoNet, 2021).

Negatieve neveneffecten

De belangrijkste negatieve neveneffecten van de verschillende technologieën zijn hierboven bij de beschrijving van de knelpunten al kort genoemd. We kijken hier vooral naar neven-effecten vanuit de benadering van beleidsdilemma's: welke beleidsdoelen concurreren met elkaar en welke afwegingen en *trade-offs* moeten er worden gemaakt.

De beleidsafwegingen die te maken hebben met het gebruik van biomassa als grondstof zijn onderdeel van een discussie die veel breder speelt dan alleen in verband met negatieve emissies. Aan de ene kant is er de grote (toekomstige) vraag naar duurzame biomassa voor de productie van duurzame energie, brandstoffen en materialen, en aan de andere kant het belang van het behoud en herstel van biodiversiteit en het grote ruimtegebruik van biomassa-productie, waardoor andere typen landgebruik mogelijk in de knel komen. Ook kost het transport van biomassa veel energie en groeit geoogste biomassa maar langzaam weer aan (dit wordt vaak 'carbon debt' genoemd).

Het beleidsdilemma komt hierbij in feite neer op de vraag welke biomassa als duurzaam mag gelden en daarmee voor bovenstaande toepassingen gebruikt mag worden. Op Europees niveau is daarvoor de Renewable Energy Directive (RED) leidend. In het voorstel tot herziening daarvan als onderdeel van het Fit for 55-pakket (RED III) wordt onder andere voorgesteld om de criteria voor duurzame biomassa aan te scherpen en het gebruik van het cascaderingsprincipe verplicht te stellen (EC, 2021a).

De schattingen over de beschikbaarheid van duurzame biomassa – en de daaruit volgende conclusies over de schaarste daarvan – lopen in verschillende rapporten sterk uiteen, onder andere afhankelijk van de benadering die wordt gevolgd. Onderzoeken die de kansen voor biomassa en de mogelijkheden om de productie ervan te vergroten benadrukken, komen typisch tot veel hogere inschattingen voor biomassa-beschikbaarheid dan studies die de nadruk leggen op de risico's voor ecologie en duurzaamheid (CE Delft & HaskoningDHV, R., 2020).

De overige neveneffecten hebben met name te maken met lokale effecten op het milieu, ecosystemen en de biodiversiteit. Zo tast mijnbouw (nodig voor versnelde verwerking) het landschap aan en kan het schadelijk zijn voor lokale ecosystemen. Bij het gebruik van biochar kunnen schadelijke stoffen vrijkomen als deze aanwezig waren in de grondstof, zoals rioolslib. Alkalisatie van de oceanen heeft mogelijk (sterk) negatieve effecten op ecosystemen en de mariene biodiversiteit. In al deze gevallen moet eerst worden gekeken of het milieu-effect voorkomen of gemitigeerd kan worden, en zo niet of het belang van negatieve emissies opweegt tegen de mogelijke (lokale) neveneffecten. Indien mogelijk dienen vervolgens de technologieën met de minste neveneffecten op milieu en biodiversiteit geprioriteerd te worden ten opzichte van technologieën waarbij de effecten groter dan wel onzekerder zijn, zoals alkalisatie.

7 Beleidsimplicaties

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk bekijken we op welke aspecten van negatieve emissies beleidsvorming nodig is, en welke beleidsopties er daarbij mogelijk zijn. Veel van de thema's die we in dit hoofdstuk behandelen zijn eerder in dit rapport al aan de orde geweest, zoals de definities van belangrijke termen (Hoofdstuk 1) en de kwestie rond de beschikbaarheid van biomassa (Hoofdstuk 3 en 6). In dit hoofdstuk ligt de nadruk echter op de beleidsimplicaties van deze discussies. We presenteren concrete beleidsaanbevelingen, waarbij we ook ingaan op het gewenste niveau waarop beleid nodig is: nationaal, Europees of zelfs mondiaal.

Eerst geven we een kort overzicht van het bestaande en aangekondigde beleid dat raakvlakken heeft met negatieve emissies. Er is nog weinig beleid van kracht dat negatieve emissies rechtstreeks reguleert maar er zijn wel aanzetten gedaan, zoals in de LULUCF-verordening en met het recente voorstel van de Europese Commissie voor een certificeringsraamwerk.

Vervolgens bespreken we de beleidsimplicaties van verschillende aspecten van negatieve emissies die in dit rapport naar voren zijn gekomen. We beginnen met de definities van een aantal belangrijke termen in relatie tot negatieve emissies, want ook die zijn uiteindelijk een kwestie van een beleidsmatige keuze. Daarna gaan we dieper in op de beleidsdilemma's uit het vorige hoofdstuk, omdat daar eerst keuzes in gemaakt moeten worden voor er concreet beleid kan worden ontwikkeld. Vervolgens behandelen we de beleidsopties voor de verschillende aspecten van regulering van negatieve emissies zelf en die van de verdere technologische ontwikkeling en innovatie. We besluiten met een samenvatting van de beleidsaanbevelingen.

7.2 Definiëren van negatieve emissies

In Hoofdstuk 1 is al kort besproken dat de definitie van de term negatieve emissies zelf op dit moment niet vastligt en dat verschillende bronnen verschillende definities hanteren. Voor de ontwikkeling van een beleidskader is het echter noodzakelijk om over een eenduidige definitie te beschikken, die niet voor meerdere interpretaties vatbaar is. Als er binnen het beleidskader aan negatieve emissies een waarde gaat worden toegekend moet het immers helder zijn wat deze waarde is en hoe de berekening ervan tot stand komt. Daarnaast is het belangrijk dat de milieu-integriteit van de definitie op orde is: activiteiten die het label negatieve emissies toegewezen krijgen moeten daadwerkelijk bijdragen aan het verwijderen en opslaan van atmosferische CO₂, en hierin niet minder doen dan beloofd.

Een eenduidige definitie van negatieve emissies is echter niet gemakkelijk te geven. Op basis van de literatuur zijn er ten minste vier aspecten van de definitie van negatieve emissies die aandacht verdienen:

1. **De afbakening tussen natuurlijke en antropogene processen.** Koolstofopslag via natuurlijke processen zonder menselijke tussenkomst valt buiten het begrip negatieve emissies zoals bedoeld in dit onderzoek. Natuurlijke processen worden over het algemeen wel onder de definitie van negatieve emissies geschaard zolang er sprake is van 'menselijke versterking' van deze processen (Smith, S. M. & et al., 2023). Ook in de broeikasgasinventarisatie in landbouw, bosbouw en ander landgebruik (AFOLU) voor het IPCC kan expliciet onderscheid worden gemaakt tussen koolstofverwijdering door

natuurlijke processen en door menselijk ingrijpen. Dit onderscheid is echter niet altijd makkelijk te maken. Bijvoorbeeld bij bebossing en opslag in de bodem is het soms lastig te bepalen in hoeverre het echt om additionele opslag gaat. Ook is de opslag bij deze natuurlijke oplossingen meestal niet permanent. Sommige partijen zijn dan ook van mening dat negatieve emissies op basis van natuurlijke processen beleidsmatig niet hetzelfde behandeld moeten worden als technieken die gebruikmaken van bijvoorbeeld geologische opslag (CMW, 2022).

2. **De afbakening tussen emissiereductie en negatieve emissies.** Activiteiten die slechts emissiereductie bewerkstelligen of emissies vermijden dienen niet onder de definitie van negatieve emissies te vallen. Bij negatieve emissies gaat het immers om een fysieke onttrekking van CO₂ aan de atmosfeer, terwijl bij emissiereductie (c.q. vermeden emissies) alleen minder CO₂ naar de atmosfeer wordt uitgestoten ten opzichte van een eerdere of een *counterfactual* situatie. Ook hier geldt dat in sommige gevallen, zoals bosbeheer of houtbouw, dit onderscheid nog niet zo makkelijk te maken is. Zo kan beredeneerd worden dat de mate waarin het beheer van een perceel bos als negatieve emissies kan worden gezien, afhangt van het gehanteerde startpunt in de tijd (Tanzer, S. E. & Ramirez, A., 2019).
3. **De afbakening van het systeem dat wordt beschouwd.** Voor de bepaling van wanneer er sprake is van negatieve emissies is het essentieel om vast te leggen naar welke waardeketen er wordt gekeken en welke processen daarbij wel en niet worden meegenomen. In feite gaat het hier om het bepalen van de systeemgrenzen die worden beschouwd om vast te stellen of er sprake is van negatieve emissies. Voor elk van de elementen van dit systeem dienen de emissies of vastleggingen meegenomen te worden. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen directe systeeminvloeden, zoals het energiegebruik dat nodig is voor het afvang- en opslagproces, en indirecte systeeminvloeden, zoals de veranderende emissies van elektriciteitsproductie wanneer duurzame energieproductie wordt ingezet voor dat afvang- en opslagproces. In de beleidsdiscussies is soms ook sprake van nationaal perspectief (vanwege nationale klimaatdoelen, bijvoorbeeld), of een focus op een specifiek project dat een onderdeel is van een waardeketen.
4. **De tijdsduur van de opslag (permanent vs. langdurig).** Zoals we in het inleidende hoofdstuk hebben gezien nemen veel literatuurbronnen ook niet-permanente opslag mee in de behandeling van negatieve emissies of wordt er geen expliciete keuze gemaakt voor een tijdsduur. Toch laten Tanzer en Ramirez zien dat niet-permanente vastlegging van koolstof niet op een consistente wijze als negatieve emissies kan worden beschouwd. De werkelijke netto-emissies van of naar de atmosfeer van een koolstofketen kunnen alleen robuust bepaald worden door de volledige keten (*cradle-to-grave*) in ogenschouw te nemen. Als de koolstof niet-permanent is vastgelegd, komt deze op enig moment weer vrij, en dient ook dat proces in de berekening van de netto-negatieve emissies te worden meegenomen. Het consequent doorvoeren van de aanpak van Tanzer en Ramirez leidt op deze manier automatisch tot de conclusie dat alleen permanente vastlegging tot negatieve emissies kan leiden.

In plaats van een compacte definitie die al deze aspecten omvat kunnen negatieve emissies beleidsmatig beter worden afgebakend op basis van een aantal criteria, zoals de vier principes van Tanzer en Ramirez (zie Hoofdstuk 1). Deze principes worden ook gebruikt binnen het NEGEM-project, een internationaal Horizon2020-project waarin het potentieel van negatieve emissies en hun bijdrage aan het bereiken van klimaatneutraliteit wordt onderzocht. Het NEGEM-project gaat voor de definitie van 'permanent' uit van een periode van tenminste twee tot drie eeuwen (Stoefs, 2021). Tijdelijke opslag, zelfs als deze steeds opnieuw zou plaatsvinden, is altijd onzeker, omdat de handhaving en monitoring ervan aan toekomstige generaties wordt overgelaten, en klimaateffecten zoals toenemende bosbranden de opslag in gevaar kunnen brengen. Daarom dient tijdelijke opslag niet

gelijkwaardig aan permanente opslag te worden beschouwd, zelfs al draagt deze wel bij aan klimaatmitigatie.

Hoewel het potentieel voor eeuwenlange opslag bij natuurlijke processen beperkt is, sluit Stoefs (2021) deze niet bij voorbaat uit. Het vasthouden van de koolstof en de monitoring daarvan zijn bij natuurlijke oplossingen waarschijnlijk echter zeer complex en duur.

De positieve effecten van natuurlijke koolstofopslag, zoals een verbeterde bodemkwaliteit en meer biodiversiteit, zouden daarom het hoofddoel moeten zijn, en de opslag van koolstof slechts een positief neveneffect, in plaats van andersom.

Opslag in producten wordt in Stoefs (2021) uitgesloten van het label negatieve emissies, omdat de koolstof weer vrijkomt nadat het product uiteindelijk als afval of energiebron wordt weggegooid of verbrand, na afloop van de levensduur³⁴. Net als bij natuurlijke processen lijkt dit echter geen reden om dit type opslag verder links te laten liggen. Er zijn koppelkansen met de circulaire bio-economie die onder andere bij het 3de tijdpad in Hoofdstuk 5 zijn genoemd. Economische activiteiten zoals houtbouw hebben opslag van CO₂ niet als doel, maar wel als ‘bijvangst’. En juist bij het produceren van hoogwaardige biogene producten en brandstoffen komt via reststromen veel CO₂ vrij, die vervolgens permanent opgeslagen kan worden.

Beleidsadvies definitie negatieve emissies

Op basis van de klimaatdoelstellingen is er behoefte aan een groot aanbod van negatieve emissies. Van de door ons beschreven tijdpaden is alleen in het optimistische 2de tijdpad ruimte om slechts technieken te gebruiken die de afgevangen koolstof permanent opslaan (BECCS en DACCS). De andere tijdpaden, en veel andere bronnen in de literatuur, nemen ook opslag via natuurlijke processen en in materialen mee, ook al is die vaak niet permanent. Vanuit wetenschappelijke hoek klinkt echter kritiek op het beschouwen van niet-permanente opslag als negatieve emissies. Aan de andere kant zijn processen waarbij tijdelijke opslag plaatsvindt daarmee niet waardeloos voor klimaatmitigatie, en kunnen ze daarnaast positieve neveneffecten hebben.

We adviseren daarom om in de beleidsmatige afbakening van het begrip negatieve emissies uit te gaan van een driedeling:

1. ‘Echte’ negatieve emissies (*permanent carbon removals*) waarbij de opslag permanent is. Permanent kan hier nader worden ingevuld maar zou minimaal 100 jaar moeten beslaan (een termijn die in LCA-methodiek wordt gebruikt voor permanente opslag, zoals eerder opgemerkt in Paragraaf 1.3.1) en bij voorkeur 200-300 jaar.
2. Natuurlijke oplossingen (*enhanced natural solutions*) waarbij tijdelijke opslag plaatsvindt. Deze oplossingen hebben vaak positieve bijeffecten op het gebied van bodem- en waterkwaliteit, gewasopbrengst en/of biodiversiteit.
3. Langdurige opslag van koolstof uit de atmosfeer d.m.v. gebruik van duurzame koolstof in materialen (*sustainable carbon use in products*). Voorbeelden hiervan zijn houtbouw en bioplastics. Bij de productie van deze laatste materialen komt vaak CO₂ vrij, die vervolgens permanent kan worden opgeslagen, maar dat valt in de eerste categorie.

Deze driedeling komt redelijk goed overeen met de indeling die de Commissie hanteert in het voorstel voor een certificeringskader voor koolstofverwijdering (*permanent removal, carbon storage in products en carbon farming*). Het is belangrijk dat in de verdere regulering (zie hieronder) recht wordt gedaan aan de verschillen tussen deze typen koolstofopslag.

³⁴ De auteur doelt hier niet op producten die worden hergebruikt of gerecycled, of als de koolstof in het product na gebruik anderszins wordt vastgelegd, bijvoorbeeld d.m.v. mineralisatie.

Restemissies

Restemissies zijn in dit rapport gedefinieerd als de emissies die nog aanwezig zijn wanneer er klimaatneutraliteit wordt bereikt in Nederland (exclusief opgeslagen fossiele CO₂ en kortcyclische broeikasgassen). Er zijn onvermijdbare restemissies, zoals die van veel natuurlijke processen, en emissies die technisch wel te vermijden zijn, voornamelijk antropogene emissies. In de praktijk gaat het in de context van negatieve emissies vaak om die laatste categorie restemissies. Zo wordt in de recente Kamerbrief over het bereiken van klimaatneutraliteit gesteld dat restemissies die emissies zijn die technisch moeilijk of niet te reduceren zijn (Ministerie van EZK, 2023). In dit rapport hebben we, met dat uitgangspunt, op basis van verschillende scenario's ingeschat dat de restemissies voor Nederland tussen de 8,8 en 38,3 Mton CO₂eq. per jaar bedragen in 2050. Deze restemissies vinden plaats in met name de industrie en de landbouw, met in die laatste sector een grote bijdrage van de niet-CO₂-broeikasgassen methaan en lachgas.

Het is van belang om op te merken dat ook achter deze benadering wel een (impliciete) beleidskeuze zit. Een alternatief voor het accepteren van restemissies vanuit bepaalde sectoren is immers het verder inkrimpen van deze sectoren, of zelfs het uitfasen van bepaalde industrieën of bepaalde typen landbouw in Nederland. Er kunnen goede redenen zijn om dat niet te doen (en reductie van bijv. de veeteelt is vaak al meegenomen in de scenario's), maar het zou niet terecht zijn om de bepaling van wat restemissies zijn puur als een technische kwestie te beschouwen. Scenario's kunnen helpen bij de inschatting hoeveel krimp van een sector en welk effect van consumptievermindering reëel of haalbaar is, maar het is uiteindelijk een politieke keuze op welk niveau van restemissies er beleidsmatig gekoerst wordt.

Beleidsadvies restemissies

Voor een effectief beleid op negatieve emissies is het belangrijk om een inschatting te krijgen van de restemissies die in 2050 in Nederland overblijven. Het beleid voor negatieve emissies kan daar vervolgens op worden afgestemd. Deze inschatting dient niet alleen gebaseerd te zijn op autonome ontwikkelingen, maar ook op beleidskeuzes. Hoeveel ruimte is er nog voor veeteelt? Welk energie-, klimaat- en circulair industriebeleid wordt er gevoerd, en welke gevolgen heeft dit voor de industrie in Nederland, in 2050? Het klimaatbeleid is, zowel Europees als nationaal, nu nog sterk op 2030 gericht. De verwachting is dat de Commissie de komende jaren een raamwerk voor het Europese klimaatbeleid richting 2040 ontwikkelt (zie Paragraaf 1.2) en het Nederlandse kabinet in de zomer van 2024 een Klimaatplan t/m 2035 voorstelt.

Ons advies is om, mede op basis van deze documenten, beleidsmatige inschattingen te gaan maken van de restemissies voor de verschillende sectoren in Nederland in 2050. Deze inschattingen kunnen gepreciseerd worden naarmate het klimaatbeleid richting 2050 helderder wordt. Zo kan steeds beter bepaald worden hoeveel negatieve emissies gerealiseerd moeten worden om de restemissies te compenseren.

Daarnaast zijn er negatieve emissies nodig om de *overshoot* te compenseren. In Hoofdstuk 2 zijn twee veelgebruikte methodes benoemd om het Nederlandse aandeel in de mondiale *overshoot* te berekenen (per capita en op basis van aandeel in de huidige uitstoot). Het is waarschijnlijk niet haalbaar om mondiaal overeenstemming te bereiken over een verdeelsleutel. Het advies is daarom om nationaal of Europees te kiezen voor een methode om daarmee het totale benodigde volume aan negatieve emissies te bepalen.

7.3 Beleidsdilemma's en *trade-offs*: wat zijn de opties?

In het vorige hoofdstuk hebben we een aantal beleidsdilemma's geschetst gerelateerd aan negatieve emissies. We hebben ze dilemma's genoemd omdat er meerdere beleidsdoelen bij elkaar komen en conflicten en *trade-offs* niet te vermijden zijn. Mede op basis van de werksessies geven we hier een beleidsadvies over wat de meest verstandige weg lijkt om met deze dilemma's om te gaan.

Concurrentie om duurzame koolstof

Onder experts en beleidsmakers lijkt er consensus te zijn dat emissiereductie de hoogste prioriteit dient te hebben. De prioriteitsladder van de Commissie is hier ook mee in overeenstemming. Als de emissies hoog blijven zou er immers een zeer groot volume negatieve emissies nodig zijn om de emissies te compenseren, en zou dit bovendien neerkomen op dweilen met de kraan open: de broeikasgasconcentratie in de atmosfeer zou hoog blijven omdat de onttrekking van CO₂ aan de atmosfeer steeds weer wordt aangevuld met nieuwe emissies, en het behalen van de 1,5-graad-doelstelling zou uit het zicht raken. Daarnaast is het bij negatieve emissies nooit 100% zeker dat de CO₂ ook op de termijn van enkele eeuwen vastgelegd blijft, zelfs niet bij geologische opslag. Het compenseren van zekere emissies met inherent onzekere negatieve emissies is daarom risicovol.

In principe dienen hoogwaardige toepassingen van duurzame koolstof daarom voorrang te hebben op het permanent opslaan van koolstof. Deze toepassingen, zoals biomaterialen, biobrandstoffen en synthetische brandstoffen, dienen immers om fossiele producten te vervangen en zo fossiele emissies te vermijden. De gewenste cascadering van duurzame koolstof zou vastgelegd moeten worden om op basis daarvan beleidsmatig te kunnen sturen op de verschillende stromen. Prioritering van economische toepassingen hoeft overigens niet te betekenen dat er geen duurzame koolstof meer beschikbaar is om permanent op te slaan. Bij de productie van biogene materialen en brandstoffen komt veel CO₂ als reststroom vrij.

Concurrentie om beschikbare opslaglocaties

De capaciteit van lege gasvelden onder de Noordzee is op langere termijn (rond 2050) waarschijnlijk beperkend voor het binnenlandse potentieel van negatieve emissies, zeker als Nederland ook CO₂ uit andere Europese landen gaat importeren. Daarbij komen de meeste gasvelden beschikbaar voor 2030, en is het waarschijnlijk dat deze gebruikt gaan worden voor de opslag van fossiele CO₂, waarvoor al plannen klaarliggen, en niet voor negatieve emissies, waarvoor op dit moment nog nagenoeg geen beleid bestaat. Als we lege gasvelden in aangrenzende delen van de Noordzee, zoals de Britse en Noorse, ook in beschouwing nemen, neemt de capaciteit toe, aangezien in deze landen de verhouding tussen opslagcapaciteit en aanbod van (fossiele) CO₂ gunstiger is. In theorie kan de opslagcapaciteit sterk vergroot worden door ook zoutcavernes en aquifers te benutten (zowel in Nederland als internationaal), maar er is nu nog geen zicht op wanneer deze daadwerkelijk benutbaar zouden zijn (realistisch potentieel versus theoretisch potentieel). Dit zou via nader onderzoek beter in kaart kunnen worden gebracht.

Ook als de geologische opslagcapaciteit uiteindelijk groter blijkt dan nu wordt ingeschat, blijft CCS van fossiele CO₂ concurreren met negatieve emissies om de best bereikbare en daarmee meest kostenefficiënte locaties. Dit hoeft geen principieel probleem te zijn, maar zal zorgen voor hogere kosten en latere implementatie voor negatieve-emissieprojecten dan in een situatie waarin fossiele CCS wordt uitgefaseerd en er rond 2050 geen concurrentie

meer plaatsvindt. Fossiele CCS is voorlopig nodig om emissiereductie te realiseren in de industrie, maar wordt als een overgangmaatregel gezien. Het verduurzamen van de betreffende industriële processen is vaak mogelijk, maar (nog) duurder dan CCS (CE Delft, 2020). Een kwantitatieve analyse waarbij de extra kosten van snellere verduurzaming van industriële processen afgezet worden tegen de extra kosten voor negatieve emissies bij concurrentie om opslaglocaties was binnen de scope van deze studie niet mogelijk. Vanuit klimaatbeleid is er echter wat voor te zeggen om fossiele CCS richting 2050 zoveel mogelijk af te bouwen. Dit biedt de mogelijkheid om negatieve emissies zo snel mogelijk te kunnen opschalen. Bovendien is CCS van fossiele CO₂ geen emissiereductie zoals bedoeld in de prioriteitsladder, namelijk het minder afhankelijk worden van fossiele koolstof, en blijven door toepassing van fossiele CCS fossiele productieketens in stand, en daarmee ook fossiele emissies zoals methaanlekages (CE Delft, 2020).

Negatieve neveneffecten

De mogelijke neveneffecten van negatieve emissies zijn divers en sterk afhankelijk van de gebruikte technologie. Voor de technieken die gebaseerd zijn op biomassa is het van belang om negatieve emissies mee te gaan nemen in de kaders voor de duurzame toepassing van biomassa. Ook voor andere typen neveneffecten, zoals emissies van schadelijke stoffen naar het milieu of een verslechtering van de biodiversiteit, is het belangrijkste beleidsinstrument het afwegingskader, waarin a priori vastgelegd is hoe de verschillende belangen tegen elkaar dienen te worden afgewogen, en daarnaast nauwkeurige monitoring van de mogelijke neveneffecten.

Beleidsadvies dilemma's en *trade-offs*

Mede op basis van de input uit de werksessies, en de verschillende opties overwegende, adviseren we het volgende voor de besproken beleidsdilemma's:

1. Leg de prioriteitsladder die de Commissie voorstelt in de mededeling Duurzame koolstofcycli als wettelijk kader vast.
2. Doe nader onderzoek naar geologische opslaglocaties anders dan lege gasvelden, zoals zoutcavernes en aquifers.
3. Overweeg uitfasering van fossiele CCS richting 2050, bijvoorbeeld via een vergunningenstop voor nieuwe projecten, ten gunste van een snelle opschaling van negatieve emissies.
4. Neem negatieve emissies mee in het afwegingskader voor duurzame toepassing van biograndstoffen
5. Ontwikkel nieuwe afwegingskaders voor mogelijke negatieve neveneffecten van negatieve emissies, zoals schade aan milieu en biodiversiteit.

7.4 Regulering van negatieve emissies

Met regulering van negatieve emissies bedoelen we in de eerste plaats alle beleidsinstrumenten die bedoeld zijn om negatieve emissies op te schalen en te ontwikkelen als economische activiteit. Het gaat dan met name om de beleidsopties voor het creëren van een normerende en/of financiële prikkel – en daarmee uiteindelijk een markt – voor negatieve emissies. We maken onderscheid tussen beleidsmaatregelen die al op de korte termijn genomen kunnen worden (richting 2030) en maatregelen die met name voor de langere termijn (richting 2050 en daarna) relevant zijn.

Onder regulering vallen daarnaast de meer randvoorwaardelijke aspecten. We gaan hierbij in op accounting en het verschil tussen nationale en projectgebaseerde accounting. Daarnaast benoemen we nog kort de aspecten veiligheid en aansprakelijkheid.

Regulering op korte termijn

Op dit moment vinden negatieve emissies nog vrijwel niet plaats, met uitzondering van koolstofvastlegging in landgebruik. Er is in eerste instantie daarom vooral beleid nodig waarmee negatieve emissies van de grond komen en in omvang kunnen groeien.

Aanjagende rol van de overheid

In deze fase ligt het voor de hand dat de overheid een relatief grote rol heeft in de opschaling van negatieve emissies. De overheid kan het gebruik en de verdere ontwikkeling van de verschillende technologieën actief stimuleren en kan zo tegelijkertijd het overzicht houden over hoe de beschikbare middelen worden gealloceerd en welke leereffecten er optreden bij de verschillende technieken. Net als bij zon-pv en windenergie is gebeurd zou er subsidie beschikbaar kunnen worden gesteld voor de verdere opschaling van technologieën die in principe voldoende rijp zijn maar nog relatief duur. Zo kan bijvoorbeeld koolstofopslag in de bodem eventueel worden gestimuleerd met een subsidie³⁵.

In Nederland is de SDE++ al beschikbaar voor geologische opslag van biogene CO₂ uit AVI's. De SDE++ zou kunnen worden uitgebreid voor negatieve emissies door technieken met een hoge TRL toe te voegen (zie Hoofdstuk 3 voor een overzicht) of er kan van een ander subsidie-instrument gebruik worden gemaakt.

Gezien de hoge kosten van veel negatieve-emissietechnieken is het op de langere termijn niet reëel dat de overheid deze blijft dragen. Een ander nadeel van overheidssturing is dat de overheid geen eigenaar is van de lege gasvelden in de Noordzee en in principe dus niet zelf kan besluiten over de allocatie van deze gasvelden aan negatieve-emissieprojecten (dan wel aan fossiele CCS). De aanjagersrol van de overheid zou daarom tijdelijk moeten zijn. Parallel dient er gewerkt te worden aan de creatie van de juiste prikkels zodat het realiseren van negatieve emissies uiteindelijk een marktgebaseerde activiteit kan worden (zie 'Regulering voor langere termijn'), en ook de ondergrondse opslag van de duurzame CO₂ voldoende gefaciliteerd kan worden. Deze elementen vergen allemaal een verdere uitwerking, om een effectief beleidspakket samen te stellen is dan ook verder onderzoek nodig.

Ontwikkelen van een circulaire economie voor duurzame koolstof

Zoals we eerder in dit rapport hebben gezien hangen negatieve emissies nauw samen met de (toekomstige) circulaire economie. Daarin worden zoveel mogelijk materialen en brandstoffen geproduceerd op basis van duurzame koolstof (biogeen of eventueel direct aan de atmosfeer onttrokken). Bovendien worden de duurzame koolstofmoleculen zoveel mogelijk hergebruikt (o.a. door Carbon Capture and Usage-technieken, CCU). Hoewel het doel van een dergelijke duurzame koolstofeconomie is om de koolstof zo lang mogelijk in circulatie te houden (en dus niet om deze permanent op te slaan), levert dit model veel indirecte kansen voor negatieve emissies. Bij de productie van biogene materialen en brandstoffen komt CO₂ vrij als reststroom. Bovendien levert het verbranden van het afval dat nog geproduceerd wordt ook kansen voor negatieve emissies, omdat dit voor een groot deel biogeen van aard zal zijn.

Om een duurzame koolstofeconomie op gang te brengen kan de industrie verplicht worden om een toenemend aandeel biogene grondstoffen voor zijn productie te gebruiken. Bijvoorbeeld via een verplicht aandeel biobased kunststoffen op EU-niveau (analoog aan het

³⁵ Dit betreft echter wel tijdelijke opslag, dus hiermee kunnen restemissies niet gecompenseerd worden.

Koolstofopslag in de bodem heeft echter andere voordelen zoals een betere vruchtbaarheid en een betere biodiversiteit.

voorstel voor een verplicht aandeel recycalaat in kunststof producten, zoals voorgesteld in (CE Delft, 2021)³⁶.

De volumes CO₂ die op deze manier beschikbaar komt voor negatieve emissies hangen van een groot aantal factoren af, zoals de beschikbaarheid van duurzame biomassa, de snelheid waarmee de industrie overgaat op biologische grondstoffen en mate waarin de productie van synthetische brandstoffen en andere producten ook aanspraak gaat maken op de beschikbare duurzame CO₂.

Al deze factoren zijn niet alleen onzeker maar hangen bovendien ook nauw met elkaar samen. Via beleid kan gestuurd worden (bijv. op de eisen voor duurzame biomassa en voor het aandeel biobased grondstoffen in de industrie), maar tegelijk moeten de effecten van eventuele beleidsmaatregelen dan wel van tevoren in kaart kunnen worden gebracht. Modelleren van de verschillende duurzame grondstofstromen, hun onderlinge relaties en de effecten van verschillende beleidsopties op deze stromen zou helpen om dit kip-of-ei-probleem binnen de beleidsvorming te omzeilen.

Beleidsadvies regulering korte termijn

Richting 2030 is het belangrijk om negatieve emissies op gang te brengen. Ons advies is om:

1. Als overheid een aanjagende rol te spelen, door actief te sturen op de verschillende technologieën en subsidie beschikbaar te stellen voor opschaling van de technieken met een voldoende hoge TRL en een hoge concentratie biogene CO₂³⁷. Om te bepalen welke maatregelen voor welke techniek moeten worden ingezet, onder welke randvoorwaarden, is nader onderzoek nodig.
2. In EU-kader in te zetten op een snellere omschakeling naar een circulaire economie op basis van duurzame koolstof, bijvoorbeeld door een toenemend aandeel biobased in kunststoffen te verplichten.
3. Te investeren in de ontwikkeling van een model waarmee grondstoffenstromen, hun onderlinge wisselwerkingen en de effecten van beleidsinstrumenten helder in beeld worden gebracht.

Daarnaast is gericht innovatiebeleid nodig om negatieve-emissietechnieken met een lagere TRL verder te ontwikkelen. Zie Paragraaf 7.5.

Regulering voor de langere termijn

Zoals eerder opgemerkt is het realiseren van negatieve emissies op de langere termijn een cruciaal onderdeel van klimaatbeleid (zie bijv. de Europese Klimaatwet). Het is daarom nodig om, naast het kortetermijnbeleid ook effectieve langetermijnregulering te ontwikkelen die zorgt voor een structurele en grootschalige inzet van negatieve emissies. Het gaat dan in eerste instantie om beleid voor BECCS en andere vormen van koolstofverwijdering op basis van biogene koolstof in een circulaire economie. Wellicht zijn deze volumes echter niet voldoende zijn om in 2050 zowel voor restemissies als voor de overshoot te compenseren (zie Hoofdstuk 2). Dan zullen richting 2050 ook technieken die niet gebaseerd zijn op biogene koolstof, zoals DACCS en maritieme opslag, opgeschaald moeten worden.

Voor de lange termijn kan via de juiste normerende en financiële prikkels een markt voor permanente negatieve emissies worden gecreëerd. De ontwikkeling en besluitvorming hierover valt buiten deze studie, maar om een beeld te geven van de mogelijkheden om dit te doen (en mogelijke ongewenste effecten) bespreken we hier twee opties: 1) opname van

³⁶ Een nationale verplichting voor plasticproducenten om de toepassing van gerecycled plastic of biogebaseerd plastic te stimuleren is ook onderdeel van het pakket beleidsmaatregelen dat is aangekondigd in de Voorjaarsbesluitvorming Klimaat (Ministerie van EZK, 2023). Daarbij kan worden opgemerkt dat gerecycled plastic grotendeels van fossiele oorsprong is, en daarmee niet bijdraagt aan negatieve emissies.

Bioplastics kunnen dat wel, als zij zorgen voor langdurige opslag. Zie de discussie in Hoofdstuk 3.

³⁷ Mogelijke voorbeelden hiervan zijn ondersteuning van CCS bij AVIs en biobrandstofproducenten.

negatieve emissies in het ETS en 2) normering in combinatie met certificering. Daarna gaan we kort in op regulering van tijdelijke koolstofvastlegging.

Integratie in het ETS

Het Europese emissiehandelssysteem (ETS) is recent herzien. Op basis van de aangescherpte lineaire reductiefactor van het emissieplafond zullen er rond 2040 geen nieuwe ETS-rechten meer uitgegeven worden, terwijl het aannemelijk is dat er dan nog aanzienlijke rest-emissies bestaan binnen de industrie. Het zou relatief eenvoudig zijn om negatieve emissies in het bestaande ETS te integreren. Het realiseren van negatieve emissies zou dan als compensatie kunnen gaan werken voor deze restemissies, en het ETS zou een netto-nul-doelstelling kunnen krijgen.

Op dit moment is er nog geen concreet regelgevend kader om het vastleggen van koolstof onder het ETS. In de recente aanscherping van het ETS is wel een bepaling opgenomen dat de Commissie halverwege 2026 haar visie geeft (en eventueel een voorstel doet) over hoe negatieve emissies onderdeel zouden kunnen worden van het ETS, en onder welke voorwaarden. Tot die tijd zullen er geen wijzigingen plaatsvinden in het ETS, maar Nederland kan zijn visie op de rol van negatieve emissies binnen het ETS de komende jaren al ontwikkelen om goed voorbereid te zijn als de discussie hierover van start gaat.

Als negatieve emissies in het ETS worden geïntegreerd ontstaat hiermee een systeem waarbij emissiereductie en negatieve emissies binnen hetzelfde instrument worden gereguleerd. Dit creëert het risico dat emissiereductie minder prioriteit krijgt, omdat het realiseren van negatieve emissies een goedkoper alternatief wordt. Het NEGEM-onderzoek laat zien dat een ton gereduceerde CO₂-emissie om meerdere redenen niet gelijkwaardig beschouwd moet worden aan een ton verwijderde en opgeslagen CO₂, en dat daarom de *accounting* van emissiereductie en negatieve emissies strikt gescheiden zou moeten blijven (Stoefs, 2021). Een alternatief zou zijn om niet te werken met equivalentie tussen emissiereductie en negatieve emissies. Met 1 ton aan gerealiseerde opslag van CO₂ zou dan bijvoorbeeld slechts 0,5 ton CO₂ kunnen worden uitgestoten, zodat er een prikkel voor emissiereductie blijft bestaan en er een veilige marge is om te garanderen dat het netto-effect op de CO₂-concentratie in de atmosfeer niet positief is. Andere opties zijn om een maximum (of strenge randvoorwaarden) te stellen aan het aandeel van de emissies dat d.m.v. negatieve emissies gecompenseerd kan worden, of negatieve emissies onder te brengen in een apart maar gekoppeld systeem, parallel aan dat voor CO₂-emissies. Identificeren van mogelijke opties om negatieve emissies te integreren in het ETS vergt nader onderzoek inclusief een gedegen impactanalyse.

Normeren en certificeren

Het is ook mogelijk om los van het ETS een markt te creëren voor negatieve emissies. Hiervoor zijn twee elementen nodig: een systeem van (verhandelbare) certificaten en een norm of verplichting waardoor een stabiele vraag naar negatieve emissies ontstaat. Als deze vraag voldoende in omvang is en op de lange termijn blijft bestaan, zullen de certificaten een waarde krijgen en ontstaat er een verdienenmodel om projecten voor negatieve emissies te gaan realiseren. We geven in het volgende een voorbeeld van hoe dat eventueel zou kunnen worden vormgegeven.

De verplichting om negatieve emissies te realiseren zou ergens in de keten van CO₂-intensieve producten gelegd kunnen worden. Supermarkten kunnen bijvoorbeeld verplicht worden om een bepaald aantal certificaten voor negatieve emissies in te leveren bij de verkoop van vlees of zuivel. De partijen die daadwerkelijke negatieve emissies realiseren kunnen hier certificaten voor krijgen, de supermarkten kunnen deze certificaten dan

aanschaffen op de markt. De kosten kunnen aan de klant worden doorberekend. Veel aspecten van dit systeem zouden nog wel nader uitgewerkt moeten worden, zoals de vraag voor welke producten de verplichting zou gelden en de vraag hoeveel certificaten er per product ingeleverd moeten worden. Om ingewikkelde discussies over dat laatste te voorkomen kan er ook gekozen worden om de directe relatie met de CO₂-inhoud van het product los te laten en te kiezen voor een vast aantal certificaten per volume-eenheid van een product, vergelijkbaar met een accijns.

Voor de certificering kan aangesloten worden bij het Commissievoorstel voor een certificeringskader (zie tekstbox in Paragraaf 1.2). Er zijn wel enkele aandachtspunten bij dit voorstel. Deelname aan een certificeringsmechanisme zou volgens dit voorstel op vrijwillige basis moeten zijn. Ontwikkeling van een stabiele markt voor deze certificaten (en daarmee voor negatieve emissies) vergt in dat geval aanvullend beleid. Daarnaast gaat het voorstel uit van private en publieke initiatieven voor certificeringsmechanismen, die door de Commissie worden getoetst, maar niet van een centraal certificeringsorgaan op Europees niveau. Het is mogelijk dat die laatste optie beter zou passen bij de wens om een stabiele Europese markt voor negatieve emissies te creëren (bijv. om het perspectief van de gehele keten te waarborgen). Tot slot omvat het certificeringsraamwerk zowel permanente opslag als natuurlijke opslag (*carbon farming*) en opslag in materialen. Het is belangrijk dat de uitwerking van de regels omtrent de vastleggingsduur en monitoring van de laatste twee opties recht doet aan de wezenlijke verschillen met permanente opslag. Daar gaan we hieronder verder op in.

Regulering voor tijdelijke opslag

Uit de discussie over de afbakening van negatieve emissies hebben we geconcludeerd dat in de regulering onderscheid gemaakt moet worden tussen permanente opslag en tijdelijke vastlegging via natuurlijke processen en in materialen. Alleen permanente opslag biedt de garantie dat de klimaateffecten van restemissies worden tegengegaan, en de overshoot in broeikasgasemissies wordt teruggebracht. Vanuit deze redenering kan worden overwogen om bij een aanpak op basis van normering of integratie van negatieve emissies in het ETS alleen permanente opslag toe te staan.

Dit wil niet zeggen dat tijdelijke opslag niet via beleidsinstrumenten kan worden beloond: tijdelijke opslag heeft ook een (tijdelijk) effect op de CO₂-emissies en er kunnen positieve neveneffecten optreden. Dit belonen kan bijvoorbeeld door een parallel systeem van certificaten voor tijdelijke opslag, waarbij er geen equivalentie is met restemissies die gecompenseerd worden. Maar er zijn ook veel andere beleidsinstrumenten denkbaar, zoals het belonen van boeren die koolstof opslaan in de bodem of het subsidiëren van de meerkosten van houtbouw ten opzichte van op fossiele processen gebaseerde bouwmaterialen. Kern van deze instrumenten is dat ze een (tijdelijke) bijdrage leveren aan het onttrekken van koolstof aan de atmosfeer, maar dat er geen claim gedaan wordt dat hierdoor een bepaald volume aan restemissies is gecompenseerd.

Randvoorwaardelijke aspecten

Accounting & monitoring

Accounting sluit nauw aan bij de kwestie van afbakening van negatieve emissies en draait om de vraag hoe (negatieve) emissies worden gemonitord en gerapporteerd. Op het niveau van nationale accounting gelden de regels van het UNFCCC: alle landen zijn verplicht om jaarlijks te rapporteren over hun broeikasgasinventaris, waarin zowel de uitstoot als ook de verwijdering van broeikasgassen uit de atmosfeer, bijvoorbeeld door landgebruik, zijn opgenomen³⁸. De richtlijnen die de UNFCCC voor deze inventaris hanteert zijn technisch van aard en kunnen niet gemakkelijk heronderhandeld worden. Via beleidsinstrumenten kunnen negatieve emissies gestuurd of gestimuleerd worden, maar dat verandert niets aan de manier waarop alle (negatieve) emissies aan het UNFCCC moeten worden gerapporteerd.

Dat sturen en stimuleren gebeurt meestal met een ander perspectief, niet met een nationaal perspectief maar vanuit een projectperspectief. Zo is bijvoorbeeld ook het voorstel van de Commissie voor certificering van koolstofverwijdering opgezet: deze gaat uit van monitoring op projectbasis. Bij veel projecten zal de keten niet beperkt zijn tot een land. Zo kan een BECCS-project bijvoorbeeld uitgaan van CO₂-afvang in Nederland, maar gebruikmaken van geïmporteerde biomassa of van opslag in een ander land. Projectaccounting kan dan zo worden opgezet dat alle Scope 2- en Scope 3-emissies mee worden genomen, maar in de nationale accounting telt dan maar een deel mee. De accountingregels op projectbasis kunnen gedetailleerder zijn dan de nationale accounting, bijv. in termen van criteria of verschillende categorieën negatieve emissies die worden onderscheiden. Het is van belang dat de accounting op nationaal en op project-niveau met elkaar kunnen communiceren en dat de milieu-integriteit over de gehele keten en permanent (of langdurig, afhankelijk van het type project) geborgd is.

Veiligheid

Geologische opslag van CO₂ vindt op dit moment nog beperkt plaats, en waar het plaatsvindt gaat het om fossiele CO₂ afkomstig van de industrie, en niet om negatieve emissies. Voor de veiligheid van CCS zelf maakt het uiteraard niet uit wat de herkomst van de CO₂ is. Hiervoor bestaat al Europees beleid in de vorm van de CCS Richtlijn (EU, 2009). Het risico van lekkage uit diepe reservoirs is klein, mits de opslag onder strikt toezicht wordt ontworpen, gebruikt en gemonitord. Voor opkomende technologieën, zoals DAC, versnelde verwerking of mariene opslag, dienen tijdig afzonderlijke veiligheidskaders te worden ontwikkeld op Europees niveau.

Aansprakelijkheid

Mocht er CO₂ vrijkomen uit een geologische opslaglocatie, dan is dat niet alleen een veiligheidsprobleem maar betekent het ook dat de opslag niet permanent is gebleken en dat (een deel van) de opgeslagen CO₂ weer bijdraagt aan de concentratie in de atmosfeer. Als de permanente opslag op de ene of de andere manier geclaimd is als negatieve emissie, die compenseert voor restemissies, rijst de vraag wie er verantwoordelijk is voor dit 'lek' in de accounting. Zeker als het lek plaatsvindt vele generaties nadat de CO₂ is opgeslagen of de CO₂ afkomstig is van een bron die zich in een ander deel van de wereld bevindt dan de opslaglocatie (Stoefs, 2021). Andersom kan geredeneerd worden dat als een projecteigenaar verantwoordelijk wordt gemaakt voor de opslag van de CO₂, dit grenzen stelt aan de duur van de opslag waarmee gerekend wordt (Fuss, 2021). Een mogelijke oplossing voor het

³⁸ www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories.

Het gaat hier dus om alle (negatieve) emissies, niet alleen de door menselijk handelen versterkte.



aansprakelijkheidsvraagstuk is het creëren van een buffer, waarbij een deel van de negatieve emissies van een project niet toegekend wordt maar als een soort verzekeringspolis terzijde wordt gezet om te compenseren voor eventuele toekomstige lekken. Ook deze methode is echter niet waterdicht, en het is de vraag of aansprakelijkheid voor de lange termijn volledig door de private sector gedragen zou kunnen worden (Stoefs, 2021).

Beleidsadvies regulering langere termijn en randvoorwaarden

Om negatieve emissies op grote schaal van de grond te krijgen is een normerende en/of financiële prikkel nodig. We hebben daarbij de volgende beleidsaanbevelingen:

1. Het incorporeren van negatieve emissies in het ETS is mogelijk, maar brengt een risico met zich mee omdat emissiereductie en negatieve emissies dan binnen hetzelfde accountingsysteem worden gebracht. Nederland dient zich goed voor te bereiden op de discussie in het kader van het voorstel waarmee de Commissie naar verwachting in 2026 komt. Daarbij kan de optie om de equivalentie tussen tonnen emissiereductie en negatieve emissies op te heffen worden meegenomen, maar andere opties zijn ook mogelijk.
2. Het creëren van een afzonderlijke markt via normering en een certificatenstelsel is mogelijk, maar kent nog veel vragen. Deze optie dient beter uitgewerkt te worden, inclusief de mogelijkheden om een centraal publiek certificeringsmechanisme op te zetten voor de EU, en onderscheid te maken tussen de verschillende technische varianten.
3. Regulering voor permanente en tijdelijke opslag dient strikt gescheiden te worden. Certificering is mogelijk voor zowel permanente als tijdelijke opslag, maar dit dient dan in afzonderlijke systemen te worden ondergebracht. Alleen bij permanente opslag kan er sprake zijn van een claim op de compensatie van restemissies.
4. De nationale accountingregels ten bate van rapportage aan het UNFCCC zijn uiteindelijk leidend. Accounting op projectbasis kan als sturingsinstrument gebruikt worden, maar dient compatibel te zijn met de nationale accounting en de milieu-integriteit moet gewaarborgd zijn. Er moet nader bekeken worden hoe dit gerealiseerd kan worden voor accounting van projecten die een deel van de keten vormen of zich over meerdere landen uitstrekken.

7.5 Technologische ontwikkeling en innovatie

Parallel aan de beleidsinstrumenten voor regulering dient er ingezet te worden op verdere ontwikkeling van bestaande technieken en op het stimuleren van innovatie. Zo is het creëren van een markt voor negatieve emissies op basis van technologieën met nu nog een lage TRL, zoals DAC en maritieme opslag, immers alleen mogelijk als deze technieken richting 2050 voldoende ontwikkeld zijn om grootschalig te kunnen worden toegepast.

Bestaande programma's en subsidies in het kader van innovatiebeleid, zoals de DEI+ en het Meerjarig Missiegedreven Innovatieprogramma (MMIP) binnen de Topsector Energie, kunnen worden uitgebreid naar technologieën voor negatieve emissies met een TRL <7-8. Daarnaast kan de overheid de steun voor bestaande onderzoeksprogramma's zoals het Arrhenius-initiatief en de NET-faciliteit van de TU Delft intensiveren. In Europees verband kan Nederland pleiten voor een vervolg op het NEGEM-project, met meer aandacht voor de verdere ontwikkeling van de meest veelbelovende technieken. Er zou ook gekeken kunnen worden naar de mogelijkheid om vanuit het Nationaal Groeifonds een project te financieren dat zich richt op doorontwikkeling van een of meerdere technologieën, zoals biochar.

Eventueel kan er ook een instrument specifiek voor negatieve-emissietechnologieën worden ontworpen, om een duidelijke scheiding tussen CO₂-mitigatie en negatieve emissies te houden. Hier komen wel een paar beleidsvragen bij kijken. Allereerst de vraag of binnen een dergelijk instrument breed moet worden ingezet op zoveel mogelijk technologieën, of dat er strategisch gekozen moet worden voor een beperkt aantal technologieën met een

groot (theoretisch) potentieel. Ten tweede de vraag welke vorm van ondersteuning nuttig is om op nationaal niveau te doen, en waar een bijdrage in internationaal verband effectiever lijkt (bijv. binnen het Clean Energy Transition Partnership, waar Nederland ook deel van uitmaakt). Het vraagstuk van negatieve emissies speelt immers mondiaal en de interesse in technologische oplossingen daarmee ook. Dit vertaalt zich in de vraag voor welke technologieën de randvoorwaarden in Nederland het beste zijn om verdere innovatie en ontwikkeling nationaal te stimuleren, en voor welke technologieën het meer voor de hand ligt om dat elders te laten gebeuren, of in samenwerking met internationale partners. Deze vraag vergt een nadere analyse die niet binnen het kader van dit onderzoek past. Wel lichten we DAC er even uit, zie tekstbox PM.

De potentie van DAC

DAC wordt wel gezien als de technologie die in theorie een *game changer* kan worden in de wereld van negatieve emissies. Als de kosten en het energieverbruik significant omlaag kunnen worden gebracht zijn er immers weinig belemmeringen om de techniek op grote schaal te gaan toepassen: er is geen grote afhankelijkheid van grondstoffen en de negatieve neveneffecten zijn ook beperkt, al zal er wel een significant ruimtegebruik blijven bestaan.

In dit rapport hebben we voor Nederland een beperkt DAC-potentieel gehanteerd. Aan de ene kant omdat het nog onduidelijk is of de noodzakelijke reductie in kosten en energieverbruik überhaupt gerealiseerd gaat worden, maar ook omdat de techniek ook dan relatief veel ruimte en (schone) energie nodig zal blijven hebben. Het ligt daarom meer voor de hand om DAC elders toe te passen dan in Nederland.

Behalve het potentieel in Nederland zelf dient echter ook te worden gekeken naar randvoorwaarden zoals aanwezige expertise en het start-up-ecosysteem. Met de onderzoeksprogramma's aan de Universiteit Twente en de TU Delft heeft Nederland een goede kennisbasis. En bij onder andere Climeworks en Carbyon wordt er gewerkt aan innovatieve technieken in de pilotfase.

Door deze twee zaken (mogelijk beperkt potentieel van de techniek in Nederland en startpositie voor Nederland om leidend te kunnen zijn in verder onderzoek) tegen elkaar af te wegen kan een conclusie getrokken worden over de mate waarin een specifieke inzet op DAC in Nederland effectief is.

Tot slot dient er ook aandacht gegeven te worden aan de randvoorwaarden voor technologieën die op zichzelf al volwassen zijn. Dit geldt met name voor CCS. Om permanente negatieve emissies mogelijk te maken, is de beschikbaarheid van een CO₂-transport- en opslagnetwerk essentieel. Ondanks vele initiatieven op het vlak van (fossiele) CCS is er in Nederland nog altijd geen grootschalig project gerealiseerd. Om tijdig permanente negatieve emissies te kunnen realiseren moet er actief beleid gevoerd worden op het ontwikkelen van een transport- en opslaginfrastuctuur voor CO₂, waar aanbieders van afgevangen CO₂ gemakkelijk op kunnen aansluiten.

Beleidsadvies technologische ontwikkeling en innovatie

Om richting 2050 over voldoende technisch volwassen technieken voor permanente negatieve emissies te beschikken dient er nu al actief te worden ingezet op technologische doorontwikkeling en innovatie. Dat kan bijvoorbeeld op de volgende manieren:

1. Maak bestaande subsidies en stimuleringsprogramma's beschikbaar voor negatieve-emissietechnologieën, inclusief het Nationaal Groeifonds indien mogelijk.
2. Steun actief binnenlandse en Europese wetenschappelijke onderzoeksprogramma's.
3. Onderzoek of het meerwaarde heeft om een specifiek instrument voor innovatie van negatieve emissietechnologieën te ontwikkelen, in aanvulling op bestaande innovatieprogramma's. Analyseer vooraf voor welke technologieën het zinvol is om deze vanuit de Nederlandse overheid extra te stimuleren, en voor welke dat effectiever elders kan gebeuren.
4. Zorg tijdig voor goede randvoorwaarden voor technologieën die al volwassen zijn, met name een transport- en opslaginfrastuctuur voor CO₂.

7.6 Conclusie: Roadmap beleid voor negatieve emissies

Hierboven hebben we verschillende aspecten van het beleid aangaande negatieve emissies afzonderlijk behandeld en daarbij beleidsaanbevelingen gedaan. In deze laatste paragraaf vatten we alle beleidsaanbevelingen nog eens samen, maar nu meer in onderlinge samenhang, uitgaande van een opbouw die in de tijd en vanuit beleidsoogpunt logisch is. Dit leidt dan tot een 'roadmap' voor het ontwikkelen van beleid voor negatieve emissies, bestaande uit de pijlers 'beleidskader', 'stimuleringsbeleid', R&D- en innovatiebeleid' en 'randvoorwaarden scheppen'.

Beleidskader

We beginnen met het opstellen van een **beleidskader met de belangrijkste uitgangspunten**.

De eerste daarvan is het **wettelijk vastleggen**, bij voorkeur op Europees niveau, van de **prioriteitsladder** die de Commissie voorstelt in de mededeling over duurzame koolstofcycli. Concreet betekent dit dat in eerste instantie moet worden gewerkt aan het terugdringen van de afhankelijkheid van fossiele koolstof (bijvoorbeeld door verduurzaming of vraagvermindering), daarna aan circulariteit en tot slot aan het opslaan van duurzame koolstof (negatieve emissies). Hierdoor wordt de behoefte aan negatieve emissies zo klein mogelijk. Ons onderzoek toont aan dat dit van groot belang is om de realisatie van voldoende negatieve emissies haalbaar te maken.

Om gericht beleid te kunnen voeren is het vervolgens nodig om die **behoefte aan negatieve emissies kwantitatief te bepalen**. Daarvoor is een inschatting nodig van zowel de rest-emissies als de overshoot. Voor de restemissies dient **per sector ingeschat te worden welke emissies er in 2050 nog overblijven**. Dit is sterk afhankelijk van het gevoerde klimaatbeleid, dus deze inschattingen kunnen iteratief verbeterd worden naarmate het Europese en Nederlandse post-2030-beleid duidelijker wordt. Voor het inschatten van de overshoot moet een keuze gemaakt worden voor de verdeelsleutel die gehanteerd wordt.

Het vaststellen van een **definitie van wat onder negatieve emissies wordt verstaan** is ook een belangrijk onderdeel van het beleidskader. Het is daarbij essentieel om consequent onderscheid te maken tussen permanente opslag en tijdelijke opslag, zoals natuurlijke oplossingen en opslag in materialen of producten.

Aansluitend op de definitie dienen de **accountings- en monitoringsregels** vastgesteld te worden. Een belangrijk punt daarbij is de verhouding tussen op projecten gebaseerde accounting en de nationale accountingregels ten bate van de rapportage aan het UNFCCC. Er moet onderzocht worden hoe dit nationale kader ruimte kan bieden aan negatieve-emissieprojecten die grensoverschrijdend zijn of die juist maar een deel van de keten omvatten. Tegelijk dient de **milieu-integriteit van de projectmatige accountingsregels geborgd te zijn**. Als er sprake is van compensatie van restemissies mogen alleen werkelijke, fysieke en permanente negatieve emissies worden meegeteld. De vier richtlijnen van Tanzer en Ramirez bieden hier een goed handvat voor. Dit is een aandachtspunt voor de verdere ontwikkeling van het Europese certificeringskader. **Voor niet-permanente opslag**, zoals die via natuurlijke processen of opslag in materialen, **dienen afzonderlijke beleidsinstrumenten ontwikkeld te worden** waarbij geen claim wordt gelegd op de compensatie van restemissies.

Stimuleringsbeleid

De volgende pijler in onze roadmap is het **stimuleringsbeleid**, gericht op het realiseren en opschalen van negatieve emissies.

Op korte termijn kan de overheid een aanjagende rol spelen door te **sturen op het plukken van laaghangend fruit** (i.e. het creëren van gunstige business cases voor negatieve-emissie-technologieën waar de komende jaren al kansen zijn, zoals bij AVI's) en **subsidie te verstrekken voor het opschalen van technologieën** die al een voldoende hoge TRL hebben. Ook kan Nederland in EU-kader **inzetten op een snellere omschakeling naar een circulaire economie** op basis van duurzame koolstof, bijvoorbeeld door een toenemend aandeel biobased in kunststoffen te verplichten.

Daarnaast is het belangrijk om de komende jaren het inzicht te verbeteren in de beschikbaarheid en het gebruik van biomassa en duurzame koolstof binnen een circulaire economie en hoe dit via beleidsinterventies beïnvloed kan worden. Ons advies is daarom om te **investeren in de ontwikkeling van een model** waarmee grondstoffenstromen, hun onderlinge wisselwerkingen en de effecten van beleidsinstrumenten helder in beeld worden gebracht. In 2026 komt de Commissie met een voorstel over het al dan niet integreren van negatieve emissies in het ETS. Als negatieve emissies onderdeel worden van het ETS verdwijnt de prikkel om eerst emissies te reduceren en pas te kijken naar negatieve emissies, wat onwenselijk is. Nederland zou zich daarom **goed moeten voorbereiden op deze discussie en maatregelen kunnen voorstellen** om dit risico te mitigeren.

Op de langere termijn kan een **afzonderlijk mechanisme** worden ontwikkeld om een markt voor negatieve emissies te creëren, bijvoorbeeld via **normering en een certificaten-systeem**, inclusief de mogelijkheden om een centraal publiek certificeringsmechanisme op te zetten voor de EU.

R&D- en innovatiebeleid

Voor het verder marktrijp maken van technologieën met een lagere TRL is gericht **R&D- en innovatiebeleid** nodig.

Dit kan in de eerste plaats door het **beschikbaar maken van bestaande subsidies en stimuleringsprogramma's** voor negatieve-emissietechnologieën, inclusief het Nationaal Groeifonds, indien mogelijk. Om de scheiding tussen klimaatmitigatie en negatieve emissies te behouden kan de **ontwikkeling van een afzonderlijk beleidsinstrument** gericht op de innovatie van negatieve-emissietechnologieën worden overwogen. Daarnaast kan Nederland **actief (financiële) steun geven** aan binnenlandse en Europese wetenschappelijke onderzoeksprogramma's, zoals ook nu al gebeurt.

Niet alle technologieën hebben een groot potentieel in Nederland zelf. Ook qua aanwezige kennis (zowel bij kenniscentra als op het vlak van start-ups) is de Nederlandse uitgangspositie verschillend per technologie. Ons advies is om te **analyseren voor welke technologieën het zinvol is** om deze vanuit de Nederlandse overheid extra te stimuleren, en voor welke dat effectiever elders kan gebeuren.

Randvoorwaarden scheppen

Tot slot kijken we naar de **randvoorwaarden** die nodig zijn voor de ontwikkeling van negatieve emissies.

Dit gaat in de eerste plaats om het **garanderen van fysieke randvoorwaarden** voor technologieën die al voldoende volwassen zijn. Dit geldt met name voor CCS, waarvoor infrastructuur moet worden aangelegd en opslaglocaties moeten worden ontwikkeld.

Om voldoende opslagcapaciteit te ontwikkelen adviseren we **nader onderzoek te doen naar het potentieel van opslaglocaties anders dan lege gasvelden** op Nederlands grondgebied, zoals zoutcavernes en aquifers. Daarnaast kan het **uitfaseren van CCS met fossiele CO₂ afkomstig van de industrie** richting 2050 helpen bij het snel opschalen van negatieve emissies. Concurrentie om opslaglocaties zal leiden tot hogere kosten voor negatieve emissies, en daarbij is fossiele CCS niet in lijn met de eerder genoemde prioriteitsladder omdat het de afhankelijkheid van fossiele koolstof niet vermindert.

Het onderwerp negatieve emissies heeft veel raakvlakken met andere beleidsthema's zoals klimaatmitigatie, beschikbaarheid van biomassa, biodiversiteit etc. Daarom is het ook een belangrijke randvoorwaarde om **negatieve emissies te integreren in relevante bestaande afwegingskaders** (zoals dat voor duurzaam gebruik van biograndstoffen) of **nieuwe afwegingskaders te ontwikkelen** voor het beoordelen van negatieve neveneffecten van negatieve emissies op bijvoorbeeld milieu of biodiversiteit.

8 Conclusie

Dit rapport is veelomvattend, en de meeste hoofdstukken eindigen met conclusies over dat specifieke onderwerp. In het volgende geven we een korte reflectie op het geheel, met een aantal overkoepelende conclusies die volgen uit de bevindingen van de verschillende onderdelen van deze studie.

De ontwikkeling en realisatie van grootschalige, permanente koolstofverwijdering uit de atmosfeer zijn cruciaal om de mondiale en nationale klimaatdoelen te halen. Er blijven restemissies over die ook op de lange termijn (na 2050) moeten worden gecompenseerd om verdere klimaatverandering tegen te gaan.

Dit onderzoek laat zien dat tijdige CO₂-reductie de kern moet blijven van klimaatbeleid. Het verlagen van de (rest)emissies om de klimaatdoelen te halen, en het beperken van de mondiale overschrijding van de 1,5°C-doelstelling blijft cruciaal. De ontwikkeling en opschaling van negatieve emissies naar een niveau dat voldoende is om de restemissies en mondiale overshoot te compenseren gaat veel tijd en inspanning kosten, en gaat met significante onzekerheden gepaard. Vanuit de klimaatdoelen geredeneerd concluderen wij dan ook dat het onverstandig is om een zekere uitstoot nu te compenseren met een onzekere verwijdering in de toekomst.

Er zijn veel verschillende technologieën beschikbaar voor negatieve emissies, maar het volume CO₂ dat daadwerkelijk kan worden verwijderd in Nederland (en daarbuiten) is onzeker. Dit hangt af van een aantal factoren, die grofweg in drie categorieën kunnen worden ingedeeld:

- **De beleidsinzet.** We geven in dit rapport een aantal suggesties hoe deze kan worden vormgegeven, deze vergen verdere uitwerking. Het gaat hierbij om het opzetten van een beleidskader met definities en uitgangspunten, het ontwikkelen van stimuleringsbeleid voor het realiseren en opschalen van negatieve emissies, R&D- en innovatiebeleid voor het marktrijp maken van technologieën met een lage TRL en het creëren van de juiste randvoorwaarden.
- **De ontwikkelingen in de energievoorziening en de industrie.** Daarbij gaat het allereerst om de vraag in hoeverre er in de toekomst gebruik wordt gemaakt van biomassa voor energie en grondstof, in processen die zich lenen voor CO₂-afvang. Vervolg vraag is dan in hoeverre deze biogene koolstof gebruikt gaat worden als duurzame grondstof voor de industrie (bijv. voor synfuels), of kan worden vastgelegd d.m.v. CCS. We bevelen aan om een beter inzicht te ontwikkelen in de toekomstige (duurzame) koolstofhuishouding van de Nederlandse economie, hoe ziet die eruit tijdens en na de overstap van fossiele naar hernieuwbare grondstoffen en welke beleidsinstrumenten zijn er om hierop te sturen?
- **Het succes van onderzoeks- en innovatietrajecten.** Veel technologieën vergen nog de nodige ontwikkeling om grootschalig te kunnen worden toegepast. Dit brengt het risico met zich mee dat de techniek zich minder snel ontwikkelt dan gehoopt, of zelfs helemaal stopt en bijv. om technische of economische redenen niet tot grootschalige toepassing kan doorgroeien. Bij sommige technologieën is er ook verder onderzoek nodig om eventuele potentiële negatieve bijeffecten (bijv. op biodiversiteit) te voorkomen. Met een gericht onderzoeks- en innovatieprogramma kunnen de verschillende technologieën zo snel mogelijk verder worden ontwikkeld.

Een andere conclusie van ons onderzoek is dat er in het beleid een duidelijk onderscheid moet worden gemaakt tussen permanente en tijdelijke opslag van koolstof. Hoewel wij een breed palet aan technologieën hebben onderzocht is het belangrijk om alleen permanente koolstofverwijdering te zien als compensatie van restemissies. Dit onderscheid dient door te werken in het beleid. Tijdelijke opslag kan als positief neveneffect worden beschouwd van bijv. houtbouw of opslag in de bodem, maar het heeft ook maar een (tijdelijk) effect.

Bij het onderwerp negatieve emissies komen veel verschillende beleidsterreinen samen: klimaat, energie, CCS, circulaire economie, bos- en landbouw, biodiversiteit, mobiliteit en transport (met name de brandstoffen), innovatie, etc. De verdere ontwikkeling van negatieve emissies vergt dan ook een integrale aanpak en een visie op de rol van koolstofverwijdering in de maatschappij en in het klimaatbeleid van de toekomst. Op deze manier kunnen de kansen voor synergie met de transitie naar een klimaatneutrale en circulaire economie worden benut, en kunnen negatieve neveneffecten (trade-offs) worden voorkomen of worden beperkt.

Gezien de doorlooptijden van zowel de beleidsprocessen als de verschillende technologieën is het belangrijk om snel een beleidskader op te zetten voor negatieve emissies. Allereerst via de Nederlandse inzet bij de Europese beleidsontwikkelingen, zodat op EU-niveau een tijdige uitrol van effectief beleid voor koolstofverwijdering wordt gerealiseerd. En daarnaast ook met nationaal beleid dat zich richt op het stimuleren van daadwerkelijke toepassing van technologieën met groot potentieel in Nederland (bijv. BECCS-routes), en het stimuleren van kansrijke innovaties.

9 Literatuurlijst

- Akhurst, M., Kirk, K., Neele, F., Grimstad, A., Bentham, M. & Bergmo, P., 2021. Storage Readiness Levels: communicating the maturity of site technical understanding, permitting and planning needed for storage operations using CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- Alcade, J., Flude, S., Wilkinson, M., Johnson, G., Edlmann, K., Bond, C. E., Scott, V., Gilfillan, S. M. V., Ogaya, X. & Haszeldine, R. S., 2018. Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation. *Nature Communications*, 2018.
- Aurora Energy Research, 2021. *CO₂-free flexibility options for the Dutch power system*, Oxford: Aurora Energy Research
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N. P. & Mathiassen, O. M., 2007. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- Belgian Federal Government, 2013. *Scenarios for a Low Carbon Belgium by 2050. Summary of the findings*, Brussels: Belgian Federal Government
- BMWK.2022. Evaluierungsbericht Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG), Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/evaluierungsbericht-bundesregierung-kspg.html>
- Bolan, N., Hoang, S. A., Beiyuan, J., Gupta, S., Hou, D., Karakoti, A., Joseph, S., Jung, S., Kim, K.-H., Kirkham, M. B., et al., 2022. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Materials Reviews*, 67, 150-200.
- Brancheorganisatie Akkerbouw.2014.Biochar voor de landbouw, Brancheorganisatie Akkerbouw <https://kennisakker.nl/archief-publicaties/biochar-voor-de-landbouw4172>
- CATF, 2022. *A European Strategy for Carbon Capture and Storage. Key policy recommendations for commercialisation of carbon capture and storage and carbon removal and storage technologies*, Boston; Rotterdam: Clean Air Task Force (CATF)
- CE Delft, 2021. *CO₂-reductie met circulaire kunststoffen in Nederland - Scenarioanalyse voor 2030 en diverse praktijkcases*, Delft: CE Delft
- CE Delft, 2022a. *Gaswinning op de Noordzee, en de afspraken daarover in het Akkoord voor de Noordzee*, Delft: CE Delft
- CE Delft, 2022b. *Herziening zeefmethodiek CCS voor SDE++*, Delft: CE Delft
- CE Delft, 2022c. *Verwerkingsroutes van afvalhout. Mogelijkheden en milieukunstige evaluatie middels mLCA*, Delft: CE Delft

CE Delft, 2023. *Naar duurzame producten met de principes van circulariteit*, Delft: CE Delft

CE Delft & Royal HaskoningDHV, 2020. *Bio-Scope: Toepassingen en beschikbaarheid van duurzame biomassa*, Delft: CE Delft

Change Inc., 2023. Op zoek naar het 'smerigste en natste' afval': dit bedrijf maakt er biobrandstoffen van. *Change Inc.*

CMW, 2022. EU's carbon removals certification framework is certifiably problematic, Carbon Market Watch (CMW) <https://carbonmarketwatch.org/2022/11/04/eus-carbon-removals-certification-framework-is-certifiably-problematic/>

CO2GeoNet, 2021. *State-of-play on CO₂ geological storage in 32 European countries - an update*, Orléans Cedex 2: CO₂GeoNet

Cobo, S., Negri, V., Valente, A., Reiner, D. M., Hamelin, L., Mac Dowell, N. & Guillén-Gosálbez, G., 2023. Sustainable scale-up of negative emissions technologies and practices: where to focus. *Environmental Research Letters*, 18, 023001.

CPB, 2017. *Biomassa met CO₂-opslag direct inzetten*, CPB Policy Brief 2017/2 Den Haag: Centraal Planbureau (CPB)

DenkWerk, 2022. *Voorbij netto-nul naar planeet-positief: Drie transitie om Nederland terug te brengen binnen de grenzen van een leefbare aarde*, <https://denkwerk.online/>

E3M-Lab, IIASA & EuroCARE, 2021. *EU Reference Scenario 2020: Energy, transport and GHG emissions : Trends to 2050*, Luxembourg: Publications Office of the European Union

EBN & Gasunie, 2018. *Transport en opslag van CO₂ in Nederland : Verkennende studie*, Utrecht; Groningen: EBN; Gasunie

EC, 2018a. *Communication from the Commission: A Clean Planet for all, A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*, COM(2018) 773 final, Brussels: European Commission (EC)

EC, 2018b. *In-depth analysis in support of the Commission. Communication COM(2018) 773 : Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*, Brussels: European Commission (EC)

EC, 2020a. 2050 long-term strategy, European Commission (EC) https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en.januari/2/2020

EC, 2020b. *Climate target plan, tabellenbijlage*, Brussels: European Commission (EC)

EC.2021a. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of



energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652, COM/2021/557 final, European Commission (EC) https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:dbb7eb9c-e575-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

EC, 2021b. *Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council amending Regulations (EU) 2018/841 as regards the scope, simplifying the compliance rules, setting out the targets of the Member States for 2030 and committing to the collective achievement of climate neutrality by 2035 in the land use, forestry and agriculture sector, and (EU) 2018/1999 as regards improvement in monitoring, reporting, tracking of progress and review*, Brussels: European Commission (EC)

EC, 2021c. *Sustainable Carbon Cycles, Communication from the Commission to the European Parliament and the Council*, Brussels: European Commissions (EC)

EC, 2022. *Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a Union certification framework for carbon removals*, Brussels: European Commission

EC & Ricardo Energy & Environment, 2020. *Implementation of the NER 300 funding programme: Final progress report*, Brussels: European Commission (EC)

EEA, 2022. *Carbon Sinks and Sources*. European Environment Agency (EEA). <https://forest.eea.europa.eu/topics/forest-and-climate/carbon-sink>

EIA, 2022. *Annual Energy Outlook 2022*, Washington DC: U.S. Energy Information Administration (EIA)

European Biochar Industry Consortium, 2022. *European Biochar Market Report 2021/2022*, EBI (European Biochar Industry) https://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2022/03/EU-Biochar-Market-Report_2022-03-09.pdf. 13-2-2023

European Parliament, 2022a. *Agricultural potential in carbon sequestration*, Strasbourg: European Parliament (EP)

European Parliament, 2022b. *Agricultural potential in carbon sequestration: Humus content of land used for agriculture and CO₂ storage*, Strasbourg: European Parliament (EP)

European Union, 1986. Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC). *Official Journal of the European Communities*.

Eurostat, 2019. *The EU's population projected up to 2100*, Luxembourg: Eurostat

Fajardy, M. & Mac Dowell, N., 2017. Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 2017.

Florence School of Regulation, 2021. *The Biochar System in the EU: the Pieces are Falling Into Place, but Key Policy Questions Remain*, Florence: Florence School of Regulation

- Fuss, S., Gruner, F., Hilaire, J., Kalkuhl, M., Knapp, J., Lamb, W., Merfort, A., Meyer, H., Minx, J. C. & Strefler, J., 2021. *CO₂-Entnahmen: Notwendigkeit und Regulierungsoptionen. Studie im Auftrag der Wissenschaftsplattform Klimaschutz.* Berlin, Berlin: Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) gGmbH
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., et al., 2018. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters*, 13, 063002.
- Global CCS Institute, 2019. *Bioenergy and Carbon Capture and Storage*, 2019 Perspective Melbourne: Global CCS Institute
- Global CCS Institute, 2021. *Technology Readiness and Costs of CCS*, Melbourne: Global CCS Institute
- Göswein, V., Reichmann, J., Habert, G. & Pittau, F., 2021. Land availability in Europe for a radical shift toward bio-based construction. *Sustainable Cities and Society*, 2021.
- Grassi, G. & et al., 2019. On the realistic contribution of European forests to reach climate objectives. *Carbon Balance and Management*.
- Green Chemistry Campus, 2021. Terrawatt biochar start pyrolysepilot op green chemistry campus voor ontwikkeling van CO₂-negatief asfalt, Green Chemistry Campus <https://www.greenchemistrycampus.com/nieuws/terrawatt-biochar-start-pyrolysepilot-op-green-chemistry-campus-voor-ontwikkeling-van-co2-negatief-asfalt>
- Griffioen, J., 2017. Enhanced weathering of olivine in seawater: The efficiency as revealed by thermodynamic scenario analysis. *Science of the Total Environment*, 575, 536-544.
- Himes, A. & Busby, G., 2020. Wood buildings as a climate solution. *Developments in the Built Environment*, 2020.
- IEA, 2021. *Global assessment of direct air capture costs. EAGHG Technical Report 2021-05 December 2021*, Cheltenham: IEAGHG
- IPCC, 2022. *Climate Change 2022. Mitigation of climate change*, London: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- IPCC, 2023. *Climate Change 2023. AR6 Synthesis Report*, s.l.: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- Ithaka Institute, Ongoing. The European Biochar Certificate, Ithaka Institute <https://www.european-biochar.org/en.8-2-2023>
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., Groenigen, v., J.W., Hungate, B. A. & Verheijen, F., 2017. Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12.



Landmarc, 2020. *Agroforestry: case study on improved carbon storage in soils and trees in the Netherlands*:

Lübbers, S., Wunsch, M. & Lovis, M., 2022. Vergleich der "Big 5" Klimaneutralitätsszenarien, <https://ariadneprojekt.de/news/big5-szenarienvergleich/>

Maesano, C. N., Campbell, J. S., Foteinis, S., Furey, V., Hawrot, O., Pike, D., Aeschlimann, S., Reginato, P. L., Goodwin, D. R., Looger, L. L., et al., 2022. Geochemical Negative Emissions Technologies: Part II. Roadmap. *Frontiers in Climate*, 4.

Mallo, M. F. L. & Espinoza, O., 2016, *Cross-laminated timber vs. concrete/steel: cost comparison using a case study*, World Conference on Timber Engineering WCTE 2016, Vienna

Meier, R. & et al., 2021. Empirical estimate of forestation-induced precipitation changes in Europe. *Nature Geoscience*, 473 - 478.

Ministerie van EZK, 2022. *Kamerbrief d.d. 10 juni 2022 m.b.t.: Contouren Nationaal plan energiesysteem*, Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)

Ministerie van EZK, 2023. Naar een beleidsagenda voor een klimaatneutraal Nederland, Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)
<https://open.overheid.nl/documenten/ronl-273610e3b6ffa46fa61836cc9b441b43ac952c36/pdf>

Ministerie van EZK & Ministerie van I&W, 2022. Kamerbrief d.d. 22 april 2022 : Beleidsinzet biograndstoffen, Tweede Kamer der Staten-Generaal
<https://open.overheid.nl/repository/ronl-7fbf02296b8e93cf235319dcc4331c2ea6153566/1/pdf/beleidsinzet-biograndstoffen.pdf>

Ministerie van I&W, 2020. Kamerbrief d.d. 16 oktober 2020 : Duurzaamheidskader biograndstoffen, Tweede Kamer der Staten-Generaal Oktober 16
<https://www.tweedekamer.nl/kamerstukken/moties/detail?id=2020Z19173&did=2020D41361>

Ministerie van LNV & IPO, 2020. *Bossenstrategie*, Den Haag: Ministerie van LNV & IPO

Moinet, G. Y., Hijbeek, R., van Vuuren, D. P. & Giller, K. E., 2023. Carbon for soils, not soils for carbon. *Global Change Biology*.

Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022. *Technology Readiness Assessment, Costs, and Limitations of five shortlisted NETs • Accelerated mineralisation, Biochar as soil additive, BECCS, DACCS, Wetland restoration*:

Montserrat, F., Renforth, P., Hartmann, J., Leermakers, M., Knops, P. & Meysman, F. J. R., 2017. Olivine Dissolution in Seawater: Implications for CO₂ Sequestration through Enhanced Weathering in Coastal Environments. *Environmental Science & Technology*, 51, 3960-3972.



- Nabuurs, G. J., Delacote, P., Ellison, D., Hanewinkel, M., Hetemäki, L. & Lindner, M., 2017. By 2050 the Mitigation Effects of EU Forests Could Nearly Double through Climate Smart Forestry. *Forests*, 8, 484.
- Naturwald Akademie, 2020. *Waldvision für die Europäische Union*, Lübeck: Naturwald Akademie
- Neele, F., Hofstee, C., Arts, R., Vandeweyer, V., Nepveu, M., Ten Veen, J. & Wilschut, F., 2013. Offshore Storage Options for CO₂ in the Netherlands. *Energy Procedia*.
- Neele, F., Hofstee, C., Dillen, M. & Nepveu, M., 2011. *Independent storage assessment of offshore CO₂ storage options for Rotterdam - Summary report*, Utrecht: TNO
- Neele, F., Ten Veen, J., Wilschut, F. & Hofstee, C., 2012. *Independent assessment of high-capacity offshore CO₂ storage options*, Delft: TNO
- NEGEM, 2022. *Literature assessment of ocean-based NETPs regarding potentials, impacts and trade-offs*
- Netbeheer Nederland, 2021a. *Het Energiesysteem van de toekomst. Integrale infrastructuurverkenning 2030-2050*, Den Haag: Netbeheer Nederland
- Netbeheer Nederland, 2021b. *Het Energiesysteem van de Toekomst: Integrale Infrastructuurverkenning 2030-2050*, Netbeheer Nederland
- Netbeheer Nederland, 2023. *Het energiesysteem van de toekomst: de II3050-scenario's*, Den Haag: Netbeheer Nederland
- NIBE Research, 2019. *Potentie van biobased materialen in de bouw*, Bussum: NIBE Research
- Noordzeeloket, 2022. *Programma Noordzee 2022-2027*, Den Haag: Rijksoverheid
- North Sea Energy, 2020. *Energy Atlas : An interactieve atlas of the North Sea*, North Sea Energy <https://north-sea-energy.eu/en/energy-atlas/>
- Ögmundarson, O., Sukumara, S., Laurent, A. & Fantke, P., 2019. Environmental hotspots of lactic acid production systems. *GCB Bioenergy*, 2020, 19-38.
- PBL, 2018. *Negatieve emissies - Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)
- PBL, 2020. *Beschikbaarheid en Toepassingsmogelijkheden van duurzame biomassa - Verslag van een zoektocht naar gedeelde feiten en opvattingen - beleidsstudie*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)
- PBL, 2022. *Klimaat- en Energieverkenning (KEV) 2022*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)
- Perpetual Next, Ongoing. *Technologies*, Perpetual Next <https://perpetualnext.com/divisies/technologies/>



- PIANOo, 2021. *Buyer Group Marktvisie en -strategie houtbouw*, Den Haag: PIANOo Expertisecentrum Aanbesteden
- Pickstone, S., z.d. *Commission prepares ground for 2040 climate target*. *Ends Europe*. <https://www.endseurope.com/article/1818437/commission-prepares-ground-2040-climate-target>
- Platform Hout & et al., 2016. Actieplan bos en hout <http://edepot.wur.nl/394083>
- Rajamani, L., Jeffery, L., Höhne, N., Hans, F., Glass, A., Ganti, G. & Geiges, A., 2021. National 'fair shares' in reducing greenhouse gas emissions within the principled framework of international environmental law. *Climate Policy*, 21, 983-1004.
- Renforth, P., 2012. The potential of enhanced weathering in the UK. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 229-243.
- Ricardo Energy & Environment, 2022. *European CO₂ availability from point-sources and direct air capture*, Harwell, Oxfordshire: Ricardo Energy & Environment
- Roe, S., Streck, C., Beach, R., Busch, J. & Chapman, M., 2021. Land - based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country. *Global Change Biology*, 6025-6058.
- Rosa, L., Sanchez, D. & Mazzotti, M., 2021. Assessment of carbon dioxide removal potential via BECCS in a carbon-neutral Europe. *Energy & Environmental Science*, 2021.
- Royal HaskoningDHV, 2021. *National CO₂ storage requirements until 2035: An inventory of CCS in the Netherlands*, Amersfoort: Royal Haskoning DHV
- Royal HaskoningDHV, 2022. *Quickscan behoefte naar een onderzoeksprogramma gericht op negatieve CO₂-emissie*, Amersfoort: Royal HaskoningDHV
- Schmidt, H. P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., M.A., S. & Cayuela, M. L., 2021. Biochar in agriculture - A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 13, 1708-1730.
- Searchinger, T., James, O. & Dumas, P., 2022. *Europe's Land Future? Opportunities to use Europe's land to fight climate change and improve biodiversity and why proposed policies could undermine both*, Princeton: Princeton University
- SGS Search, 2023. *Onderzoek rapportage Berekeningsmethodiek koolstof vastlegging biobased bouwmaterialen*, Heeswijk: SGS Search Ingenieursbureau B.V.
- Slim Landgebruik, 2022. *CO₂Bodem: Tussenresultaten Slim Landgebruik*, Wageningen: Slim Landgebruik
- Smeaton, C., 2021. Augmentation of global marine sedimentary carbon storage in the age of plastic. *Limnology and Oceanography Letters*



Smith, P. & et al., 2015. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change*, 6, 42-50.

Smith, S. M. & et al., 2023. *The State of Carbon Dioxide Removal - A global, independent scientific assessment of Carbon Dioxide Remova - 1st Edition*: Applied Sustainability Sciences

Staatsbosbeheer, 2023. Bos en CO₂-opslag, Staatsbosbeheer
<https://www.staatsbosbeheer.nl/wat-we-doen/co2-opslaan/bos-en-co2#:~:text=Staatsbosbeheer%20draagt%20bij%20aan%20het,opslag%20van%2050.000%20ton%20CO2>

Stegmann, P. & et al., 2022. Plastic futures and their CO₂ emissions. *Nature*, 612, 272-276.

Tanzer, S. E. & Ramirez, A., 2019. When are negative emissions negative emissions? *Energy & Environmental Science*, 12, 1210-1218.

Teeuwen, S., Reichgelt, A. & Oldenburger, J., 2020. *Factsheets Kostenindicatie aanleg nieuw bos en landschapselementen: Rekenhulpmiddel voor het ramen van de kosten voor aanplant van verschillende beplantingstypen*. Wageningen: Stichting Probos

TNO, 2020a. *Technology factsheet - Post-combustion CO₂ capture add-on for power plants - gaseous fuels*. S.l.: TNO

TNO, 2020b. *Technology factsheet - Post-combustion CO₂ capture add-on for power plants - solid fuels*. S.l.: TNO

TNO, 2021. *Een verkenning van het potentieel van tijdelijke CO₂-opslag bij houtbouw*, TNO-rapport TNO 2021 R10538 Utrecht: TNO

TNO, 2022a. *Een klimaatneutraal energiesysteem voor Nederland. Nieuwe verkenning toont grenzen mogelijkheden (White paper)*, Amsterdam: TNO

TNO, 2022b. *Groengasproductie uit biomassavergassing: barrières voor opschaling en mogelijke oplossingsrichtingen*, Amsterdam: TNO

TNO, 2022c. *Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2050 - Scenario update and analysis of heat supply and chemical and fuel production from sustainable feedstocks*, Amsterdam: TNO

UN, 2015. *Paris Agreement*, Paris: United Nations (UN)

Vellinga, T. V., Reijs, J. W., Lesschen, J. P. & van Kernebeek, H. R., 2018. *Lange termijn opties voor reductie van broeikasgassen uit de Nederlandse landbouw: Een verkenning*, Wageningen: Wageningen Livestock Research

Welkenhuysen, K., Piessens, K., Baele, J.-M., Laenen, B. & Duser, M., 2011. CO₂ storage opportunities in Belgium. *Energy Procedia*, 4913-4920.

Welkenhuysen, K., Ramirez, A., Swennen, R. & Piessens, K., 2013. Strategy for ranking potential CO₂ storage reservoirs: A case study for Belgium. *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 431-449.

Werkgroep CO₂-vrij elektriciteitssysteem 2035, 2022. *Naar een CO₂-vrij elektriciteitssysteem in 2035*, Den Haag: Ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK)

World Bank, 2022. *CO₂ emissions (kt) - European Union*, Washington DC: World bank

WUR, 2022a. *Mineralen inzetten tegen klimaatverandering*, Wageningen: Wageningen University & Research <https://www.wur.nl/nl/show-longread/mineralen-inzetten-tegen-klimaatverandering.htm>

WUR, 2022b. *Factsheets. Klimaatmaatregelen met bomen, bos en natuur*, Wageningen: Wageningen University & Research

WUR, 2023a. *Beleidsscenario's voor klimaatmitigatie in landbouw en landgebruik: Resultaten voor de AFOLU sector in 2035*, Wageningen: Wageningen University & Research (WUR)

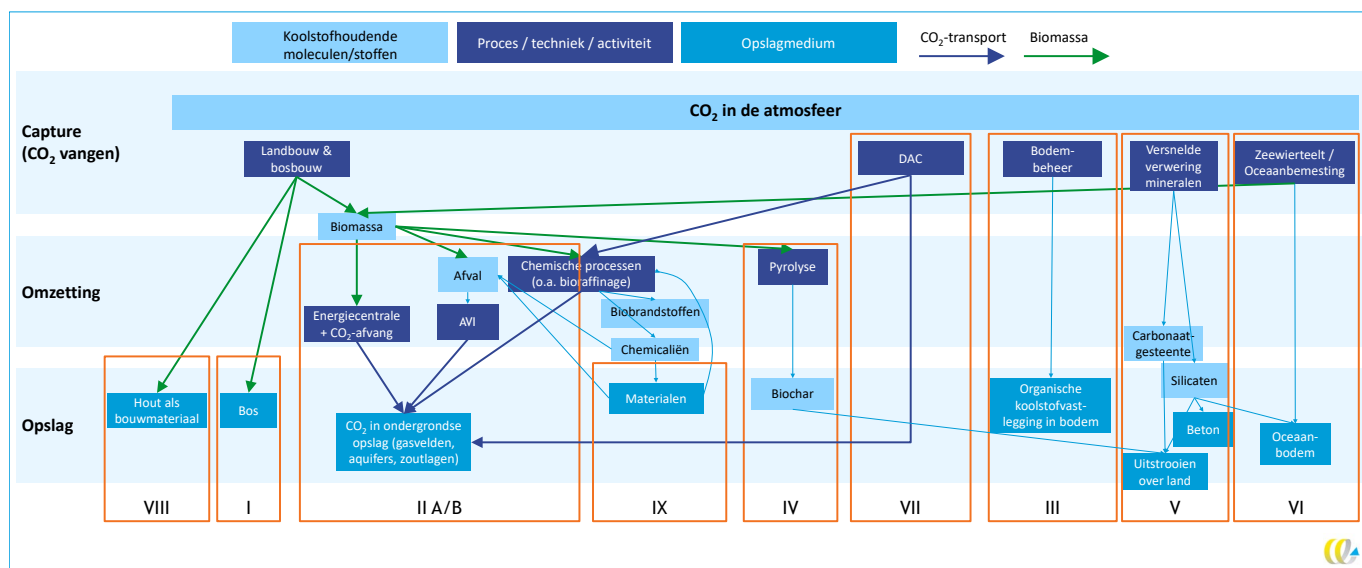
WUR, 2023b. *Climate and soils*, Wageningen University & Research (WUR) <https://www.wur.nl/en/Dossiers/file/Climate-and-soils-1.htm>

WUR, Lopend, *Biochar*, Wageningen University & Research (WUR) <https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/onderzoeksinstituten/environmental-research/faciliteiten-tools/laboratoria-omgevingswetenschappen/bodem-hydro-fysisch-laboratorium/onderzoek/biochar.htm>

A Aanbod negatieve emissies

In volgend schema is een overzicht gegeven van methoden voor CO₂-verwijdering, omzetting en opslag.

Figuur 45 - Overzicht van methoden van CO₂-verwijdering, omzetting en opslag



Tabel 33 geeft welke namen er aan de verschillende afvang- en opslagketens worden gegeven. In deze bijlage werken we voor elke technologie een factsheet uit.

Tabel 33 - Naamgeving van negatieve-emissietechnologieën

Nr.	Technologie	Engelstalig
I	Bebossing	Aforestation/Reforestation (AR)
IIA	Bio-energie met CCS	Bio-energy
IIB	Biochemie met CCS	
III	Koolstofopslag in de bodem	Soil carbon sequestration (SCS)
IV	Biochar	Biochar (BC)
V	Mineralisatie	Enhanced Weathering
VI	Marine NETP	Marine NETP (negative emissions technologies and practices)
VII	Directe CO ₂ -verwijdering met geologische opslag (DACCS)	Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS)
VIII	Houtbouw	
IX	Biomaterialen	

Fuss (2018) beschrijft naast deze technologieën ook een aantal innovatieve methoden voor negatieve emissies, waar we hier niet verder op ingaan:

- a Verwijdering van non-CO₂-broeikasgassen zoals methaan.
- b Aanleggen van zeewier ‘bossen’ als carbon sink.
- c CO₂ als synthetische feedstock voor chemie (route van DAC > chemie > materialen)³⁹.

A.1 Bebossing en bosbeheer

Beschrijving van de techniek

Bomen nemen CO₂ op uit de atmosfeer en leggen de koolstof vast in biomassa. Door aanplant en revitalisering van bossen ontstaan negatieve emissies door (blijvende) opslag van CO₂ in het areaal van bos en door bijgroei in bestaand bos. Bosuitbreiding en revitalisering zijn relatief eenvoudige maatregelen met zeer veel positieve neveneffecten. Hoewel Nederland inzet op een vergroting van het areaal aan bos, is het potentieel voor bebossing in Nederland beperkt vanwege het hoge ruimtegebruik. De bijdrage aan negatieve emissies zal in een realistisch scenario minimaal blijven.

Koolstofbron
De atmosfeer
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
Biologisch: bomen nemen CO ₂ op uit de atmosfeer en leggen deze vast in biomassa.
Opslagmedium
Boven- en ondergrondse houtige biomassa.
Beschrijving van verschillende varianten
Aanplant van nieuw areaal bossen (bebossing), revitalisering van bestaande bossen waardoor de koolstofopslag toeneemt, agroforestry (planten van bomen op landbouwgrond en aanleg van voedselbossen) en het planten van bomen als ‘landschapselementen’ in landelijk gebied. In feite gaan we hier uit van herbebossing, waarbij voorheen bebost land weer bos wordt. Wanneer niet bebost land wordt omgezet in bos, kan negatieve neveneffecten met zich meebrengen voor biodiversiteit.
Afbakening keten en netto-negatief
Er is alleen sprake van netto-koolstofverwijdering als de toename van de koolstofopslag groter is dan de toename van BKG-emissies (uitgedrukt in CO ₂ -eq.) als gevolg van de bebossing, herbebossing of agroforestry.

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid
Bosbouw levert geen technologische problemen op.
TRL + toelichting
N.v.t.
Energieverbruik
N.v.t.
Ruimtegebruik
De opslagratio van bos is maximaal 9,1 ton CO ₂ /hectare/jaar voor volgroeid bos (WUR, 2022b), met een maximum van ongeveer 400 ton/hectare na 50 tot 60 jaar. Maar de opslag varieert sterk naar bodemtype, soort beplanting en tijdstip, zie volgende tabel.

³⁹ Een aantal van dergelijk productieroutes zijn op dit moment in de R&D-fase. Deze route zal echter niet voor alle chemicaliën mogelijk zal zijn.

Maatregel	Eenheid	CO ₂ -effect	
		< 10 jaar na ingreep	> 10 tot 50 jaar na ingreep
Nieuw bos	Ton CO ₂ -eq. / Hectare/jaar	Afh. van bos/ bodemtype	9,1
Spontaan bos	Ton CO ₂ -eq. / Hectare/ jaar	0,9-4,6	1,8-9,1
Voedselbos	Ton CO ₂ -eq. / Hectare/jaar	2,3-3,5	4,6-6,8
Lijnbeplanting - bomenrij	Ton CO ₂ -eq. /km/jaar	3,1	6,3
Lijnbeplanting - houtwal	Ton CO ₂ -eq. / Hectare/jaar	4,6	9,1
Struweelhaag	Ton CO ₂ -eq. / Hectare/jaar	1,4 in eerste 15 jaar, daarna 0,1	
Agroforestry - strokenteelt	Ton CO ₂ -eq. / km/jaar	3,1	6,3
Agroforestry - boomweide	Ton CO ₂ -eq. / Hectare jaar	2,3	4,6

Bron: (WUR, 2022b).

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.

In 2016 heeft een consortium op initiatief van Platform Hout, Natuur & Milieu en de VBNE het Actieplan Bos en Hout gepubliceerd (Platform Hout & et al., 2016). Dat schat de kosten van bosbeheer op 1,3 €/tCO₂ en de uitbreiding van het areaal met 100.000 ha op 166,9 €/tCO₂ in 2050. Gemiddeld schatten zij de kosten van de maatregelen voor bosbeheer en uitbreiding in het Actieplan op 50,3 €/tCO₂ in 2050. PBL geeft aan dat de kosten bij aankoop van private grond oplopen tot vele honderden euro's/tCO₂ (PBL, 2018, Ministerie van LNV & IPO, 2020). De kosten voor de afwaardering van landbouwgrond worden ingeschat op € 52.200 per hectare. De kosten voor de aanplant variëren van € 7.600 tot 22.100 per hectare (Teeuwen, S. et al., 2020)

Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel

N.v.t.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader

Aansluiting bij lokale ecosysteem is cruciaal.

Koppelkansen

Ecologie, recreatie, landschapsontwikkeling, landbouw, volksgezondheid.

Negatieve neveneffecten

N.v.t.

Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing

N.v.t.

Knelpunten

Voor uitbreiding van bosareaal is relatief veel ruimte nodig, dat mogelijk ook voor andere functies nodig is, zoals landbouw. Daarnaast is (houtige) biomassa een belangrijke grondstof voor de biobased circulaire economie. Duurzaam bosbeheer is nodig zodat het bos behouden blijft terwijl er hout wordt geoogst. Door import van biobrandstoffen, veevoer of andere ruimtelijk intensieve producten kan worden bijgedragen aan ontbossing elders. Herbebossing in Europa is samengegaan met ontbossing buiten Europa, waardoor de klimaatwinst in de EU teniet wordt gedaan door verlies buiten de EU (Searchinger, T. et al., 2022).

Kwantificering van potentieel Nederland

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting (NL/Europees)

Het mitigatiepotentieel van bossen wordt bepaald door bosareaal, capaciteit van het bos om CO₂ vast te leggen, en de onttrekking (oogst) van houtproducten. Ongeveer 11% van het landoppervlak in Nederland is bos (365.000 ha). Hiervan is 58% (multifunctioneel) productiebos en de rest natuurbos. Jaarlijks groeit er in het Nederlandse bos gemiddeld 7,3 m³ per ha bij. In productiebossen is de bijgroei zo'n 10 procent hoger dan in natuurbossen. Van de totale bijgroei wordt iets meer dan de helft geoogst.

Het Nederlandse bos legt jaarlijks ongeveer 1,65 Mton CO₂ vast. Bij continuering van het huidige bosbeleid zal de vastlegging volgens PBL dalen tot 0,8 Mton CO₂/jaar in 2050 (PBL, 2018). Dit komt doordat de gemiddelde leeftijd van de Nederlandse bossen steeds hoger wordt.

Volgens de WUR was de vastlegging bos in 2020 2,0 Mton. In 2020 heeft het Ministerie van LNV - voortvloeiend uit het Klimaatakkoord - een Bossenstrategie gepresenteerd, waarin de ambitie staat om 37.000 hectare extra bos te realiseren in 2030 (Ministerie van LNV & IPO, 2020). Dit is nog niet allemaal vertaald in beleid. De WUR schat in dat bij vastgesteld beleid, namelijk bosuitbreiding met financiering binnen het Natuurnetwerk Nederland (NNN) en compensatie voor ontbossing uit de bossenstrategie, de vastlegging in 2050 kan groeien naar 3,0 Mton CO₂-eq. (WUR, Lopend).

Maximum technisch potentieel

In het theoretische geval dat ongeveer een kwart van het huidige agrarische areaal (totaal 2,2 mln hectare, 54% van Nederland) bebost zou worden (0,55 mln ha), zou er grofweg cumulatief 220 Mton CO₂ vastgelegd zijn na 60 jaar (op basis van een totaal aan 400 ton CO₂/hectare). In 2050 zou dat gemiddeld 3,6 Mton per jaar zijn en 84 Mton cumulatief.

Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)

De permanente vastlegging in 2030 ten gevolge van het Actieplan bos en hout (25.000 aanplant in bestaande natuurgebieden, 75.000 op landbouwgronden, met inbegrip van de reeds getroffen maatregelen) wordt door PBL geschat op 0,5-1 Mton CO₂/jaar in 2030 en in 2050 1,2 Mton/jaar.

Het aantal hectare extra bos in de Bossenstrategie uit 2020 ligt iets lager dan in het Actieplan Bos en Hout uit 2016.

In 2020 heeft het Ministerie van LNV – voortvloeiend uit het Klimaatakkoord – een Bossenstrategie gepresenteerd, waarin de ambitie staat om 37.000 hectare extra bos te realiseren in 2030 (Ministerie van LNV & IPO, 2020). WUR heeft de effecten van het uitvoeren van deze strategie (aanplant + revitalisering) berekend. Dit zou leiden tot 0,7 Mton/jaar vastlegging in 2050 ten opzichte van het referentiep pad (KEV). Cumulatief, met een lineair ingroeipad, leidt dit tot ongeveer 9,5 Mton vastlegging.

Belangrijkste onzekerheden

Beschikbaarheid grond.

Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))

De permanentie van de opslag in bos dient gemonitord en gegarandeerd te worden. Mogelijkerwijs kan dit via duurzaamheidskeurmerken (FSC, PEFC, etc.) Deze keurmerken richten zich echter op duurzaam beheer van (productie)bossen en niet specifiek op behoud van de koolstofopslag. Ook is het meten van de netto-verandering van de koolstofinhoud van bossen niet eenvoudig (EEA, 2022).

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
In 2019 was circa 40% van de landmassa in de EU bedekt met bos. De vastlegging door deze bossen was in totaal ca. 340 Mton CO ₂ /jaar (EEA, 2022). Volgens het EU-referentiescenario zullen EU-bossen minder gaan vastleggen: dit scenario projecteert richting 2050 een afnemende koolstofvastlegging van herbebossing (van -55 Mton in 2020 tot ongeveer -45 Mton in 2050) en de reeds bestaande bossen (-275 in 2020 tot -246 Mton in 2050). De emissies van ontbossing nemen daarentegen af van 30 tot 13 Mton in 2050 (E3M-Lab et al., 2021). Naturwald Akademie rekende in opdracht van Greenpeace uit dat door minder hout te oogsten voor bio-energie en andere beheerswijze de vastlegging zou kunnen verdubbelen tot 488 Mton/jaar (Naturwald Akademie, 2020). Een studie schat in dat 14,4% van het oppervlak van Europa (incl. Groot-Brittannië) geschikt zou zijn voor herbebossing (Meier, R. & et al., 2021). Dat zou ongeveer 60 miljoen hectare zijn en grofweg een (extra) vastlegging van 540 Mton CO ₂ (bij 9,1 ton/ha/jaar) of van 100 Mton/jaar (bij het huidige gemiddelde van 1,75 Mton/ha/jaar).
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Verschillende studies doen tegenstrijdige uitspraken over het potentieel van bebossing en bosbeheer in Europa. Volgens een studie van WUR hebben bossen in de EU de potentie om additioneel 441 Mton/jaar vast te leggen in 2050 met een combinatie van beheersmaatregelen, toename van areaal, bio-energie en bosreservaten. Als bio-energie niet wordt meegeteld is dit 300 Mton/jaar bovenop de toenmalige vastlegging (Nabuurs, G. J. et al., 2017). Ook wil de EU met de EU-bossenstrategie 3 miljard bomen planten (EC, 2021a).
Belangrijkste onzekerheden
Beschikbaarheid ruimte; permanentie van de bossen
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
De permanentie van de opslag in bos dient gemonitord en gegarandeerd te worden. Mogelijkerwijs kan dit via duurzaamheidskeurmerken (FSC, PEFC, etc.) Deze keurmerken richten zich echter op duurzaam beheer van (productie)bossen en niet specifiek op behoud van de koolstofopslag. Ook is het meten van de netto-verandering van de koolstofinhoud van bossen niet eenvoudig (EEA, 2022).
Gebruikte referenties
– (Platform Hout & et al., 2016) – (Teeuwen, S. et al., 2020) – (EEA, 2022) – (E3M-Lab et al., 2021) – (Naturwald Akademie, 2020) – (Nabuurs, G. J. et al., 2017) – (EC, 2021a) – (Landmarc, 2020) – (PBL, 2018) – (Staatsbosbeheer, 2023) – (Meier, R. & et al., 2021) – (Grassi, G. & et al., 2019) – (Searchinger, T. et al., 2022) – (WUR, 2022b)

A.2 BECCS - bio-energie en biochemische processen

BECCS omvat het gebruik van biomassa als energiebron of als grondstof in een proces in de industrie of energiesector - gevolgd door afvang van de biogene CO₂ die vrijkomt bij de verbranding of het proces, waarna die CO₂ permanent geologisch wordt opgeslagen. Er is geen enkelvoudige definitie van BECCS, aangezien het een verscheidenheid aan industrieën, biomassagrondstoffen en methoden van energieomzetting betreft (Global CCS Institute, 2021).

NB. De eindproducten van de industriële processen kunnen ook biogene koolstof bevatten. Als deze processen leiden tot producten die een lange levensduur hebben vallen zij in onze systematiek in de categorie ‘biomaterialen’, zie Bijlage A9. Als deze materialen na afloop van hun levensduur in een afvalverbrandingsinstallatie met CO₂-afvang en -opslag terechtkomen kan deze biogene koolstof uiteindelijk nog wel in deze BECCS-categorie terechtkomen. Dit geldt uiteraard ook voor biogene producten met korte levensduur.

Beschrijving van de techniek

Koolstofbron
CO ₂ uit biomassa, die vrijkomt bij energieproductie, of bij industriële processen.
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
PBL (PBL, 2018) onderscheidt in de volgende processen waar biogene CO₂ kan worden afgevangen voor ondergrondse opslag, in Nederland en Europa: - Biomassacentrales. - Biogascentrales. - Hogetemperatuurwarmte uit biomassa of biogas in de industrie. - Afvalverbrandingsinstallaties. - Staalindustrie (i.c.m. het Hisarna-proces). - Vergassing van biomassa. Daarnaast zijn er nog een aantal potentiële opties voor biogene CO₂-afvang (Fuss, S. et al., 2018) (Smith, S. M. & et al., 2023) die PBL niet heeft meegenomen: - Bij biogasproductie door vergisting van biomassa. - Bij sommige processen in de (chemische) industrie (bioraffinage). Bij de afvang van biogene CO₂ kunnen we verschillende vormen onderscheiden. De post-combustion CO₂-afvang-unit vangt de CO₂ af uit de rookgassen die vrijkomen bij verbranding van biomassa. Dit kan aan bestaande installaties toegevoegd worden of geïntegreerd worden in het design van een nieuwe centrale of installatie. Integratie in nieuwe installaties heeft de potentie om een hogere efficiëntie en lagere kosten te bereiken, met name omdat een hoge mate van warmte integratie mogelijk is. Voor CCS moet CO₂ gescheiden worden van het rookgas dat vrijkomt bij de verbranding. Het percentage CO₂ in het rookgas hangt met name af van de koolstofbron. Verschillende technieken kunnen gebruikt worden voor de scheiding, zoals membranen, oplos- of sorptiemiddelen en cryogene scheiding. Chemische oplosmiddelen, zoals monoethanolamine (MEA), zijn de meest gebruikelijke techniek voor CO₂-afvang bij verbrandingsprocessen (TNO, 2020). Na het afvangen van CO₂ is een regeneratiestap nodig om de CO₂ vrij te maken en het oplosmiddel te reinigen, zodat het kan worden hergebruikt. Typische afvangpercentages liggen binnen ranges van 85-95% (TNO, 2020). Met kansrijke innovaties wordt gewerkt aan afvang van 99%-100%. Afhankelijk van de technologie kan dit hogere kosten met zich mee brengen, hoewel er ook gewerkt wordt aan kostenreductie. CO₂-afvang niet alleen mogelijk na verbranding van de biomassa, maar ook op bij andere processen voor energieproductie of in de industrie. Het gaat hierbij om processen met biomassa als feedstock, waarbij CO₂ in hoge concentraties vrijkomt. Hier wordt ook wel de term pre-combustion capture voor gebruikt. Zo zijn er in processen waar de biomassa gescheiden wordt in CO₂ en waterstof, waarbij de waterstof wordt gebruikt voor energieproductie of het industriële proces. De CO₂ kan dan vrij eenvoudig worden afgevangen en opgeslagen. Een ander voorbeeld van een industrieel proces waar biogene CO₂ kan worden afgevangen is het Hisarna-proces (staalproductie o.b.v. biomassa). Ook bij ethanolproductie uit suikers en zetmeel, bijvoorbeeld, komt zuivere CO₂ vrij die zou kunnen worden afgevangen en opgeslagen. Omdat deze stromen het resultaat zijn van het proces zijn er geen additionele processtappen nodig voor de afvang van de CO₂, wat bij de post-combustion-routes wel het geval is. De afvang, de regeneratie van het oplosmiddel na absorptie en compressie van CO₂ is een behoorlijk energie-intensief proces. Dit leidt tot een hoger energie/brandstofverbruik van het gehele proces, waarbij ook CO₂ vrijkomt. Als deze emissies niet ook worden afgevangen, dan is de netto-reductie van CO₂ lager.

Opslagmedium
Opslag van CO ₂ vindt plaats in ondergrondse reservoirs. Dit kan in lege olie- en gasvelden of in zoutwater-voerende lagen (aquifer). Deze opslaglocaties zijn theoretisch gezien wel eindig en mogelijk speelt concurrentie met andere CCS-toepassingen om opslaglocaties. Zie Hoofdstuk 4.
Beschrijving van verschillende varianten
Biomassacentrales In biomassacentrales wordt vaste biomassa rechtstreeks gebruikt als brandstofbron om warmte te produceren en elektriciteit op te wekken. De centrales kunnen aangepaste kolencentrales zijn, of nieuw worden gebouwd. Een tussenvorm is ook mogelijk: biomassa die wordt bijgemengd bij kolen, in kolencentrales. Er kunnen verschillende soorten vaste biomassa worden verbrand, zoals houtpellets en snoeihout. De biomassa moet voldoen aan de duurzaamheidseisen uit de richtlijn hernieuwbare energie zijn opgenomen, anders vallen ze buiten nationale subsidieregelingen (in Nederland de SDE++) en tellen ze niet mee als hernieuwbare energie in de nationale doelstellingen. Vanwege de nadelen van biomassacentrales (o.a. beperkte beschikbaarheid duurzame biomassa, en, beschikbaarheid van alternatieve vormen van hernieuwbare energie in relatie tot het duurzaamheidskader voor biomassa) is het uitgangspunt van het huidige Nederlands beleid (Ministerie van EZK, 2022) dat duurzame biomassa zo beperkt en hoogwaardig mogelijk moet worden ingezet. Plantaardige en dierlijke materialen worden eerst gebruikt om producten van te maken zoals bouw materiaal, textiel of bioplastics, daarna eventueel als brandstof. Biogascentrales In biogascentrales wordt biogas of biomethaan (groengas, oftewel opgewerkt biogas) gebruikt als brandstofbron om warmte te produceren en elektriciteit op te wekken. In theorie kan de CO₂ in de verbrandingsgassen worden afgevangen, maar deze route is minder aantrekkelijk dan de afvang bij biomassacentrales - de kosten liggen (met huidige techniek) aanzienlijk hoger omdat de CO₂-concentratie in de verbrandingsgassen relatief laag is (ca. 1/4de van die van kolencentrales) (PBL, 2018) én de typische schaal van de biogascentrales (vaak bio-wkk's) aanzienlijk kleiner is. (NB. Bij de productie van het gas via vergisting of vergassing kan ook BECCS worden toegepast, zie hieronder) Hogetemperatuurwarmte uit biomassa of biogas in de industrie Veel industriële processen vragen hogetemperatuurwarmte, waarin op dit moment grotendeels wordt voorzien door gasketels. Een van de opties om die processen te verduurzamen is vervanging van deze gasketels door biomassaketels. De CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van de biomassa kan vervolgens worden afgevangen. Afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) CO₂-afvang kan ook worden toegepast op AVI's. In hoeverre deze CO₂ biogeen is, en dus zou kunnen worden toegepast voor negatieve emissies, hangt af van het aandeel biogeen afval. Het is te verwachten dat dit nu al hoge aandeel biogeen relatief nog kan toenemen, naarmate er steeds meer biobased plastics uit worden verwijderd. Echter, het is ook de inzet dat in het kader van de biobased economy en circulaire economie steeds minder biogene reststromen in een AVI terechtkomen, maar te recyclen zijn. De voortgang van deze transitie in de tijd zal dus bepalend zijn voor hoe lang deze vorm van BECCS een belangrijke rol kan spelen. Staalindustrie (i.c.m. het Hisarna-proces en biomassa) Afvang van biogene CO₂ uit de staalindustrie is mogelijk als het huidige productieproces wordt vervangen door het Hisarna-proces, én de kolen vervangen worden door biomassa. In dat geval komt er zuivere biogene CO₂ vrij die direct kan worden ingezet voor negatieve emissies. Het is echter zeker geen uitgemaakte zaak dat het Hisarna-proces grootschalig zal worden toegepast in Nederland en/of de EU, er zijn ook andere technische mogelijkheden voor verduurzaming van staalproductie, zoals elektrificatie via het DRI-proces, waar TATA Steel Nederland nu volledig op in lijkt te zetten. De beschikbaarheid van voldoende duurzame biomassa is daarnaast ook een knelpunt. Omdat het in de factsheets om het potentieel gaat en er in de scenario's gevarieerd wordt met de rol van bepaalde technieken, is deze technologie toch opgenomen. Vergassing van biomassa Bij vergassing van biomassa wordt vaste droge biomassa via thermische processen omgezet naar waterstof, koolstofhoudende energiedragers en grondstoffen voor de chemische industrie. Hierbij komt een zuivere stroom CO₂-

vrij, het aandeel van de koolstof die in zo vrijkomt is afhankelijk van het eindproduct ((Fuss, S. et al., 2021) geeft bijv. 99% bij waterstofproductie, 48% bij productie van biokerosine). Er zijn verschillende technologieën voor biomassavergassing in ontwikkeling. Naast vergassing van vaste droge biomassa, vindt superkritisch vergassen juist op basis van natte stromen plaats, waar ook in Nederland veel aandacht voor is, maar de ontwikkelingen gaan moeizaam. Deels zijn er, op beperkte schaal, al installaties in Nederland die op basis van vergassing syngas produceren. De verdere technologische doorontwikkeling, kosten en ook weer de beschikbaarheid van voldoende duurzame biomassa zullen bepalend zijn voor het potentieel van de verschillende vergassings-technologieën.

Vergisting van biomassa

Bij vergisting van biomassa (bijvoorbeeld mestvergisting) komt biogene CO₂ vrij die evt. zou kunnen worden afgevangen voor negatieve emissies. Vanwege de relatief kleine schaal van vergisters zijn de transportkosten van de CO₂ naar een centraal CO₂-netwerk of een andere eindtoepassing echter relatief hoog, in vergelijking met de andere opties. (PBL, 2018) acht het realistisch potentieel van deze route daarom voor Nederland nihil, tenzij er in de toekomst gekozen zou worden voor grote centrale (mest)vergisters.

Overige industriële processen o.b.v. biomassa

Bij industriële productieketens kan de CO₂ ook vrijkomen bij andere processen dan hierboven zijn genoemd. De CO₂-concentratie kan daarbij variëren van vrijwel 100% tot sterk verdund. Voor negatieve emissies komt alleen afvang in beeld van processen met biomassa als grondstof, en stromen met hoge concentraties CO₂. Ook bio-ethanolproductie en bioraffinage, een proces waarbij veelal houtachtige biomassastromen worden verwerkt tot hoogwaardige producten, lenen zich in potentie voor CO₂-afvang.

Een deel van de huidige industrie maakt al gebruik van biogene grondstoffen (bijv. ethanolproductie, voedselproductie, cosmetica). Dit aandeel neemt naar verwachting toe de komende decennia. Het vervangen van fossiele grondstoffen door biomassa (met de nodige aanpassingen aan de processen) is een maatregel die leidt tot zowel CO₂-reductie in de industrie als bij de eindgebruikers van de producten, en bijdraagt aan de transitie naar een circulaire economie.

Bij alle routes wordt de opgevangen biogene CO₂ vervolgens gecomprimeerd en opgeslagen (CCS).

Afbakening keten en netto-negatief (welke definitie, wat wordt er wel en niet meegenomen)

Als negatieve emissies tellen alleen mee de CO₂ van biogene oorsprong die in deze processen wordt afgevangen en geologisch wordt opgeslagen (CCS).

Producten die worden geproduceerd met deze processen, zoals biobrandstoffen, bioplastics, etc. bevatten ook biogene koolstof. Bij biobrandstoffen wordt die al snel weer uitgestoten als CO₂ bij het gebruik (die komt vrij bij verbranding). Bij bioplastics is het doel het biogene materiaal door middel van recycling, zolang mogelijk in de kringloop te houden. Biobased kunststoffen worden besproken in een andere factsheet.

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid

CO₂-afvang is een vergevorderde techniek die zowel bij bestaande als nieuwe fabrieken gebruikt kan worden. De meest gebruikte manier van afvang gebeurt met chemische oplosmiddelen. Deze zijn alom beschikbaar. Andere onderdelen van de techniek zijn gangbare onderdelen in industriële processen.

De schaarse beschikbaarheid van duurzame biomassa kan een limiterende factor zijn bij al deze routes. Zie Paragraaf 3.5.1.

Zoals hierboven al kort aangegeven zijn het Hisarna-proces en vergassing van biomassa nog in ontwikkeling. Van beide zijn er een aantal demonstratieprojecten in bedrijf.

Daarnaast hangt de beschikbaarheid van de bestaande technologieën zoals biomassacentrales, bioketels voor hogetemperatuurwarmte of bio-CO₂-afvang in de staalindustrie af van de toekomstige ontwikkelingen in de energievoorziening en industrie. Deze worden deels gedreven door beleid, deels door de markt. Zo heeft het Kabinet besloten dat er geen subsidies meer worden verleend aan nieuwe biomassacentrales, waardoor het

langetermijn-BECCS-potentieel via deze route nihil wordt tenzij dit beleid wordt aangepast. En of Tata Steel op termijn overschakelt op het Hisarna-proces o.b.v. biomassa of volledig inzet op waterstof, zoals nu de lijn is, is een besluit dat het bedrijf zelf zal nemen. Zo zijn er meer onzekerheden die sterk bepalend kunnen zijn voor het toekomstige potentiële aanbod van BECCS.

TRL + toelichting

De TRL van BECCS o.b.v. biomassacentrales, biogascentrales, hoge temperatuurwarmte uit biomassa en AVI's is 8 (o.b.v. (PBL, 2018) en een scan van actuele literatuur). Biomassavergassing heeft een wat lagere TRL, TNO schat 6 tot 7 (afhankelijk van de techniek) (TNO, 2022b), Hisarna komt uit op een TRL van 6-8. Ethanolproductie is TRL 9.

CO₂-afvang en -opslag:

TNO kent in 2020 een TRL van 9 toe aan CO₂-afvang voor zowel gasvormige als vaste brandstoffen. BECCS berust op dezelfde techniek als CO₂-afvang, alleen is de invoer anders. Mogelijk is hierdoor de samenstelling van het rookgas verschillend (waardoor er kleine verschillen zijn in de zuivering hiervan, m.b.v. stoffilters en het verwijderen van NO_x en zwavel), maar deze veranderen het TRL niet.

Energieverbruik

CCS kan een energie-intensief proces zijn, maar dit hangt af van de CO₂-concentratie in de gassen en de manier waarop CO₂ gezuiverd wordt. Door gebruik van evt. beschikbare restwarmte en integratie in het proces kan het energiegebruik worden gereduceerd.

Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik zit voornamelijk in het produceren van biomassa en is afhankelijk van het type biomassa dat wordt gebruikt (reststromen, suikers, zetmeel, hout of energiegewassen). Reststromen kunnen zonder extra ruimtegebruik worden ingezet, voor landbouwproducten geeft (Fuss, S. et al., 2021) een indicatie:

- Mais 0,1-0,25 ha/tCO₂.
- Miscanthus 0,05-0,1 ha/tCO₂ (onderste range: biogas met CCS; bovenste range biogeen waterstof met CCS).

Daarnaast is ruimte nodig voor CO₂-afvanginstallaties, compressorstations en ondergrondse leidingen. Deels zou dit via bestaande aardgasleidingen kunnen.

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX/CO₂-kosten per CO₂-eq.

(PBL, 2018) geeft de volgende meerkosten voor CO₂-afvang bij de verschillende verbrandingsroutes, in euro per ton CO₂:

Kolencentrales naar biomassa met CCS	40-60
Biogascentrales	50-100
Staalindustrie Hisarna-proces	0
Hogetemperatuurwarmte	60-110
Biogeen deel AVI's	60-80

Bij de overige routes komt er al zuivere CO₂ vrij, de meerkosten van CO₂-afvang zijn dan nihil.

Voor kosten voor CO₂-transport en -opslag onder zee geeft PBL de volgende range, in euro per ton CO₂:

CO ₂ -transport per 250 km bij >10 Mt/jr	1,5-3,5
CO ₂ -opslag onder zee	6-10

NB. De kosten die in een aantal andere bronnen uit de recente literatuur worden gegeven, liggen in lijn met deze cijfers (zie hieronder). De kostenschattingen zijn echter wel aanzienlijk lager dan wat is opgenomen als basisbedragen voor de SDE++ voor deze technieken. Een diepgaand onderzoek naar de onderbouwing van deze cijfers kon echter niet worden uitgevoerd binnen de scope van deze studie.

CO₂-afvang bij bio-ethanolproductie of bioraffinage is niet opgenomen in de PBL-studie (er is op dit moment geen productie van bio-ethanol in Nederland, zie [CBS](#)). Waar zuivere CO₂ vrijkomt (de pre-combustion-routes) zijn de kosten van afvang nihil. De kosten voor compressie, transport en ondergrondse opslag hangen af van de schaal-grootte (i.e. de CO₂-volumes die vrijkomen op een locatie, of in een cluster van fabrieken) en transportafstand.

Ter vergelijking, (Fuss, S. et al., 2018) vindt ook een flinke range in de kosten van BECCS, maar concludeert op basis van een literatuurstudie dat de meerkosten van CO₂-afvang en -opslag grofweg variëren tussen US\$ 15-400 per ton CO₂. De cijfers voor verschillende routes, in USD per ton CO₂:

- Verbranding: 88-288
- Ethanol: 20-175
- Pulp en papier: 20-70
- Biomassavergassing: 30-76

Deze kostencijfers zijn gebaseerd op mondiale literatuur, zonder verder specificering voor Europa of Nederland. BECCS in de pulp en papier industrie heeft voor Nederland vermoedelijk weinig potentieel, maar is in Europa wellicht wel interessant voor Scandinavische landen met papierindustrie.

In het latere rapport (Fuss, S. et al., 2021) geven zij alleen globale kostenindicaties, die in lijn zijn met de PBL-cijfers: bio-CO₂-afvang bij bestaande installaties komt onder de 100 €/ton uit, incl. transport en geologische opslag lopen de kosten op tot 135 €/ton. De kosten van technieken met een lagere TRL zijn aanzienlijk hoger. Voor 2050 geven zij een globale range van 100-200 USD/ton CO₂, met uitschieters tussen 25 en 1.000 USD/ton.

(Smith, S. M. & et al., 2023) rapporteert kosten voor BECCS tussen 15-400 USD/ton CO₂, bij grootschalige toepassing. Zij geven geen specifieke cijfers voor de verschillende varianten.

Ook het CPB (CPB, 2017) schatte in 2017 de kosten voor BECCS met een biomassacentrale in Europa in op 115 €/tCO₂, voor 2050.

Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel

Een belangrijke kostenfactor bij al deze routes zijn de kosten van de biomassa. De toekomstige ontwikkeling van die kosten zijn onzeker, maar het is niet te verwachten dat zij sterk zullen dalen. De vraag naar duurzame biomassa zal toenemen en de beschikbare hoeveelheid zal beperkt blijven.

De kosten van CO₂-afvang uit verbrandingsgassen zijn sterk afhankelijk van de schaalgrootte van de installatie (Global CCS Institute, 2021). Schaalvergroting kan de kosten verder drukken. Daarnaast nemen de kosten van alle onderdelen van de CCS-keten af bij verdere uitrol van de technologie, door technologische ontwikkelingen en 'learning by doing'.

De kostenschattingen die hierboven zijn gegeven zijn schattingen voor de toekomst en houden hier ook rekening mee, al is uit de literatuur niet direct op te maken wat de aannames zijn t.a.v. kostenreducties over de tijd.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader

Belangrijke randvoorwaarden hebben betrekking op de duurzaamheid en dat zit hem vooral in het verkrijgen van biomassa en de duurzame herkomst, productie en landgebruik. Bij gebruik van biomassa die niet aan de biomassa duurzaamheidseisen voldoet kan de daadwerkelijke CO₂-emissiereductie beperkt zijn, en kunnen er ook nadelige effecten optreden voor de vruchtbaarheid van de grond, de biodiversiteit en koolstofopslag in bossen en grond. In Nederland zullen vanaf 2025 duurzaamheidscriteria voor alle gereguleerde en gesubsidieerde stromen van biomassa gaan gelden.

Bij beperkte beschikbaarheid van duurzame biomassa concurreren een aantal van de BECCS-routes die gebaseerd zijn op verbranding (bio-energiecentrales, biogas, hoge temperatuurwarmte) met de inzet van biomassa voor directe CO₂-reductie. Het potentieel van BECCS via AVI's hangt uiteraard af van de hoeveelheid biogeen afval dat wordt verbrand - wat ook weer afhangt van het aandeel biomassa in de feedstock van de industrie.

Om richting te geven aan waar de beschikbare biomassa het beste kan worden ingezet heeft de rijksoverheid een Duurzaamheidskader Biogrondstoffen ontwikkeld (Ministerie van I&W, 2020), in 2022 is dit vervolgens verder uitgewerkt in een brief aan de Kamer over de Beleidsinzet biogrondstoffen (Ministerie van EZK & Ministerie van I&W, 2022, PBL, 2018). Deze beleidskaders hebben als uitgangspunt dat duurzame biomassa zo beperkt en hoogwaardig mogelijk moet worden ingezet, uitgaande van de beperkte beschikbaarheid van biomassa.



Biomassagebruik voor negatieve emissies is niet expliciet opgenomen in dit kader, maar de processen waarbij de biogene CO ₂ kan worden afgevangen (bio-energie, biochemie, etc.) wel.
Koppelkansen
BECCS kan gebruikt worden bij energiecentrales en industriële processen die als grondstof vaste biomassa, biogas/biomethaan of bioafval gebruiken. Hierbij kan direct worden aangehaakt bij ontwikkelingen die toch nodig zijn, uit oogpunt van CO₂-reductie en de transitie naar een circulaire economie. Door BECCS toe te voegen aan deze CO₂-reductiemaatregelen kan de klimaatwinst van de inzet van de biomassa als vervanger van fossiele grondstoffen worden vergroot. Als negatieve emissies in de toekomst ook beleidsmatig worden gestimuleerd kan dit een positief effect hebben op de business case voor de bedrijven. BECCS kan gebruikmaken van dezelfde CO₂-infrastructuur die nodig is voor fossiele CCS.
Negatieve neveneffecten
Biomassagebruik kan negatieve duurzaamheidsgevolgen hebben, zie hierboven. CO₂-afvang en compressie kost energie. De neveneffecten daarvan zullen echter beperkt zijn als die energie duurzaam is opgewerkt. De negatieve neveneffecten van het toevoegen van CO₂-afvang-installaties op bestaande installaties is daarom beperkt. De diverse BECCS-routes die gebaseerd zijn op verbranding van biomassa leiden tot uitstoot van luchtvervuilende stoffen, waaronder stikstof en fijn stof. Dit komt echter niet direct door de CO₂-afvang en -opslag, het hoofddoel van de verbranding is de opwekking van elektriciteit en warmte. Indien nodig kan een extra rookgasreiniging worden toegepast om de uitstoot van eventuele luchtvervuilende stoffen te vermijden. BECCS concurreert met andere toepassingen om de biogene koolstof: als biograndstoffen grootschalig worden ingezet voor vergassing en verbranding, en de biogene CO₂ geologisch wordt opgeslagen, is er minder biogene koolstof beschikbaar voor materiaal- en chemietoepassingen. De verwachting is dat de vraag naar duurzame koolstof vanuit de industrie de komende decennia sterk zal toenemen, als vervanger voor fossiele koolstof. Daarmee kan BECCS een negatief effecten hebben op de CO₂-reductie van de industrie, en de transitie naar een circulaire economie.
Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing
Economisch gezien zijn de meest kansrijke BECCS-varianten: - De processen waarbij biogene CO₂ in hoge concentraties vrijkomt. - Relatief grootschalige processen, met grote CO₂-stromen. - Processen op locaties op beperkte afstand tot de CO₂-opslaglocaties en al bestaande (of geplande) CCS-infrastructuur.
Knelpunten
- Beschikbaarheid van voldoende duurzame biomassa (zie Paragraaf 3.5.1). - CO₂-infrastructuur voor CCS is nog niet aanwezig. De aanleg hiervan zal ook voor emissies zorgen. - Beschikbaarheid van opslagcapaciteit (zie Hoofdstuk 4). - Behoeftte aan biogene koolstof als grondstof voor chemie/materialen.

Kwantificering van potentieel Nederland

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting (NL/Europees)

BECCS wordt op dit moment nog niet toegepast.

Maximum technisch potentieel

De verschillende BECCS-varianten worden niet zozeer ontwikkeld met als hoofddoel negatieve emissies maar worden vooral gedreven door klimaatbeleid (d.w.z. beleid gericht op CO₂-reductie en vermindering van fossiele grondstoffen en energie), kostenoverwegingen en marktontwikkelingen. Het technisch potentieel kan dan worden gezien als een inschatting van het meest optimistische scenario voor al deze routes, én een optimistische inschatting van de realisatie van CO₂-afvang en -opslag bij de hiervoor geschikte processen.

(PBL, 2018) heeft hier de volgende inschatting van gemaakt, voor Nederland, in Mton CO₂ per jaar:

Kolencentrales naar biomassa met CCS	23
Biogascentrales	6-8
Hogetemperatuurwarmte	7-14
Biogeen deel AVI's	4,9
Staalindustrie Hlsarna-proces o.b.v. biomassa	4,8
Vergassing i.c.m. productie biobrandstof	45-55
Totaal technisch potentieel BECCS	62-79
Waarvan bio-energie met CCS	12-19
En waarvan biochemie met CCS	50-60

Dit is een eerste-orde-schatting, zonder rekening te houden met onderlinge afhankelijkheid tussen de opties en grenzen aan de beschikbaarheid van duurzame biomassa.

De aannames achter deze berekeningen lijken ons nog redelijk, we zien op dit moment geen reden om deze cijfers te actualiseren. Bij de kolencentrales wordt uitgegaan van BECCS in 4 centrales die ook nu nog in bedrijf zijn: de centrale in Geertruidenberg, 2 op de Maasvlakte en 1 in de Eemshaven. Er is ook wel een theoretisch potentieel van BECCS bij bioethanol productie, maar zonder concrete plannen in de industrie is dat potentieel lastig in te schatten.

Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)

Het realistisch potentieel is aanzienlijk lager dan dit technische potentieel. Daarbij wordt rekening gehouden met de huidige verwachte ontwikkelingen in de markt, en van de verschillende bio-energie-routes, de AVI's, Hlsarna, etc. Maar de onzekerheden daarin zijn groot, mede door onzekerheden in het toekomstig klimaat- en energiebeleid.

Bio-energie

Biomassacentrales

Zo is het plan om alle kolencentrales in Nederland uiterlijk in 2030 te sluiten en worden er geen nieuwe subsidiebeschikkingen voor elektriciteitsproductie in biomassacentrales afgegeven. Het realistisch potentieel voor negatieve emissies in biomassacentrales is dan nihil, bij huidig beleid.

We zien echter wel dat biomassacentrales met BECCS wel degelijk een rol spelen in een aantal recente scenario studies naar een klimaatneutrale energievoorziening, bijvoorbeeld in (Werkgroep CO₂-vrij elektriciteitssysteem 2035, 2022) en (Aurora Energy Research, 2021). De laatste concludeert in een van de scenario's dat BECCS via deze route al relatief snel (voor 2030) kan worden gerealiseerd, via ombouw van een kolencentrale naar biomassa, en retrofit van CO₂-afvang.

Biogascentrales zouden een belangrijke rol kunnen spelen in het toekomstig energiesysteem, om perioden te overbruggen als er weinig opwekking is door wind en zon. De kosten van CO₂-afvang zijn relatief hoog maar onder de huidige ETS-prijs (50-100 €/ton, zie hierboven). Onder gunstige beleids- en marktomstandigheden zou een deel van het technische potentieel kunnen worden gerealiseerd. Voor hogetemperatuurwarmte en AVI's sluiten we ons aan bij de inschattingen van (PBL, 2018).

Een overzicht van het geschatte realistische potentieel aan negatieve emissies, incl. de benodigde biomassa daarvoor (o.b.v. omrekenfactoren PBL) staan in volgende tabel. De biomassa voor het biogene afval in AVI's tellen we hier niet mee, die biomassa was grondstof voor de productie van de materialen die worden verbrand, er is geen nieuwe biomassa nodig. Daarnaast is de vraag of in het kader van de biobased economy en circulariteit er nog zoveel AVI-capaciteit zal zijn in 2050, deze schatting van het potentieel gaat ervan uit dat er ook in de toekomst niet alle biogene koolstof volledig kan worden hergebruikt. Gezien de grote onzekerheid over de toekomst van de biomassacentrales is het lastig om hier een concreet potentieel voor te geven. In de verschillende tijdspaden (Hoofdstuk 5) variëren we de inzet van deze route.

	Realistisch potentieel (Mton CO ₂)		Biomassa nodig (PJ)	
	2030	2050	2030	2050
Biomassacentrales met CCS	>0	>0	>0	>0
Biogascentrales met CCS	0	4	0	132
Hogetemperatuurwarmte met CCS	2,5	7,4	25	74
Biogeen deel AVI's met CCS	1,4	4,8	0	0
Totaal bio-energie met CCS	>3,9	>16,2	>25	>206

Biochemie met CCS

Staalproductie o.b.v. biomassa

Tata Steel heeft op een proeffabriek voor het Hisarna-proces in bedrijf in IJmuiden, maar die draait op kolen en niet op biomassa. Andere staalbedrijven zijn bezig met de ontwikkeling van alternatieve duurzame productie-methoden zoals DRI. PBL schat het realistisch potentieel in op ca. 0,7 Mton/jaar voor 2030 en 4,8 Mton voor 2050. Om dit potentieel te realiseren is ca. 6 PJ biomassa nodig in 2030, en 43 PJ in 2050.

Deze inschatting is wel zeer onzeker, gezien de recente aandacht in de EU voor DRI (ook een kansrijke technologie die duurzame elektriciteit i.p.v. biomassa gebruikt), de locatie van Tata Steel dicht bij de offshore-windparken, en de onzekerheid over of Tata Steel ook op de lange termijn in Nederland blijft of niet.

Vergassing

Omdat de technologische ontwikkeling van deze route nog minder ver gevorderd is dan van de andere technologieën, én vergassing van biomassa grote hoeveelheden duurzame biomassa nodig heeft is het lastig om op dit moment een goede inschatting te maken van het realistisch potentieel van deze BECCS-variant.

PBL schat voor 2030 in dat er 2,3 Mton CO₂ zou kunnen worden afgevangen en opgeslagen, maar waagt zich niet aan een voorspelling voor de lange termijn. De potentiële vraag naar biobrandstoffen uit vergassing kan groot zijn, de biomassabeschikbaarheid en kosten t.o.v. andere duurzame alternatieven zal bepalend zijn voor de daadwerkelijke realisatie van de productie. In deze studie gaan we uit van ca. 6 Mton realistisch potentieel voor 2050, als wat voorzichtige schatting.

	Realistisch potentieel (Mton CO ₂)		Biomassa nodig (PJ)	
	2030	2050	2030	2050
Staalindustrie Hisarna o.b.v. biomassa	0,7	4,8	6	43
Vergassing van biomassa i.c.m. productie biobrandstof	2,3	6	46	120
Totaal biochemie met CCS	3,0	10,8	52	163

Belangrijkste onzekerheden

Een aantal zijn hierboven al benoemd: de ontwikkelingen in de energievoorziening en staalindustrie lijken daarbij het belangrijkste. De beschikbaarheid van duurzame biomassa voor deze routes speelt daarbij een belangrijke rol, maar ook de kosten en beschikbaarheid van alternatieve energieproductie, de vraag of Tata Steel op termijn overstapt op Hisarna o.b.v. biomassa of op een ander alternatief, en of de staalfabriek überhaupt in Nederland blijft of niet.

Daarnaast is uiteraard het beleidskader nog onzeker maar van groot belang voor de realisatie van het potentieel.

Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Opslag in lege olie- of gasvelden is een bekende vorm van opslag, waardoor de risico's van lekkages van CO ₂ klein zijn en goed kunnen worden ingeschat en gemonitord. (Alcade, J. et al., 2018) berekende dat realistisch gezien goed geregleerde opslag in regio's met matige putdichtheden meer dan 98% van de geïnjecteerde CO ₂ gedurende 10.000 jaar in de ondergrond kunnen vasthouden.

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
In Europa is BECCS ook mogelijk in de verschillende processen die hierboven zijn beschreven, zoals verbranding van biomassa in elektriciteitscentrales, bij vergisting van biomassa, de productie van biobrandstoffen, afvalverbranding en de biochemie.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
(Rosa, L. et al., 2021) concluderen dat 5% van de Europese uitstoot van 2018, of ongeveer 200 miljoen ton CO ₂ per jaar, zou kunnen worden verminderd met biogene CO ₂ -afvang van BECCS, o.b.v. biomassa uit Europa zelf (excl. import). Twee-derde van dit potentieel is afkomstig van bestaande puntbronnen (pulp en papier, mee gestookte biomassa, waste-to-energy en afvalwaterzuiveringsinstallaties), terwijl een derde afkomstig is van gedistribueerde bronnen (gewasresten, organisch voedselafval en dierlijke mest). Volgens (Rosa, L. et al., 2021) bevindt een dergelijk potentieel zich aan de ondergrens van de verwachte CO ₂ -afvangbehoeften voor Europa. Vanuit geopolitiek perspectief bereiken of overtreffen slechts enkele Europese landen hun negatieve emissie behoeften via BECCS. Die landen die niet in staat zullen zijn om koolstofneutraliteit te bereiken met binnenlandse biomassa-bronnen, zullen waarschijnlijk gebruik moeten maken van andere CO ₂ -afvangstrategieën of biomassa uit het buitenland moeten importeren.
Belangrijkste onzekerheden
De onzekerheden op Europees niveau zijn vergelijkbaar met die in Nederland. Biomassaproductie binnen Europa is beperkt mogelijk doordat reststromen beperkt zijn en landbouwgrond schaars is. Daarnaast bestaat er mogelijk spanning met andere duurzaamheidsdoelen, zoals biodiversiteit en koolstofopslag in bodems, en komen er broeikasgassen vrij bij de teelt van biomassa wat de klimaatwinst beperkt. Het potentieel van de BECCS-varianten zijn afhankelijk van het aandeel bio-energie in de energiemix, en het aandeel biomassa in de grondstoffen voor de industrie. Beide zijn onzeker, en afhankelijk van de kostenontwikkeling van biomassa en van de duurzame alternatieven. Alles BECCS-varianten zijn bovendien afhankelijk van de in de toekomst beschikbare CO ₂ -infrastructuur en opslagcapaciteit. Omdat de kosten oplopen met de transportafstanden is BECCS met name aantrekkelijk bij beperktere afstanden en grotere CO ₂ -volumes. EU-breed zijn de afstanden van emissiebronnen en opslagplaatsen zijn nogal ongunstig verdeeld (Rosa, L. et al., 2021).
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Opslag in lege olie- of gasvelden is een bekende vorm van opslag, waardoor de risico's van lekkages van CO ₂ goed kunnen worden ingeschat en gemonitord. (Alcade, J. et al., 2018) berekende dat realistisch gezien goed geregleerde opslag in regio's met matige putdichtheden meer dan 98% van de geïnjecteerde CO ₂ gedurende 10.000 jaar in de ondergrond kunnen vasthouden.

Gebruikte referenties
– (TNO, 2020a) – (TNO, 2020b) – (Fuss, S. et al., 2018) – (Fuss, S. et al., 2021) – (Ministerie van EZK, 2022) – (PBL, 2018) – (Fajardy, M. & Mac Dowell, N., 2017) – (EC & Ricardo Energy & Environment, 2020) – https://biomassmagazine.com/articles/19312/nrel-study-highlights-emissions-reduction-potential-of-becss – (Global CCS Institute, 2019) – (Rosa, L. et al., 2021) – (CPB, 2017) – (PBL, 2022) – (Global CCS Institute, 2021) – (PBL, 2022) – (Alcade, J. et al., 2018) – (EBN & Gasunie, 2018) – (Werkgroep CO₂-vrij elektriciteitssysteem 2035, 2022) – (Aurora Energy Research, 2021)

A.3 Koolstofopslag in de bodem

Koolstof uit dood plantmateriaal wordt opgenomen in de bodem. Hierdoor wordt het organische stofgehalte van minerale landbouwbodems verhoogd. In de gemiddelde Nederlandse bodem zit in de bovenste 30 cm ongeveer 11 kg koolstof per m², wat optelt tot ca. 280 miljoen ton koolstof voor heel Nederland (PBL, 2018). Er zijn verschillende maatregelen die kunnen bijdragen aan het vergroten van deze koolstofvoorraad in de landbouwbodem door opname en opslag van additionele koolstof uit plantaardige biomassa te bevorderen. Deze maatregelen gaan over aanpassingen in het beheer van landbouwgrond. Het verbeterde beheer moet wel permanent worden uitgevoerd, omdat de koolstof anders weer vrijkomt in de vorm van CO₂-emissies. Koolstofopslag in de bodem heet in het Engels ‘soil carbon sequestration (SCS)’ of ‘soil organic carbon sequestration (SOC sequestration)’.

Beschrijving van de techniek

Koolstofbron
De koolstofbron is plantaardig restmateriaal van de landbouw. De meeste koolstof in de bodem is geproduceerd door dood plantmateriaal en de uitwerpselen van plantetende organismen. Micro-organismen breken plantenresten af en stoten onder andere CO ₂ uit. Omdat organisch materiaal in de bodem langzamer afbreekt dan dat nieuw materiaal wordt toegevoegd, wordt koolstof afkomstig van CO ₂ opgeslagen in de bodem (WUR, 2023b).
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
Planten vangen de CO ₂ af en zetten deze om in boven- en ondergrondse biomassa. De koolstof in het organisch materiaal wordt via natuurlijke processen opgenomen in de bodem.
Opslagmedium
De bovenlaag van minerale en organische landbouwbodems.
Beschrijving van verschillende varianten
Er kan onderscheid worden gemaakt in minerale landbouwbodems voor akkerland en voor veehouderij (grasland), en anderzijds organische bodems. Koolstofopslag in minerale landbouwbodems kan worden bevorderd met verschillende aanpassingen in landbouwbeheer. De belangrijkste aanpassingen zijn (PBL, 2018, Vellinga, T. V. et al., 2018):

- het beperken of niet uitvoeren van kerende grondbewerking waardoor het organisch materiaal minder blootgesteld wordt aan oxidatie;
 - zoveel mogelijk gebruikmaken van vanggewassen of stikstofbindende gewassen die vervolgens worden ondergeploegd;
 - het verbeteren van de gewasrotatie;
 - het zoveel mogelijk achterlaten van gewasresten;
 - het telen van gewassen die meer stoppel, wortel en gewasresten achterlaten (zoals granen) of het telen van een groenbemester;
 - de aanvoer en op het land brengen van organische stof zoals compost en mest;
 - beter akkerrandenbeheer;
 - niet of minder frequent ‘scheuren’ van het grasland waardoor minder organisch materiaal verloren gaat.
- Op grasland (dat in West-Europa vaak onder landbouwgrond valt) kan koolstofopslag in de bodem worden bereikt door (Vellinga, T. V. et al., 2018):
- niet scheuren van blijvend grasland voor een tussenteelt van een gewas voor een periode van één of twee jaar;
 - zoveel mogelijk beperken van herinzaai van grasland en dit vervangen door doorzaai van gras;
 - beweiding van grasland (dit wordt in sommige studies genoemd, maar de effecten koolstofopslag in de bodem zijn niet duidelijk);
 - de aanvoer van organische stof op peil houden (al is vaak al sprake van een hoge aanvoer uit stoppel, wortel en gewasresten).

Opslag van CO₂ in **organische bodems** heeft te maken met het grondwaterpeil. Ontwatering in veenweidegebieden kan leiden tot een hoge uitstoot van broeikasgassen. Andersom kan de aangroei van veen leiden tot negatieve emissies. Vastlegging van koolstof in bestaande veengronden is onder landbouwkundige omstandigheden niet mogelijk (Vellinga, T. V. et al., 2018).

Afbakening keten en netto-negatief

Er is alleen sprake van negatieve emissies als de aanpassingen in het beheer van de grondgebieden leiden tot een permanente netto-opslag van koolstof in de bodem, wat een langdurige, blijvende uitvoering van de nieuwe landbouwbeheermaatregelen vergt.

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid

De beschikbaarheid van de techniek van koolstofopslag in de bodem hangt af van de beschikbaarheid van landbouwreststromen. De meeste landbouwreststromen in Nederland hebben al een bestemming, ook de gewasresten die overblijven na de oogst. Een deel hiervan wordt al achtergelaten op het land om de vruchtbaarheid van het land te verbeteren. Ook wordt een deel van andere biomassa-reststromen zoals runder- en varkensmest en compost al ingezet als meststof/bodemverbeteraar. De hoeveelheid organische reststromen die op het land wordt gebracht zou kunnen worden vergroot om koolstofopslag in de bodem te vergroten, maar dan moeten deze stromen wel worden ‘vrijgespeeld’ uit de markt.

TRL + toelichting

De TRL (technology readiness level) van koolstofopslag in de bodem is 8 tot 9 (de technologie is voltooid en bewezen in operationele omgevingen). Het herstel van veenweidegebied heeft dezelfde TRL (Smith, S. M. & et al., 2023). Aan de andere kant zijn er nog weinig projecten die gericht zijn op koolstofopslag in de bodem (Cobo, S. et al., 2023).

Energieverbruik

De landbouwbeheermaatregelen kennen een laag energieverbruik. In vergelijking met het huidige beheer van landbouwgrond wordt het beheer anders uitgevoerd, maar dat zal hooguit tot een beperkte stijging van het energiegebruik leiden. Het is mogelijk dat in het nieuwe landbouwgrondbeheer bepaalde activiteiten zelfs minder worden ontplooid (bijv. beperking van kerende grondbewerking), wat tot een effectieve afname van het energiegebruik kan leiden.

Ruimtegebruik

Het huidige landbouwareaal wordt gebruikt voor koolstofopslag in de bodem; er is geen sprake van herbestemming van land. Er is dus geen additioneel ruimtegebruik ten opzichte van de huidige landbouwpraktijk.

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.

Er zijn geen kostenschattingen van de afzonderlijke maatregelen ter bevordering van koolstofopslag in de bodem, maar de kosten van dit soort maatregelen zijn in eerder werk van PBL geschat op € 40 à 50 per ton CO₂. Soms zijn de kosten nog lager, bijv. in het geval van biologische landbouwbedrijven die zomermaaisel van natuurterreinen gratis krijgen en alleen de kosten hebben voor het onderploegen van dit maaisel (PBL, 2018). Om deze reden schat Royal HaskoningDHV (2022) de kostprijs in op 0 tot 50 €/tCO₂. Een veel ruimere kostenschatting wordt gemaakt door (Smith, S. M. & et al., 2023) met -45 tot 100 \$/tCO₂ (-42 tot 93 €/tCO₂). Volgens (Roe, S. et al., 2021) is ca. 30% van het technisch potentieel van aangroei van veen in Europese veenweidegebieden te realiseren tegen kosten onder de 100 USD per ton CO₂-eq., waarmee veengroei kan worden beschouwd als kosteneffectieve maatregel (European Parliament, 2022b).

Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel

Omdat er voor koolstofopslag in de bodem geen gebruik wordt gemaakt van nieuwe of geavanceerde technologie en het energiegebruik beperkt is, wordt het kostenreductiepotentieel vooral bepaald door de doorwerking van leereffecten. Maar wanneer de nodige ervaring wordt opgedaan met verschillende landbeheermaatregelen, zal duidelijker worden wat de meest kosteneffectieve maatregelen zijn om negatieve emissies te bereiken en hoe deze maatregelen efficiënt kunnen worden uitgevoerd, waardoor de kosten per vermeden ton CO₂ waarschijnlijk steeds vaker in het laagste deel van het bovengenoemde kostenspectrum zullen komen te liggen.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader

Veel landbouwbeheermaatregelen ter bevordering van koolstof hebben mogelijk een positieve milieu-impact (zie 'koppelkansen'), maar bij de aanvoer en op het land brengen van biomassa moet erop worden gelet dat dit duurzame biomassa is (d.w.z., dat er geen negatieve milieu-effecten plaatsvinden eerder in de leveringsketen) en dat er geen stoffen in zitten die schadelijk zijn voor het lokale milieu. Zo is er sinds 1986 de Europese richtlijn 86/278/EEG, waarin voorschriften staan voor het gebruik van rioolwaterzuiveringsslib als meststof in de landbouw. Deze richtlijn moet voorkomen dat bepaalde grenswaarden worden overschreden voor de toegestane concentratie in de bodem van zeven metalen die bij langjarige overbemesting giftig kunnen zijn voor planten en mensen (European Union, 1986).

Koppelkansen

Er zijn meerdere potentiële positieve neveneffecten van landbouwbeheermaatregelen ter bevordering van koolstofopslag in de bodem, waaronder een verbeterd vochtvasthoudend vermogen van de bodem, betere infiltratie bij stevige regenbuien, meer biodiversiteit en minder erosie. Beter akkerrandenbeheer draagt ook bij aan de opbouw van stikstof in de bodem. Ook lijkt koolstofopslag in de bodem een positief effect te hebben op de bodemvruchtbaarheid en daarmee op gewasproductiviteit.

Echter, uit een brede review van literatuur en data door (Moinet, G. Y. et al., 2023) blijkt dat er alleen een win-win-situatie kan optreden als specifieke landbouwpraktijken in specifieke situaties worden toegepast. De auteurs concluderen daarom dat koolstofopslag als een mogelijke co-benefit van effectiever en duurzamere landbouwbeheer moet worden gezien. Ook stellen zij dat geen wereldwijde broeikasgasreductietargets voor koolstofopslag in de bodem moeten worden opgesteld, omdat de complexe interactie tussen gewasopbrengst, koolstofopslag en andere functies van landbouwgrond de potentie voor negatieve emissies onzeker en contextafhankelijk maken.

De aangroei van veen in veenweidegebied kan onder de juiste omstandigheden de biodiversiteit en de nutriëntenkringloop bevorderen (Smith, S. M. & et al., 2023).

Negatieve neveneffecten
Het bevorderen van koolstofopslag in de bodem kan in specifieke gevallen een negatief effect hebben op de voedselopbrengst van de landbouwgrond en daarmee op de voedselvoorziening (Moinet, G. Y. et al., 2023). De aangroei van veen in veenweidegebied leidt tot meer methaanemissies (Smith, S. M. & et al., 2023), maar het effect van koolstofopslag in het veen is groter, waardoor negatieve emissies worden behaald.
Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing
Koolstofopslag in de bodem kan economische gevolgen hebben voor de landbouw.
Knelpunten
Belangrijke knelpunten zijn: – Onzekerheid over de potentiële negatieve emissies die met specifieke landbeheermaatregelen kunnen worden bereikt. – Het feit dat de aangepaste landbeheermaatregelen permanent moeten worden uitgevoerd om daadwerkelijk tot negatieve emissies te komen op de lange termijn, en de afhankelijkheid van permanente medewerking van de landeigenaren om de maatregelen uit te voeren. – De onnauwkeurigheid van metingen en schattingen van koolstofopname in de bodem en de noodzaak van permanente monitoring. – Gewasresten zijn waardevolle biograndstoffen voor allerlei toepassingen, terwijl het achterlaten op het land financieel minder opbrengt voor de boer.

Kwantificering van potentieel Nederland

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting (NL/Europees)
De mate waarin landbouwmaatregelen die leiden tot extra koolstofopslag in de bodem al worden uitgevoerd verschilt per Europees land. In Nederland is gewasrotatie in veel gevallen al geoptimaliseerd. Verder mag het 'scheuren' van grasland momenteel eens in de 5 jaar gebeuren, wat het verlies aan organisch materiaal beperkt als gevolg hiervan (PBL, 2018). Het telen van een vanggewas is voor een aantal uitspoelingsgevoelige zandgebieden al een verplichte maatregel. Er zijn echter nog veel maatregelen die ook in Nederland nog niet worden systematisch en op grote schaal worden uitgevoerd.
De WUR heeft prognoses gemaakt van de CO ₂ -vastlegging in minerale landbouwbodems in verschillende beleids-scenario's. In het maximale scenario is dit 0,32 Mton/jaar in 2035. Het doel uit het Klimaatakkoord van 0,4-0,6 Mton extra CO ₂ -vastlegging in landbouwbodems in 2030 wordt in geen van de beleidsscenario's behaald. Dit komt met name door het effect van de afschaffing van de derogatie (het uitrijden van mest), wat leidt tot 0,2-0,3 Mton minder koolstofvastlegging.
Maximum technisch potentieel
Het vermogen van de bodem om koolstofmateriaal op te nemen hangt af van de kwantiteit en de typen planten en organisch materiaal, klimaat (temperatuur, neerslag, etc.), grondstructuur, de zuurstof- en waterbalans in de grond, organismen in het water en in de bodem, evt. verandering van landgebruik en het beheer van de landbouwgrond (WUR, 2023b, Cobo, S. et al., 2023). Er is een verzadigingsniveau van koolstofopname in de bodem, wat lang niet altijd goed wordt meegenomen in wetenschappelijk onderzoek. Ook kan er weer koolstof uit de bodem verdwijnen: – Kerende grondbewerking kan leiden tot koolstofverlies via oxidatie. – De emissie van andere broeikasgassen zoals N₂O kunnen in sommige gevallen het positieve klimaatteffect van koolstofopslag teniet doen (Moinet, G. Y. et al., 2023). – Er kan een koolstofafname ontstaan door ontbinding van organisch materiaal, bacteriële ademhaling, uitloging en erosie (Cobo, S. et al., 2023). – Klimaatverandering kan het technisch potentieel doen verminderen. Het is zelfs aannemelijk dat de opwarming van de aarde tot een afname van de koolstofvoorraad in de bodem leidt (Cobo, S. et al., 2023).
Belangrijk is dat de landbouwbeheermaatregelen die leiden tot koolstofopslag in de bodem <i>permanent</i> moeten worden toegepast om te voorkomen dat de opgeslagen koolstof weer uit de bodem verdwijnt (Cobo, S. et al., 2023).

Het onderzoeksprogramma Slim Landgebruik heeft het potentieel aan koolstofvastlegging van verschillende maatregelen in kaart gebracht. De maatregelen tellen op tot circa 0,9 Mton/jaar ten opzichte van referentiejaar 2017, waarbij een toename in blijvend grasland de hoogste potentie heeft, maar ook groenbemesters en verbeterde gewasrotatie van belang zijn (Slim Landgebruik, 2022).
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Op basis van het onderzoek Slim Landgebruik lijkt een potentieel van 0,9 Mton/jaar uit minerale landbouw-bodems mogelijk vanaf 2030, maar het maximale beleidsscenario van de WUR komt uit op 0,32 Mton/jaar in 2035. Daarom hanteren we een middenwaarde (0,6 Mton/jaar) voor het realistisch potentieel in 2030. Voor 2050 zou 0,9 Mton/jaar behaald kunnen worden.
Belangrijkste onzekerheden
Er is onzekerheid over de potentiële negatieve emissies die met specifieke landbeheermaatregelen kunnen worden bereikt, omdat er nog kennis ontbreekt over langdurige koolstofopslag en de effectiviteit van specifieke maatregelen. Ook de onnauwkeurigheid van metingen draagt bij aan onzekerheid hierover. Verder is het onzeker of landeigenaren aangepaste landbeheermaatregelen permanent zullen uitvoeren, wat de exacte effecten van de maatregelen zijn op o.a. gewasproductiviteit en het lokale milieu, en in hoeverre klimaatverandering en andere omgevingsontwikkelingen tot een verandering van de omvang van de negatieve emissies leiden.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
De bodem kan koolstof in principe voor duizenden jaren vasthouden (WUR, 2023b), maar het bevorderen van koolstofopslag in de bodem met gerichte maatregelen in landbouwbeheer kan ook weer teniet worden gedaan door slecht beheer in de periode daarna. Langdurige monitoring is belangrijk om te meten of de koolstofvoorraad in de bodem daadwerkelijk toeneemt. Daarnaast is de berekening van de verandering van de koolstofvoorraad over de tijd vaak onnauwkeurig. Vaak wordt de gemeten massaconcentratie van koolstof in een specifieke hoeveelheid aarde vermenigvuldigd met de grond dichtheid, maar deze kan over de tijd veranderen als gevolg van veranderd landbouwbeheer. Er bestaan echter nauwkeurigere meetmethodes (Moinet, G. Y. et al., 2023).

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
De koolstofvoorraad in de landbouwgronden in de EU 27 is gemiddeld genomen ongeveer 34 gigaton in de bovenste 20 centimeter en 75 gigaton in de bovenste 30 centimeter, maar er is een ongelijke geografische verdeling tussen landen (European Parliament, 2022a). In een simulatiestudie van (Roe, S. et al., 2021) is het technisch potentieel van koolstofopslag in Europese landbouwgronden in de periode 2020 tot 2050 ingeschat op 75 Mt CO ₂ -eq. per jaar en in Europees grasland op 54 Mt CO ₂ /jaar. Dit telt op tot 129 Mt/jaar. De landbouwmaatregelen die in de studie zijn meegenomen zijn niet-kerende landbouw en de teelt van gewassen die leiden tot meer koolstofopname ('cover crops'). De aangenomen verandering bij grasland bestaat uit duurzamer beheer met gematigde begrazing. Verder hebben (Roe, S. et al., 2021) het technisch potentieel van aangroei van veen in veenweidegebieden in de EU 27 ingeschat op 185 Mt CO ₂ -eq./jaar voor dezelfde periode (Roe, S. et al., 2021);(European Parliament, 2022b).
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
In de simulatiestudie van (Roe, S. et al., 2021) is ook een schatting gemaakt van het realistisch potentieel van koolstofopslag in de Europese bodem voor de periode 2020-2050. Hiervoor zijn alleen landbouw- en graslandmaatregelen meegenomen die hooguit 100 dollar per ton vermeden CO ₂ -equivalent kosten. Het realistisch potentieel is geschat op 67,5 Mt CO ₂ -eq./jaar voor landbouwgrond en 32,5 Mt/jaar voor grasland, wat optelt tot 100 Mt/jaar in totaal. Daarnaast is het realistisch potentieel van aangroei van veen in veenweidegebieden in de EU 27 ingeschat op 54 Mt CO ₂ -eq./jaar voor dezelfde periode, bij maximale vermijdingskosten van 100 dollar per ton CO ₂ -eq. (Roe, S. et al., 2021);(European Parliament, 2022b).
Belangrijkste onzekerheden
Bij de inschatting van het Europees potentieel spelen dezelfde onzekerheden als bij de inschatting van het Nederlands potentieel. Hier komt nog bij dat er veel geologische en socio-economische verschillen zijn tussen Europese landen die effect hebben op het potentieel per hectare landbouwgrond.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Hier spelen dezelfde aspecten een rol als voor de kwantificering van het potentieel in Nederland (zie boven).

Gebruikte referenties

- (Cobo, S. et al., 2023). Sustainable scale-up of negative emissions technologies and practices: where to focus.
- (European Parliament, 2022b). Agricultural potential in carbon sequestration: Humus content of land used for agriculture and CO₂ storage.
- (Moinet, G. Y. et al., 2023). Carbon for soils, not soils for carbon.
- (PBL, 2018). Negatieve emissies: Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland.
- (Roe, S. et al., 2021). Land - based measures to mitigate climate change: Potential and feasibility by country.
- (Royal HaskoningDHV, 2022). Quicksan behoefte naar een onderzoeksprogramma gericht op negatieve CO₂-emissie.
- (Smith, S. M. & et al., 2023). The State of Carbon Dioxide Removal - 1st Edition.
- (Vellinga, T. V. et al., 2018). Lange termijn opties voor reductie van broeikasgassen uit de Nederlandse landbouw: Een verkenning.
- (WUR, 2023b). Climate and soils. <https://www.wur.nl/en/Dossiers/file/Climate-and-soils-1.htm>

A.4 Biochar

Biochar is een houtskoolachtig materiaal dat kan worden gemaakt uit organisch materiaal zoals hout, agrarische residuen, huishoudelijk groen afval, rioolslib en mest. De vastgelegde koolstof is erg lastig af te breken, waardoor het gedurende eeuwen of millennia vastgehouden blijft. De biochar kan worden ingezet als grondverbeteraar, maar ook als grondstof in de bouwsector, voor de verwijdering van verontreinigingen in bodem, lucht en water of als katalysator voor industriële toepassingen. Ook kan het op industriële schaal worden opgeslagen.

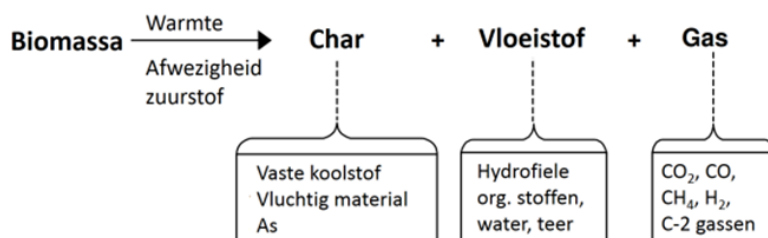
Beschrijving van de techniek

Koolstofbron

Biochar kan worden gemaakt uit organisch materiaal zoals hout, agrarische residuen, huishoudelijk groen afval, rioolslib en mest. Het bestaat uit vooral koolstof en zouten uit de biomassa. Productie van biochar kan een oplossing zijn voor onvoldoende gevaloriseerde organische reststromen zoals slib, mest en gecontamineerd houtafval. Voor de toepassing van biochar als grondverbetering is het van groot belang of de grondstoffen voldoende schoon zijn. De samenstelling van de zouten is afkomstig uit biomassa en past daarom goed bij de aanmaak van nieuwe biomassa.

Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)

Biochar wordt gemaakt door pyrolyse van organisch materiaal: door middel van een thermochemische omzetting in de afwezigheid van zuurstof ontstaat er een houtskoolachtig materiaal (char), vloeibare pyrolyseolie en syngas. (PBL, 2018)



De relatieve verdeling tussen biochar, vloeistof en gas wordt voornamelijk bepaald door de temperatuur waarbij pyrolyse plaatsvindt en de duur van het proces. De meest optimale temperatuur voor de vorming van een hoog aandeel biochar ligt tussen 350 en 450 graden bij een procesduur van maximaal 15 minuten. De maximaal haalbare

fractie biochar ligt dan op 70%. De koolstofinhoud van biochar kan variëren tussen 60 en 90%. Het resterende deel is een mix van mineralen en wordt met name beïnvloed door de gebruikte invoer aan biomassa, maar ook door de temperatuur; biochar die wordt gevormd bij hogere temperaturen bevat meer koolstof (PBL, 2018).

Door de pyrolyse van organisch materiaal is het koolstof in het resulterende biochar veel lastiger af te breken. Dit betekent dat de koolstof in de biochar gedurende eeuwen of millennia vastgehouden kan blijven. Ter vergelijking: als de oorspronkelijke organische stof in onverzadigde toestand in de bodem wordt gebracht verteert dit in jaren of ten hoogste decennia, waarbij de koolstof dus relatief weer snel vrijkomt (WUR).

Pyrolyse is het meest gangbare proces om biochar te maken. Biochar ontstaat ook als bijproduct bij de vergassing van biomassa (met een ondermaat van zuurstof), maar met een veel lagere opbrengst dan bij pyrolyse. Het voordeel van vergassing is echter wel dat het biogas een hoge economische waarde kent.

Opslagmedium

CO₂ wordt opslagen in biochar, dat lijkt op houtskool, maar het heeft een andere structuur, samenstelling en kwaliteit. Biochar kent verschillende toepassingen en daarmee toegevoegde waarde, zoals:

- a. Bodemverbeteraar/compostadditief:
 - i) zorgt potentieel voor het vasthouden van water en nutriënten, wat de bodemvruchtbaarheid en mogelijk gewasopbrengst vergroot.
 - ii) potentiële verbetering van de bodem (microbiële en enzymatische activiteiten) waardoor bijvoorbeeld meststoffen minder snel uitspoelen.
 - iii) potentiële opname van lachgas (N₂O) en methaan (CH₄) waardoor de bodem vermindert deze broeikasgassen uitstoot.
- b. Bouwsector, bijvoorbeeld als grondstof voor CO₂-negatief asfalt of beton of ander bouw materiaal (Green Chemistry Campus, 2021).
- c. Verwijdering van verontreinigingen (giftige metalen) in bodem, lucht en water door absorberend vermogen.
- d. Katalysator voor industriële toepassingen.

Door het hoge koolstofgehalte en de stabiliteit leidt dit tot negatieve emissies (Perpetual Next) (Bolan, N. et al., 2022). Het is eventueel ook mogelijk om biochar op grote industriële schaal op te slaan, maar wel onder strenge eisen.

Naast opslag van biochar voor langere tijd, waarmee het leidt tot negatieve emissies, is biochar ook inzetbaar in de volgende toepassing, vaak gebaseerd op de gelijkenis met steenkool:

- e. Thermische conversie in biomassacentrales of de industrie, als vervanging van steenkool. Dit wordt momenteel al toegepast met biochar gemaakt van rioolslib.
- f. Voedingssupplement in veevoer.

Bij deze toepassingen is geen sprake van negatieve emissies omdat de koolstof weer vrijkomt. Echter concurreren deze toepassingen wel met de toepassingen die wel zorgen voor negatieve emissies (Perpetual Next).

Beschrijving van verschillende varianten

De organische grondstoffen bepalen met name de samenstelling van biochar. Zo is er bij afvalstromen zoals huishoudelijk afval en rioolslib spraken van sterk vervuilde stromen, met onder andere zware metalen, die moeilijk uit de grondstoffen stroom te filteren zijn. De inzet van biochar hangt sterk af van de zuiverheid. Zo is het zeer onwenselijk om deze vervuilde biochar te gebruiken voor landbouwdoeleinden, maar speelt dit mogelijk minder bij de inzet van biochar als grondstof in asfalt. In het Europese INTERREG-project is gekeken naar de effecten van biochar op bodem en teelt. Hieruit volgde dat de kwaliteit van biochar moet worden gecertificeerd omdat biochar, afhankelijk van de grondstof en het proces, verontreinigd kan zijn met zware metalen en organische micro-verontreinigingen zoals PAK's, PCB's en dioxinen (Brancheorganisatie Akkerbouw, 2014).

Meer onderzoek is nodig naar zowel de kwaliteit van biochar op basis van de grondstoffen als de mogelijke toepassingen van in kwaliteit variërende soorten biochar. Het is onzeker of zwaar vervuilde afvalstromen zoals rioolslib daadwerkelijk geschikt zijn voor biochar met landbouwdoeleinden, hoewel dit wel erg gunstig zou om deze onvoldoende gevaloriseerde afvalstroom in te zetten voor negatieve emissies.

Afbakening keten en netto-negatief

Bij de teelt van biomassa wordt CO₂ afgevangen. In het geval van hout en agrarische residuen wordt deze direct ingezet voor de productie van biochar. In het andere geval worden biogene reststromen, zoals rioolslib of huishoudelijk afval, omgezet in biochar. Door de pyrolyse van organisch materiaal is het koolstof in het resulterende biochar veel lastiger af te breken. Dit betekent dat de koolstof in de biochar gedurende eeuwen of millennia vastgehouden kan blijven (WUR).

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid

Het productieproces van biochar met biomassa is relatief simpel met pyrolyse, al ver ontwikkeld en wordt hedendaags gebruikt om biosteenkool te produceren voor verbranding. Het gaat hier om technieken waarbij biochar het bijproduct is van bio-olie en biosyngas, maar ook processen waarbij biochar het hoofdproduct is. Het verschil in output hangt af van het pyrolyseproces. De beschikbaarheid van biomassa is net zoals bij andere toepassingen van biomassa onzeker. Voor hoge kwaliteit biochar is het gebruik van houtige biomassa of agrarische residuen met name interessant.

De productie van biochar is ook mogelijk met laagwaardige afvalstromen zoals huishoudelijk afval, mest of rioolslib, of met resthout in het geval van vergassing. Dit zijn vaak stromen met naar verhouding meer water, dat eerst verwijderd dient te worden. Dit behoeft extra en nieuwe stappen in het standaard productieproces, wat momenteel getest wordt in succesvolle pilots (Change Inc., 2023). Voor deze stromen geldt wel dat per toepassing het belangrijk is om te weten welke zuiverheid nodig is en of er sporen van vervuiling toegestaan zijn. Zo is zuivering van zware metalen uit rioolslib is hedendaags nog een lastig proces.

TRL + toelichting

Pyrolyse met cogeneratie van biochar (opbrengst ~30%) en warmte wordt al langdurig gebruikt op meerdere locaties en heeft daarom een TRL van 9 (Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022). Pyrolyse waarbij het hoofdproduct biochar is, is vaak mogelijk binnen dezelfde installaties, maar met andere procescondities. Deze condities hangen ook af van de toepassing van biochar en deze optimalisatie is nog in ontwikkeling en wordt nog niet op grote schaal toegepast. Eventueel zou het gebruik van andere reststromen ook nog voor veranderingen zorgen in het productieproces. Momenteel wordt wel al lage kwaliteit biochar gemaakt van rioolslib, voor verbranding.

PBL geeft voor biochar een TRL van 3-6, maar er zijn recent veel pilots gedaan naar productie en toepassing van biochar in de grond. Daarom schatten we de TRL op 5-7.

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting

In Nederland wordt er al biochar gemaakt van rioolslib. Dit zwaar vervuilde restproduct wordt momenteel gebruikt ter vervanging van steenkool in onder andere Duitsland. In Europa is de biocharproductie naar schatting in 2022 65 kton. Dit is bijna een verdubbeling ten opzichte van de capaciteit in 2021. De productie van biochar in Europa neemt de laatste jaren sterk toe. 75% van deze capaciteit komt vanuit Duitsland, Oostenrijk, Zwitserland en Scandinavië (European Biochar Industry Consortium, 2022).

De huidige wereldmarkt voor biochar is zeer klein met een geschatte waarde van 450.000 dollar in 2016. Men verwacht een groei van bijna 15% per jaar tot 15 miljoen dollar; wat nog steeds klein in omvang is (PBL, 2018).

Energieverbruik

Het maken van biochar gebeurt a.d.h.v. pyrolyse tussen 350 en 450 graden. Voor deze verhitte is energienodig, momenteel wordt dit op basis van gas gedaan, maar het is ook mogelijk met behulp van elektrische installaties.

Ruimtegebruik

Dit hangt sterk af van de in de toekomst toegestane grondstoffen voor de productie van biochar. Om 1 Mton CO₂ vast te leggen in biochar is ongeveer 1,2 Mton of 18 PJ biomassa nodig. Deze hoeveelheid komt bijvoorbeeld overeen met 40% van de theoretisch oogstbare bijgroei uit 650.000 ha natuur en landschap (dit is inclusief de bossen) (PBL, 2018). Mochten reststromen ook aantoonbaar geschikt zijn voor de productie van biochar, dan is minder bijgroei nodig.

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.

De kosten van toepassen van biochar worden met name bepaald door de kosten van de gebruikte feedstock. In 2014 varieerden de prijzen voor biochar van € 200 per ton voor lage kwaliteit biochar vanuit onzekere grondstof tot € 1.500 per ton voor hoge kwaliteit met loofhout als grondstof (Brancheorganisatie Akkerbouw, 2014). In 2018 kostte in Oregon (VS) een grote vrachtwagenlading biochar van hoge kwaliteit € 1.375 per ton (PBL, 2018). Als er van uitgaan wordt dat lage kwaliteit biochar 60% koolstof bevat en hoge kwaliteit 90% en dat 10% van de koolstof vrijkomt in de eerste maanden, dan komt dit neer op een prijs van € 370 tot 1.850 per ton koolstof of € 100 tot 500 per ton CO₂, uitgezonderd de kosten voor het verspreiden van de biochar over het land (PBL, 2018).

In een overzichtsstudie van (Smith, P. & et al., 2015) wordt niet uitgegaan van marktprijzen, maar van werkelijke kosten en baten en komt men uit op een veel grotere range van een opbrengst van € 200 per ton CO₂ indien alle kosten aan de onderkant van de range liggen tot een kostenpost van € 500 per ton CO₂ indien alle kosten aan de bovenkant van de range liggen. Om positief uit te komen gaat men er van uit dat de productie van biochar energie oplevert die verkocht kan worden en dat het toepassen van biochar leidt tot verhoging van de opbrengst (Smith, P. & et al., 2015). Vanwege onzekerheden houdt het PBL een range van € 100 tot 500 per ton CO₂ aan.

(Fuss, S. et al., 2018) hebben op basis van literatuur een range van 30-120 USD/ton CO₂-eq. gevonden.

Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel

Studies over de vooruitzichten van biocharproductiefaciliteiten op de lange termijn zijn schaars. Sommige techno-economische studies suggereren een mogelijke afname van biocharproductiekosten in het bereik van 10-20% in vergelijking met de huidige niveaus, voornamelijk geassocieerd met de schaalvergroting ervan (Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022).

De totale kosten en baten zijn ook afhankelijk van de vraag en inzet naar biochar. De vraag vanuit de agrarische sector in Nederland zal afhangen van economisch nut voor de bodem, welke nog niet bewezen is. Mogelijk hangt de economische meerwaarde van biochar meer af van de economische waarde van negatieve emissies en kan deze insteek voor een positief kostenplaatje zorgen.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader

Zoals beschreven is er nog onduidelijk rondom de inzet van biochar ten behoeve van negatieve emissies. Hiervoor is echt meer onderzoek nodig naar de toepassing van biochar in Nederland, met name op het gebied van toepassing in de landbouw. Dergelijke informatie is van belang als leidraad bij beleidsvorming, waarbij de voordelen afgewogen kunnen worden tegen de nadelen en waarbij de voordelen kunnen worden gemaximaliseerd en de nadelen kunnen worden geminimaliseerd. Een wetgevingskader zou meer duidelijkheid moeten bieden over de kwaliteit van biochar (zoals zuiverheid en percentage gebonden koolstof) en de toepassingen.

Het Ithaka Institute heeft richtlijnen voor een “European Biochar Certificate” opgesteld, die bedoeld is om een hoog niveau van biocharstabiliteit te garanderen. Momenteel is dit een vrijwillige industriestandaard in Europa en wordt deze in Zwitserland als regelgeving gebruikt voor biochar die verkocht wordt voor agrarische toepassingen (Ithaka Institute).

Koppelkansen

De vaakst aangehaalde koppelkans is het gebruik van biochar als bodemverbeteraar. Huidig onderzoek suggereert dat de toepassing van zuivere biochar in de bodem met name geschikt is in nutriëntarme grond in de tropen, waarmee mogelijk biochar minder toegevoegde waarden heeft voor de Nederlandse landbouw. Er nog geen algemene consensus over de doeltreffendheid van biochar in agrarische toepassingen en in de sector heerst onzekerheid over de toepassing en het economisch nut. Lopende en toekomstige onderzoeken proberen de onzekerheden rondom biochar verder uit te diepen.

Er wordt veel onderzoek gedaan naar welke (zuivere) organische stromen geschikt zijn. In een recente meta-analyse op basis van 26 studies werd geconcludeerd dat er overtuigend bewijs is van het algehele gunstige effect

van biochar voor alle onderzochte agronomische parameters. De onderzoekers noemde als resterende uitdagingen de standaardisatie van biochar eisen, zoals zuiverheid. Nadelige effecten van individuele onderzoeken die in de meta-analyses zijn opgenomen houden mogelijk verband met biochars van lage kwaliteit, die niet in aanmerking zouden komen voor certificering en daaropvolgend gebruik (bijv. hoog gehalte aan verontreinigingen, hoog zoutgehalte, onvolledige pyrolyse, enz.). Samenvattend suggereert de studie dat het gebruik van biochar in de landbouw het potentieel heeft om negatieve emissies te combineren met aanzienlijke agronomische en/of ecologische nevenvoordelen (Schmidt, H. P. et al., 2021).

De verhoogde gewasopbrengst lijkt met name voor te komen bij zure grond met weinig voedingsstoffen in de tropen en minder voor akkerbouwgrond in gematigde streken zoals Europa. De grond in gematigde streken zou over het algemeen minder zuur en hoger in vruchtbaarheid zijn door het gebruik van kunstmest, wat weinig ruimte overlaat voor extra voordelen van biochar (Jeffery, S. et al., 2017). Dit is lijn met eerder onderzoek binnen het driejarige INTERREG-project, waarbij in landen rondom de Noordzee het gebruik van biochar in de bodem onderzocht werd. Dit onderzoek concludeerde dat er geen verbetering in de bodemkwaliteit en verhoging van de gewasopbrengst was (Brancheorganisatie Akkerbouw, 2014).

De verhoogde gewasopbrengst lijkt met name voor te komen bij zure grond met weinig voedingsstoffen in de tropen en minder voor akkerbouwgrond in gematigde streken zoals Europa. De grond in gematigde streken zou over het algemeen minder zuur en hoger in vruchtbaarheid zijn door het gebruik van kunstmest, wat weinig ruimte overlaat voor extra voordelen van biochar (Jeffery, S. et al., 2017). Dit is lijn met eerder onderzoek binnen het driejarige INTERREG-project, waarbij in landen rondom de Noordzee het gebruik van biochar in de bodem onderzocht werd. Dit onderzoek concludeerde dat er geen verbetering in de bodemkwaliteit en verhoging van de gewasopbrengst was (Brancheorganisatie Akkerbouw, 2014).

Meer onderzoek is nodig naar het gebruik en de voor- en nadelen van biochar in Nederland. Onderzoekers van de WUR wijzen erop dat het achterhalen van de mechanismen achter de waargenomen effecten van biochar in de bodem meer inzicht kan geven en gebruikt kan worden om gedegen voorspellingen te doen bij het gebruik in verschillende bodemsoorten (WUR). Wellicht kan de combinatie van precisielandbouw en het effect dat biochar voor minder uitspoeling van meststoffen zorgt er voor zorgen dat minder kunstmest en water gebruikt hoeft te worden, waarmee biochar een aantoonbare economische toegevoegde waarde kan hebben.

Meer onderzoek is nodig naar het gebruik en de voor- en nadelen van biochar in Nederland. Onderzoekers van de WUR wijzen erop dat het achterhalen van de mechanismen achter de waargenomen effecten van biochar in de bodem meer inzicht kan geven en gebruikt kan worden om gedegen voorspellingen te doen bij het gebruik in verschillende bodemsoorten (WUR). Wellicht kan de combinatie van precisielandbouw en het effect dat biochar voor minder uitspoeling van meststoffen zorgt er voor zorgen dat minder kunstmest en water gebruikt hoeft te worden, waarmee biochar een aantoonbare economische toegevoegde waarde kan hebben.

Naast koppelkansen in de landbouw is er ook mogelijk een toepassing in de materialen- en bouwsector, bijv. als grondstof voor CO₂-negatief asfalt of ander bouw materiaal. Momenteel is TerraWatt Biochar in Nederland bezig met een pilot rondom CO₂-negatief asfalt (Green Chemistry Campus, 2021). Meer onderzoek is nodig voor deze en andere toepassingen en de potentie van het langdurig vastleggen van koolstof in deze toepassingen.

Een andere koppelkans is mogelijk de inzet van rioolslib, een afvalstroom die nu weinig waarden en toepassing kent, maar wel in grote hoeveelheid beschikbaar. Aandachtspunt is dan de zuivering van zware metalen uit het rioolslib, zodat dit niet in de biochar eindigt.

Negatieve neveneffecten
Biochar heeft het risico vervuild te zijn met zware metalen en/of organische micro verontreinigingen zoals PAK's en PCB's, afhankelijk van de grondstoffen. Door het gebruik van lage kwaliteit grondstof (afvalstromen) en lage kwaliteit metaallegeringen in pyrolyse oven materiaal kunnen verontreinigingen in biochar ontstaan. Als gevolg van hoge temperaturen kunnen zware metalen vrijkomen en de biochar besmetten. Kwaliteit van de grondstof en het proces is de belangrijkste bron voor biochar kwaliteit. Om die reden worden er verschillende certificeringregelingen voorgesteld voor het waarborgen van veilige biochar. De EU heeft drempelwaarden voor verontreinigende stoffen in bodemverbeteraars zoals compost, deze waarden gelden ook voor biochar (Brancheorganisatie Akkerbouw, 2014).
Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing
Op dit moment is er nog geen autonome marktvraag naar biochar als bodemverbeteraar, omdat er betere en goedkopere alternatieven worden gebruikt voor bodemverbetering, zoals kunstmest. Het is mogelijk dat biochar in Nederland voordelen kan opleveren op zwaar verarmde grond, maar de toepassing hangt waarschijnlijk meer af van de economische waarde van negatieve emissies.
Daarnaast is het, gezien het duurzaamheidskader, waarschijnlijk onwenselijk dat hoogwaardige biomassa voor biochar wordt ingezet. Als rioolslib grootschalig kan worden gebruikt voor biocharproductie en het behalen van negatieve emissies, is er mogelijk economisch voordeel, aangezien de afvoer van rioolslib momenteel een kostenpost vormt waterzuiveringen.
Knelpunten
Het ontbreken van een faciliterend en ondersteunend beleidskader op EU-niveau voor biochar resulteert in een lage vraag naar biochar als bodemverbeteraar. Dat vormt de belangrijkste belemmering voor de grootschalige opzet van het biocharsysteem in de EU. Een regelgevingskader is nu in opbouw, maar de uiteindelijke invulling is nog niet gedefinieerd. Daarnaast zouden financiële prikkels voor het verwijderen van broeikasgassen uit de atmosfeer, evenals van koolstofherstel in de bodem, waarschijnlijk de verspreiding van het biocharsysteem stimuleren (Florence School of Regulation, 2021).

Kwantificering van potentieel Nederland

Maximum technisch potentieel
Het technisch potentieel voor negatieve emissies met biochar is groot. Er zijn geen studies voor het technisch potentieel in Nederland, maar als er wordt uitgegaan van 45 ton biochar per ha op het akker- tuinbouw- en groenvoedergewassenareaal dat in 2017 ruim 820.000 ha besloeg, dan is het cumulatieve potentieel 30 Mton C of 110 Mton CO ₂ . Hierbij is uitgegaan van een optimale koolstofinhoud van 90% en dat 10% mineraliseert in de eerste maanden (PBL, 2018). Als dit over een periode van 20 jaar zou worden verspreid, is het potentieel 5,5 Mton CO ₂ /jaar. In Nederland werken Torrgas, Perpetual Next en TerraWatt Biochar aan de productie en/of verwerking van biochar.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Het realistisch potentieel van biochar hangt sterk af van de biomassastromen die gebruikt kunnen worden. Als biochar op een veilige manier geproduceerd kan worden op basis van reststromen die momenteel weinig toepassingen kennen, vergroot dit het potentieel enorm. Echter is dit nog lastig in te schatten en hangt het sterk af van regulering, certificering en technologische vooruitgang rondom zuivering van reststromen.
Vanwege de vele onzekerheden schat PBL het potentieel in 2030 als nihil. Voor de periode daarna maakt PBL een inschatting van de bijdrage van biochar als deze op circa 1% van het Nederlandse landbouwareaal zou worden ingezet als bodemverbeteraar (PBL, 2018). PBL ziet dit als bovengrens van de hoeveelheid landbouwgrond. Bij een toepassing van 45 ton biochar per hectare op 7500 hectare kan cumulatief 1 Mton CO ₂ worden vastgelegd. (PBL, 2018). Als dit over een periode van 20 jaar wordt verspreid, zijn de jaarlijkse negatieve emissies 0,05 kton/jr.
Hiervoor is 270 kton C in de vorm van biochar nodig. Als er uit wordt gegaan van de eerder genoemde optimale koolstofinhoud van 90% en 10% mineralisatie dan betekent dit dat er 340 kton biochar nodig is (PBL, 2018). Hiervoor is ongeveer 1,2 Mton of 18 PJ biomassa nodig. Deze hoeveelheid komt bijvoorbeeld overeen met 40%

van de theoretisch oogstbare bijgroei uit 650.000 ha natuur en landschap (dit is inclusief de bossen). Bij het gebruik van reststromen, zoals rioolslib, is minder bijgroei nodig voor de benodigde biomassa.
Bij toepassing van biochar in bouw materiaal of asfalt komt er additioneel potentieel bij. Dit is niet gekwantificeerd.
Belangrijkste onzekerheden
Er zijn nog veel onzekerheden rondom grootschalige productie en toepassing van biochar in Nederland. Meer onderzoek, bijvoorbeeld op Nederlandse bodem, is nodig om te garanderen dat biochar veilig te gebruiken is in de bodem en bewezen effectief is als bodemverbeteraar. Op dit moment ontbreekt het ook aan een standaardisering en certificering van biochar, welke wel nodig is voor grootschalige inzet.
De vraag vanuit de agrarische sector in Nederland is ook onzeker en zal afhangen van het economisch nut voor de bodem, welke nog niet bewezen is. Mogelijk is de inzet van biochar interessanter voor het behalen van negatieve emissies en kan deze insteek voor een groei in de vraag zorgen.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Door de pyrolyse van organisch materiaal is het koolstof in het resulterende biochar veel lastiger af te breken. Dit betekent dat de koolstof in de biochar gedurende eeuwen of millennia vastgehouden kan blijven. Ter vergelijking: als de oorspronkelijke organische stof in onverzadigde toestand in de bodem wordt gebracht verteert dit in jaren of ten hoogste decennia, waarbij de koolstof dus relatief weer snel vrijkomt (WUR).

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
Biochar kan potentieel negatieve emissies leveren tegen relatief lage kosten, met als mogelijk voordeel het herstel van bodemkoolstof en water behoud door het gebruik van biochar als bodemverbeteraar. Om dit potentieel echter op grote schaal te realiseren, er is een holistische en coherente sector overschrijdende beleidsaanpak nodig op EU-niveau (Florence School of Regulation, 2021).
Er zijn geen studies voor het technisch potentieel in Europa, maar in theorie kan er worden uitgegaan van 45 ton biochar per ha (PBL, 2018). In 2020 besloeg de <i>utilised agricultural area</i> in de EU 157,4 miljoen ha. Indien biochar wordt verspreid over dit gehele gebied, gaat dit om 7.083 miljoen ton biochar. Het cumulatieve potentieel is 21 Gton CO ₂ . Hierbij is uitgegaan van een optimale koolstofinhoud van 90% en dat 10% mineraliseert in de eerste maanden (PBL, 2018). Als dit over een periode van 25 jaar zou worden verspreid, is het potentieel 845 Mton CO ₂ /jaar.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Het realistisch potentieel hangt af van de beschikbare stromen biomassa, de veiligheid en het economisch nut van de toepassing van de biochar.
Belangrijkste onzekerheden
Er zijn nog veel onzekerheden rondom grootschalige productie en toepassing van biochar in Europa. Meer onderzoek is nodig om te garanderen dat biochar veilig te gebruiken is in de bodem en bewezen effectief is als bodemverbeteraar. Op dit moment ontbreekt het ook aan een standaardisering en certificering van biochar, welke wel nodig is voor grootschalige inzet.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Door de pyrolyse van organisch materiaal is het koolstof in het resulterende biochar veel lastiger af te breken. Dit betekent dat de koolstof in de biochar gedurende eeuwen of millennia vastgehouden kan blijven. Ter vergelijking: als de oorspronkelijke organische stof in onverzadigde toestand in de bodem wordt gebracht verteert dit in jaren of ten hoogste decennia, waarbij de koolstof dus relatief weer snel vrijkomt (WUR).

A.5 Mineralisatie

Bij mineralisatie reageert natuurlijk alkalisch gesteente (met name silicaten of calciumhydroxide) met CO_2 . Deze CO_2 kan afkomstig zijn uit de atmosfeer, industriële restgassen of DAC. Van nature gebeuren deze chemische processen aan de oppervlakte van gesteente heel langzaam; dit kan worden versneld door het mineraal te vermalen en te verspreiden over grote oppervlakten (versnelde verwerking).

Beschrijving van de techniek

Koolstofbron
Bij mineralisatie reageert natuurlijk alkalisch gesteente (calciumhydroxide, magnesiumhydroxide of silicaten) met de CO_2 uit de atmosfeer.
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
Negatieve emissies met mineralisatie kent verschillende opties. De volgende chemische reacties zijn hierbij de belangrijkste: - Carbonatatie, hierbij reageert CO_2 met calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) waarbij onoplosbaar calciumcarbonaat gevormd wordt. Dit proces treedt van nature ook op in beton. Eenzelfde reactie kan plaatsvinden met magnesiumhydroxide om magnesiumcarbonaat te vormen. - Reactie met silicaten, zoals olivijn. Silicaten zijn een groep mineralen die het ion SiO_4^{4-} bevatten. Deze groep mineralen vormt bijna 95% van de aardkorst en bestaan in verschillende vormen, zoals basalt, olivijn en serpentijn. CO_2 uit de lucht reageert in een natuurlijk proces met water. Het product hiervan (H_2CO_3) kan vervolgens als het in aanraking komt met silicaten reageren met bijvoorbeeld de aanwezige magnesium en calcium. Hierbij ontstaan in het gesteente stabiele carbonaten, waarmee dus de CO_2 uit de lucht is vastgelegd. Van nature gebeuren deze geologische processen aan de oppervlakte van gesteente heel langzaam. Via de volgende methodes kan dit versneld worden: - Versnelde verwerking: door silicaten zeer fijn te malen wordt het reactie oppervlak vergroot, wat het natuurlijke proces van chemische reacties tussen gesteente, water en de lucht versnelt. Door de mineralen te vermalen tot gruis en te verspreiden over grote oppervlaktes verloopt de versnelde verwerking binnen jaren tot decennia. Hierna is het mineraal verzadigd met CO_2. Met name de deeltjes- of korrelgrootte (hoe kleiner hoe beter) zijn van belang voor de reactietijd, maar daarnaast ook de temperatuur, de beschikbaarheid van water en de zuurgraad hiervan en de ijzerfractie in het gebruikte gesteente (Griffioen, J., 2017). - Door geconcentreerd of zuiver CO_2 aan het gesteente toe te voegen afkomstig van restgassen of DAC. De CO_2-afvangtechnologie is dan industriële afvang of DAC, en de mineralisatie is het opslagmedium. Zie hiervoor ook de factsheet DAC.
Opslagmedium
CO_2 wordt opgeslagen in de vorm van stabiele waterstofcarbonaat-ionen (HCO_3^-). Silicaten komen over de hele wereld voor.
Beschrijving van verschillende varianten
Er zijn verschillende bronnen voor het gesteente die kunnen gebruikt worden voor mineralisatie: - Gewonnen silicaten zoals basalt, olivijn en serpentijn. Olivijn is het meest reactieve silicaat en een van de meest voorkomende mineralen op aarde. Olivijn (net zoals basalt) wordt gevormd in lavageesteente en komt voor in verschillende gesteente, waaronder als kleine mineraalkristallen in basalt. Olivijn is ook aanwezig in Europa, met name in bergachtige gebieden. Het wordt al actief gewonnen in onder andere Spanje en Noorwegen. - Mijnafval, bij het delven komt vaak verguisd basalt vrij. - Alkalische industriële silicaatmineralen (zoals staalslakken, vliegassen, bouw- en slooafval of as van biomassaverbranding). Er zijn ook verschillende bronnen van CO_2 voor mineralisatie: CO_2 uit de atmosfeer.

- CO₂ kan worden toegevoegd door blootstelling aan verhoogde concentraties, bijvoorbeeld met rookgas.
- CO₂ in pure vorm (afkomstig uit DAC) kan worden toegevoegd.

Nadat de chemische reactie van CO₂ met de mineralen heeft plaatsgevonden, zoals beschreven onder omzet- en afvangtechnologie, kunnen deze opslagmedia een toepassing krijgen. Hierdoor wordt de CO₂ voor langere tijd wordt vastgelegd. Mogelijke toepassingen zijn:

- ophoogzand, bijvoorbeeld voor kustversterking;
- grind, bijvoorbeeld voor bestrating;
- cement voor in beton;
- bakstenen;
- uitstrooien in de landbouw, voor verbetering van bodemvruchtbaarheid;
- kunstmatige alkalinisatie van de oceanen, dit wordt beschreven in de factsheet Mariene CO₂-opslag.

Afbakening keten en netto-negatief

Als gebruik wordt gemaakt van gewonnen mineralen, moeten deze worden gemijnd, vervoerd en vermalen, wat energie kost en leidt tot CO₂-uitstoot. De energiebehoefte voor versnelde mineralisatie varieert aanzienlijk en hangt af van de korrelgrootte. Een kleinere korrel vereist meer energie voor vermaling. Rekening houdend met emissies over de volledige levenscyclus, kunnen broeikasgasemissies potentieel hoger zijn dan de door mineralisatie vastgelegde CO₂. De praktische haalbaarheid van versnelde mineralisatie hangt dus af van de toegang tot goedkope hernieuwbare energie bronnen.

Het gebruik van voorgemalen materialen zoals afval uit verschillende industrieën biedt kansen, omdat daarmee het gebruik van energie voor het slijpen van materialen niet nodig is en bijdraagt aan circulariteit.

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid

Volgens (Renforth, P., 2012) zijn de mondiale silicaatvoorraden groot en heeft alleen al Groot-Brittannië genoeg gesteente om in theorie 430 Gton CO₂ vastleggen. Tussen de gesteentes zijn onderlinge verschillen, het meer bruikbare deel met een potentiële vastlegging van ten minste 0,8 tCO₂ per ton gesteente beperkt dit tot 25 Gton CO₂ in Groot-Brittannië. Het technisch potentieel is dus niet het knelpunt; dat zit meer in de toepassingen die commercieel interessant zijn (PBL, 2018) en de energiekosten voor het mijnen, vermalen en transporteren (Maesano, C. N. et al., 2022).

Toepassingen:

- *Bestrating met bijvoorbeeld grindpaden of ophoogzand van olivijn:*
Kleinschaligere toepassingen op land hebben zich al commercieel bewezen. Voor de aanleg van het schouwpad van de Hoekse Lijn, het metrotracé langs de Nieuwe Waterweg van Hoek van Holland naar Rotterdam, 16 kton olivijn gebruikt, dat over een periode van 50 jaar ongeveer 5 kton CO₂ zal vastleggen.
- *Kustverdediging met ophoogzand van olivijn:*
In een recente studie naar de toepasbaarheid van olivijn worden laboratoriumexperimenten en simulaties beschreven over de toepassing van olivijnzand in kustwateren (Montserrat, F. et al., 2017). Hier kwam uit naar voren dat dit een interessante optie is, maar dat nader onderzoek nodig voor een betere kwantificering van de CO₂-vastlegging onder veldcondities. Daarnaast is ook het uitloggen van verontreinigingen (metalen) een milieutechnische onzekerheid/belemmering die nog niet onder controle is.
- *Landbouwtoepassingen voor verbetering van bodemvruchtbaarheid:*
Mogelijke verbetering van de bodemvruchtbaarheid. Bij de omzetting van CO₂ in bicarbonaat en kalk daalt bijvoorbeeld de zuurgraad in de bodem, dat kan gunstig zijn voor gewassen. Maar er zijn ook afbreukrisico's. Bij de verwerking van het mineraal olivijn komt bijvoorbeeld het potentieel gevaarlijke nikkel vrij. Onderzoekers van de WUR onderzoeken of nikkel wegspoelt naar het grondwater of dat wordt het wordt opgenomen door het gewas of dat het gebonden blijft aan bodemdeeltjes (WUR, 2022a).
- *Zand in beton vervangen door olivijn:*
Het zand in beton zou vervangen kunnen worden door olivijn. PBL geeft aan dat nieuwe soorten beton een langdurige testprocedure moeten doorlopen om voor dragende constructies gebruikt te kunnen worden.

TRL + toelichting
De implementatie van CO₂-mineralisatie met behulp van industrieel afval is in de experimentele fase, maar enkele onderzoeksinstituten en bedrijven hebben een pilot faciliteit: TRL 5-6. De verwachting is dat in 2030 er een TRL van 8-9 is (Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022): – Bestrating met bijvoorbeeld grindpaden of ophoogzand van olivijn: Kleinschaligere toepassingen op land zoals bestrating zijn momenteel operationeel en hebben daarom een TRL 8-9 (PBL, 2018). – Kustverdediging met ophoogzand van olivijn: Toepassing van olivijnzand in kustwateren kent een TRL 4 tot 5 (PBL, 2018). – Landbouwtoepassingen voor verbetering van bodemvruchtbaarheid: Voor deze toepassing is meer onderzoek nodig en een duidelijk regelgevend kader omtrent gebruik van enhanced weathering en voedselveiligheid en kent daarom een TRL van 4. – Beton met olivijn is op kleine schaal geproduceerd (TRL 6-7) (PBL, 2018).
Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting
De wereldproductie van silicaten was in 2013 ongeveer 9 Mton. Om het maximale potentieel te benutten zal het mijnen van silicaten op grotere schaal moeten plaatsvinden. 10 Gton aan silicaten per jaar is nodig om jaarlijks ongeveer 3,7 Gt CO₂ vast te leggen (Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022). (Renforth, P., 2012) schetst een CO₂-opslag potentieel van 2,9-8,5 Gton CO₂ per jaar in 2100. Om dat potentieel dus te behalen zal de wereldproductie moeten verduizenvoudigen. Volgens (Renforth, P., 2012) zijn de mondiale silicaatvoorraden groot en heeft alleen al Groot-Brittannië genoeg gesteente om in theorie 430 Gton CO₂ vast te leggen. Tussen de gesteentes zijn onderlinge verschillen, het meer bruikbare deel met een potentiële vastlegging van ten minste 0,8 tCO₂ per ton gesteente beperkt dit tot 25 Gton CO₂. Er is dus geen gebrek aan grondstoffen, wel moet goed gekeken worden naar het mijnen en de lokale impact hiervan (PBL, 2018).
Energieverbruik
Het grootste deel van het energieverbruik zit vooral in het transport en het fijnmalen van olivijn. (Renforth, P., 2012) schat de totale energiebehoefte op 0,8 tot 2,7 GJ per ton CO₂ afhankelijk van de gewenste korrelgrootte (en dus de reactietijd met CO₂). Dit is significant hoger dan de geschatte energiebehoefte in Hangx en Spiers (2009), namelijk maximaal 0,9 GJ/ton bij een korrelgrootte van 10 micrometer en een afstand van minder dan 1.000 km. Voor een korrelgrootte van 200 micrometer is de energiebehoefte volgens hen ongeveer 0,3 GJ/ton. Het verschil wordt met name verklaard doordat (Renforth, P., 2012) het energieverbruik voor zeer fijn gemalen olivijn bijna een factor 3 hoger inschat.
Ruimtegebruik
Er is geen gebrek aan grondstoffen, wel moet goed gekeken worden naar het mijnen en de lokale impact hiervan. Silicaten komen wereldwijd voor en vormen bijna 95% van de aardkroon.

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.
Olivijnzand is significant duurder dan gewoon zand. De gemiddelde kosten van zandwinning nemen lineair toe met de afstand. De kosten voor laden en lossen van gewoon zand bedragen € 2,40 per m³, en elke kilometer afstand tussen winningsgebied en losgebied kost 9 €ct per m³. Bij een afstand tot de kust van 20 kilometer kost zandwinning dus ongeveer € 4 per m³ of minder dan € 3 per ton (PBL, 2018). Volgens het bedrijf GreenSand kost het winnen van olivijnzand in een bestaande steengroeve in La Coruña, Spanje, met een korrelgrootte tot 2 mm ongeveer € 14 per ton, inclusief het laden in een schip. Het vervoer naar Nederland kost ongeveer € 6 tot 10 per ton. Olivijn uit Noorwegen is ongeveer € 2 duurder door de grotere afstand. Het vermalen van het olivijn tot deeltjes van 200 micrometer kost € 4 à 5 per ton (PBL, 2018). Als er wordt uitgegaan van een gemiddelde marktprijs van olivijn ten opzichte van zand van € 24 per ton olivijn en van de aannames zoals beschreven in (Montserrat, F. et al., 2017) dan vertaalt zich dit in € 70 per ton CO₂ indien wordt gerekend met de CO₂-opname over een periode van 30 jaar waarin ongeveer 40% van het olivijn zal zijn opgelost in het zeewater. Wordt gerekend met 50 jaar, dan dalen de kosten tot € 50 per ton (PBL, 2018). In een techno-economische analyse uit 2020 werden de kosten van het gebruik van enhanced weathering geschat op \$ 80-180 per ton CO₂ voor China, India, de VS en Brazilië. www.nature.com/articles/s41586-020-2448-9

Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel

Met name in de innovatieve concepten voor de toepassing zal een kostenreductie in de mineralisatiereactie te behalen zijn. Zo kan mogelijk de inzet van mineralisatie-producten een grotere rol gaan spelen in bouw-materiaal.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader

Voor grootschalige toepassing van versnelde verwerking is meer duidelijkheid nodig over toepassing in de grond/landbouw. Onderzoek laat zien dat de meest geschikte locaties warme en vochtige gebieden zijn, met name in India, Brazilië, Zuidoost-Azië en China. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaa9c4>

Op het gebied van duurzaamheid moet rekening gehouden worden met de lokale omgeving bij het mijnen van grote hoeveelheden silicaten die gemijnd zullen moeten worden voor grootschalige toepassing van enhanced weathering.

Koppelkansen

Er zijn verschillende toepassingen van vernalen silicaten voor versnelde verwerking:

- Bestrating met bijvoorbeeld grindpaden of ophoogzand van olivijn.
- Kustverdediging met ophoogzand van olivijn. Basalt wordt in Nederland al veel toegepast als dijkbekleding, in kademuuren en op golfbrekers. Dit gaat echter wel om grotere stukken gesteente en niet vergruisd.
- Landbouwtoepassingen voor verbetering van bodemvruchtbaarheid.
- Bouwmateriaal zoals beton.
- Kunstmatige alkalinisatie van de oceanen, dit wordt beschreven in de factsheet Mariene CO₂-opslag

Negatieve neveneffecten

Inzet van versnelde verwerking op grote schaal vereist het mijnen van silicaten op grote schaal. Dit kan de bodem en lokale ecosystemen verstoren, door zowel het mijnen zelf als door vervoer en machines. De effecten op het milieu bij toepassing van versnelde verwerking op grote schaal zijn ook nog niet bekend (Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022).

In landbouwtoepassingen komt het potentieel gevaarlijke nikkel vrij. Onderzoekers van de WUR onderzoeken of nikkel wegspoelt naar het grondwater of dat wordt opgenomen door het gewas of dat het gebonden blijft aan bodemdeeltjes.

Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing

Aangezien zand en grind al worden toegepast in bestrating, kustverdediging en voor de productie van beton, is het aannemelijk dat deze toepassingen snel kunnen overgaan tot het gebruik van bijvoorbeeld olivijn. Olivijnwinning is echter duurder dan normale zandwinning.

Knelpunten

Voor vernalde silicaten geldt dat hoe kleiner de korrelgrootte is, hoe sneller de reactietijd voor verwerking. Er is in de literatuur nog discussie over de exacte verhoudingen tussen de korrelgrootte en de reactietijd per soort silicaat. De exacte verhoudingen hiertussen zijn van belang om een realistische inschatting te maken voor het opslaan van CO₂.

Toepassingen zoals bestrating, kustverdediging en de productie van beton zijn mogelijk eenvoudig te realiseren. Er dient wel onderscheid gemaakt te worden tussen toepassingen die direct in contact staan met de lucht en water (regen) en toepassingen waarbij dit niet het geval is. Voor het laatste geldt, zoals bijv. bij ophoogzand onder wegen, dat versnelde verwerking veel langzamer plaatsvindt. Onderzoek naar deze toepassingen is nodig om een goede inschatting te maken van het potentieel voor negatieve emissies. Bij het uitstrooien van bijv. olivijn over (landbouw)grond is er wel sprake van een groot en direct contactoppervlak met de lucht. Deze toepassing kent nog meer onzekerheden en er is meer onderzoek nodig voor deze toepassing in combinatie met voedselveiligheid (Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022).

Daarnaast is de bouwsector ook minder bekend met het gebruik van deze materialen, ook al lijken die op huidige materialen zoals zand. Er is mogelijk certificering nodig voor het veilig en betrouwbaar gebruiken van silicaten in de grond of rond de kust. Zo kunnen silicaten sporen bevatten van zware metalen die mogelijk terecht kunnen komen in het grondwater. Om dergelijke problemen aan te pakken en om de betrouwbaarheid en prestaties van

versnelde verwerking op lange termijn te garanderen, is er meer onderzoek nodig met betrekking tot de eigenschappen van de materialen en vervuiling (Möllersten, K. & Naqvi, R., 2022).

Kwantificering van potentieel Nederland

Maximum technisch potentieel

Ophoogzand: Voor Nederland lijkt de vervanging van ophoogzand door olivijn een interessante mogelijkheid (Montserrat, F. et al., 2017). Het verbruik van dit zand verschilt vrij sterk van jaar tot jaar, maar was gemiddeld 78 Mton zand per jaar (=52 miljoen m³) in de periode 2000-2014, uitgezonderd het ophoogzand voor land-aanwinning (Maasvlakte II) en uitgezonderd het gebruik als beton- en metselzand (gemiddeld 19 Mton) (PBL, 2018). Vervanging van regulier ophoogzand lijkt ongeschikt aangezien dit meestal onder wegen en huizen wordt gebruikt en niet of nauwelijks blootstaat aan water. Het ophoogzand voor kustverdediging zou wel interessant kunnen zijn. Hiervoor geldt dat het gemiddelde verbruik in de periode 2000-2014 gelijk was aan ruim 26 Mton ophoogzand per jaar. In Montserrat et al. (2017) is gesimuleerd hoe snel een dergelijke hoeveelheid olivijnzand zal reageren bij een korrelverdeling van ongeveer 200 micrometer. Indien deze vervanging langere tijd wordt volgehouden zal de CO₂-opname over een periode van 25 jaar toenemen tot 9 Mton CO₂ per jaar.

Beton: PBL heeft ingeschat hoeveel CO₂ kan worden vastgelegd als een deel van de Nederlandse betonproductie overstapt op olivijn. Op basis van dezelfde gegevens kan worden ingeschat wat het negatieve emissiepotentieel is als alle rivierzand in beton (823 kg/m³) zou worden vervangen door olivijn. Met een vastlegging van 0,375 kg CO₂/kg olivijn zou dit 308 kg CO₂/m³ beton zijn. Op een totale jaarlijkse betonproductie van 16 miljoen m³ zou dit 5 Mton/jaar aan negatieve emissies op kunnen leveren. Als we ervan uitgaan dat het winnen en vermalen van olivijn ook energie kost, dat minder dan 100% van het zand door olivijn kan worden vervangen en dat de betonproductie minder wordt door overstap op hergebruikt betongranulaat en biobased bouwmaterialen, moet dit potentieel significant naar beneden worden bijgesteld.

Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)

Aangezien grootschalige toepassing van silicaten nog onderzoek en voorbereiding vergt, is het onbekend wanneer grootschalige inzet mogelijk is.

Ophoogzand: (PBL, 2018) maakt een schatting van de hoeveelheid negatieve emissies indien vanaf 2023 wordt begonnen om het ophoogzand te vervangen met olivijn. De inschatting is dat dan in 2030 0,5 Mton CO₂/jaar kan worden opgenomen. Vervolgens kan olivijn het totaal in Nederland gebruikte ophoogzand bij kustverdediging vervangen (26 Mton ophoogzand per jaar), waarmee uiteindelijk in 2050 4,7 Mton CO₂/jaar kan worden vastgelegd. Het is niet duidelijk of PBL hier de energiebehoefte voor het vermalen en transport hier al heeft verdisconteerd.

Beton: PBL schat in dat in 2030 een kwart van de niet-dragende constructies met hergebruikt en 'groen' beton te produceren is en in 2050 de helft van de totale betonproductie in Nederland (16 miljoen m³). De bijdrage van olivijn schatten ze op 32 kg/m³ in 2030 en 113 kg/m³ in 2050, wat uitkomt op respectievelijk 0,2 en 0,7 Mton/jaar.

Andere toepassingen: Voor toepassingen zoals bestrating met bijvoorbeeld grindpaden en landbouwtoepassingen zijn geen potentieelberekeningen bekend voor Nederland, mede vanwege de onzekerheid rondom grootschalige toepassing.

Belangrijkste onzekerheden

De mondiale silicaatvoorraden zijn groot en dit vormt verder geen beperkingen. Volgens (PBL, 2018) is het vinden van zinnige toepassingen die commercieel interessant en versneld CO₂ opslaan het voornaamste knelpunt. Voor het toepassen van silicaten is het belangrijk dat meer onderzoek gedaan wordt naar het gebruik en mogelijke sporen van vervuiling en of hier effect van is op de bodem en het grondwater.

Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))

In een recente studie naar de toepasbaarheid van olivijn worden laboratoriumexperimenten en simulaties beschreven over de toepassing van olivijnzand in kustwateren (Montserrat, F. et al., 2017). Hier kwam uit naar voren dat dit een interessante optie is, maar dat nader onderzoek nodig voor een betere kwantificering van de CO₂-vastlegging onder veldcondities.

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
De grootste producent van silicaten is Noorwegen met 3,5 Mton per jaar. Op dit moment zijn de grootste afnemers de hoogovens. Volgens GreenSand kan de productie van de door hun gebruikte mijnen in Europa op korte termijn worden opgevoerd tot 6 Mton per jaar. Hiermee kan jaarlijks ongeveer ruim 2 Mton CO ₂ vastgelegd worden.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Het realistisch potentieel zal met name afhangen van nuttige toepassingen en economische inpassing van vermaalde silicaten.
Belangrijkste onzekerheden
De mondiale silicaatvoorraden zijn groot en dit vormt verder geen beperkingen. Volgens (PBL, 2018) is het vinden van zinnige toepassingen die commercieel interessant en versneld CO ₂ opslaan het voornaamste knelpunt. Voor het toepassen van silicaten in landbouw en als ophoogzand is het belangrijk dat meer onderzoek gedaan wordt naar het gebruik en mogelijke sporen van vervuiling en of hier effect van is op de bodem en het grondwater.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
In een recente studie naar de toepasbaarheid van olivijn worden laboratoriumexperimenten en simulaties beschreven over de toepassing van olivijnzand in kustwateren (Montserrat, F. et al., 2017). Hier kwam uit naar voren dat dit een interessante optie is, maar dat nader onderzoek nodig voor een betere kwantificering van de CO ₂ -vastlegging onder veldcondities.

A.6 Mariene CO₂-opslag

Beschrijving van de techniek: Mariene CO₂-opslag is een verzamelterm voor een aantal verschillende routes om CO₂ vast te leggen in zee of op de oceaانبodem. De voornaamste zijn het stimuleren van bestaande mariene ecosystemen (blauwe koolstof) en kunstmatige alkalinisatie van de oceanen. De maximale wereldwijde capaciteit van blauwe koolstof ligt rond 0,13-0,8 Gt/jaar en bij kunstmatige alkalinisatie rond de 8,43-12,15 Gt/jaar. Maar de negatieve effecten van kunstmatige alkalinisatie op ecosystemen zijn waarschijnlijk veel groter dan de positieve effecten op mitigatie van klimaatverandering. Er is nog veel onbekend over mariene CO₂-opslag.

Koolstofbron
Atmosfeer
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
Biologisch via zeewier, mangroves of chemisch via kunstmatige alkalinisatie van de oceaan.
Opslagmedium
Oceaan of planten die in de oceaan groeien
Beschrijving van verschillende varianten
Blauwe koolstof: Stimuleren van bestaande mariene ecosystemen die via fotosynthese CO₂ opnemen en opslaan. De duur van opslag varieert per type ecosysteem of biomassa. Bij afsterven kan een deel van de CO₂ sedimenten, in het water worden opgenomen of weer in de atmosfeer terechtkomen. Blauwe koolstof kan grofweg in drie categorieën ingedeeld worden: 1. Ecosystemen waar voldoende kennis over bestaat, zoals mangroven, zoutmoerassen en zeegrasbeddingen. 2. Opkomende opties zoals grootschalige zeewierbossen. 3. Opties die nog in de kinderschoenen staan met focus op beschermen van mariene fauna, van oesters tot walvissen. Kunstmatige alkalinisatie van de oceanen. De oceanen zijn de belangrijkste opnameput van koolstof uit de atmosfeer. Silicaten zoals olivijn (Mg₂SiO₄) en serpentijn (Mg₃Si₂O₅(OH)₄) nemen (op zeer lange termijn) CO₂ op. Dit proces zou kunstmatig versneld kunnen worden door olivijn extreem fijn te malen en op te lossen in oceanen.

Afbakening keten en netto-negatief
Als negatieve emissie telt alle koolstof opgenomen door de biomassa of oceanen. De maximale capaciteit van CO ₂ -verwijdering wordt wereldwijd geschat op 8,43-12,15 Gton/jaar voor kunstmatige alkalinisatie en 0,13-0,8 Gton/jaar voor blauwe koolstof (NEGEM, 2022).

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid
Kunstmatige alkalinisatie bevindt zich nog in het laboratorium stadium. De geologische beschikbaarheid van olivijn is zeer groot dus dat levert geen beperkingen op. Blauwe koolstof vergt geen specifieke technologie en maakt voornamelijk gebruik van de reeds bestaande ecosystemen.
TRL + toelichting
Kunstmatige (grootschalige) alkalinisatie in oceanen: TRL 4 tot 5, op land zijn er kleinschalige toepassingen die zich commercieel bewezen hebben: TRL 8-9 (PBL, 2018). Blue carbon: TRL 5-6 (NEGEM, 2022).
Energieverbruik
Energie is nodig voor vervoer en het fijnmalen van olivijn. Afhankelijk van de korrelgrootte en afstand is dit 0,3-2,7 GJ/tCO ₂ . Energieverbruik voor blauwe koolstof: n.v.t.
Ruimtegebruik
Toepassing in oceanen zou geen ruimtelijke beperkingen opleveren.

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.
Gerekend met CO ₂ -opname over een periode van 30 jaar, kan voor oplossen van olivijn in zeewater 70 €/tCO ₂ aangehouden worden. Negem schat de kosten op 3-160 €/tCO ₂ (NEGEM, 2022). Blauwe koolstof: 9 €/tCO ₂ (NEGEM, 2022) (o.b.v. wetland restoration).
Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel
Onbekend.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader
De negatieve effecten van kunstmatige alkalinisatie op ecosystemen zijn waarschijnlijk groter dan de positieve effecten op mitigatie van klimaatverandering. Een duurzaamheidskader is niet afdoende.
Koppelkansen
Blauwe koolstof kan gecombineerd worden met natuurbescherming en -ontwikkeling.
Negatieve neveneffecten
Oplossen olivijn in oceanen zou kunnen leiden tot verhoogde concentraties van magnesium, cadmium, silicium, ijzer en nikkel. Silicium en ijzer zouden de groei van micro-organismen in het water stimuleren met meer CO ₂ -opname tot gevolg. De verhoogde concentraties zouden echter een effect op de gehele (incl. menselijke) voedselketen en ecosystemen kunnen hebben. Nikkel is potentieel toxisch en zou bij grootschalige toepassing problemen kunnen opleveren. Verschillende zeeorganismen zouden niet in staat kunnen blijken om te gaan met verhoogde alkalinisatie. Kunstmatige alkalinisatie kan ook spontane neerslag van gebluste kalk (calciumhydroxide) veroorzaken, wat weer tot aantasting van koralen kan leiden (NEGEM, 2022). Blue carbon heeft vooral positieve neveneffecten (op vissen, waterzuivering, kustverdediging), maar het is mogelijk dat inheemse soorten worden verdrongen of bestaande ecosystemen verstoren. Indien de biomassa op grote schaal wordt geoogst en wordt afgezonken in de diepe oceaan (voor permanente opslag) kan dit wel negatieve consequenties hebben, zowel op de plek van oogst als op de bodem van de oceaan.
Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing
N.v.t.
Knelpunten
Zie neveneffecten.

Kwantificering van potentieel Nederland

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting (NL/Europees)
Geen gegevens voor Nederland.
Maximum technisch potentieel
De maximale capaciteit van CO ₂ -verwijdering wordt wereldwijd geschat op 8,43-12,15 Gton/jaar voor kunstmatige alkalinisatie en 0,13-0,8 Gton/jaar voor blauwe koolstof (NEGEM, 2022).
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Omdat de meeste mariene CDR uitgaan van de diepe oceaan, gaan we er niet van uit dat er realistisch potentieel in Nederland is voor deze vorm van negatieve emissies.
Belangrijkste onzekerheden
Veel onzekerheid omtrent mariene CO ₂ -opslag zowel voor klimaateffect als ook voor negatief ecologisch effect.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Onbekend

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
Onbekend
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Onbekend
Belangrijkste onzekerheden
Zelfde als voor Nederland
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Onbekend

Gebouwde referenties
- (PBL, 2018) - (NEGEM, 2022)

A.7 Direct air capture + Carbon storage (DACCS)

Directe CO₂-verwijdering is de directe afvang van CO₂ uit de lucht, gevolgd door gebruik of permanente geologische opslag in bijv. lege gasvelden. De combinatie met opslag wordt ook wel 'direct air capture and carbon storage (DACCS)' genoemd.

Bij gebruik kan de afgevangen CO₂ op zowel langdurige als kortere termijn worden opgeslagen. Het kan ook als grondstof of voor brandstof worden gebruikt, maar dan is het geen negatieve emissie. Daadwerkelijke toepassing van DAC wordt nog gehinderd door hoge kosten en hoog energieverbruik.

Ondanks de onzekerheid wat betreft de uiteindelijke praktische geschiktheid, doet vrijwel elk klimaatneutraal scenario een beroep op DAC, zowel voor de productie van synthetische brandstoffen en grondstoffen als voor permanente geologische opslag. Met andere woorden: zonder DAC is een klimaatneutraal scenario eigenlijk niet haalbaar.

Beschrijving van de techniek

Koolstofbron
De atmosfeer. Het aandeel CO ₂ in de atmosfeer is ongeveer 0,04% (410 ppm). De lage concentratie maakt CO ₂ -afvang energie-intensief om de CO ₂ eruit te filteren.
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
CO ₂ wordt chemisch-fysisch uit de lucht gefilterd met behulp van een filterinstallatie.
Opslagmedium
Ondergrondse geologische opslag (CCS) of gebruik in producten met een lange levensduur; zie voor het potentieel daarvan de paragraaf biobased materialen. Theoretisch kan de vastgelegde koolstof/CO ₂ ook worden vastgelegd in mineralen. Grootschalige uitrol van die route vraagt echter nog meer innovaties (en kostenreducties) dan de DACCS-route, die laatste lijkt op dit moment dan ook kansrijker.
Beschrijving van verschillende varianten
Er zijn verschillende DAC-methoden. In twee hoofdmethodes die nu op de markt zijn wordt (buiten)lucht in contact gebracht met een chemische stof waaraan CO ₂ zich bindt. Daarna wordt de CO ₂ vrijgemaakt en wordt een geconcentreerde CO ₂ -stroom verkregen. De twee hoofdmethodes zijn (PBL, 2018): – Liquid DAC: Installaties waarin de buitenlucht in contact wordt gebracht met een oplossing van natriumhydroxide (NaOH) dat CO₂ bindt en natriumcarbonaat vormt (Na₂CO₃). Daarna wordt calciumhydroxide (CaOH) toegevoegd, waardoor calciumcarbonaat (CaCO₃) ontstaat en opnieuw natriumhydroxide. De CO₂ wordt vrijgemaakt door verhitting tot 900°C, waar veelal aardgas voor wordt verstoekt. – Solid DAC: Installaties met filters waarin een poreus granulaat zit met een vast sorptiemiddel (meestal een amine) dat CO₂ absorbeert. De CO₂ wordt vrijgemaakt door het filter in contact te brengen met stoom van 100°C. Er is momenteel geen duidelijke indicatie te geven over welke technologie het meest kostenefficiënt zal worden in de toekomst. Mogelijk blijven ze naast elkaar bestaan (Ricardo Energy & Environment, 2022). Daarnaast zijn er talloze alternatieve concepten die op dit moment worden onderzocht en ontwikkeld welke in de toekomst gunstiger kunnen scoren op energieverbruik en kosten. In een ontwerpvariant, die ook wel ‘artificial trees’ of ‘mechanical trees’ wordt genoemd, wordt de lucht niet actief langs filters geblazen, maar nemen synthetische ‘bladeren’ CO₂ op als de wind erlangs blaast. Deze variant zit in een vroege ontwikkelfase.
Afbakening keten en netto-negatief
DAC betreft uitsluitend het proces waarbij CO ₂ aan de atmosfeer wordt onttrokken met behulp van een installatie. Wat er vervolgens met die CO ₂ gedaan wordt, bepaalt of het netto-negatief is. Alleen als de CO ₂ permanent wordt opgeslagen telt het als negatief.

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid
De technologie is momenteel op hele kleine schaal beschikbaar. Een eerste installatie in IJsland vangt 4.000 ton CO ₂ per jaar af (DenkWerk, 2022). Grootschalige toepassing is nog gelimiteerd door hoge kosten en de energie intensiteit van het proces. Er zijn nu wereldwijd 19 DAC-installaties, die samen ongeveer 0.01 Mton CO ₂ /jaar afvangen (Ricardo Energy & Environment, 2022).
TRL + toelichting
DAC is nog voornamelijk in laboratoriumstadium en het TRL wordt tussen 4 tot 8 geschat. Onderzoek wordt nog verricht naar betere materialen, processen en naar opschaling (PBL, 2018).
Energieverbruik
Direct air capture kost veel energie, vooral als warmte (waarvoor momenteel aardgas wordt gebruikt), maar ook als elektriciteit. Met de emissie van dit energiegebruik moet rekening gehouden worden bij het bepalen van het netto-klimaatteffect van de DAC en CO ₂ -opslag. Wanneer deze energie uit hernieuwbare bronnen komt, is de

impact van het energieverbruik op het netto-klimaatteffect het kleinst. Aardgas kan bijvoorbeeld door groene waterstof vervangen kunnen worden.

De theoretische minimum energie-input is 1,8 GJ/ton koolstof, nodig voor de filtering van buitenlucht en de chemische reactie (Smith, P. & et al., 2015). Als ook het energiegebruik voor productie, verwerking en transport van de grondstoffen voor de benodigde materialen worden meegerekend dan stijgt het totale energieverbruik tot 45 GJ/ton koolstof (Smith, P. & et al., 2015). In (Ricardo Energy & Environment, 2022) wordt het energieverbruik voor de twee methoden van DAC als volgt weergegeven:

Energieverbruik voor DAC (Ricardo Energy & Environment, 2022)

	Solid DAC	Liquid DAC
Elektriciteit (GJ/tCO ₂)	0,6-1,1	0,7-1,7
Warmte (GJ/tCO ₂)	3,4-4,8	7,7-10,7
Temperatuur	80-130	900

Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik van DAC zelf is laag: minder dan 0,001 ha/ton koolstof/jaar. Het gaat om een filterinstallatie die op elke plaats kan staan waar buitenlucht is. Om de jaarlijkse CO₂-uitstoot van Nederland af te vangen, zou ongeveer 250 km² nodig zijn (PBL, 2018). Als het landgebruik van wind- en zonne-parken die nodig zijn om DAC-installaties van elektriciteit te voorzien wordt meegeteld, dan is het ruimtegebruik aanzienlijk hoger (Smith, P. & et al., 2015). Vanwege de grote energievraag ligt het voor de hand om duurzame energieopwekking in de buurt van een DAC-installatie te hebben.

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.

De totale kosten van DAC (incl. CCS) zijn grofweg 1.600-2.080 \$/ton CO₂, waarvan ca. tweederde CAPEX en een derde OPEX (Smith, P. & et al., 2015). In (PBL, 2018) wordt de schatting gegeven van CAPEX 425 €/t CO₂ en OPEX 240 €/t CO₂. Ricardo citeert kosten van 85-209 €/tCO₂ voor DAC m.b.v. de eerste hoofdmethode (liquid DAC), en 540 €/tCO₂ voor de tweede hoofdmethode (solid DAC). IEA schat voor 'first-of-a-kind' DACCS-projecten de kosten tussen de 400 en 700 \$/tCO₂, dit kan mogelijk dalen tot 150-200 \$/tCO₂ (IEA, 2021).

DAC wordt pas rendabel bij hoge CO₂-prijzen, goedkope hernieuwbare elektriciteit en verlaagde investeringskosten van DAC. Hierbij is een raamwerk voor een adequate vergoeding van negatieve emissies van groot belang.

Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel

In 2011 werden de kosten van DAC nog op 600 \$/ton geschat, wat is gedaald naar 94-243 \$/ton (DenkWerk, 2022). Climeworks heeft tot doel om de kosten op lange termijn te reduceren tot 85 €/ton CO₂-afvang met een ruimtelijk beslag van 24 kton CO₂-afvang per ha per jaar (PBL, 2018). Vanwege de leercurve kan er een halvering van de kosten verwacht worden in 2050.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader

Belangrijke randvoorwaarde is dat er additionele duurzame elektriciteit en/of warmte beschikbaar is. Een tweede randvoorwaarde is dat de afgevangen CO₂ duurzaam opgeslagen of gebruikt kan worden.

Koppelkansen

DAC kan gekoppeld worden aan CO₂-opslagfaciliteiten, brandstofproductielocaties, chemie, glastuinbouw en locaties voor de opwekking van hernieuwbare elektriciteit. Een concrete koppelkans bestaat in het gebruik van surplus hernieuwbare elektriciteit van zon- of windparken.

Negatieve neveneffecten

-

Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing
Een geschikte locatie voor een grote DAC-installatie is een locatie met veel goedkope hernieuwbare energie-opwekking. Hiernaast zou de installatie het best gelokaliseerd kunnen worden waar de afgevangen CO ₂ wordt opgeslagen of gebruikt om transportkosten laag te houden.
Knelpunten
Mogelijk de beschikbaarheid van hernieuwbare energie.

Kwantificering van potentieel Nederland

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting (NL/Europees)
Momenteel wordt DAC nog niet toegepast.
Maximum technisch potentieel
Afhankelijk van beschikbare ruimte. Met 250 km ² aan installaties zou jaarlijkse Nederlandse uitstoot uit 2016 afgevangen kunnen worden (uiteraard is minder ruimte nodig bij een kleiner afvangvolume). Daarnaast zijn er grote hoeveelheden hernieuwbare energie nodig om de installaties te voeden.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Hoewel de meeste mondiale scenario's uitgaan van DAC, betekent dit niet dat dit ook in Nederland zal plaatsvinden. Het potentieel is beperkt door hoge kosten, hoge energievraag en (te lage) CO ₂ -prijs. Het realistisch potentieel zal daarnaast sterk afhangen van de mogelijkheden die andere technieken bieden. In het TRANSFORM-scenario gaat TNO voor Nederland uit van 18 Mton per jaar vanaf 2050. Maar vanwege de uitdagingen schat (PBL, 2018) bij de huidige verwachtingen het realistisch potentieel voor 2050 in als nihil. Het is mogelijk dat bij een zeer hoge CO ₂ -prijs (i.e. opbrengst) in 2050 en ruim beschikbare duurzame energie (warmte en elektriciteit) het wel aantrekkelijk wordt om DAC(CS) toe te passen. Ruimtelijk loopt DAC niet gauw tegen grenzen aan, hoewel het voor zeer grote installaties waarschijnlijker is dat deze geplaatst worden op plekken waar de grond goedkoop is en opslag- dan wel transportcapaciteit beschikbaar is.
Belangrijkste onzekerheden
Vooraf kosten, maar ook beschikbaarheid hernieuwbare energie en mate van vergoeding voor geleverde negatieve emissies.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
N.v.t.

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
Bij 30-100 \$/tCO ₂ is het wereldwijd maximaal potentieel van DAC in combinatie met opslag ongeveer 5 Gt CO ₂ /jaar (DenkWerk, 2022). Momenteel in experimentele fase (1 kton/jaar wereldwijd), maar klimaatneutrale EU-scenario's gaan uit van tussen de 100 en 200 Mton CO ₂ /jaar in 2050.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Sterk afhankelijk van kosten en prijsontwikkeling van hernieuwbare elektriciteit.
Belangrijkste onzekerheden
Kosten
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
N.v.t.

Gebruikte referenties

- (DenkWerk, 2022). Voorbij netto-nul naar planeet-positief: Drie transitie om Nederland terug te brengen binnen de grenzen van een leefbare aarde.
- (PBL, 2018). Negatieve emissies: Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland.
- (Smith, P. & et al., 2015). Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions.
- (Ricardo Energy & Environment, 2022)

A.8 Houtbouw

Door het toepassen van houtproducten in de bouw wordt biogene koolstof tijdelijk vastgelegd. Bij producten met een lange levensduur zoals constructief hout komt de koolstof pas na 50 jaar of langer vrij. Bij volledig hergebruik van bouwmaterialen wordt de periode zelfs nog verlengd.

Het gebruik van hout en andere biobased materialen in andere toepassingen (zoals meubels, pallets, speelgoed, sportmaterialen, isolatiematerialen en grond-, weg- en waterbouw) bespreken we onder de categorie biomaterialen.

Er is veel discussie over het meetellen van biobased materialen als negatieve emissies, omdat het geen permanente opslag behelst. Aan het einde van de levensduur komt de CO₂ namelijk weer vrij, tenzij het product eeuwig hergebruikt wordt of CO₂ na verbranding wordt opgevangen en opgeslagen (CCS).

Beschrijving van de techniek

Koolstofbron
De atmosfeer.
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
Atmosferische CO ₂ wordt in bosbouw omgezet in hout.
Opslagmedium
Bomen vangen de CO ₂ af. Het hout wordt geoogst en gebruikt als bouw materiaal.
Beschrijving van verschillende varianten
Twee varianten met hout als constructiemateriaal zijn houtskeletbouw (HSB) en constructies uit kruislaaghout (CLT). Hierbij vervangt hout staal en beton in woningbouw en utiliteitsbouw. – Houtskeletbouw (hsb) is een hoogwaardige prefab bouwmethode voor woningen tot vier verdiepingen hoog. Dit bouwsysteem is samengesteld uit diverse materialen, waaronder hout en/of houten plaatmaterialen. – Cross Laminated Timber (CLT) bestaat uit kruislings verlijmd lamellen, veelal samengesteld uit vurenhout. CLT-hout kan op constructieve wijze worden toegepast in casco's voor woningen, flats en utiliteitsbouw (bron TNO). Ook kan hout gebruikt worden in vloeren, kozijnen en gevels. Naast hout zijn andere biobased materialen mogelijk als dakbedekking, gevelbekleding, tussenwanden, vloeren en isolatiematerialen. Voorbeelden zijn vlas, hennep, stro, kurk en cellulose (NIBE Research, 2019). Wij richten ons in deze factsheet enkel op hout.
Afbakening keten en netto-negatief
De CO₂-verwijdering zelf vindt plaats in de (duurzame) houtproductie (bosbouw). De koolstof wordt vervolgens verplaatst van het bos naar het gebouw. Het totale systeem bestaat daarbij uit zowel het bos (vastlegging) als het gebouw als het hergebruik en einde van de levenscyclus van het materiaal (Himes, A. & Busby, G., 2020). Er is geen sprake van dubbeltelling als de oogst van hout wordt afgetrokken van de koolstofopslag in het bos. Volgens de IPCC-richtlijnen wordt dit onder harvested wood products (HWP) geteld. In de bouw wordt koolstofopslag in biobased materialen op dit moment niet meegeteld als negatieve emissies. Dat is omdat wordt aangenomen dat de koolstof aan het eind van de levensduur van het materiaal weer vrijkomt, bijvoorbeeld door verbranding. Echter kunnen bouwmaterialen na sloop van een gebouw opnieuw worden gebruikt, waardoor de levensduur verlengd kan worden. In de huidige methodieken voor het bepalen van de milieuprestatie van bouwproducten (EN 15804+A2 en de Bepalingsmethode) wordt permanente of tijdelijke koolstofopslag buiten beschouwing gelaten. Ook de emissie van de opgeslagen CO₂ uit hout bij diens verbranding wordt niet meegenomen in impactberekeningen, ondanks dat er bij verbranding van hout grote hoeveelheden (biogeen) CO₂ vrijkomt. Zie ook (SGS Search, 2023).

Er is veel discussie of koolstofopslag in bouwmaterialen moet meetellen als negatieve emissies, zowel op nationaal als Europees niveau. Zowel definitieve opslag van CO₂ als tijdelijke uitstel van CO₂-emissie in hout gedurende ten minste 20 jaar draagt namelijk bij positief aan het oplossen van de klimaatdoelen, doordat de CO₂ niet in de atmosfeer aanwezig is (CE Delft, 2022c)

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid

De toepassing van biobased bouwproducten zit in de early adopters-fase. Er zijn veel pilotprojecten en pioniers die met biobased bouwproducten werken, maar biobased constructies zijn buiten de woningbouw nog niet door-gedrongen als regulier alternatief bij grootschalige bouwprojecten, zeker met betrekking tot hoogbouw en utiliteitsbouw. Ook biobased isolatiemateriaal en wandafwerking worden nog lang niet zo grootschalig toegepast als hun fossiele en minerale varianten (CE Delft, 2021). Hout wint wel snel aan populariteit als bouw materiaal, waardoor verwacht wordt dat de vraag naar duurzaam hout na 2030 het aanbod voorbij kan streven (NIBE Research, 2019).

TRL + toelichting

8-9 (PBL, 2018) en (Smith, S. M. & et al., 2023)

Energieverbruik

De productie van biobased bouwmaterialen gebruikt in veel gevallen minder energie dan van traditionele bouwmaterialen (<https://www.nibe-sustainability-experts.com/nl/news/de-potentie-van-biobased-materialen-in-de-bouw>). Het energiegebruik is momenteel nog wel fossiel (CE Delft, 2023)

Ruimtegebruik

Het ruimtegebruik zit in de productie van duurzaam hout. Duurzame bosbouw kan in Europe de komende jaren maximaal 50% groeien, waarmee niet kan worden voldaan aan de groeiende vraag. Hierbij speelt ook mee dat hout ook aan populariteit wint voor energieopwekking, wat een negatief effect heeft op het aanbod van hout voor de bouw (NIBE Research, 2019).

Het is daarom belangrijk om nu al het toekomstige aanbod van hout te verhogen. Het duurt namelijk decennia voordat nieuwe plantages gerooid kunnen worden (CE Delft, 2023).

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.

De kosten van biobased bouwmaterialen liggen momenteel meestal wat hoger (10-20%) dan conventionele bouwmaterialen. De kosten van biobased bouwwerken liggen momenteel meestal beduidend hoger dan conventionele bouw, van 10-20% hoger tot tweemaal zo hoog worden genoemd (CE Delft, 2021). HSB kan echter ook zo'n 10% goedkoper zijn dan traditionele bouwmethoden, mits al vroeg in het proces voor houtbouw is gekozen (PIANOo, 2021). Andere literatuur (Mallo, M. F. L. & Espinoza, O., 2016) geeft in een berekening aan dat de kosten van CLT voor de VS 20% lager zouden kunnen zijn dan alternatieven.

Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel

Er wordt verwacht dat standaardisatie en verhoogde kennis over en ervaring met houtbouw de kosten kan verlagen (CE Delft, 2021). Aan de andere kant kan bij toenemende schaarste van hout de materiaalkosten juist toenemen (NIBE Research, 2019).

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader
Duurzaam bosbeheer is essentieel, anders is ontbossing, vermessing, etc. een risico. Competitie in landgebruik en met andere vormen van biomassagebruik.
Koppelkansen
Houtbouw heeft veel positieve eigenschappen t.o.v. beton zoals: – betere milieuprestatie, bijv. smog, ecologische toxiciteit; – in sommige situaties lagere kosten; – aantrekkelijke esthetische en akoestische eigenschappen; – goede seismische eigenschappen; – snellere bouwtijd door prefab materialen. (Himes, A. & Busby, G., 2020)
Negatieve neveneffecten
Duurzaam bosbeheer is essentieel, anders is ontbossing, vermessing, etc. een risico.
Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing
Afhankelijk van snelheid van nieuwbouw; schaarste/kosten van hout.
Knelpunten
De knelpunten bij houtbouw zijn voornamelijk: – andere bouwtechnische eisen voor brandveiligheid; – in sommige situaties hogere kosten; – geluidsoverdracht in bouwwerken (aanvullende geluiddempende isolatie benodigd); – gebrek aan kennis en ervaring met houtbouw bij opdrachtgevers en aannemers.

Kwantificering van potentieel Nederland

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting (NL/Europees)
Houtskeletbouw en CLT worden momenteel al toegepast in de nieuwbouw in Nederland, maar zijn nog niet gangbaar. In 2019 werd 2% van de Nederlandse nieuwbouw in hout uitgevoerd. Het grootste aandeel hiervan vond plaats binnen de woningbouw, waar hout 16% van alle bouwmaterialen besloeg (NIBE Research, 2019).
Maximum technisch potentieel
(NIBE Research, 2019) maakt een inschatting van het potentieel voor biobased bouwen in Nederland. Voor het 2050-scenario wordt uitgegaan van het uitvoeren van de volledige nieuwbouw in houtbouw, zie onder.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Nibe heeft scenario's opgesteld voor het potentieel in 2030 en 2050. In 2030 lijkt het de auteurs realistisch om 10% biobased nieuwbouw te realiseren. De intentie is om in Nederland 1 miljoen woningen te bouwen tussen 2020-2030. Volgens dit scenario zouden er in 2030 ten opzichte van 2020 jaarlijks ruim 9.000 biobased woningen, 2.200 biobased appartementen, 150 biobased kantoren, 260.000 m ³ biobased asfalt, 400 km houten geleiderail, 150 houten portalen en 70 Houten bruggen of viaducten kunnen worden gerealiseerd. Dit zou dan gezamenlijk jaarlijks 359 kton CO ₂ -uitstoot besparen.
Als het volledig technisch potentieel in 2050 wordt bereikt, schat Nibe de hoeveelheid biomassa die nodig is om alle nieuwbouw (woningen en utiliteitsbouw) biobased uit te voeren. Daarvoor is nodig: – 2.600 kt/jaar biobased materialen in nieuwbouw; – 181 kt/jaar hout en 240 kt/jaar lignine in GWW.
Volgens (Himes, A. & Busby, G., 2020) is de CO ₂ -opslag in houten bouwmaterialen 753-800 kg CO ₂ /m ³ . Bij een dichtheid van 500 kg/m ³ betekent dat een opslag van 1,5 kg CO ₂ e/kg hout. Als we ervan uitgaan dat dit geldt voor alle biobased materialen, kan er in de Nibe-scenario's in 2030 400 kton CO ₂ /jr en in 2050 3.900 kton CO ₂ /jr worden opgeslagen.

Belangrijkste onzekerheden
– Daadwerkelijke toepassing van hout en biobased materialen in de bouw. – Beschikbaarheid van biograndstoffen en (duurzaam) hout, o.a. door groeiende vraag naar hout door energiesector.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Meetbaarheid en monitoring is een aandachtspunt

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
Harvested wood products in the EU represent an active net carbon sink of around -40 MtCO ₂ e/year, while also generating climate benefits through a material substitution effect, with values ranging from -18 to -43 MtCO ₂ e/year 22. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0572
(Göswein, V. et al., 2021) hebben het totale potentieel ingeschat van houtbouw voor nieuwbouw en renovatie in de EU. Zij komen op 600 Mt CO ₂ , cumulatief potentieel in Europa in 2050. Het startjaar is niet duidelijk uit de studie. Aangenomen dat dit 2025 is, is er jaarlijks een potentieel van 24 Mt CO ₂ .
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Onbekend.
Belangrijkste onzekerheden
Zelfde als NL.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Zelfde als NL.

Gebruikte referenties
– (Himes, A. & Busby, G., 2020) – (NIBE Research, 2019) – (SGS Search, 2023) – (CE Delft, 2022c) – (Smith, S. M. & et al., 2023) – (Smith, S. M. & et al., 2023) – (CE Delft, 2023) – (Mallo, M. F. L. & Espinoza, O., 2016) – (Göswein, V. et al., 2021) – (Ögmundarson, O. et al., 2019)

A.9 Biomaterialen

In de chemische sector worden fossiele grondstoffen, met name nafta, omgezet in een grote groep verschillende producten. Deze producten zijn bijvoorbeeld brandstoffen en brandstofadditieven, kunstmest, kunststoffen en synthetische rubbers, geneesmiddelen, cosmetica, oplosmiddelen, smeermiddelen, etc. In plaats van fossiele grondstoffen kan ook biomassa of afgevangen CO₂ als koolstofbron gebruikt worden. Als de chemische producten vervolgens een lange levensduur hebben en/of herhaaldelijk gerecycled worden, is er sprake van langdurige koolstofvastlegging.

Hier focussen we ons op biobased kunststoffen, omdat deze chemische producten de langste levensduur hebben en gerecycled kunnen worden.

In biobased kunststoffen wordt koolstof wordt door de groei van gewassen vastgelegd. Door biochemische processen wordt de koolstof verwerkt in materialen met een bepaalde levensduur. Aan het eind van de levensduur moet deze koolstof niet vrijkomen, maar wordt

het materiaal hergebruikt (circulaire economie) of verbrand in AVI's met CCS (wat in deze studie valt onder BECCS). In theorie zorgt duurzame stort ook dat de koolstof niet vrijkomt, maar dit is zonde van de waarde van hergebruik of verbranding; ook de industrie zelf is tegen landfilling (Zero plastics to landfill • Plastics Europe).

Terwijl de koolstof in de materialen is opgeslagen, is de CO₂ (tijdelijk) uit de atmosfeer. Hoewel de levensduur van sommige kunststof producten beperkt is (bijv. verpakkingen die binnen een jaar gebruikt worden), zijn er ook toepassingen met een langere levensduur. Hierbij is te denken aan kunststof dat in de bouw of in auto's wordt gebruikt. Er is hierdoor een aanzienlijke hoeveelheid kunststof 'opgeslagen' in de economie. Ook is op dit moment de vraag naar nieuwe kunststof producten aanzienlijk groter dan de hoeveelheid kunststof afval die vrijkomt uit de economie (CE Delft, 2021).

Negatieve emissies ontstaan uit de netto-toename aan biobased materialen (kunststoffen) die we gebruiken in de samenleving. De jaarlijkse koolstof 'opslag' in de economie is het verschil tussen de jaarlijkse productie (kton/jaar) en de jaarlijkse inzameling/afval-verwerking van biobased kunststoffen. Daarbij moet gecorrigeerd worden voor weglek in het milieu.

De groei in materialengebruik niet helemaal in lijn is met beleidsdoelstellingen van een circulaire economie. Daarom is de vraag of inzet op negatieve emissies via biobased materialen maximaal benut moet worden.

Beschrijving van de techniek

Koolstofbron
Biograndstoffen
Omzet- en afvangtechnologie (biologisch en/of chemisch fysisch)
De chemie in Nederland produceert jaarlijks ongeveer 6,6 Mton aan grondstoffen voor de kunststofverwerkende industrie. Door toepassing van biograndstoffen kunnen negatieve emissies worden gerealiseerd doordat de biograndstoffen worden opgeslagen in de geproduceerde kunststoffen.
Opslagmedium
Kunststoffen in de economie.
Beschrijving van verschillende varianten
Kunststoffen worden momenteel voornamelijk van aardolie gemaakt. Als de bulkchemicaliën worden vervangen door op biograndstoffen gebaseerde alternatieven, zal een steeds groter wordend deel van de kunststoffen in gebruik bestaan uit biogene koolstof. Voor het produceren van biobased bulkchemicaliën zijn verschillende processen mogelijk, zie hiervoor bijvoorbeeld (PBL, 2018).
Afbakening keten en netto-negatief
Terwijl de koolstof in de materialen is opgeslagen, is de CO ₂ (tijdelijk) uit de atmosfeer. Negatieve emissies kunnen ontstaan uit de <i>groei</i> aan materialen die we gebruiken in de samenleving. De jaarlijkse koolstof 'opslag' in materialen is het verschil tussen de jaarlijkse productie (kton/jaar) en de jaarlijkse inzameling/afval-verwerking. Daarbij moet gecorrigeerd worden voor weglek in het milieu.
Echter, omdat de opslag niet permanent is, is er veel discussie of dit moet worden meegeteld als negatieve emissies. Volgens de gangbare LCA-methodiek mag iets pas meetellen als negatieve emissies als de opslagperiode minimaal 100 jaar is. Met recycling kan één levensduur kleiner dan 100 jaar zijn, maar de totale opslagperiode groter dan 100 jaar. Er zal echter ook verlies van koolstof zijn, en niet alle materialen zijn te recylen.

Status technologie en beschikbaarheid

Status technologie en beschikbaarheid
Biomaterialen zijn volop in ontwikkeling. Er is een groot scala aan soorten materialen en het verschilt per type materiaal en feedstock hoe ver de ontwikkeling is.
TRL + toelichting
De TRL verschilt per type materiaal en feedstock. (Ögmundarson, O. et al., 2019) geven een TRL van 4-5 aan PLA productiemethoden met tweede generatie feedstocks (bijproducten zoals lignocellulose), en TRL van 8-9 voor eerste generatie feedstocks (landbouwgewassen).
Energieverbruik
De productie van bioplastics kost energie, maar biobased productie is een randvoorwaarde is voor een CO ₂ -neutrale/circulaire economie. Daarmee kost de opslag van CO ₂ in materialen geen additionele energie.
Ruimtegebruik
Omdat de productie van biomaterialen afhankelijk is van biograndstoffen, is het ruimtegebruik nodig voor de teelt hiervan. Er is een verschil of gebruik wordt gemaakt van primaire biograndstoffen (landbouwgewassen) of secundaire biograndstoffen (bijproducten). De 'opslag' van CO ₂ in kunststoffen kent geen extra ruimtegebruik.

Economische aspecten

Kosten (CAPEX/OPEX)/CO₂-kosten per CO₂-eq.
Net als bij energieverbruik Gelden de kosten van biobased materialen niet als meerkosten, omdat deze toe worden geschreven aan de noodzakelijke biobased economie.
Inschatting toekomstig kostenreductiepotentieel
Kostenreductie door technologieontwikkeling. Kosten kunnen ook toenemen door schaarste biograndstoffen.

Bredere inpassing

Randvoorwaarden/duurzaamheidskader
Dit is hetzelfde als bredere randvoorwaarden voor bio-economie en toepassing van biograndstoffen. Netto-opslag van biomaterialen in de economie is er alleen als er een groei is in biomateriaalgebruik. Als de economie minder biomaterialen gaat gebruiken, is er ook kans dat de netto-opslag afneemt, maar dan is er meer afval voor AVI+CCS.
Koppelkansen
Circulaire economie
Negatieve neveneffecten
Kunststof moet niet weglekken naar het milieu (zwerfafval). Verder is er risico op zogenaamde indirect land use change (ILUC) effecten: als we veel meer biomassa gaan gebruiken is er meer land nodig, tenzij de opbrengst wordt verhoogd of er landbouwgrond vrijkomt door andere consumptiepatronen. Die uitbreiding kan plaatsvinden op marginaal land, maar het is veelal makkelijker en goedkoper om ergens een stuk oerwoud te kappen. Naast biodiversiteitsschade leidt dit ook tot verlies aan carbon stocks in natuur (en dus tot CO ₂ -emissies).
Economische omstandigheden die relevant zijn voor de toepassing
De inzet van biomaterialen zal naar verwachting groeien de komende decennia, dit is een kansrijke route om de circulaire economie te realiseren en het gebruik van fossiele grondstoffen te verminderen
Knelpunten
- waardering van biokunststof als negatieve emissies; - kosten van biokunststoffen versus fossiele kunststoffen; - beschikbaarheid van biograndstoffen

Kwantificering van potentieel Nederland

Huidig gerealiseerd potentieel/toekomstverwachting (NL/Europees)

Op dit moment is het gemiddeld aandeel recycalaat in kunststoffen ongeveer 10% en biobased circa 1% (CE Delft, 2021). De jaarlijkse toename van kunststoffen in de economie bedroeg in 2018 1.058 kton/jaar.

Maximum technisch potentieel

Het maximum potentieel wordt bereikt als er maximale groei plaatsvindt van het gebruik van kunststoffen in de maatschappij, en de volledige hoeveelheid aan kunststoffen wordt geproduceerd van biograndstoffen.

Als we de jaarlijkse netto-toename aan kunststoffen ('opslag') aanhouden uit (CE Delft, 2021), is dit zowel in 2018 als in de scenario's voor 2030 circa 1.000 kton/jaar. Als dit allemaal biobased is, is de opslag circa 2,6 Mton CO₂/jaar (zie aannames hieronder).

Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)

PBL (PBL, 2018) berekent het potentieel op basis van het potentieel aan biograndstoffen, echter dat is alleen productie, daar is de 'end-of-life' van kunststoffen die worden verbrand in AVI's niet van afgetrokken. De hoeveelheid negatieve emissies is de netto-toename van biobased kunststoffen vermenigvuldigd met de CO₂-intensiteit van kunststof (vastgelegde CO₂ per kg materiaal). De netto-toename aan biobased kunststoffen kan worden ingeschat door de totale netto-toename aan kunststoffen (productie min end-of-life) te vermenigvuldigen met het percentage biobased productie. Daarbij nemen we aan dat het percentage biobased kunststoffen in de end-of-life (bijv. AVI) gelijk is aan het percentage biobasedproductie.

(CE Delft, 2021) geeft twee scenario's voor circulaire kunststoffen in Nederland. In beide scenario's neemt de jaarlijkse productie van kunststoffen toe van 1.994 kton in 2018 naar 2.151 kton in 2030: een toename van 157 kton. CE Delft berekent ook het verschil tussen de hoeveelheid geproduceerd (input) en de end-of-life verwerking (output). Dit is de 'opslag' in de economie en weglek naar het milieu. In 2018 is dit 1.058 kton materiaal/jaar; in beide scenario's voor 2030 (Autonome ontwikkeling en Geüpdatete transitieagenda) is dat 1.030 kton/jaar. De hoeveelheid biobasedproductie is in het eerste scenario 22 kton/jaar en in het tweede scenario 323 kton/jaar in 2030. Als het aandeel bioplastics in de economie verhoudingsgewijs wordt toege-rekend, is resp. 1% en 15% van de 'opslag' in de economie biobased. Dat komt neer op 11 resp. 155 kton materiaal. We nemen hierbij aan dat er geen kunststof weglekt naar het milieu.

	Autonome ontwikkeling	Geüpdatete transitieagenda
Totaal gebruik	2.151	2.151
- Waarvan biobased productie	22 (1%)	323 (15%)
Totaal end-of-life	1.121	1.121
- Waarvan energierugwinning	570	32
'Opslag' in economie en weglek naar milieu	1.030	1.030
- Waarvan biobased	11	155
- Vastgelegde CO ₂ (kton)	29	403

De koolstofinhoud van kunststoffen ligt tussen 50% en 90% (Smeaton, C., 2021); (Stegmann, P. & et al., 2022) noemt 75%. Een kilo koolstof komt overeen met 3,67 kilo CO₂. Gemiddeld is er dus 2,6 kton CO₂ vastgelegd in een kton biokunststof (ervan uitgaande dat 70% van de massa van kunststoffen uit koolstof bestaat).

De jaarlijkse CO₂-opslag in kunststoffen in 2030 is dan 29 kton CO₂ in het scenario Autonome ontwikkeling versus 403 kton CO₂ in het scenario Geüpdatete transitieagenda.

Voor 2050 geeft de studie geen inschatting. Beleidsdoelen richting de circulaire economie sturen echter niet op méér materiaalgebruik. Er zou aangenomen kunnen worden dat er in 2050 geen netto-toename meer is aan materialen in de economie. Daarom hanteren we hier in 2050 een potentieel van nul.

Belangrijkste onzekerheden

- groei gebruik kunststoffen;
- groei toepassing biomaterialen;
- levensduur en hergebruik van kunststoffen.

Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Monitoring van de totale koolstofinhoud van materialen is cruciaal voor de inzet van biomaterialen voor negatieve emissies, maar bestaat nog niet. Gezien de vele verschillende materialen en materiaalstromen (incl. import en export) verwachten we dat geen eenvoudige opgave wordt.

Kwantificering van potentieel Europa

Maximum technisch potentieel
(Stegmann, P. & et al., 2022) voorspelt dat er mondiaal tussen 2020 en 2100 ongeveer 100 Gton plastics cumulatief zal worden geproduceerd, met een potentieel aan 275 Gton negatieve CO ₂ -emissies als deze materialen allemaal worden behouden. Er is geen studie gevonden dat een inschatting geeft van het EU-brede technisch potentieel voor negatieve emissies met biomaterialen.
Realistisch potentieel (inclusief economisch potentieel)
Geen data gevonden.
Belangrijkste onzekerheden
Dezelfde als voor Nederland: – groei gebruik kunststoffen; – groei toepassing biomaterialen; – levensduur en hergebruik van kunststoffen.
Meetbaarheid en monitoring in relatie tot permanentie van opslag (bijv. garantie van opslag (100 jaar))
Zelfde als voor Nederland: monitoring moet nog worden opgezet, en zal niet eenvoudig worden.
Gebruikte referenties
– (Stegmann, P. & et al., 2022) – (CE Delft, 2021) – (PBL, 2018) – (Smeaton, C., 2021)

B Duiding van emissiereductie in de KEV 2022

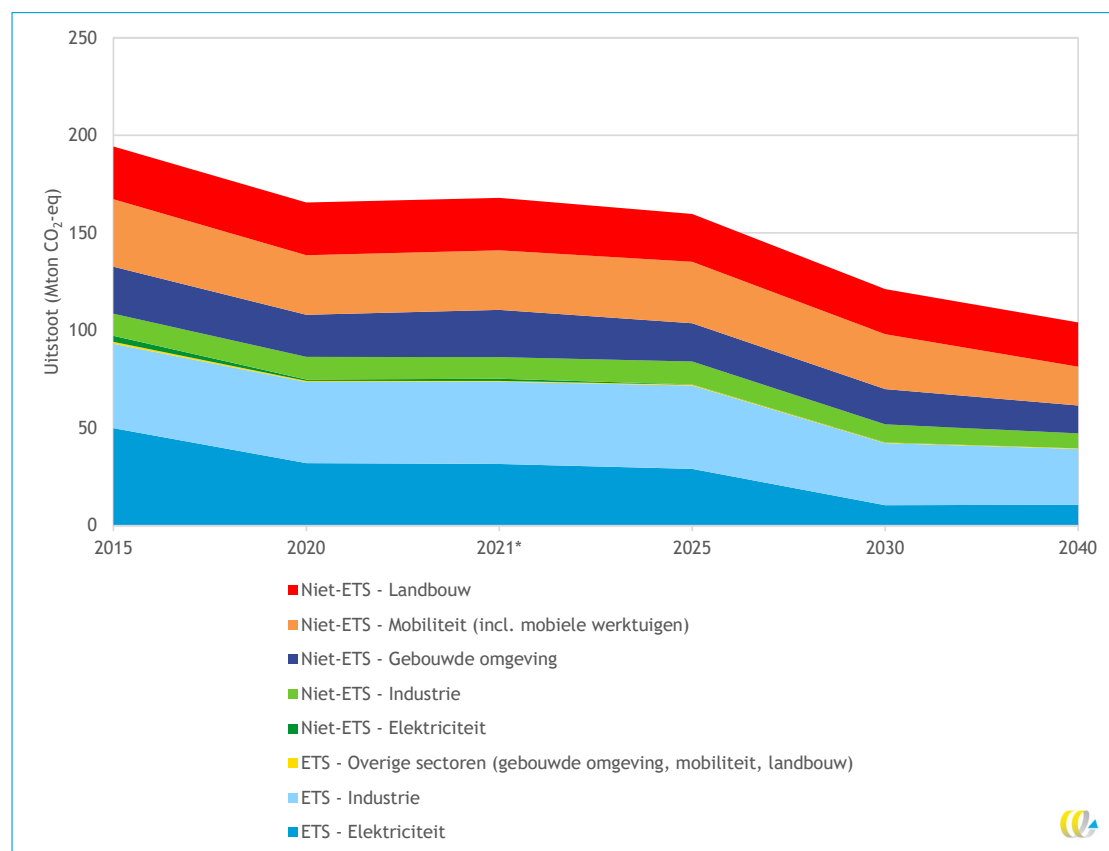
De KEV maakt een prognose van de emissies op basis van het vastgesteld en voorgenomen beleid en rekent dus vanuit de status quo. De KEV geeft daarmee inzicht in de effectiviteit van het huidige klimaatbeleid en de resterende beleidsopgave ten opzichte van de doelstellingen. Dit is echter niet gelijk aan de behoefte aan negatieve emissies, er kan namelijk vanuit worden gegaan dat het klimaatbeleid ook de komende jaren en decennia verder wordt aangescherpt waardoor de emissies verder zullen teruglopen. De KEV loopt voor de meeste onderdelen tot 2040.

B.1 Emissies in 2040 (KEV)

Bij de uitstootprognose wordt rekening gehouden met het onderscheid tussen ETS- en niet-ETS-sectoren. Het vastgesteld en voorgenomen beleid dat de basis vormt van de KEV is voornamelijk gericht op 2030. Voor de periode erna zijn weinig (nieuwe) beleidsinstrumenten onderdeel van de analyse. Dit betekent dus dat emissies verder gereduceerd kunnen worden indien aanvullend beleid wordt geïmplementeerd. De uitbreiding van het ETS naar de gebouwde omgeving en het wegvervoer valt niet onder vastgesteld en voorgenomen beleid. De aanscherping van het ETS is in de vorm van een hogere ETS-prijs indirect wel opgenomen in voorgenomen en vastgesteld beleid van de KEV (PBL, 2022).

In Figuur 46 is de prognose voor de uitstoot van Nederland tot aan 2040 weergegeven, opgedeeld naar sector. Uit de grafiek blijkt dat meer dan de helft van de totale uitstoot buiten het (huidige) ETS valt en dat deze verhouding enigszins gelijk blijft tot aan 2040. De grafiek geeft niet zozeer de behoefte aan negatieve emissies in 2040, maar eerder de behoefte aan verdere emissiereductie.

Figuur 46 - Uitstootprognose naar sector (2021 gebaseerd op voorlopige cijfers en voor 2030 en 2040 is het midden van de bandbreedte genomen)



ETS-sectoren

In de KEV zijn specifieke prognoses opgenomen van ETS-plichtige bedrijven per sector, zie Tabel 34. Voor het jaar 2040 is er echter een beperkte afname ten opzichte van 2030 te zien. Uit de tabel is op te maken dat vooral bij de elektriciteitsproductie een sterke afname van de uitstoot wordt verwacht richting 2030. In 2030 is de elektriciteitssector verantwoordelijk voor 20 tot 30% van de uitstoot voor de bedrijven die in Nederland onder het ETS vallen. In 2020 was dat ongeveer 43%. De industrie heeft in 2030 dus een aandeel van tussen de 70 en 80% van de uitstoot van de ETS-plichtige bedrijven. In 2040 zijn deze verhoudingen volgens de huidige prognoses niet veranderd. Een belangrijke bijdrage aan de daling van de uitstoot na 2025 wordt gerealiseerd door CO₂-afvang en -opslag (jaarlijks 9 Mton CO₂). Dit is echter niet in de grafiek apart weergegeven omdat het bij verschillende sectoren wordt toegepast (raffinage, chemie, afval) (PBL, 2022).

Tabel 34 - Totaal broeikasgasemissies binnen de ETS per sector volgens GWP-waardes van het IPCC AR5 in megaton CO₂-equivalenten (vastgesteld en voorgenomen beleid, * is voorlopig)

Sector	2015	2020	2021*	2025	2030	Band-breedte 2030	2040
Elektriciteit	49,9	32,0	31,6	25,9-32,2	7,8-13,2	7-21	7,9-13,4
Industrie	43,3	41,6	42,1	42,7	31,7	23-37	28,6
Overige sectoren (gebouwde omgeving, mobiliteit, landbouw)	0,9	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2-0,4	0,3
Totaal	94,1	74,1	74,1	69,0-75,3	39,9-45,3	33-55	36,8-42,3

Momenteel bevindt het ETS zich in de vierde handelsperiode (2021-2030) waar een lineair reductiepercentage voor de beschikbare emissierechten geldt van 2,2% op jaarbasis. Dit is gericht op de (inmiddels verouderde) doelstelling van 40% emissiereductie in 2030. Voor de herziening van het ETS (om de huidige 55% doelstelling van de EU te implementeren) is het reductiepercentage gelijk gehouden, maar er is een eenmalige verlaging van het aantal rechten voorgesteld. Dit zou leiden tot een emissiereductie van 61% van de ETS-sector in 2030.

Emissies niet-ETS-sectoren

Buiten het ETS zijn de gebouwde omgeving, mobiliteit en de landbouw sectoren die uitstoot genereren. Maar er is ook een aantal bedrijven binnen industrie en elektriciteit dat vanwege hun beperkte omvang niet ETS-plichtig is. De KEV-prognose voor 2030 en 2040 ziet eruit zoals in Tabel 35. Hoewel de uitstoot van de gebouwde omgeving en mobiliteit wel afneemt richting 2040, zijn er nog aanzienlijke emissies voor die sectoren. De uitstoot van de landbouw loopt ook terug, maar minder snel en wordt de belangrijkste niet-ETS-sector met emissies in 2040.

Tabel 35 - Totaal broeikasgasemissies binnen de ESD/ESR per sector volgens GWP-waardes IPCC AR5 in megaton CO₂-equivalenten (vastgesteld en voorgenomen beleid, * is voorlopig)

Sector	2015	2020	2021*	2025	2030	Band-breedte 2030	2040
Elektriciteit	3,2	0,7	1,1	0,2	0,2	0,2-0,2	0,0
Industrie	11,3	11,7	11,1	11,7	9,2	8-10	8
Gebouwde omgeving	24,1	21,5	24,2	19,6	18,0	15-21	14
Mobiliteit (incl. mobiele werktuigen)	34,5	30,6	30,5	31,6	28,2	26-31	20
Landbouw	27,0	26,9	27,0	24,4	23,1	21-24	23
Totaal	100,2	91,4	93,8	87,6	78,6	74-83	65