

# Koolstofverwijdering in een duurzaam Nederlands energiesysteem

Nadere analyse van ADAPT en TRANSFORM  
scenario's



TNO 2025 R10245 – Februari 2025

# Koolstofverwijdering in een duurzaam Nederlands energiesysteem

## Nadere analyse van ADAPT en TRANSFORM scenario's

Auteurs	Martin Scheepers, Floris Taminiau, Koen Smekens, Juan Giraldo Chavarriaga, Karina Veum
Rubricering rapport	TNO Publiek
Aantal pagina's	38 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)
Programmanaam	Onderzoeksprogramma Energietransitie Studies (OPETS) / Kennis voor energiebeleid (KVE)
Projectnaam	KVE 2024 Negatieve emissies
Projectnummer	060.59384

**Alle rechten voorbehouden**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

© 2025 TNO

# Inhoudsopgave

Samenvatting.....	4
1 Inleiding.....	7
1.1 Context.....	7
1.2 Over dit onderzoek.....	8
2 Methode.....	10
2.1 Scenario's.....	10
2.2 OPERA-model.....	11
2.3 Analyses.....	13
3 Resultaten.....	14
3.1 ADAPT en TRANSFORM.....	14
3.2 What-if-analyses.....	19
3.3 Opslag CO <sub>2</sub> op lange termijn.....	27
4 Beleidsontwikkelingen koolstofverwijdering.....	30
4.1 Nederlands beleid.....	30
4.2 Europees beleid.....	30
5 Bevindingen en aanbevelingen.....	32
5.1 Bevindingen.....	32
5.2 Aanbevelingen.....	34
Referenties.....	36
Bijlage	
Bijlage A: Data BECCS- en DAC-technologie	37

# Samenvatting

## *Aanleiding*

Nederland wil in 2050 klimaatneutraal zijn. Naar verwachting zullen er dan nog moeilijk te reduceren broeikasgassen worden geëmitteerd, zoals methaanemissies in de landbouwsector. Deze resterende emissies kunnen worden gecompenseerd met koolstofverwijdering, ook wel negatieve emissies genoemd<sup>1</sup>. Daarbij gaat het om permanente of langdurige verwijdering van koolstof uit de atmosfeer. Dit kan met geologische opslag van niet-fossiele CO<sub>2</sub> in de diepe ondergrond. Deze niet-fossiele CO<sub>2</sub> kan worden afgevangen bij processen waarbij biograndstoffen worden ingezet of door CO<sub>2</sub> uit de lucht te halen. Als er in de periode tot 2050 wereldwijd te langdurig en te veel broeikasgassen worden uitgestoten zal de mondiale temperatuur boven de afgesproken grens van 1,5 of 2 °C uitkomen. Deze overschrijding kan na 2050 worden tegengegaan door de koolstofverwijdering voort te zetten of zelfs te intensiveren waardoor de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer wordt verlaagd. Het is dan wel belangrijk dat er na 2050 nog voldoende opslagcapaciteit voorhanden is.

## *Onderzoeksvraag*

Het belang van koolstofverwijdering om klimaatneutraliteit te bereiken en om een temperatuuroverschrijding tegen te gaan, wordt onderkend door Nederlandse en Europese beleidsmakers. Het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) zal in 2025 een Routekaart Koolstofverwijdering publiceren. Het ministerie van KGG heeft behoefte aan een goed inzicht in de verwachte restemissies voor 2050 en de mogelijkheden en technieken om koolstofverwijdering te realiseren.

## *Methode*

Voor het verkrijgen van inzicht over verwachte restemissies voor 2050 en de mogelijkheden en technieken om koolstofverwijdering te realiseren heeft TNO een aantal analyses uitgevoerd. Voor deze analyses is gebruik gemaakt van twee door TNO opgestelde energiescenario's: ADAPT en TRANSFORM. Het Nederlandse klimaat- en energiesysteem van deze scenario's is geoptimaliseerd naar de laagste maatschappelijke kosten. Het onderzoek betreft een verdiepende analyse naar de afvang van fossiele, biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>, de bestemming daarvan voor CO<sub>2</sub>-opslag en de omvang van koolstofverwijdering. Onderzocht is wat het effect is van hogere kosten voor biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>-afvang, een beperkte beschikbaarheid van biograndstoffen en beleid gericht op uitfasering fossiel energie op de omvang van de koolstofverwijdering ten opzichte van de twee basisscenario's. Ook is een vergelijking gemaakt tussen de beschikbare CO<sub>2</sub>-opslagcapaciteit in het Nederlandse deel van de Noordzee en de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt opgeslagen bij extrapolatie van de scenario's tot 2100.

## *Bevindingen*

De resultaten van de analyses kunnen als volgt worden samengevat:

- De hoeveelheid biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> die bestemd wordt voor koolstofverwijdering is niet alleen afhankelijk van hoeveel biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> wordt afgevangen. De afgevangen CO<sub>2</sub> kan namelijk ook gebruikt worden voor productie

<sup>1</sup> Hier wordt gekozen voor koolstofverwijdering omdat negatieve emissies een meer boekhoudkundige term is voor een situatie waarbij de uitstoot van broeikasgassen meer dan gecompenseerd wordt door koolstofverwijdering.

van synthetische brandstoffen en grondstoffen. De omvang van de koolstofverwijdering hangt daardoor ook af van de allocatie van de afgevangen CO<sub>2</sub>. De allocatie kan worden gebaseerd op de toegepaste processen en hun inputs, maar ook door bijvoorbeeld een boekhouding- of certificeringssysteem toe te passen. Op die manier kan gebruik van biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> aan de productie van synthetische brandstoffen en grondstoffen worden gekoppeld en fossiele CO<sub>2</sub> voor die toepassing worden uitgesloten.

- Koolstofverwijdering is belangrijk voor het realiseren van klimaatneutraliteit in 2050. De omvang van de CO<sub>2</sub>-opslag bedraagt in de twee beschouwde scenario's in 2050 15 Mton per jaar en 40 Mton per jaar. Dat is het maximum dat voor beide scenario's is aangenomen. In 2050 is het aandeel koolstofverwijdering in de totale CO<sub>2</sub>-opslag in beide scenario's meer dan 75%. In het scenario met een maximum opslag van 15 Mton per jaar is het aandeel iets hoger dan in het scenario met 40 Mton per jaar.
- Met koolstofverwijdering worden in 2050 restemissies van broeikasgassen volledig gecompenseerd. De restemissies hebben in de beschouwde scenario's in 2050 een omvang van 14,0 en 34,9 Mton CO<sub>2</sub>-eq. Ruim de helft tot tweederde van deze restemissies is CO<sub>2</sub> van fossiele oorsprong. De overige restemissies zijn niet-CO<sub>2</sub>-broeikasgassen.
- Een deel van de fossiele CO<sub>2</sub>-restemissies is vermijdbaar. Omdat in de scenario's in 2050 alleen gestreefd wordt naar klimaatneutraliteit is het door koolstofverwijdering nog steeds mogelijk om fossiele brandstoffen te gebruiken. Voor sommige toepassingen is gebruik van fossiele brandstoffen vermijdbaar omdat daarvoor duurzame alternatieven bestaan. Afhankelijk van de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-opslag die voor het scenario is verondersteld gaat het om gebruik van fossiele brandstoffen bij staalproductie (kolen), verwarmen van woningen (aardgas) en auto's (olie) of alleen fossiele brandstoffen bij auto's. Als beleid wordt gevoerd om het (resterende) gebruik van fossiele brandstoffen te verminderen is de behoefte aan compensatie van restemissies kleiner. Dit leidt in 2050 tot een lichte daling van de koolstofverwijdering. Ook de totale hoeveelheid CO<sub>2</sub>-opslag neemt dan af.
- Als in een kosten-geoptimaliseerd energiesysteem de kosten voor biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>-afvang worden verhoogd (resp. verdubbeld, verhoogd met 50% en gecombineerd), heeft dit in de twee scenario's geen effect op de totale hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> (de maximum opslagcapaciteit wordt al benut) en maar een beperkt effect op de omvang van de koolstofverwijdering (verandering in koolstofverwijdering van 5 tot 8%). Over het algemeen daalt de omvang van de koolstofverwijdering bij hogere technologiekosten. Als de kosten van biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>-afvang afzonderlijk worden verhoogd, vindt er ook onderlinge compensatie plaats. Het netto-effect is afhankelijk van de mate waarin de kosten voor de verschillende technieken hoger kunnen uitvallen.
- Wanneer de beschikbaarheid van geïmporteerde biograndstoffen wordt beperkt kan een daling van afgevangen biogene CO<sub>2</sub> gecompenseerd worden door toename van afvang van atmosferische CO<sub>2</sub>. Hierdoor kan de koolstofverwijdering zelfs iets toenemen. De totale hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> blijft in beide scenario's gelijk.
- Uit vergelijking van de cumulatieve hoeveelheid CO<sub>2</sub> die in de twee scenario's wordt opgeslagen kan, indien al die CO<sub>2</sub> in Nederland wordt opgeslagen, met het geschatte opslagpotentieel in lege gasvelden onder het Nederlandse deel van de Noordzee (ongeveer 1700 Mton) worden berekend dat, afhankelijk van het scenario, 17 tot 39% van het beschikbare opslagpotentieel in 2050 zal zijn benut. Als na 2050 de omvang van de CO<sub>2</sub>-opslag met hetzelfde jaarlijkse volume wordt voortgezet, zal in het scenario met een opslag van 40 Mton per jaar de beschikbare opslagcapaciteit rond 2076 volledig benut zijn. In het andere scenario, met een jaarlijkse opslag van 15 Mton, zal de beschikbare Nederlandse opslagcapaciteit in 2100 voor 61% gevuld zijn. Verwacht wordt dat er een Europese opslagmarkt tot ontwikkeling komt. De daadwerkelijk benutting

van de Nederlandse opslagcapaciteit zal dan mede afhankelijk zijn van zowel de import van buitenlandse CO<sub>2</sub> als export van Nederlandse CO<sub>2</sub>.

- Het Europese- en Nederlandse beleid op het gebied van koolstofverwijdering is nog in ontwikkeling. Het Nederlandse beleid zal moeten aansluiten op Europese beleid en regelgeving. Relevant daarbij zijn de Industrial Carbon Management Strategy, de Carbon Removals and Carbon Farming Certification (CRCF) regulering en de discussies over het opnemen van permanente koolstofverwijdering in het Europese emissiehandelssysteem. Het Nederlandse beleid zal nader vorm krijgen in het Klimaatplan 2025-2035 en de Routekaart Koolstofverwijdering.

#### *Aanbevelingen*

Koolstofverwijdering die in de scenario's van deze studie wordt geschetst, zal niet vanzelf tot stand komen. Hiervoor is nog technologieontwikkeling nodig, zullen keuzes moeten worden gemaakt en zal beleid moeten worden geïmplementeerd. Over deze onderwerpen kunnen de volgende aanbevelingen worden geformuleerd:

- Er is nog technologieontwikkeling nodig voor afvang van CO<sub>2</sub>, met name bij productie van biobrandstoffen en biograndstoffen, en uit de lucht (Direct Air Capture, DAC).
- Voor investeerders in deze technologie moet er een voldoende aantrekkelijke business-case zijn. Bij fossiele CCS (Carbon Capture and Storage) kan de business-case worden gebaseerd op vermeden CO<sub>2</sub>-kosten. Bij afvang, opslag en gebruik van biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> is geen sprake van deze vermeden kosten. De opbrengsten moeten komen van een of andere vorm van economische waardering van de afgevangen CO<sub>2</sub> voor opslag (koolstofverwijdering) of gebruik in duurzame brandstoffen en chemicaliën.
- Aanvankelijk zal CO<sub>2</sub>-afvangtechnologie nog relatief hoge kosten hebben en energetisch minder efficiënt zijn. Stimulering van verdere technologieverbetering is wenselijk. Dit kan via de economische waardering van de afgevangen CO<sub>2</sub> of een andere economische prikkel (bijv. investeringssubsidie).
- Om in 2050 klimaatneutraliteit te realiseren is koolstofverwijdering nodig door opslag van biogene en/of atmosferische CO<sub>2</sub>. Daarbij zal een beleidsafweging moeten worden gemaakt tussen de hoeveelheid fossiele brandstoffen die nog in het energiesysteem wordt toegelaten, de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die per jaar moet worden opgeslagen en het aandeel koolstofverwijdering daarin.
- Indien gebruik van fossiele CO<sub>2</sub> voor productie van synthetische brandstoffen en chemicaliën ongewenst wordt gevonden, vereist dit een duidelijke beleidskeuze en instrumentatie van dat beleid (bijvoorbeeld d.m.v. boekhouding en certificaten).
- De hoeveelheid CO<sub>2</sub>-afvang en koolstofverwijdering die mogelijk is, hangt samen met ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem, zoals de omvang van bepaalde sectoren, beschikbaarheid van biograndstoffen en technologieontwikkeling. Deze ontwikkeling kan anders verlopen dan geschetst in de twee scenario's die in deze studie zijn gebruikt. Aanbevolen wordt scenario's regelmatig te updaten op basis van nieuwe ontwikkelingen en inzichten (zoals beschikbaarheid van afvangtechnieken en mogelijke andere vormen van koolstofverwijdering) en de rol van CO<sub>2</sub>-afvang en koolstofverwijdering hierin te onderzoeken. Hierbij zou ook gekeken moeten worden naar de effecten op de systeemkosten.
- Verder is vervolgonderzoek wenselijk naar de Europese markt voor CO<sub>2</sub>-opslag waarbij zowel in Nederland afgevangen CO<sub>2</sub> die wordt opgeslagen in het buitenland als in het buitenland afgevangen CO<sub>2</sub> die wordt opgeslagen in Nederland wordt betrokken. Ook is vervolgonderzoek wenselijk naar de bijdrage van koolstofverwijdering in Nederland aan de mondiale behoefte aan koolstofverwijdering.

# 1 Inleiding

## 1.1 Context

Met het Klimaatakkoord van Parijs hebben vrijwel alle landen in de wereld afgesproken de stijging van de gemiddelde mondiale temperatuur te beperken tot ruim onder de 2 °C boven het pre-industriële niveau en te streven naar een beperking van deze temperatuurstijging tot 1,5 °C (United Nations, 2015). De Europese Unie heeft dit vertaald in een klimaatneutraliteitsdoel voor 2050 vastgelegd in de Europese Klimaatwet (Europese Unie, 2021). Dat betekent dat er in 2050 netto geen broeikasgassen (BKG) meer mogen worden uitgestoten. Nederland heeft een doelstelling voor klimaatneutraliteit voor 2050 vastgelegd in de Klimaatwet (Rijksoverheid, 2019).

Het enkel reduceren van broeikasgasemissies zal waarschijnlijk niet toereikend zijn om klimaatneutraliteit te realiseren. Er zullen resterende BKG-emissies overblijven die technisch zeer moeilijk te reduceren zijn (bijvoorbeeld methaanemissies bij de veeteelt) of waarvan de reductiekosten relatief hoog zullen zijn. Deze resterende emissies kunnen worden gecompenseerd met koolstofverwijdering, ook wel negatieve emissies genoemd. Daarbij gaat het om permanente of langdurige verwijdering van koolstof uit de atmosfeer.

Koolstofverwijdering kan ook een rol spelen bij het beperken van een wereldwijde temperatuuroverschrijding. De mondiale temperatuur zal hoger uitkomen dan de 1,5 of 2 °C als er in de periode tot 2050 wereldwijd te langdurig en te veel BKG worden uitgestoten. Door koolstofverwijdering na 2050 voort te zetten of zelfs te intensiveren kan CO<sub>2</sub> aan de atmosfeer worden onttrokken en de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer worden verlaagd.

### Onderzoek en advies

In 2023 is door CE-Delft en TNO, in opdracht van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat<sup>2</sup>, een onderzoek gepubliceerd naar koolstofverwijdering (Kampman, et al., 2023). In dit onderzoek is een analyse gemaakt van de behoefte aan en het aanbod van koolstofverwijdering in Nederland. Er wordt onder meer een overzicht gegeven van verschillende technieken voor koolstofverwijdering en hun potentiële, waaronder vastlegging in bossen, in materialen, bioenergy met carbon capture and storage (BECCS), direct air capture and storage (DACCS) en mineralisatie. Ook zijn in dit onderzoek beleidsimplicaties in kaart gebracht.

In 2024 is door TNO een nieuwe scenariostudie gepubliceerd (Scheepers, et al., 2024). In deze studie wordt voor twee scenario's (ADAPT en TRANSFORM) een energiesysteem voor Nederland berekend dat in 2050 klimaatneutraal is. Afhankelijk van het scenario wordt 15 tot 40 Mt CO<sub>2</sub> opgeslagen in lege gasvelden onder de Noordzee (geologische opslag). Het grootste deel van de opgeslagen CO<sub>2</sub> is afkomstig van processen waarbij biograndstoffen worden omgezet in brandstoffen of grondstoffen (d.w.z. BECCS<sup>3</sup>). Ook wordt direct air capture (DAC) toegepast.

<sup>2</sup> Thans het Ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG)

<sup>3</sup> BECCS kan worden toegepast bij zowel elektriciteitsproductie uit biograndstoffen als bij processen waarbij biograndstoffen worden omgezet in biobrandstoffen of grondstoffen.



In 2024 adviseerde de Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR) in haar advies over koolstofvastlegging CO<sub>2</sub>-verwijderingsbeleid op te stellen, maar daarbij wel maximaal in te zetten op het beperken van BKG-emissies en de compensatie van restemissies te limiteren (Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR), 2024). Daarnaast adviseert de WKR restemissies alleen te compenseren met permanente CO<sub>2</sub>-verwijdering, d.w.z. geologische opslag in de diepe ondergrond (CCS) en mineralisatie van CO<sub>2</sub>.

### Beleidsontwikkelingen

Als onderdeel van de strategie om te komen tot klimaatneutraliteit heeft de Europese Commissie een Industrial Carbon Management Strategy gepubliceerd (Europese Commissie, 2024). Om in 2050 netto nul broeikasgasemissies te bereiken zou het in de EU nodig kunnen zijn om ongeveer 400 miljoen ton CO<sub>2</sub>-equivalent aan moeilijk te reduceren restemissies (zoals bij landbouw, luchtvaart en sommige industrieën) met koolstofverwijderingen te compenseren op basis van zowel natuurlijke koolstofvastlegging (bijvoorbeeld bosaanplant) als door middel van BECCS en DACCS.

In het Ontwerp Klimaatplan 2025-2035 geeft het Ministerie van KGG aan dat naast BKG-emissiereductie het ook noodzakelijk is beleid te ontwikkelen ten aanzien van koolstofverwijdering. In het Ontwerp Klimaatplan kondigt KGG aan bij het definitieve Klimaatplan ook een Routekaart Koolstofverwijdering te publiceren (Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2024).

## 1.2 Over dit onderzoek

### Aanleiding

Aanleiding voor dit onderzoek vormt het opnemen van beleid over koolstofverwijdering in het Klimaatplan 2025-2035 en uitwerking van dit beleid in de Routekaart Koolstofverwijdering. Daarbij is een goed inzicht nodig in de verwachte restemissies voor 2050 en de mogelijkheden en technieken om koolstofverwijdering te realiseren. Ook is beleid nodig voor het stimuleren van innovatie m.b.t. technieken voor koolstofverwijdering.

### Onderzoeksvragen

Ten behoeve van het te formuleren beleid zijn door KGG en TNO een aantal onderzoeksvragen geformuleerd:

- **EU Beleidscontext.** Wat is de huidige en toekomstige EU beleidscontext waarbinnen het Nederlandse beleid met betrekking tot koolstofverwijdering vorm gegeven zal moeten gaan worden? Wat is het voorgenomen Europese beleid ten aanzien van CCUS – Carbon capture use & storage – (Industrial carbon management strategy) en certificering van koolstofverwijdering (proposal for a Regulation on an EU certification for carbon removals). Hoe zal worden omgegaan met grensoverschrijdende CO<sub>2</sub>-handel? En in hoeverre wordt rekening gehouden, c.q. concurrentie vermeden met andere doelen (CO<sub>2</sub>-reductie, circulair gebruik koolstof, biodiversiteit)?
- **Behoeftte aan koolstofverwijdering.** Wat zijn de verwachte BKG-restemissies in 2050 bij verschillende scenario's? Waar zijn deze restemissies van afhankelijk en bestaan er nog mitigatie-opties waarmee deze restemissies kunnen worden verlaagd?
- **Aanbod van koolstofverwijdering.** Met welke technieken en met welke omvang worden in de verschillende scenario's de restemissies gecompenseerd? Welke CO<sub>2</sub>-opslag capaciteit is hiervoor nodig en hoe verhoudt zich dit tot opslag van fossiele CO<sub>2</sub>? Hoe verhoudt dit zich tot de bestaande voornemens voor CO<sub>2</sub>-opslag (bijv. Porthos en Aramis)? Wat is de relatie met de beschikbaarheid/het gebruik van biogroundstoffen en circulaire koolstof? Welke factoren beïnvloeden het aanbod van biogene CO<sub>2</sub> voor

koolstofopslag? Is er een rol voor DAC, c.q. onder welke omstandigheden zal DAC een rol kunnen gaan spelen?

- **Technologieën koolstofverwijdering**<sup>4</sup>. Welke CO<sub>2</sub>-afvangtechnologieën worden in de scenario's ingezet? Wat is de huidige status van technologieontwikkeling? Als deze technologieën niet op tijd commercieel beschikbaar komen, c.q. niet op tijd zijn opgeschaald, wat zijn dan de consequenties voor aanbod van koolstofverwijdering? Wat zijn de alternatieven (d.w.z. alternatieve technieken of opties)? Wat zijn de effecten op de systeemkosten?

In deze studie staan een aantal van deze onderzoeksvragen centraal. Het gaat met name om de onderzoeksvragen over behoefte aan en aanbod van koolstofverwijdering. Daarnaast wordt de inzet van CO<sub>2</sub>-afvangtechnologieën geanalyseerd en wordt de EU beleidscontext in kaart gebracht. Buiten de scope van deze studie vallen grensoverschrijdende CO<sub>2</sub>-handel, impact op biodiversiteit, status van de technologieontwikkeling en alternatieven bij niet op tijd beschikbaar zijn van afvangtechnieken, en de effecten op de systeemkosten.

### Aanpak

In vervolg op de ADAPT- en TRANSFORM-scenariostudie van 2024 zijn door TNO nadere analyses uitgevoerd ten aanzien van resterende emissies en toepassing van industriële technieken die koolstofverwijdering realiseren. Daarnaast zijn extra modelanalyses uitgevoerd waarbij randvoorwaarden zijn aangepast die bij de scenario's zijn gebruikt. Deze randvoorwaarden betreffen de kosten van BECCS- en DAC-technologie, het gebruik van biogrondstoffen en het beleid ten aanzien van gebruik van fossiele brandstoffen. Ook is een vergelijking gemaakt tussen de beschikbare CO<sub>2</sub>-opslagcapaciteit in het Nederlandse deel van de Noordzee en de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt opgeslagen bij extrapolatie van de scenario's tot 2100. Tenslotte is een deskstudie uitgevoerd naar de beleidscontext in de EU en in Nederland.

### Opzet van dit rapport

In dit rapport worden in Hoofdstuk 2 eerst de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's geïntroduceerd, een korte beschrijving gegeven van het gebruikte energiesysteemmodel OPERA en de aanpak van de verdiepende analyse. Hoofdstuk 3 gaat in op resultaten van de kwantitatieve analyses. Deze resultaten worden nader toegelicht en geduid. De beleidsontwikkelingen op het gebied van koolstofverwijdering worden in Hoofdstuk 4 beschreven, zowel voor Nederland als de Europese Unie. Het rapport sluit af met een overzicht van de bevindingen en met een aantal aanbevelingen in Hoofdstuk 5.

<sup>4</sup> In dit onderzoek worden verschillende technieken voor afvang van fossiele, biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> beschouwd. Mineralisatie van CO<sub>2</sub> valt buiten de scope van het onderzoek.

## 2 Methode

Voor het kwantitatieve deel van het onderzoek is gebruik gemaakt van de ADAPT- en TRANSFORM-scenariostudie. Daarnaast zijn verdiepende analyses uitgevoerd met het OPERA-model. In dit hoofdstuk wordt een korte beschrijving gegeven van de beide scenario's, het OPERA-model en wordt ingegaan op de aanpak van de analyses. Voor meer informatie over de ADAPT- en TRANSFORM-scenariostudie wordt verwezen naar (Scheepers, et al., 2024).

### 2.1 Scenario's

Toekomstige transitiepaden naar een duurzaam Nederlands energiesysteem kunnen worden onderzocht met behulp van scenario's. Scenario's beschrijven de mogelijke ontwikkeling van het energiesysteem op basis van een samenhangende set van realistische aannames en randvoorwaarden. Voor deze studie zijn twee door TNO opgestelde scenario's gebruikt: ADAPT en TRANSFORM (Scheepers, et al., 2024). Deze scenario's zijn gebaseerd op verschillende toekomstbeelden voor het Nederlandse energiesysteem. In beide visies is het doel om de uitstoot van broeikasgassen in 2030 met 55% te verminderen en om broeikasgasneutraliteit te bereiken in 2050.

#### Box 1 – Toekomstvisies

---

##### **ADAPT**

- *Nederland en EU halen de doelstellingen voor broeikasgasreductie in 2030 en 2050.*
- *Behoud van huidige levensstijl.*
- *Industriële productie en economische structuur blijft grotendeels hetzelfde.*
- *Nationale en lokale overheden nemen het voortouw.*
- *Aanpassing van het energiesysteem en industriële processen om het doel te bereiken.*
- *Structurele veranderingen na 2050.*
- *Fossiele brandstoffen blijven gebruikt worden in combinatie met toepassing van CO<sub>2</sub>-opslag.*
- *Geringe ambities om chemicaliën en plastics en bunkerbrandstoffen te verduurzamen*

##### **TRANSFORM**

- *Nederland en EU halen de doelstellingen voor broeikasgasreductie in 2030 en 2050.*
  - *Sterk milieubewustzijn en gevoel van urgentie in de samenleving leidt tot leefstijlverandering.*
  - *EU en Nederland stimuleren innovaties.*
  - *Individuele en collectieve initiatieven door burgers en bedrijven.*
  - *De overheid heeft een stimulerende en faciliterende rol.*
  - *Ambitieuze transformatie van het energiesysteem, transitie van energie-intensieve industrie, resulterend in lagere industriële productie en energieverbruik, groei van de dienstensector.*
  - *Een beperkt gebruik van CO<sub>2</sub>-opslag.*
  - *Chemicaliën en kunststoffen op basis van circulaire koolstof, bunkerbrandstoffen worden verduurzaamd.*
-

De bevolkingsgroei en de omvang van de Nederlandse economie zijn in beide scenario's hetzelfde. De manier waarop de doelstellingen worden bereikt, is verschillend. De twee scenario's verschillen met name in intrinsieke motivatie en draagvlak voor verandering bij overheid, burgers en bedrijven (zie Box 1). Ook is er een verschil ten aanzien van de maximale hoeveelheid CO<sub>2</sub> die jaarlijks kan worden opgeslagen. Dit maximum loopt geleidelijk op, zie Tabel 2.1.

**Tabel 2.1:** Verondersteld maximum jaarlijkse CO<sub>2</sub>-opslag in ADAPT en TRANSFORM in Mton

Scenario	2030	2035	2040	2045	2050
ADAPT	12,7	24,0	35,0	40,0	40,0
TRANSFORM	12,7	12,7	12,7	12,7	15,0

## 2.2 OPERA-model

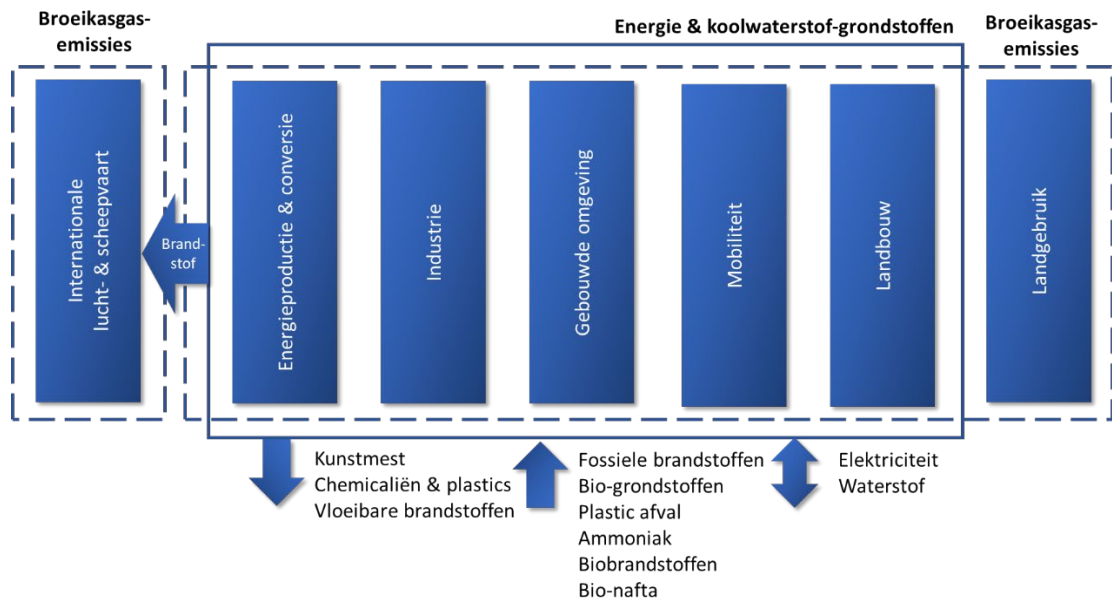
Met behulp van het OPERA-model is het toekomstige Nederlandse energiesysteem berekend. Het OPERA-model omvat alle sectoren van het Nederlandse energiesysteem, inclusief koolwaterstoffen die in de industrie als grondstof worden gebruikt, zie Figuur 2.1. Het model beschouwt alle BKG-emissies, naast CO<sub>2</sub> ook de niet-CO<sub>2</sub> broeikasgassen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en F-gassen), en de niet-energetische BKG-emissies van landbouw en landgebruik. Het model houdt ook rekening met de brandstoffen van internationale luchtvaart en scheepvaart die in Nederlandse zee- en luchthavens worden getankt. Hoewel de emissies van deze zogenoemde bunkerbrandstoffen niet meetellen voor de Nederlandse BKG-doelstelling, worden deze brandstoffen binnen het Nederlandse energiesysteem geproduceerd en bepalen daarmee mede de energievraag en de bijbehorende BKG-emissies. Het Nederlandse energiesysteem importeert brandstoffen (zoals olie, kolen, aardgas en biobrandstoffen) en biograndstoffen, kan elektriciteit en waterstof importeren en exporteren en exporteert industriële producten die uit koolwaterstoffen zijn geproduceerd (zoals kunstmest, chemicaliën en plastics).

Het OPERA-model wordt schematisch weergegeven in Figuur 2.2. De invoerparameters die het OPERA-model gebruikt zijn:

- Maximale uitstoot van broeikasgassen, d.w.z. de BKG-doelstelling.
- Het bruto vloeroppervlak van woningen en gebouwen in de dienstensector, mobiliteitsvraag, productie van industriële producten en additionele energievraag (elektriciteit en warmte).
- Techno-economische gegevens van de technologische opties.
- Prijs van geïmporteerde energie en grondstoffen.
- Specifieke beperkingen op het gebruik van technologieën, zoals maximaal potentieel voor wind- en zonne-energieproductie, CO<sub>2</sub>-opslag en kerncentrales.

Een uitgebreid overzicht van de gebruikte invoerparameters staat in (Scheepers, et al., 2024). OPERA is een optimalisatiemodel en berekent een energiesysteem waarmee aan de vraag en de BKG-doelstelling kan worden voldaan op basis van laagste maatschappelijke kosten<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Bij het bepalen van de maatschappelijke kosten van het energiesysteem wordt aangesloten bij de nationale kosten-batenanalysemethodiek. De kosten bestaan uit van de som van geannualiseerde investeringskosten op basis van de technische levensduur en een nationale (maatschappelijke) discontovoet van 2.25%, jaarlijkse operationele kosten en energiekosten (of baten in geval van export).



Figuur 2.1: Nederlands energie- en broeikasgassensysteem in het OPERA-model



Figuur 2.2: Schematische weergave van het OPERA-model

Het OPERA-model levert de volgende resultaten op:

- Fysieke resultaten: energieaanbod en -vraag (totaal en per sector) en hoe die is samengesteld, gebruikte technologieën (bijv. geïnstalleerd vermogen, vollasturen), import en export van energie (bijv. fossiele energie, biomassa, elektriciteit, waterstof), resterende uitstoot van broeikasgassen.
- Economische resultaten: systeemkosten en jaarlijkse investeringen (totaal en per sector) en schaduwrijzen (gebaseerd op marginale kosten voor CO<sub>2</sub>-reductie en productie van elektriciteit en waterstof).
- Een koolstofbalans met de herkomst en bestemming van koolstof in het energiesysteem. CO<sub>2</sub> dat wordt opgeslagen of opnieuw gebruikt wordt niet apart gelabeld. De mix van de opgeslagen en opnieuw gebruikte CO<sub>2</sub> wordt bepaald door de herkomst, d.w.z. afvang bij een fossiel of biogeen proces of uit de lucht.

Het OPERA-model houdt rekening met de fluctuerende energievraag gedurende een jaar en de wisselende energieproductie uit wind en zon. Hierbij worden vraag en aanbod per tijdsperiode gebalanceerd, waarbij ook gebruik wordt gemaakt van opties als vraagsturing

en energieopslag en wordt rekening gehouden met import van en export naar buurlanden. Voor elk uur van het jaar zijn de import- en exportflows van elektriciteit en waterstof met bijbehorende prijzen bepaald met behulp van een Europees energiemarktmodel, zie voor details (Scheepers, et al., 2024). Het OPERA-model hanteert een myopische benadering: voor elk volgend jaar waarvoor een energiesysteem wordt berekend, houdt het model rekening met de reeds aanwezige investeringen uit de voorgaande periode op basis van de technische levensduur van deze investeringen. Het model bepaalt of er extra capaciteit moet worden geïnvesteerd om aan de vraag te voldoen. Bij deze benadering wordt geen rekening gehouden met gebeurtenissen en doelen in de volgende jaren.

## 2.3 Analyses

De uitgevoerde analyses richten zich op de BKG-restemissies, de koolstofstromen en toepassing van CCU/S. Allereerst zijn deze resultaten van de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's nader geanalyseerd. Een volledige beschrijving van de scenarioresultaten kan worden gevonden in (Scheepers, et al., 2024) en, in de vorm van grafieken en tabellen, op <https://energyscenarios.tno.nl/><sup>6</sup>.

Met de resultaten van de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's als referentie zijn vervolgens een aantal what-if-analyses uitgevoerd. Daarbij zijn de parameters over technologiekosten van BECCS- en DAC-technologieën en randvoorwaarden ten aanzien van de beschikbaarheid van biomassa en beleid voor fossiele brandstoffen aangepast, zie Tabel 2.2. Door de resultaten van deze what-if-analyses te vergelijken met de referentie, d.w.z. ADAPT en TRANSFORM, is onderzocht in hoeverre aanpassing van de randvoorwaarden invloed heeft op de uitkomsten.

**Tabel 2.2:** Aanpassingen parameters en randvoorwaarden what-if-analyses

What-if-analyses	Aanpassingen
Verhogen BECCS kosten	Investerings- en operationele kosten van biomassa-technologieën verhoogd met 100%.
Verhogen DAC kosten <sup>7</sup>	Investerings- en operationele kosten voor DAC verhoogd met 50% en energie-efficiency verlaagd met 25%.
Verhogen BECCS en DAC kosten	Investerings- en operationele kosten van biomassa-technologieën verhoogd met 100%. Investerings- en operationele kosten voor DAC verhoogd met 50% en energiekosten voor DAC met 25%.
Lagere beschikbaarheid van biograndstoffen	Maximale toegestane import van biograndstoffen met 25% verlaagd
Beperking gebruik fossiele brandstoffen	Voor technologie-opties waarvoor duurzame alternatieven bestaan, geen gebruik van fossiele brandstoffen toegestaan in 2050.

Tenslotte is de vraag naar CO<sub>2</sub>-opslag die voortkomt uit de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's vergeleken met het beschikbare aanbod. Voor de beschikbare geologische opslag onder het Nederlandse deel van de Noordzee is gebruik gemaakt van de analyses uit (Kampman, et al., 2023). Hierbij is verondersteld dat de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-opslag in ADAPT en TRANSFORM in 2050 en de jaren daarna hetzelfde blijft.

<sup>6</sup> De parameters voor DAC-technologie zijn voor het ADAPT- en TRANSFORM-scenario aangepast. In vergelijking met Scheepers et al. wordt DAC ook ingezet in TRANSFORM.

<sup>7</sup> De kostenverhogingen voor BECCS en DAC zijn verschillend. Dit heeft te maken met de veronderstelde kostenniveaus in de base case, zie paragraaf 3.2.2.

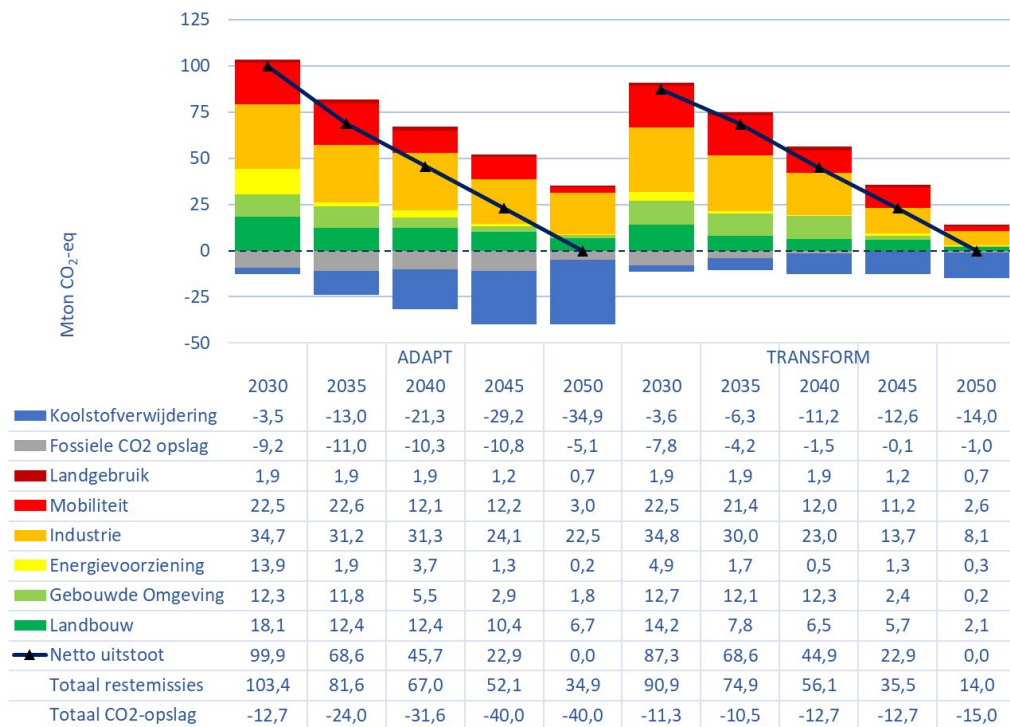
# 3 Resultaten

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van de kwantitatieve analyses. Eerst worden resultaten van de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's nader bekeken wat betreft BKG-restemissies, koolstofstromen, CCU/S en vermijdbare restemissies (paragraaf 3.1). Daarna worden de resultaten van de verschillende what-if-analyses besproken (paragraaf 3.2). Tenslotte wordt de CO<sub>2</sub>-opslag uit ADAPT en TRANSFORM vergeleken met het geologische opslagpotentieel onder het Nederlandse deel van de Noordzee (paragraaf 3.3).

## 3.1 ADAPT en TRANSFORM

### 3.1.1 Restemissies

De BKG-reductiedoelstelling zorgt ervoor dat de netto BKG-emissie daalt tot uiteindelijk nul emissies in 2050, zoals te zien is in Figuur 3.1. De figuur laat ook zien welke sectoren verantwoordelijk zijn voor resterende BKG-emissies. Naast een overkoepelende reductiedoelstelling geldt voor beide scenario's voor 2030 ook een sectorale doelstelling, gebaseerd op de sectorale streefwaarden (Ministerie van EZK, 26 april 2023). Daarnaast kunnen in TRANSFORM vanaf 2040 de sectoren industrie en energievoorziening netto geen emissies meer emitteren in verband met het niet langer beschikbaar zijn van emissierechten onder het emissiehandelssysteem (ETS). In 2050 bestaan de restemissies in ADAPT voor 66% uit CO<sub>2</sub> en 33% uit niet-CO<sub>2</sub>-broekasgassen. In TRANSFORM is dit respectievelijk 57% en 43%. De omvang van restemissies in ADAPT is in 2050 34,9 Mton en in TRANSFORM 14,0 Mton CO<sub>2</sub>-eq.



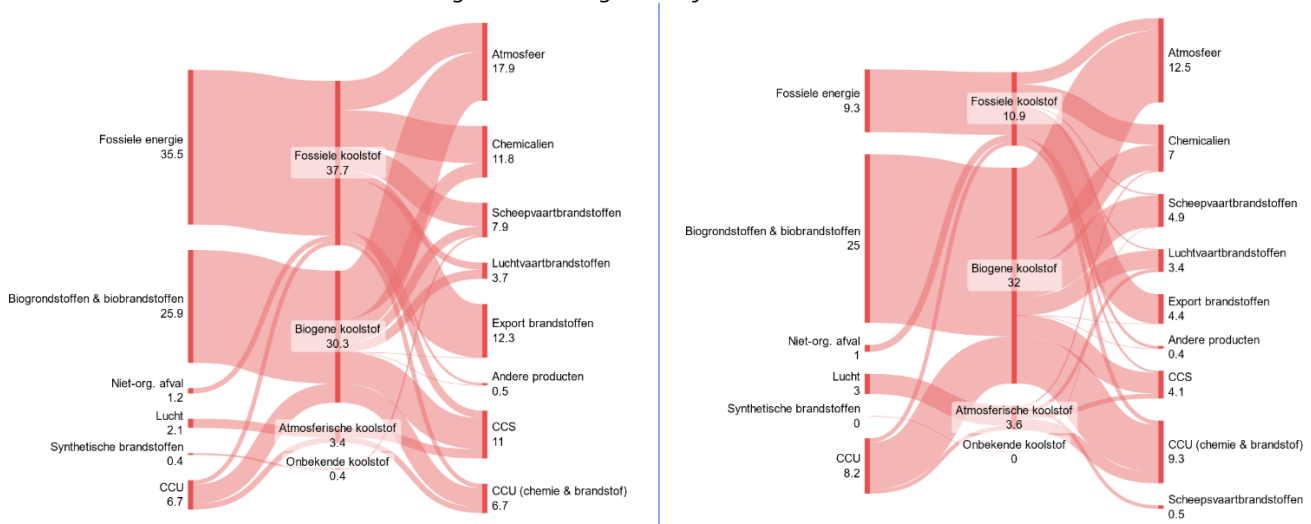
Figuur 3.1: Restemissies en CO<sub>2</sub>-opslag

Figuur 3.1 toont ook de totale CO<sub>2</sub>-opslag: de som van biogene en niet-biogene opgeslagen CO<sub>2</sub>. Het maximum voor de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-opslag (zie Tabel 2.1) wordt in ADAPT in alle jaren volledig benut, behalve in 2040 (maximum is 35 Mton). De veronderstelde opslagcapaciteit voor ADAPT (exogene parameter) neemt sneller toe dan de capaciteit die vanuit kostenoptimalisatie nodig is. Vanaf 2045 ligt de optimale opslagcapaciteit voor ADAPT boven het veronderstelde maximum. In TRANSFORM wordt de maximum opslagcapaciteit pas benut vanaf 2040 (maximum in 2030 en 2035 is 12,7 Mton).

### 3.1.2 Koolstofstromen

Figuur 3.2 laat de herkomst en bestemming van koolstof in het Nederlandse energiesysteem in 2050 zien voor ADAPT en TRANSFORM in de vorm van Sankey-diagrammen. De hoeveelheid koolstof in het ADAPT-scenario is in 2050 71,8 Mton. Ten opzichte van 2022 is er geen sprake van een reductie van de hoeveelheid koolstof, maar zelfs van een toename van 11 Mton. Dit wordt vooral veroorzaakt door een groei in de vraag naar energie, mobiliteit en industriële producten. Wel daalt het aandeel fossiele koolstof in ADAPT van 89% in 2022 naar 53% in 2050. In TRANSFORM daalt de hoeveelheid koolstof tot 46,5 Mton in 2050. Deze daling is het gevolg van een minder sterke groei of lagere vraag als gevolg van gedragsverandering bij consumenten en de industriële transitie. Ook is de omschakeling naar niet-fossiele koolstof in TRANSFORM groter: het aandeel fossiel koolstof daalt in TRANSFORM naar 23%.

De Sankey-diagrammen geven ook de bestemming van de koolstof weer. Een groot deel van de koolstof wordt gebruikt als bunkerbrandstof, grondstof in chemicaliën of als brandstof geëxporteerd (in ADAPT is dat 50% en in TRANSFORM 44%). In beide scenario's verdwijnt ongeveer 25% van de koolstof in de atmosfeer. In TRANSFORM is dat voor het overgrote deel niet-fossiele koolstof en in ADAPT voor iets meer dan de helft. Dat de emissie van fossiele koolstof in ADAPT groter is, komt door het grotere CCS-volume (11 Mton C ofwel 40 Mton CO<sub>2</sub>) waardoor de compensatie door koolstofverwijdering (opgeslagen niet-fossiel koolstof) groter kan zijn dan in TRANSFORM waarvan het opslagvolume beperkter is (4,1 Mton C ofwel 15 Mton CO<sub>2</sub>). Daarentegen is het gebruik van afgevangen CO<sub>2</sub> (CCU) in TRANSFORM groter dan in ADAPT door de grotere vraag naar synthetische brandstoffen.



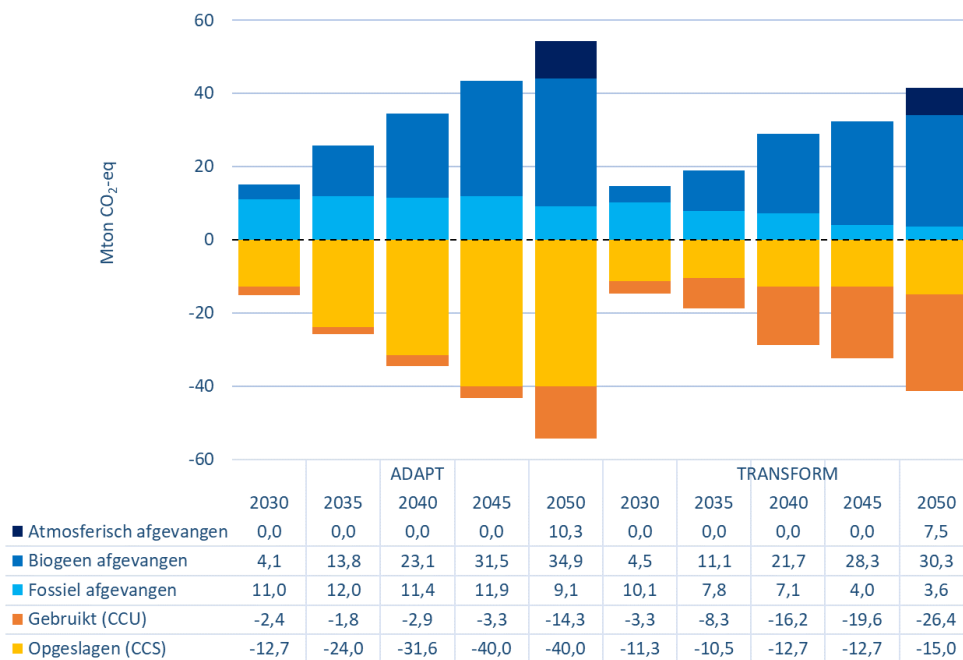
**Figuur 3.2:** Sankey-diagram van de koolstofstromen in ADAPT 2050 (links) en TRANSFORM 2050 (rechts) in Mton C (x 3,67 = Mton CO<sub>2</sub>). Fossiele, biogene en atmosferische koolstofstromen uit CO<sub>2</sub>-afvang naar rato verdeeld over CCS en CCU.



### 3.1.3 CCU/S

De ontwikkeling van afgevangen CO<sub>2</sub> en de herkomst en bestemming ervan is in Figuur 3.3 voor beide scenario's weergegeven en uitgesplitst. In beide scenario's neemt de hoeveelheid afgevangen CO<sub>2</sub> toe. In ADAPT heeft dit te maken met de toename van de maximale CO<sub>2</sub>-opslagcapaciteit die geleidelijk wordt verhoogd naar 40 Mton in 2050. In TRANSFORM is de groei van de CO<sub>2</sub>-afvang vooral het gevolg van de ambities om bunkerbrandstoffen en grondstoffen voor productie van chemicaliën en plastics te verduurzamen. De hoeveelheid afgevangen CO<sub>2</sub> die opnieuw wordt gebruikt (CCU) is daarom in TRANSFORM aanzienlijk groter dan in ADAPT waarvoor zo'n ambitie niet geldt. Vanaf 2040 is CCU in TRANSFORM ook groter dan de hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> (CCS) die in 2050 is begrensd tot 15 Mton. In ADAPT is CCU aanvankelijk bescheiden en groeit pas in 2050.

In ADAPT is de hoeveelheid afgevangen fossiele CO<sub>2</sub> aanvankelijk vrij constant en daalt iets in 2050. De groei van afgevangen biogene CO<sub>2</sub> neemt daarentegen wel fors toe, voor een groot deel ten behoeve van BECCS. Met de koolstofverwijdering die met BECCS wordt gerealiseerd worden fossiele CO<sub>2</sub>-emissies naar de atmosfeer gecompenseerd. BECCS is een kostenefficiënte optie in vergelijking met fossiele CCS. Dit komt omdat BECCS wordt toegepast bij processen waarin biogrondstoffen worden omgezet in brandstoffen en grondstoffen voor chemicaliënproductie. De CO<sub>2</sub> komt hierbij vrij in hogere concentraties dan in verbrandingsgassen van bijvoorbeeld aardgas (post-combustion). De investeringskosten van BECCS bij deze bioprocessen zijn, vanwege compactere installaties, relatief lager en ook zijn de energiekosten geringer.



**Figuur 3.3:** Ontwikkeling, herkomst en bestemming van afgevangen CO<sub>2</sub>

De afvang van fossiele CO<sub>2</sub> daalt in TRANSFORM geleidelijk. Gelijktijdig neemt de afvang van biogene CO<sub>2</sub> aanzienlijk toe. In beide scenario's wordt in 2050 ook CO<sub>2</sub> uit de lucht afgevangen (DAC). Deze CO<sub>2</sub> wordt onder meer gebruikt voor productie van synthetische brandstoffen die een duurzaam alternatief vormen voor biobrandstoffen. De vraag naar duurzame bunkerbrandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart kan in 2050 niet alleen met biobrandstoffen worden voorzien. Hoewel in ADAPT de verduurzaming van bunkerbrandstoffen voor internationale lucht- en scheepvaart minder groot is dan in

TRANSFORM (50% versus 100% CO<sub>2</sub>-reductie in 2050) is de vraag naar deze bunkerbrandstoffen aanzienlijk groter dan in TRANSFORM (zie Figuur 3.2). De biobrandstoffenproductie wordt echter beperkt door de beschikbaarheid van geïmporteerde biograndstoffen die in beide scenario's gelijk is.

*Koolstofverwijdering*

Op basis van de in de scenario's gebruikte processen en hun inputs is bepaald welk deel van de afgevangen fossiele, biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> wordt opgeslagen (CCS) en welk deel wordt gebruikt voor productie van synthetische brandstoffen en grondstoffen (CCU).

Er is een andere allocatie van de afgevangen CO<sub>2</sub> mogelijk waarbij toepassing van fossiele CO<sub>2</sub> voor productie van synthetische brandstoffen en grondstoffen wordt uitgesloten. Hiermee wordt bereikt dat synthetische brandstoffen en chemicaliën geproduceerd uit synthetische grondstoffen als volledig duurzaam kunnen worden aangemerkt. Dit vereist echter wel een duidelijke beleidskeuze en instrumentatie van dat beleid (boekhouding, certificaten) (Europese Commissie, 2024).

In Tabel 3.1 wordt de omvang van de koolstofverwijdering weergegeven volgens beide methoden. Deze omvang is in de eerste methode (mix op basis van gebruikte processen) groter dan in de tweede methode (geen fossiele CO<sub>2</sub>-gebruik bij CCU). Dit komt omdat in de tweede methode alleen de resterende biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> wordt opgeslagen die niet wordt gebruikt voor CCU. De koolstofverwijdering neemt in beide scenario's toe, zowel absoluut (in Mton) als relatief (% van de opgeslagen CO<sub>2</sub>). De omvang van de koolstofverwijdering is in ADAPT wel groter dan in TRANSFORM.

**Tabel 3.1:** Omvang koolstofverwijdering volgens twee methoden. Percentage geeft aandeel koolstofverwijdering weer in verhouding tot totale CO<sub>2</sub>-opslag.

Methode	Eenheid	ADAPT					TRANSFORM				
		2030	2035	2040	2045	2050	2030	2035	2040	2045	2050
Op basis van processen	Mton	3,5	13,0	21,3	29,2	34,9	3,6	6,3	11,2	12,6	14,0
	%	28%	54%	67%	73%	87%	31%	60%	88%	99%	93%
Alleen niet-fossiele CCU voor synthetisch brandstoffen en grondstoffen <sup>a</sup>	Mton	1,7	11,9	20,2	28,1	30,9	1,2	2,7	5,6	8,7	11,4
	%	13%	50%	64%	70%	77%	10%	26%	44%	68%	76%

<sup>a</sup> door middel van certificering

### 3.1.4 Herkomst resterende broeikasgasemissies

De Wetenschappelijk Klimaatraad (WKR) adviseert om maximaal in te zetten op het beperken van de BKG-uitstoot (Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR), 2024). Voor het realiseren van klimaatneutraliteit in 2050 zal daardoor minder koolstofverwijdering nodig zijn en blijft er een grotere geologische opslagcapaciteit over voor koolstofverwijdering ten behoeve van tegengaan van een temperatuuroverschrijding.

De energiesystemen die voor ADAPT en TRANSFORM zijn berekend zijn in 2050 wel klimaatneutraal, maar er wordt niet expliciet gestreefd naar een zo gering mogelijke BKG-restemissie. Doordat de hoeveelheid CO<sub>2</sub>-opslag beperkt is, is er wel een indirecte beperking. Daardoor zijn de restemissies in TRANSFORM lager dan in ADAPT (zie paragraaf 3.1.1).

Door nadere analyse van de modelresultaten kunnen drie vragen worden beantwoord:

1. Welke toepassingen of (sub)sectoren stoten in 2050 nog BKG-emissies uit?
2. Zijn er voor deze toepassingen of (sub)sectoren nog reductiemogelijkheden die niet benut worden door het model?
3. Wat zijn binnen de modelcontext de onvermijdbare BKG-emissies in 2050?

De resultaten van deze analyse staan weergegeven in Tabel 3.2. De tabel toont een overzicht van de toepassingen en (sub)sectoren waarbij in 2050 BKG-restemissies ontstaan, inclusief de omvang van deze emissies. Binnen de modelcontext zijn deze restemissies in ADAPT verder te reduceren voor staalproductie (door over te schakelen op direct reduced iron; DRI), benzineauto's (vervangen door elektrische auto's) en aardgasketels in woningen (vervangen door warmtepompen, warmtenetten of hernieuwbaar gas). Restemissies kunnen in TRANSFORM worden gereduceerd door de laatste in 2050 nog gebruikte benzineauto's te vervangen door elektrische auto's. Onvermijdbare BKG-emissies zijn overige BKG-emissies in de landbouw (CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O), BKG-emissies van landgebruik, indirecte CO<sub>2</sub>-emissies en resterende CO<sub>2</sub>-emissies in verschillende sectoren waar CO<sub>2</sub>-afvang plaatsvindt, omdat het technisch niet mogelijk is alle CO<sub>2</sub> af te vangen.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de analyse betrekking heeft op de technologie-opties die zijn opgenomen in het OPERA-model, zie (Scheepers, et al., 2024). OPERA bevat een groot aantal (meer dan 500) technisch haalbare opties en routes, maar er kunnen opties en routes in ontwikkeling zijn die nog niet in OPERA zijn opgenomen.

**Tabel 3.2:** Herkomst resterende BKG-emissies en mogelijkheden tot verdere reductie daarvan

	ADAPT	TRANSFORM
Welke toepassingen of (sub)sectoren stoten in 2050 nog BKG-emissies uit?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Staalproductie (Hisarna-proces; 9,5 Mton)</li> <li>• Restgassen raffinaderijen (5 Mton)</li> <li>• CH<sub>4</sub>- en N<sub>2</sub>O-emissies uit de landbouw (4 Mton)</li> <li>• Indirecte emissies bij glas en keramiek (1,6 Mton)</li> <li>• Afvalverbranding met CCS die niet 100% afvangt (2,2 Mton)</li> <li>• Non-energetische en indirecte uitstoot chemie (2,2 Mton)</li> <li>• Benzineauto's (1,6 Mton)</li> <li>• Aardgasketels woningen (1,2 Mton)</li> <li>• BKG-emissies landgebruik (0,7 Mton)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indirecte emissies, restgassenverbranding en verwerking van plastic afval in de chemie (2,6 Mton)</li> <li>• CH<sub>4</sub>- en N<sub>2</sub>O-emissies uit de landbouw (2,1 Mton)</li> <li>• Indirecte emissies bij glas en keramiek (1,6 Mton)</li> <li>• Restgassenverbranding bij de raffinaderij (1,9 Mton)</li> <li>• Benzineauto's (1,6 Mton)</li> <li>• Afvalverbranding met CCS die niet 100% afvangt (1,1 Mton)</li> <li>• Ammoniakproductie (0,7 Mton)</li> <li>• BKG-emissies landgebruik (0,7 Mton)</li> </ul>
Zijn er voor deze toepassingen of (sub)sectoren nog reductiemogelijkheden en die niet benut worden door het model?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Staalproductie</li> <li>• Benzineauto's</li> <li>• Aardgasketels woningen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Benzineauto's</li> </ul>

	ADAPT	TRANSFORM
Wat zijn binnen de modelcontext de onvermijdbare BKG-emissies in 2050?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Overige BKG-emissies uit de landbouw</li> <li>• BKG-emissies landgebruik</li> </ul> <p>Restemissies met (fossiele) CO<sub>2</sub>-afvang die niet 100% effectief is:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afvalverbranding</li> <li>• Raffinaderijen</li> <li>• Glas en keramiek</li> <li>• Ammoniakproductie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Overige BKG-emissies uit de landbouw</li> <li>• BKG-emissies landgebruik</li> </ul> <p>Restemissies met (fossiele) CO<sub>2</sub>-afvang die niet 100% effectief is:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afvalverbranding</li> <li>• Raffinaderijen</li> <li>• Plasticverwerking</li> <li>• Ammoniakproductie</li> </ul>

## 3.2 What-if-analyses

Deze paragraaf bespreekt de resultaten van vijf what-if-analyses die zijn uitgevoerd om te onderzoeken in hoeverre aanpassingen van parameters en randvoorwaarden invloed hebben op de uitkomsten van de scenario's. De uitkomsten van what-if-analyses worden vergeleken met die van de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's (base-cases).

### 3.2.1 Hogere kosten BECCS

Uit de resultaten van ADAPT en TRANSFORM blijkt dat CO<sub>2</sub>-afvang bij processen die biograndstoffen gebruiken aantrekkelijk is. In paragraaf 3.1.3 is de reden hiervoor al gegeven: de kosten van CO<sub>2</sub>-afvang bij deze processen liggen relatief lager dan CO<sub>2</sub>-afvang bij bijvoorbeeld verbrandingsprocessen (post-combustion). In een what-if-analyse is onderzocht wat er gebeurt als BECCS wat betreft kosten minder aantrekkelijk wordt. Hiervoor zijn de investerings- en operationele kosten van bioprocessen met CO<sub>2</sub>-afvang verdubbeld (zie voor oorspronkelijke kostenaannames Bijlage A). Het verlagen van de kosten voor CO<sub>2</sub>-afvang is niet nader onderzocht. Dit zou tot enige toename van biogene-CCS en -CCU kunnen leiden.

#### *Analyse veranderingen*

De resultaten van deze what-if-analyse worden in Figuur 3.4 vergeleken met die van de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's. Door hogere kosten voor BECCS neemt de afvang van biogene CO<sub>2</sub> in beide scenario's af in alle getoonde jaren. De afvang van fossiele CO<sub>2</sub> wordt hierdoor relatief aantrekkelijker en het volume daarvan neemt toe. De totale hoeveelheid afgevangen fossiele en biogene CO<sub>2</sub> daalt eveneens in beide scenario's. In 2050 is deze daling sterker in ADAPT (-40%) dan TRANSFORM (-30%). In 2050 wordt het tekort aan biogene CO<sub>2</sub> gedeeltelijk gecompenseerd door meer DAC. In ADAPT groeit dit volume met 60% en in TRANSFORM is sprake van een ruime verdubbeling. In beide scenario's daalt in 2040 en 2050 de hoeveelheid hergebruikte CO<sub>2</sub> (CCU). CCU is in deze what-if-variant minder aantrekkelijk omdat de meeste hergebruikte CO<sub>2</sub> een biogene oorsprong heeft en hogere kosten voor BECCS-technologie deze optie duurder maken. De hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> blijft in beide scenario's gelijk, behalve in TRANSFORM 2030. Een lager CO<sub>2</sub>-gebruik voor productie van synthetische brandstoffen wordt gecompenseerd door een hogere gebruik van biobrandstoffen in beide scenario's. In ADAPT wordt in de zeescheepvaart ook meer ammoniak als brandstof ingezet.

#### *Koolstofverwijdering*

De verandering in de koolstofverwijdering wordt getoond in Tabel 3.3. Bij hogere kosten van BECCS neemt in beide scenario's de hoeveelheid koolstofverwijdering in alle jaren af, zowel absoluut als relatief.



**Figuur 3.4:** Ontwikkeling, herkomst en bestemming van afgevangen CO<sub>2</sub> bij hogere kosten voor BECCS vergeleken met ADAPT (boven) en TRANSFORM (onder).

**Tabel 3.3:** Omvang koolstofverwijdering bij hogere kosten BECCS (allocatie op basis van processen). Percentage geeft aandeel koolstofverwijdering weer in verhouding tot totale CO<sub>2</sub>-opslag.

Eenheid	ADAPT	BECCS	ADAPT	BECCS	ADAPT	BECCS	TRANSFORM	BECCS	TRANSFORM	BECCS	TRANSFORM	BECCS
	2030		2040		2050		2030		2040		2050	
	Mton	3,5	2,0	21,2	13,9	34,9	32,9	3,6	2,1	11,2	8,1	14,0
%	28%	16%	67%	44%	87%	82%	31%	19%	88%	64%	93%	89%

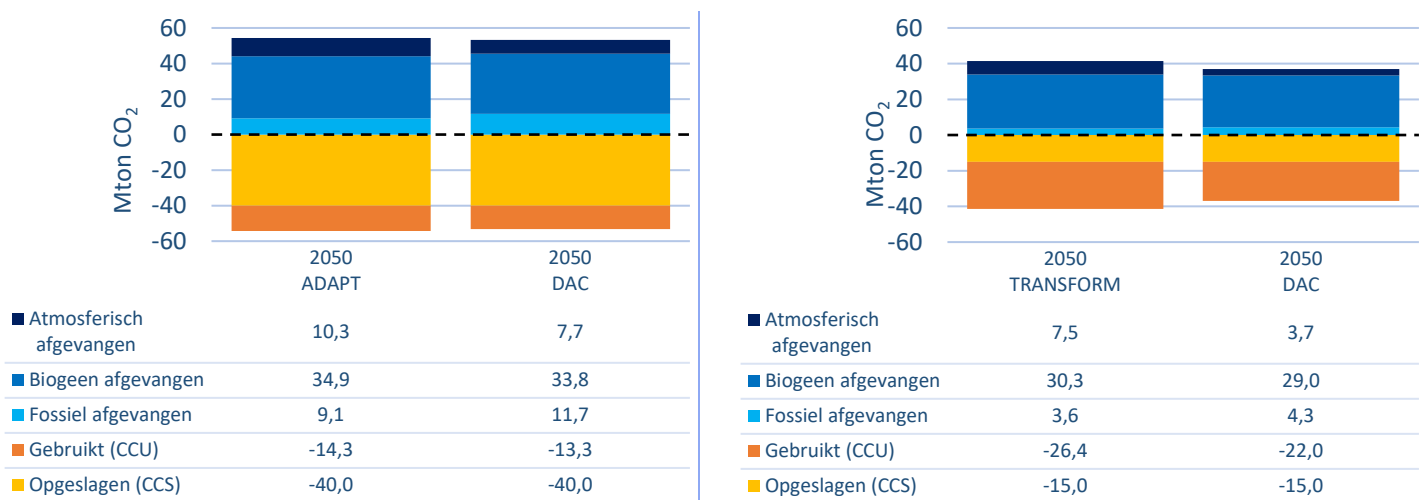
### 3.2.2 Hogere kosten DAC

Met direct air capture (DAC) technologie wordt CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer afgevangen. Doordat de concentratie CO<sub>2</sub> in de atmosfeer veel lager is dan in rookgassen of processtromen is DAC minder efficiënt. DAC-installaties zijn daardoor omvangrijk en verbruiken veel energie. Dat maakt DAC relatief duur. DAC kan zowel stand-alone bestaan – dus als installatie die CO<sub>2</sub> afvangt om vervolgens te worden opgeslagen – als worden geïntegreerd in een productieproces – bijvoorbeeld voor de productie van synthetische brandstoffen.

DAC wordt pas in 2050 ingezet in zowel ADAPT als TRANSFORM. De investeringskosten zijn dan lager dan nu – OPERA houdt voor innovatieve technologieën rekening met zogenoemde *technology learning*, waardoor kosten dalen en energie-efficiëntie toeneemt als gevolg van R&D en uitrol van de techniek<sup>8</sup>. In deze what-if analyse is onderzocht wat er gebeurt als het energieverbruik voor DAC niet lager wordt, maar 25% hoger uitvalt. De investeringskosten en operationele kosten van DAC-technologie, zowel voor stand-alone als geïntegreerd, zijn 50% hoger verondersteld (zie voor oorspronkelijke kostenaanname Bijlage A). De toegepaste kostenverhoging is kleiner dan die voor BECCS, omdat het veronderstelde kostenniveau voor DAC in de base case al relatief hoog is. Het verlagen van het energieverbruik en kosten voor DAC-technologie is niet nader onderzocht. Dit zou tot een grotere inzet van DAC kunnen leiden.

#### Analyse veranderingen

Figuur 3.5 toont de resultaten van deze what-if-analyse in vergelijking met die van de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's, maar enkel voor 2050 omdat DAC in de jaren daarvoor niet voorkomt. Door de lagere energie-efficiency en hogere kosten voor DAC daalt de inzet van deze technologie in ADAPT 2050 met 25% en in TRANSFORM 2050 met iets meer dan 50%. De effecten voor afgevangen fossiele en biogene CO<sub>2</sub> zijn beperkt: biogeen neemt in beide scenario's iets af, maar fossiel neemt iets toe. Tezamen is het verschil tussen de what-if en de base case slechts enkele procenten. Per saldo daalt de afgevangen CO<sub>2</sub> die opnieuw gebruikt wordt (CCU) met 7% voor ADAPT en met 17% voor TRANSFORM. Omdat iets minder niet-fossiele koolstof wordt afgevangen, daalt de productie van synthetische brandstof en grondstoffen. Dit wordt voor de brandstoffen opgelost door meer biobrandstoffen in te zetten als bunkerbrandstof voor de zeescheepvaart. De hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> blijft in de what-if-varianten gelijk aan de maximum hoeveelheid die voor ADAPT en TRANSFORM gelden.



**Figuur 3.5:** Herkomst en bestemming van afgevangen CO<sub>2</sub> bij hogere kosten voor DAC vergeleken met ADAPT

<sup>8</sup> DAC-technologie is nog niet volledig ontwikkeld. Volgens de Energy Technology Perspectives [Clean Energy Technology Guide](#) van de IEA bevindt deze technologie zich nog in de demonstratiefase.

(links) en TRANSFORM (rechts).

*Koolstofverwijdering*

De verandering in de koolstofverwijdering voor deze what-if-variant wordt getoond in Tabel 3.4. Omdat DAC in beide scenario's pas in 2050 wordt ingezet, worden alleen resultaten van dat jaar getoond. Bij een lagere energie-efficiency en hogere kosten voor DAC-technologie neemt in beide scenario's de hoeveelheid afgevangen en opgeslagen atmosferische CO<sub>2</sub> af. Hoewel ook afvang van biogene CO<sub>2</sub> iets daalt is sprake van een verschuiving van afgevangen biogene CO<sub>2</sub> van CCU naar CCS waardoor in ADAPT, per saldo, de koolstofverwijdering iets toeneemt. Bij TRANSFORM leidt het saldo tot een kleine daling van de koolstofverwijdering.

**Tabel 3.4:** Omvang koolstofverwijdering bij hogere kosten DAC (allocatie op basis van processen). Percentage geeft aandeel koolstofverwijdering weer in verhouding tot totale CO<sub>2</sub>-opslag.

Eenheid	ADAPT	DAC	TRANSFORM	DAC
	2050		2050	
Mton	34,9	36,0	14,0	13,5
%	87%	90%	93%	90%

### 3.2.3 Hogere kosten BECCS en DAC

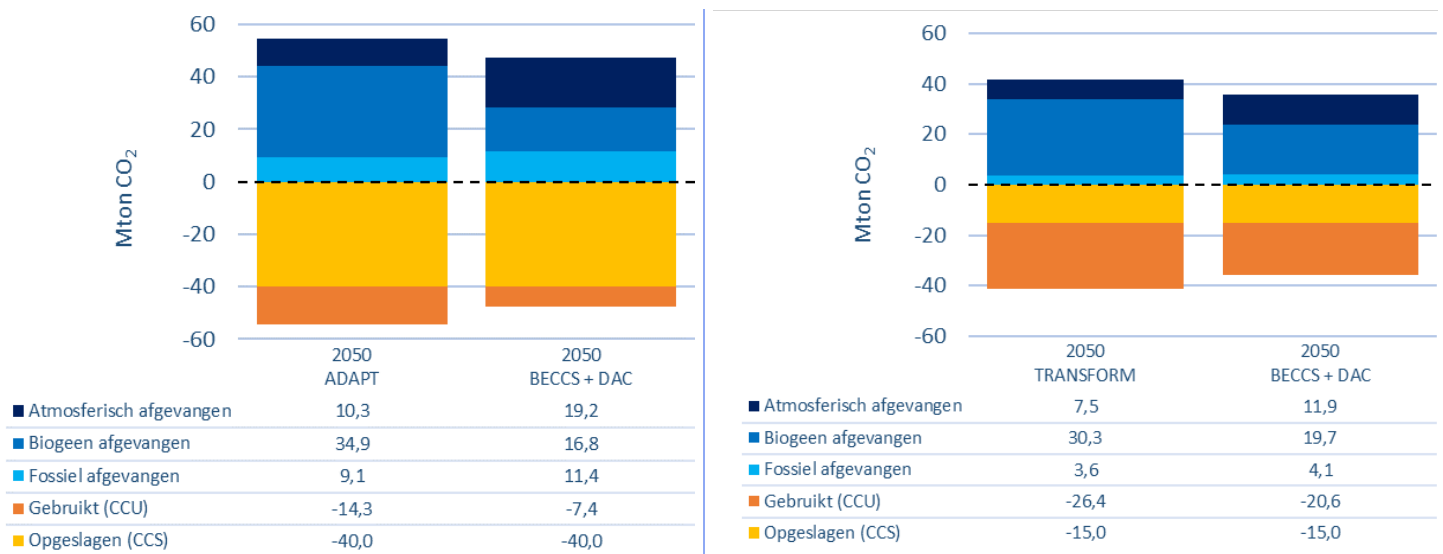
In de twee vorige what-if-analyses zijn de effecten onderzocht van hogere kosten voor BECCS of voor DAC. In deze derde what-if-analyse is de combinatie van hogere kosten voor BECCS én DAC onderzocht. Het is immers voorstelbaar dat zowel BECCS-toepassingen door hogere kosten minder aantrekkelijk worden en dat ook de kosten voor DAC hoger uitvallen. De vraag is dan welk effect dit heeft op het energiesysteem.

*Analyse veranderingen*

De resultaten van de derde what-if-analyse zijn weergegeven in Figuur 3.6. Evenals de what-if-analyse voor hogere DAC-kosten wordt alleen het resultaat voor 2050 getoond omdat DAC alleen in dat jaar in ADAPT en TRANSFORM wordt toegepast.

De totale afgevangen biogene en atmosferische hoeveelheid CO<sub>2</sub> daalt in beide scenario's ten opzichte van de base case: -20% voor ADAPT en -17% voor TRANSFORM. De inzet van BECCS neemt zowel in ADAPT (-52%) als in TRANSFORM (-35%) af. De daling is een fractie minder groot dan wanneer alleen de kosten voor BECCS hoger zijn, zie Figuur 3.4. Daarentegen laat DAC, ondanks hogere kosten, juist een toename zien: 86% in ADAPT en 58% in TRANSFORM. Ook neemt de afvang van fossiele CO<sub>2</sub> toe. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt gebruikt voor synthetische brandstoffen en grondstoffen daalt in deze what-if-variant. De daling is in dezelfde orde als de what-if met alleen hogere kosten voor BECCS. De hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> blijft in beide scenario's onveranderd en is gelijk aan de maximum veronderstelde hoeveelheid.

De vraag naar duurzame koolstof (in TRANSFORM groter dan in ADAPT) is zodanig dat minder aantrekkelijke BECCS voor een deel gecompenseerd wordt met DAC. Dit was ook al te zien in de BECCS-what-if. Met hogere kosten voor DAC blijft deze compensatie vrijwel overeind: de toename in ADAPT is in deze what-if 86% tegen 112% in de BECCS-what-if; in TRANSFORM is de toename 58% tegen 60%.



**Figuur 3.6:** Herkomst en bestemming van afgevangen CO<sub>2</sub> bij hogere kosten voor BECCS en DAC vergeleken met ADAPT (links) en TRANSFORM (rechts).

### Koolstofverwijdering

Tabel 3.5 laat de verandering zien in koolstofverwijdering in de situatie waarbij de kosten voor zowel BECCS als DAC hoger zijn dan in de base case. Evenals bij hogere kosten voor BECCS neemt in beide scenario's de hoeveelheid koolstofverwijdering af. De afname is voor ADAPT iets groter (0,9 Mton), maar voor TRANSFORM is de afname vrijwel gelijk.

**Tabel 3.5:** Omvang koolstofverwijdering bij hogere kosten BECCS en DAC (allocatie op basis van processen). Percentage geeft aandeel koolstofverwijdering weer in verhouding tot totale CO<sub>2</sub>-opslag.

Eenheid	ADAPT	BECCS+DAC	TRANSFORM	BECCS+DAC
	2050		2050	
Mton	34,9	32,0	14,0	13,3
%	87%	80%	93%	88%

## 3.2.4 Verlagen beschikbaarheid biograndstoffen

Voor de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's zijn aannames gemaakt over de beschikbaarheid van biograndstoffen. De hoeveelheid binnenlands beschikbare biograndstoffen is onvoldoende om in de vraag naar biobrandstoffen en biograndstoffen te voorzien. Vandaar dat ook wordt uitgegaan van import van biograndstoffen tot een maximum, gebaseerd op verschillende potentieelramingen (zie voor een nadere toelichting (Scheepers, et al., 2024)). ADAPT en TRANSFORM kennen hetzelfde maximum dat tussen 2030 en 2050 geleidelijk oploopt. In 2050 wordt de maximum import volledig ingezet in beide scenario's. De beschikbare import kan echter kleiner zijn dan voor de scenario's is verondersteld, bijvoorbeeld vanwege strengere duurzaamheidscriteria dan waar bij de potentiële schatting van is uitgegaan of uitsluiting van import uit bepaalde landen. De omvang van de koolstofverwijdering is mede afhankelijk van de beschikbare hoeveelheid biograndstoffen. Om het effect van een lagere beschikbaarheid van biograndstoffen te kunnen onderzoeken, is in een what-if-analyse de hoeveelheid biograndstoffen die Nederland kan importeren met 25% verlaagd.



### Analyse veranderingen

De resultaten van deze what-if-analyse worden in Figuur 3.7 getoond en vergeleken met die van ADAPT en TRANSFORM. Doordat minder biograndstoffen beschikbaar zijn, daalt de afvang van biogene CO<sub>2</sub>: in 2050 is dit in ADAPT -23% en in TRANSFORM -36%. De afvang van atmosferisch CO<sub>2</sub> gaat in beide scenario's in 2050 juist omhoog: voor ADAPT is dat een ruime verdubbeling en voor ADAPT zelfs een ruime verdrievoudiging. Daardoor is sprake van een kleine toename van de totale hoeveelheid afgevangen biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>. Door een lagere beschikbaarheid van biograndstoffen wordt in beide scenario's minder biobrandstoffen ingezet, maar meer synthetische brandstoffen. Omdat er in vergelijking met de base case minder biogene koolstof is, wordt meer atmosferische CO<sub>2</sub> toegepast bij de productie van synthetische brandstoffen.

Ook wordt in de what-if-variant minder biogene CO<sub>2</sub> opgeslagen. Dit wordt gecompenseerd door meer opslag van fossiele en atmosferische CO<sub>2</sub>. De totale hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> blijft in deze what-if-variant gelijk aan het maximum dat voor beide scenario's is verondersteld.

### Koolstofverwijdering

Tabel 3.6 toont de verandering in koolstofverwijdering als minder biograndstoffen worden geïmporteerd. In vergelijking met de base cases resulteert een beperking in de beschikbaarheid van biograndstoffen in een lagere koolstofverwijdering in 2030 en 2040, maar, in beide scenario's, een toename in 2050. Dit komt doordat in 2050 DAC wordt toegepast en die inzet is groter in deze what-if dan in de base case.



**Figuur 3.7:** Ontwikkeling, herkomst en bestemming van afgevangen CO<sub>2</sub> bij verlaging van de beschikbaarheid biograndstoffen vergeleken met ADAPT (boven) en TRANSFORM (onder).

**Tabel 3.6:** Omvang koolstofverwijdering bij verlaging beschikbaarheid biograndstoffen (aangeduid BIO; allocatie op basis van processen). Percentage geeft aandeel koolstofverwijdering weer in verhouding tot totale CO<sub>2</sub>-opslag.

Eenheid	ADAPT	BIO	ADAPT	BIO	ADAPT	BIO	TRANSFORM	BIO	TRANSFORM	BIO	TRANSFORM	BIO
	2030		2040		2050		2030		2040		2050	
Mton	3,5	3,0	21,3	17,5	34,9	37,0	3,6	3,8	11,2	9,4	14,0	14,6
%	28%	23%	67%	51%	87%	93%	31%	32%	88%	74%	93%	98%

### 3.2.5 Beperking gebruik van fossiele brandstoffen

Voor de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's wordt geen doelstelling gehanteerd ten aanzien van het gebruik van fossiele brandstoffen. De doelstelling voor BKG-emissies leidt wel tot minder gebruik van fossiele brandstoffen. Maar doordat CO<sub>2</sub>-emissies met koolstofverwijdering kan worden gecompenseerd, is in 2050 nog steeds sprake van gebruik van fossiele brandstoffen. In ADAPT is dit gebruik groter dan in TRANSFORM.

Er is beleid ontwikkeld om het gebruik van fossiele brandstoffen te beperken of te verbieden. Een goed voorbeeld is het vanaf 2030 niet langer toepassen van kolen bij elektriciteitsopwekking en vanaf 2035 geen enkele fossiele brandstof. In deze what-if-analyse wordt ervan uitgegaan dat ook voor andere toepassingen dergelijk beleid wordt gemaakt en het voor die toepassingen niet meer mogelijk is fossiele brandstoffen te gebruiken. Het gaat vooral om toepassingen waarbij nog olie en aardgas wordt ingezet. Deze analyse is alleen uitgevoerd voor het TRANSFORM-scenario, omdat dit type beleid goed past bij dit scenario en niet bij ADAPT waarin er juist voor wordt gekozen het gebruik van fossiele brandstoffen nog enigermate in stand te houden in combinatie met een ruime CO<sub>2</sub>-opslag.

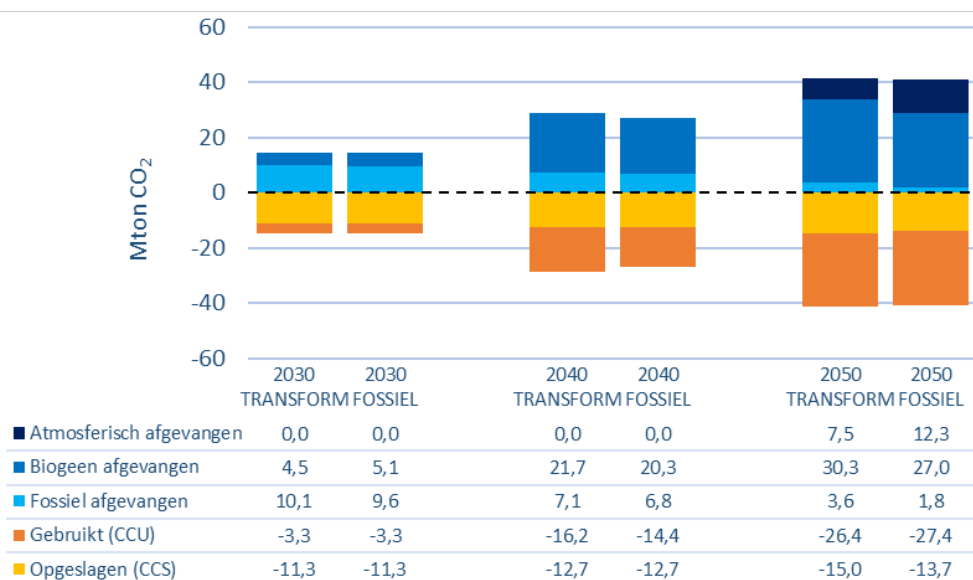
#### Analyse veranderingen

Het gebruik van fossiele brandstoffen voor deze what-if-analyse wordt in Tabel 3.7 vergeleken met de base case. Zowel het gebruik van aardgas als olie is in de what-if variant vanaf 2035 lager. Het is echter niet mogelijk fossiele brandstoffen volledig uit te faseren. De modelresultaten laten zien dat dit te maken heeft met enkele toepassingen waarbij gebruik van fossiele brandstoffen nog nodig blijft, zoals het gebruik van fossiele nafta bij de productie van chemicaliën die voor maximaal 80% uit duurzame koolstof (gerecyclede, biogene of atmosferische koolstof) kunnen worden geproduceerd (zie voor toelichting (Scheepers, et al., 2024)). In 2050 is het gebruik van aardgas in de base-case al geminimaliseerd.

**Tabel 3.7:** Gebruik van olie en aardgas in TRANSFORM en in de what-if-analyse waarbij fossiele brandstoffen zoveel mogelijk worden beperkt.

	Eenheid	TRANSFORM					Beperking fossiele brandstoffen				
		2030	2035	2040	2045	2050	2030	2035	2040	2045	2050
Aardgas	PJ	713	498	447	215	6	725	544	363	181	6
Olie	PJ	1397	1128	791	498	241	1400	1050	700	350	120

Figuur 3.8 toont voor de what-if-analyse de verandering ten aanzien van CO<sub>2</sub>-afvang, -opslag en -gebruik in vergelijking met het TRANSFORM-scenario. De afvang van fossiele CO<sub>2</sub> daalt en is in 2050 gehalveerd. Dit komt omdat met name in de industrie, waar de meeste CO<sub>2</sub>-afvang plaatsvindt, minder fossiele brandstoffen worden gebruikt. Ook daalt de afvang van biogene CO<sub>2</sub> enigszins (in 2050 is dat -11%). Dit komt door verschuivingen bij inzet van biograndstoffen, onder meer naar productie van biobrandstoffen. De afvang van atmosferische CO<sub>2</sub> met DAC laat een ruime verdubbeling zien ter compensatie van de daling van de biogene CO<sub>2</sub> afvang. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die wordt ingezet voor CCU blijft vrijwel gelijk. In deze what-if-analyse neemt de hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> (CCS) in 2050 af met 9% en is lager dan het veronderstelde maximum voor dit scenario van 15 Mton in 2050. Omdat er minder resterende fossiele emissies zijn, is de noodzaak deze met koolstofverwijdering te compenseren kleiner. Compensatie is echter nog steeds nodig voor de moeilijk te reduceren emissies uit veeteelt, landgebruik, bij enkele industriële processen en niet-afgevangen fossiele CO<sub>2</sub>, zoals bij afvalverbranding.



**Figuur 3.8:** Ontwikkeling, herkomst en bestemming van afgevangen CO<sub>2</sub> bij beperking gebruik van fossiele brandstoffen vergeleken met TRANSFORM.

### Koolstofverwijdering

De verandering in koolstofverwijdering bij beperking van het gebruik van fossiele brandstoffen wordt weergegeven in Tabel 3.8. Minder fossiele brandstoffen resulteert in een kleinere afvang van fossiele CO<sub>2</sub> en een daling van de opslag daarvan. Hierdoor wordt in 2030 iets meer biogene CO<sub>2</sub> opgeslagen. In 2040 wordt echter ook minder biogene CO<sub>2</sub> afgevangen. Die daling is groter dan bij afvang van fossiel CO<sub>2</sub> waardoor de koolstofverwijdering iets afneemt. In 2050 daalt de totale hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> van 15 Mton in de base-case naar 13,7 Mton in deze what-if-variant en neemt de koolstofverwijdering relatief toe, terwijl in absolute hoeveelheden sprake is van een daling.

**Tabel 3.8:** Omvang koolstofverwijdering bij beperking gebruik fossiel brandstoffen (aangeduid Fossiel; allocatie op basis van processen). Percentage geeft aandeel koolstofverwijdering weer in verhouding tot totale CO<sub>2</sub>-opslag.

Eenheid	TRANSFORM	Fossiel	TRANSFORM	Fossiel	TRANSFORM	Fossiel
	2030		2040		2050	
Mton	3,6	4,0	11,2	9,6	14,0	13,1
%	31%	35%	88%	75%	93%	96%

### 3.3 Opslag CO<sub>2</sub> op lange termijn

De jaarlijkse en cumulatieve hoeveelheden CO<sub>2</sub> die worden opgeslagen in de ADAPT- en TRANSFORM-scenario's staan vermeld in Tabel 3.9 en worden weergegeven in Figuur 3.9 en Figuur 3.10. Tabel 3.9 en Figuur 3.9 tonen ook de gezamenlijke voorgenomen jaarlijkse en opslagvolumes voor de twee opslagprojecten Porthos (Porthos, 2022) en Aramis (Aramis, 2024) en de resulterende cumulatieve volumes.

**Tabel 3.9:** Jaarlijkse en cumulatieve CO<sub>2</sub>-opslag voor Aramis en Porthos en ADAPT en TRANSFORM

Jaar	Porthos en Aramis		ADAPT		TRANSFORM	
	Mton/jaar	Mton cumulatief	Mton/jaar	Mton cumulatief	Mton/jaar	Mton cumulatief
2030	14,5	49,5	12,7 <sup>a</sup>	38,1	11,3 <sup>b</sup>	34,0
2035	24,5	167,0	24,0 <sup>a</sup>	135,4	10,5 <sup>b</sup>	88,1
2040	24,5	289,5	31,6 <sup>b</sup>	278,1	12,7 <sup>a</sup>	147,2
2045			40,0 <sup>a</sup>	461,2	12,7 <sup>a</sup>	210,7
2050			40,0 <sup>a</sup>	661,2	15,0 <sup>a</sup>	281,1

<sup>a</sup> Door het model berekende CO<sub>2</sub>-opslag wordt beperkt door het maximum dat voor het scenario is verondersteld.

<sup>b</sup> Door het model berekend CO<sub>2</sub>-opslag die lager ligt dan voor het scenario het verondersteld maximum.

#### *Wanneer is CO<sub>2</sub>-opslagcapaciteit vol?*

De opslag van CO<sub>2</sub> is eindig en afhankelijk van de beschikbare geologische opslagcapaciteit. De capaciteit voor CO<sub>2</sub>-opslag in lege gasvelden onder het Nederlandse deel van de Noordzee wordt geschat op in totaal 1700 Mton en is naar verwachting rond 2065 volledig beschikbaar, d.w.z. dat de gasvelden niet langer worden gebruikt voor gasproductie (Gessel, Breunese, Juez Larré, Huijses, & Remmelts, 2018; Kampman, et al., 2023). In Figuur 3.10 wordt de jaarlijkse opgeslagen hoeveelheden CO<sub>2</sub> voor ADAPT en TRANSFORM na 2050 doorgetrokken. Op deze manier kan geschat worden hoe lang CO<sub>2</sub>-opslag kan worden voorgezet. Bij voorzetting van het jaarlijks opslagvolume in het ADAPT-scenario na 2050 (40 Mton per jaar) zal de beschikbare opslagcapaciteit rond 2076 volledig zijn benut. Voor TRANSFORM, waarbij jaarlijks 15 Mton CO<sub>2</sub> wordt opgeslagen, is in 2100 61% van de opslagcapaciteit benut. Tabel 3.9 laat zien dat de cumulatieve hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> van Porthos en Aramis in 2040 in de buurt ligt van het ADAPT-scenario.

Hierbij moet worden opgemerkt dat geen rekening is gehouden met CO<sub>2</sub> dat uit andere landen in Nederlandse geologische opslag terecht zou kunnen komen of, het omgekeerde, in Nederland afgevangen CO<sub>2</sub> die in het buitenland (bijvoorbeeld Verenigd Koninkrijk of Noorwegen) wordt opgeslagen. Ook is hierbij geen rekening gehouden met mogelijke extra

geologische opslag in aquifers. De Europese Commissie noemt grensoverschrijdende samenwerking belangrijk om tot een kostenefficiënte vraag en aanbod van koolstofverwijdering te komen (Europese Commissie, 2024). Het potentieel voor CO<sub>2</sub>-opslag in de Noordzee, met name onder de zeebodems van de gedeelten van het Verenigd Koninkrijk en Noorwegen, wordt aanzienlijk groter ingeschat dan het hierboven geraamde Nederlandse potentieel<sup>9</sup>.

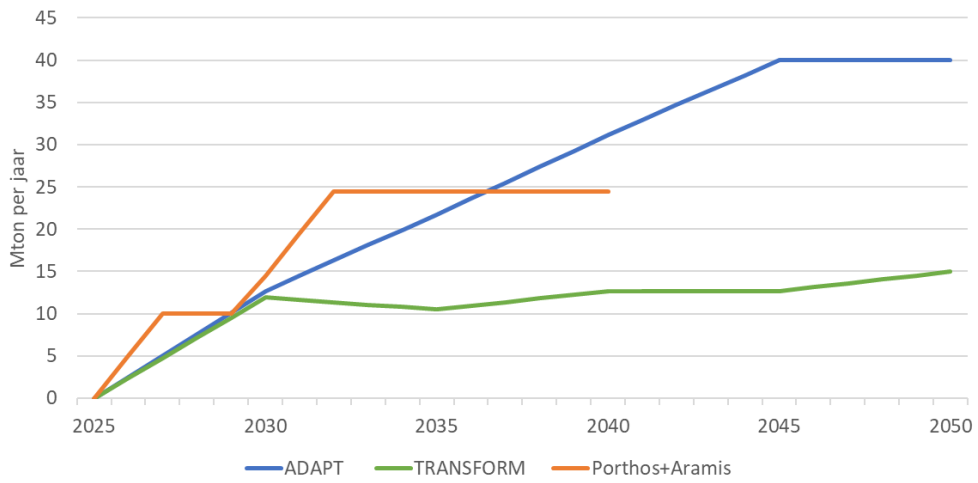
#### *Koolstofverwijdering*

In Tabel 3.10 wordt voor enkele zichtjaren het totale volume aan koolstofverwijdering weergegeven (d.w.z. cumulatieve opgeslagen biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen een situatie waarbij het gebruik van fossiele brandstoffen zich voortzet zoals dat in 2050 in beide scenario's het geval is. Het is echter ook voorstelbaar dat na 2050, als gevolg van verdere verduurzaming van het energiesysteem en de industriële productie, uiteindelijk het gebruik van fossiele brandstoffen volledig wordt beëindigd. Er ontstaat dan meer ruimte voor koolstofverwijdering. Tabel 3.10 toont daarom ook cijfers voor koolstofverwijdering als het resterende fossiele gebruik na 2050 in 10 jaar lineair wordt afgebouwd en de jaarlijkse CO<sub>2</sub>-opslag van 40 Mton en 15 Mton CO<sub>2</sub> voor respectievelijk ADAPT en TRANSFORM wordt gecontinueerd.

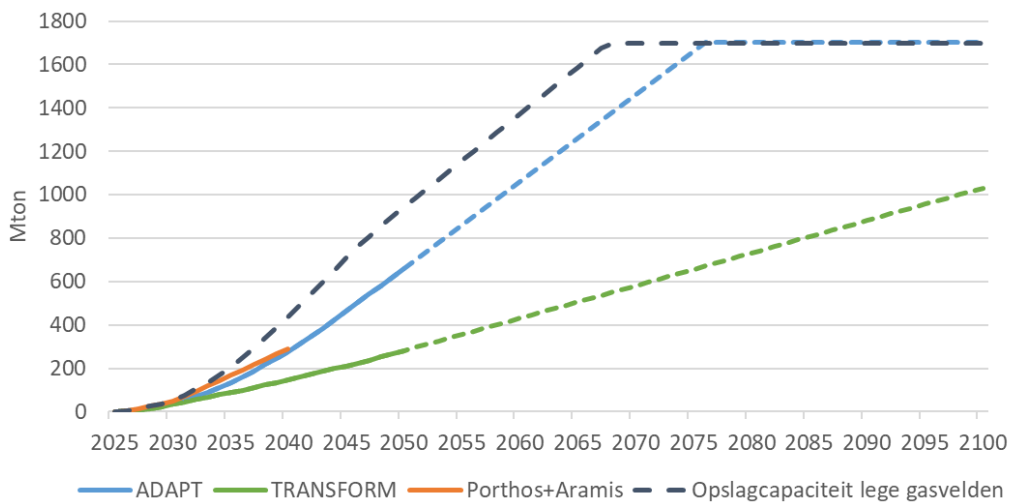
Het aandeel koolstofverwijdering in de cumulatieve hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> bedraagt in 2050 voor ADAPT 67% en voor TRANSFORM 75%. In het zichtjaar 2076 wordt voor het ADAPT-scenario de maximale opslagcapaciteit bereikt. In de situatie waarbij gebruik van fossiele brandstoffen is voortgezet, zal in ADAPT 79% van de opgeslagen CO<sub>2</sub> bestaan uit koolstofverwijdering. Voor TRANSFORM is dit percentage 86%. Bij voorzetting van gebruik fossiele brandstoffen zal voor TRANSFORM in 2100 88% van de opgeslagen CO<sub>2</sub> bestaan uit koolstofverwijdering.

Als na 2050 het gebruik van fossiele brandstoffen wordt afgebouwd, zodat vanaf 2060 geen fossiel CO<sub>2</sub> meer wordt opgeslagen en de jaarlijkse opslaghoeveelheid geheel wordt gebruikt voor koolstofverwijdering, heeft koolstofverwijdering in 2076 voor ADAPT een aandeel in de cumulatieve opgeslagen CO<sub>2</sub> van 86% en voor TRANSFORM van 89%. In 2100, als voor TRANSFORM 61% van de opslagcapaciteit gevuld is, is het aandeel koolstofverwijdering voor dat scenario toegenomen tot 93%.

<sup>9</sup> Voor het Verenigd Koninkrijk wordt het potentieel geschat op 78.000 Mton (<https://www.nstauthority.co.uk/the-move-to-net-zero/ccs/>) en voor Noorwegen 5.500 Mton (<https://www.sodir.no/en/whats-new/publications/co2-atlases/co2-storage-atlas-of-the-norwegian-sea/#:~:text=The%20mapping%20is%20a%20follow, and%2069%C2%B030%22%20North>)



**Figuur 3.9:** Jaarlijkse hoeveelheid CO<sub>2</sub>-opslag.



**Figuur 3.10:** Cumulatief opgeslagen CO<sub>2</sub> bij voortzetting jaarlijkse opslag na 2050 vergeleken met beschikbare opslagcapaciteit in lege gasvelden onder de Noordzee.

**Tabel 3.10:** Cumulatieve koolstofverwijdering in Mton voor verschillende zichtjaren bij extrapolatie van ADAPT en TRANSFORM.

Jaar	Voortzetting fossiele CO <sub>2</sub> opslag 2050-2100		Geen fossiel vanaf 2060	
	ADAPT	TRANSFORM	ADAPT	TRANSFORM
2050	439	210	439	210
2076	1348	575	1457	596
2100	1348	912	1457	956

# 4 Beleidsontwikkelingen koolstofverwijdering

## 4.1 Nederlands beleid

In het Nederlandse beleid wordt er sinds enkele jaren gesproken over het belang van koolstofverwijdering. Zowel de Kamerbrief 'Contouren Nationaal Plan Energiesysteem' uit juni 2022 (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2022) en de Kamerbrief 'Naar een beleidsagenda voor een klimaatneutraal Nederland' uit maart 2023 (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023) onderkennen noodzaak van koolstofverwijdering voor netto nul in 2050 en netto negatief na 2050. Daarin wordt onder andere gesteld dat het belonen van het vastleggen van koolstof bij voorkeur op Europees niveau geregeld wordt. Het Nationaal Plan Energiesysteem (NPE) uit december 2023 (Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, 2023) noemt dezelfde noodzaak en voegt toe dat er onderzoek gedaan moet worden om beter zicht te krijgen op de verhouding tussen de vraag naar en het aanbod van koolstofverwijdering. Tot slot heeft de Wetenschappelijke Klimaatraad in juli 2024 in haar rapport 'De lucht klaren?' (Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR), 2024) een lijst met adviezen opgesteld voor beleidssturing op koolstofverwijdering.

Enkele belangrijke adviezen zijn:

- Richt beleid op permanente methoden van koolstofverwijdering.
- Stel limieten op restemissies op Europees, nationaal en sectoraal niveau.
- Start een door de overheid geleid inkoopprogramma voor permanente koolstofverwijdering.
- Houd koolstofverwijdering zo lang mogelijk buiten het ETS.
- Laat uitstoters vanaf nu bijdragen aan toekomstige kosten voor het terugdringen van de temperatuuroverschrijding.

In het hoofdlijnenakkoord van het huidige kabinet (PVV, VVD, NSC & BBB, 2024) wordt expliciet gesproken over het stoppen met gebruiken van biomassa voor energieopwekking gecombineerd met CO<sub>2</sub>-afvang (BECCS). In het Regeerprogramma kabinet-Schoof (Rijksoverheid, 2024) wordt deze expliciete vermelding niet gemaakt. In het Ontwerp-Klimaatplan 2025-2035 (Ministerie van Klimaat en Groene Groei, 2024) wordt duidelijk gemaakt dat koolstofverwijdering zeker een belangrijke bijdrage gaat leveren aan klimaatneutraliteit. Het kabinet-Schoof houdt rekening met een bijdrage van tussen de 20 en 25 Mton aan koolstofverwijdering in 2040. Om die opgave verder invulling te geven komt het kabinet-Schoof parallel aan het Klimaatplan 2025-2035 met een Routekaart Koolstofverwijdering.

## 4.2 Europees beleid

Ook op Europees gebied wordt koolstofverwijdering, in Europese context vaak Carbon Dioxide Removal (CDR) genoemd, gezien als een belangrijk onderdeel van klimaatneutraliteit in 2050. De Europese Klimaatwet (Europese Unie, 2021) uit 2021 benoemt dat de Unie moet streven naar klimaatneutraliteit in 2050, d.w.z. netto nul broeikasgasemissies, en daarna tot negatieve emissies moet komen. Verder verplicht de Europese Klimaatwet het ontwikkelen

van een regelgevingskader voor de certificering van de verwijdering van koolstof op basis van een transparante koolstofboekhouding.

Het 'Fit for 55' wetgevingspakket (Europese Commissie, 2021) is nu van kracht om de tussentijdse doelstelling van 55% broeikasgasreductie in 2030 te waarborgen. Een belangrijk onderdeel van dit pakket gaat over aanscherpingen bij uitstoot van landgebruik, verandering in landgebruik en bosbouw (land use, land use change, and forestry; LULUCF). Het gaat hier dus om passieve koolstofvastlegging in de bodem door grond anders te gebruiken (bossen in plaats van akkers) en niet om actieve koolstofafvang en -opslag vanuit biogene of atmosferische bronnen.

Op 6 februari 2024 heeft de Europese Commissie de industrial carbon management strategy (ICMS) aangenomen (Europese Commissie, 2024). Dit document bevat een samenhangende strategie om koolstofverwijderingsmethoden op te schalen. In totaal zal er volgens de ICMS 250 Mton per jaar aan CO<sub>2</sub>-opvang en -opslag nodig zijn en ongeveer 200 Mton per jaar aan CO<sub>2</sub>-afvang en -gebruik. Ongeveer 40% van deze CO<sub>2</sub> zal uit atmosferische bronnen komen, ongeveer 10% uit fossiele bronnen, 25% uit procesemissies en ongeveer 20% uit biogene emissies. Verder spreekt het ICMS over een mogelijk regelgevingspakket voor CO<sub>2</sub>-transport dat onder andere marktstructuur, grensoverschrijdende integratie, investeringsstimulansen en toegang voor derden zal behandelen.

Om invulling te geven aan de verplichting in de Europese Klimaatwet is op 6 december 2024 de EU Carbon Removals and Carbon Farming Certification (CRCF) wetgeving (Europees Parlement, Europese Raad, 2024) van kracht gegaan. De CRCF wetgeving legt vast aan welke voorwaarden koolstofverwijdering moet voldoen om gecertificeerd te kunnen worden en geeft de rekenregels om deze te kunnen kwantificeren. Verder stelt de CRCF wetgeving normen vast over additionaliteit, aansprakelijkheid, duurzaamheid en eisen voor permanentie. De volgende stap voor de EU is om via gedelegeerde handelingen gedetailleerde certificeringsmethodes vast te stellen voor verschillende koolstofverwijderingsmethoden zoals permanente opslag, koolstoflandbouw en opslag in (duurzame) producten.

In de tweede helft van 2026 zal de Europese Commissie een evaluatie van het Europese Emissiehandelssysteem (EU ETS) delen. In de tweede helft van 2026 tot de eerste helft van 2027 zal de Europese Commissie daarbij discussiëren over de mogelijkheid om permanente koolstofverwijdering op te nemen in het EU ETS. Integratie van koolstofverwijdering in het ETS zou bedrijven die moeite hebben om hun emissies te verminderen in staat stellen koolstofverwijdering als nalevingsinstrument te gebruiken. Echter, integratie gaat gepaard met verschillende uitdagingen en risico's, zoals aanzienlijke uitdagingen bij nauwkeurige meting en verificatie van koolstofverwijdering, het risico dat bedrijven koolstofverwijdering verkiezen boven noodzakelijke emissiereducties, toegenomen prijsvolatiliteit in de koolstofmarkt, zorgen over de permanentie van koolstofverwijderingsmethoden, dubbeltelling en greenwashing-problemen.



# 5 Bevindingen en aanbevelingen

Klimaatneutraliteit in 2050 wordt in twee energiestenari'o's (ADAPT en TRANSFORM) mede bereikt met CO<sub>2</sub>-afvang en -opslag. In deze studie zijn de resultaten van deze scenari'o's nader geanalyseerd wat betreft CO<sub>2</sub>-afvang, -gebruik en -opslag, is de robuustheid van de uitkomsten onderzocht en is de omvang van de CO<sub>2</sub>-opslag en koolstofvastlegging vergeleken met het beschikbare CO<sub>2</sub>-opslagpotentieel. Tenslotte is een overzicht gemaakt van de beleidsontwikkelingen omtrent koolstofverwijdering. In de volgende twee paragrafen wordt een overzicht gegeven van de bevindingen die de analyses hebben opgeleverd en worden enkele aanbevelingen gedaan.

## 5.1 Bevindingen

- **De hoeveelheid biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> die bestemd wordt voor koolstofverwijdering is niet alleen afhankelijk van hoeveel biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> wordt afgevangen. De afgevangen CO<sub>2</sub> kan namelijk ook gebruikt worden voor productie van synthetische brandstoffen en grondstoffen (CCU). De omvang van de koolstofverwijdering (CCS) hangt daardoor ook af van de allocatie van de afgevangen CO<sub>2</sub>.** In dit onderzoek is daarvoor naar twee benaderingen gekeken. In de eerste benadering wordt de omvang van de koolstofverwijdering bepaald door de in de scenari'o's gebruikte processen en hun inputs. In de andere benadering wordt verondersteld dat afgevangen fossiele CO<sub>2</sub> niet gebruikt wordt voor productie van synthetische brandstoffen en chemicaliën. Alle fossiele CO<sub>2</sub> wordt dan opgeslagen en CO<sub>2</sub> uit DAC kan worden gekoppeld aan CCU. Omdat meer biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> nodig is voor productie van synthetische brandstoffen en grondstoffen, is de omvang van de koolstofverwijdering kleiner.
- **Koolstofverwijdering is belangrijk voor het realiseren van klimaatneutraliteit in 2050.** De omvang van de CO<sub>2</sub>-opslag bedraagt in de twee beschouwde scenari'o's in 2050 15 Mton (TRANSFORM) respectievelijk 40 Mton (ADAPT). Dat is het maximum dat voor beide scenari'o's is aangenomen. Een groot deel van de CO<sub>2</sub>-opslag wordt gebruikt voor het realiseren van koolstofverwijdering waarmee resterende BKG-emissies worden gecompenseerd. Dit loopt op van enkele tientallen procenten van de opgeslagen CO<sub>2</sub> in 2030 tot 77-78% in ADAPT en 76-93% in TRANSFORM in 2050, afhankelijk van de toegepaste benadering. Koolstofverwijdering wordt gerealiseerd door afvang en opslag van biogene CO<sub>2</sub> bij processen die biograndstoffen omzetten in brandstoffen en grondstoffen voor chemicaliënproductie (BECCS), en door afvang en opslag van CO<sub>2</sub> uit de lucht (DACCS). Dit laatste gebeurt in de scenari'o's alleen in 2050.
- **Met koolstofverwijdering worden in 2050 restemissies van broeikasgassen volledig gecompenseerd.** In het ADAPT-scenario bestaan de restemissies voor 66% uit CO<sub>2</sub> van fossiele oorsprong. In TRANSFORM is dat 57%. De overige restemissies bestaan uit niet-CO<sub>2</sub> broeikasgassen. In 2050 is de omvang van restemissies in ADAPT 34,9 Mton en in TRANSFORM 14,0 Mton CO<sub>2</sub>-eq.
- **Een deel van de fossiele CO<sub>2</sub>-restemissies is vermijdbaar.** Omdat in de scenari'o's in 2050 alleen gestreefd wordt naar klimaatneutraliteit, is door toepassing van BECCS en DACCS het nog steeds mogelijk om fossiele brandstoffen te gebruiken. Voor sommige toepassingen is gebruik van fossiele brandstoffen niet per se nodig omdat daarvoor

duurzame alternatieven bestaan. In ADAPT gaat het om gebruik van fossiele brandstoffen bij staalproductie (kolen), verwarmen van woningen (aardgas) en auto's (olie). In TRANSFORM is het gebruik van benzine in auto's vermijdbaar. Moeilijk te reduceren BKG-emissies zijn emissies uit de landbouw, bij landgebruik, indirecte emissies in de industrie en restemissies met (fossiele) CO<sub>2</sub>-afvang die niet 100% effectief is.

- **Als in een kosten-geoptimaliseerd energiesysteem de kosten voor biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>-afvang worden verhoogd, heeft dit geen effect op de totale hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> (de maximum opslagcapaciteit wordt al benut) en verandert de omvang van de koolstofverwijdering in de twee scenario's beperkt (5-8%).** Dit kan als volgt worden samengevat (zie voor cijfers Tabel 5.1):
  - Het verdubbelen van kosten van biogene CO<sub>2</sub>-afvang leidt in 2050 bij beide scenario's tot een daling van de koolstofverwijdering en ook een beperkte daling van afgevangen hoeveelheid CO<sub>2</sub>.
  - Het verhogen van het energiegebruik en de kosten van DAC met 50% leidt tot verlaging van atmosferische CO<sub>2</sub>-afvang en in TRANSFORM in 2050 ook tot een lichte daling in de koolstofverwijdering. In ADAPT neemt de koolstofverwijdering zelfs iets toe. Dit komt door een verschuiving tussen processen met biogene CO<sub>2</sub>-afvang richting CO<sub>2</sub>-opslag. Dit volume is groter dan de daling bij DAC.
  - Als zowel de kosten van biogene als atmosferische CO<sub>2</sub>-afvang substantieel toenemen daalt bij ADAPT de koolstofverwijdering in 2050, iets meer dan wanneer alleen de kosten voor biogene CO<sub>2</sub>-afvang worden verhoogd. Bij TRANSFORM is eveneens sprake van een daling van de koolstofverwijdering, maar het effect is hetzelfde als wanneer alleen de kosten voor biogene CO<sub>2</sub>-afvang worden verhoogd.

Over het algemeen kan geconcludeerd worden dat de omvang van de koolstofverwijdering daalt bij verhoging van technologiekosten, maar als de kosten van biogene en atmosferische CO<sub>2</sub>-afvang afzonderlijk worden verhoogd, dan vindt er ook onderlinge compensatie plaats. Het netto-effect is dan afhankelijk van de mate waarin de kosten voor de verschillende technieken hoger kunnen uitvallen.

- Ook aanpassing van enkele randvoorwaarden leidt tot een beperkte verandering in de omvang van de koolstofverwijdering (zie voor cijfers Tabel 5.1):
  - **Wanneer de beschikbaarheid van geïmporteerde biograndstoffen wordt beperkt, wordt in 2050 minder biogene CO<sub>2</sub> afgevangen.** Maar dit wordt gecompenseerd door toename van DAC, waardoor de koolstofverwijdering zelfs iets toeneemt. De totale hoeveelheid opgeslagen CO<sub>2</sub> blijft in beide scenario's gelijk.
  - **Als beleid wordt gevoerd om het (resterende) gebruik van fossiele brandstoffen te verminderen is de behoefte aan compensatie van restemissies kleiner.** Dit leidt in 2050 bij TRANSFORM tot een lichte daling van de koolstofverwijdering. Maar ook de totale hoeveelheid CO<sub>2</sub>-opslag neemt in dit scenario af. Dit effect is niet onderzocht voor ADAPT omdat dat scenario uitgaat van gebruik van fossiele brandstoffen in 2050.
- Uit vergelijking van de cumulatieve hoeveelheden CO<sub>2</sub> in de scenario's met het geschatte opslagpotentieel in lege gasvelden onder het Nederlandse deel van de Noordzee (ongeveer 1700 Mton) kan worden opgemaakt dat:
  - **In 2050 17% (TRANSFORM) tot 39% (ADAPT) van het beschikbare opslagpotentieel zal zijn benut indien al die CO<sub>2</sub> in Nederland wordt opgeslagen.** De cumulatieve CO<sub>2</sub>-opslag is in 2050 281 Mton voor TRANSFORM en 662 Mton voor ADAPT. Het aandeel koolstofverwijdering in 2050 is 75% respectievelijk 67%. Afhankelijk van de onzekerheden in de aannames en randvoorwaarden kunnen deze laatste cijfers iets hoger of lager zijn.
  - **De beschikbare opslagcapaciteit zal rond 2076 volledig benut zijn als de jaarlijkse opgeslagen hoeveelheid CO<sub>2</sub> voor ADAPT (40 Mton/jaar) na 2050 wordt voortgezet.** Wordt de jaarlijks hoeveelheid CO<sub>2</sub>-opslag van TRANSFORM (15 Mton/jaar) na 2050 gecontinueerd, dan zal de beschikbare opslagcapaciteit in 2100 voor 61% gevuld zijn

met CO<sub>2</sub>. Verwacht wordt dat er een Europese opslagmarkt tot ontwikkeling komt. De daadwerkelijke benutting van de Nederlandse opslagcapaciteit zal dan mede afhankelijk zijn van zowel de import van buitenlandse CO<sub>2</sub> als export van Nederlandse CO<sub>2</sub>.

- **Het Europese- en Nederlandse beleid op het gebied van koolstofverwijdering is nog in ontwikkeling.** Het Nederlandse beleid zal moeten aansluiten op Europese beleid en regelgeving. Relevant daarbij zijn de Industrial Carbon Management Strategy, de Carbon Removals and Carbon Farming Certification (CRCF) regulering en de discussies over het opnemen van permanente koolstofverwijdering in het Europese emissiehandelssysteem. Het Nederlandse beleid zal nader vorm krijgen in het Klimaatplan 2025-2035 en de Routekaart Koolstofverwijdering.

**Tabel 5.1:** Omvang van de koolstofverwijdering in 2050 voor ADAPT en TRANSFORM en veranderingen daarin bij verhoging kostenparameters en aanpassing randvoorwaarden.

	Base case	BECCS	DAC	BECCS+DAC	Bio	Fossiel
ADAPT	34,9	32,0	36,0	32,0	37,0	<sup>a</sup>
TRANSFORM	14,0	13,5	13,3	13,5	14,6	13,0

<sup>a</sup> Niet onderzocht omdat dit niet past bij het scenario

## 5.2 Aanbevelingen

In de voorgaande hoofdstukken zijn scenario's gepresenteerd die leiden tot een klimaatneutraal energie- en klimaatstelsel voor Nederland. De koolstofverwijdering die voor deze scenario's wordt geschetst zal niet vanzelf tot stand komen. Hiervoor is nog technologieontwikkeling nodig, zullen keuzes moeten worden gemaakt en zal beleid moeten worden geïmplementeerd. Over deze onderwerpen kunnen de volgende aanbevelingen worden geformuleerd:

- Er is nog technologieontwikkeling nodig voor CO<sub>2</sub>-afvangtechnologie, met name bij productie van biobrandstoffen en biograndstoffen, en uit de lucht (DAC).
- Voor investeerders in deze technologie moet er een voldoende aantrekkelijke business-case zijn. Bij fossiele CCS kan de business-case worden gebaseerd op vermeden CO<sub>2</sub>-kosten. Bij afvang, opslag en gebruik van biogene en atmosferische CO<sub>2</sub> is geen sprake van deze vermeden kosten. De opbrengsten moeten komen van een of andere vorm van economische waardering van de afgevangen CO<sub>2</sub> voor opslag (koolstofverwijdering) of gebruik in duurzame brandstoffen en chemicaliën.
- Aanvankelijk zal CO<sub>2</sub>-afvangtechnologie nog relatief hoge kosten hebben en energetisch minder efficiënt zijn. Stimulering van verdere technologieverbetering is wenselijk. Dit kan via de economische waardering van de afgevangen CO<sub>2</sub> of een andere economische prikkel (bijv. investeringssubsidie).
- Om in 2050 klimaatneutraliteit te realiseren is koolstofverwijdering nodig door opslag van biogene en/of atmosferische CO<sub>2</sub>. Daarbij zal een beleidsafweging moeten worden gemaakt tussen de hoeveelheid fossiele brandstoffen die nog in het energiesysteem wordt toegelaten, de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die per jaar moet worden opgeslagen en het aandeel koolstofverwijdering daarin.
- Indien gebruik van fossiele CO<sub>2</sub> voor productie van synthetische brandstoffen en chemicaliën ongewenst wordt gevonden, vereist dit een duidelijke beleidskeuze en instrumentatie van dat beleid (bijvoorbeeld d.m.v. boekhouding en certificaten).
- De hoeveelheid CO<sub>2</sub>-afvang en koolstofverwijdering die mogelijk is, hangt samen met ontwikkeling van het Nederlandse energiesysteem, zoals de omvang van bepaalde sectoren, beschikbaarheid van biograndstoffen en technologieontwikkeling. Deze ontwikkeling kan anders verlopen dan geschetst in de twee scenario's die in deze studie

zijn gebruikt. Aanbevolen wordt scenario's regelmatig te updaten op basis van nieuwe ontwikkelingen en inzichten (zoals beschikbaarheid van afvangtechnieken en mogelijke andere vormen van koolstofverwijdering) en de rol van CO<sub>2</sub>-afvang en koolstofverwijdering hierin te onderzoeken. Hierbij zou ook gekeken moeten worden naar de effecten op de systeemkosten.

- Verder is vervolgonderzoek wenselijk naar de Europese markt voor CO<sub>2</sub>-opslag waarbij zowel in Nederland afgevangen CO<sub>2</sub> die wordt opgeslagen in het buitenland als in het buitenland afgevangen CO<sub>2</sub> die wordt opgeslagen in Nederland wordt betrokken. Ook is vervolgonderzoek wenselijk naar de bijdrage van koolstofverwijdering in Nederland aan de mondiale behoefte aan koolstofverwijdering.

# Referenties

- Aramis. (2024). Brochure: A Transport Infrastructure for Large-scale CO<sub>2</sub> Reduction.
- Climate Copernicus Institute. (2025). Global Climate Highlights 2024 - The 2024 annual climate summary. Opgehaald van <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2024>
- Element Energy / Clean Air Task Force. (2023). *Unlocking Europe's CO<sub>2</sub> Storage Potential*.
- Europees Parlement, Europese Raad. (2024). *Carbon Removals and Carbon Framing Certification Regulations*.
- Europese Commissie. (2021). *'Fit for 55': delivering the Eu's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*.
- Europese Commissie. (2024). Towards an ambitious Industrial Carbon Management for the EU. EC COM (2024) 62 final.
- Europese Unie. (2021). Europese Klimaatwet.
- Gessel, S., Breunese, J., Juez Larré, J., Huijses, T., & Remmelts. (2018). *Ondergrondse Opslag in Nederland - Technische Verkenning*. TNO 2018 R11372.
- Kampman, B., Kruit, K., Toorn, E. v., Vries, M. d., Grinsven, A. v., Voulis, N., . . . Neele, F. (2023). Koolstofverwijdering voor klimaatbeleid - Analyse van behoefte, aanbod en beleid voor negatieve emissies in Nederland. CE-Delft nr. 23.220460.095.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2022). *Kamerbrief over contouren Nationaal Plan Energiesysteem*.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). *Kamerbrief over beleidsagenda Klimaatneutraal Nederland*.
- Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. (2023). *Nationaal Plan Energiesysteem*.
- Ministerie van EZK. (26 april 2023). *Brief aan Tweede Kamer - Voorjaarsbesluitvorming Klimaat*.
- Ministerie van Klimaat en Groene Groei. (2024). Ontwerp-Klimaatplan 2025-2035 - Op weg naar een klimaatneutraal Nederland.
- Porthos. (2022). Standard CO<sub>2</sub> Transport and Storage Conditions in respect of the Porthos System.
- PVV, VVD, NSC & BBB. (2024). *Hoop, lef en trots - Hoofdlijnenakkoord 2024-2028*.
- Rijksoverheid. (2019). Klimaatwet.
- Rijksoverheid. (2024). *Regeerprogramma kabinet-Schoof*.
- Scheepers, M., Stralen, J. v., Giraldo Chavarriaga, J., Eberry, A., Uslu, A., & Oliveira, C. (2024). *Towards a sustainable energy system for the Netherlands in 2025 - Scenario update and scenario variants for industry*. TNO P10607.
- United Nations. (2015). Paris Agreement.
- Wetenschappelijke Klimaatraad (WKR). (2024). De lucht klaren? Advies over uitgangspunten en beleid voor sturing op CO<sub>2</sub>-verwijdering uit de atmosfeer.

## Bijlage A

# Data BECCS- en DAC-technologie

**Tabel A.1:** Techno-economische data BECCS-technologie voor ADAPT -en TRANSFORM-scenario's

Nr.	Technologie	Sector	Eenheid	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	Levensduur [yr]
				Investeringskosten [Mln €(2015)/UoC]			Vaste O&M-kosten [Mln euro(2015)/UoC/yr]			Variable kosten [Mln euro(2015)/UoA]			Energie input [PJ] per UoA			
1798	AVI met CCS	Afval	GW	5176	5176	5176	65,7	65,7	65,7				62,6	62,6	62,6	15
1859	SNG op basis van lignocellulose met CC	Gasvoorziening	PJ/j	90	81	72	5	4,5	4	4	3,5	3	1,6	1,6	1,6	35
2388	Methanol op basis van lignocellulose met CC	Chemische industrie	PJ/j	71	64	57	4	3,5	3	3	2,5	2	1,8	1,8	1,8	30
2392	Lignocellulose ethanol productie met CC	Raffinaderij	PJ/j	87	78,5	70	5	4,5	4	3	3	3	2,5	2,5	2,5	20
2393	Bio-DME productie met CC	Raffinaderij	PJ/j	73	65,5	58	4	3,5	3	3	2,5	2	1,6	1,6	1,6	20
2408	Biomassavergassing + FT naar diesel met CC	Raffinaderij	PJ/j	86	77	68	5	4,5	4	3	3	3	1,6	1,6	1,6	25

CC: carbon capture; CCS: carbon capture & storage; FT: Fischer-Tropsch

UoA: unit of activity; UoC: unit of capacity

**Tabel A.2:** Techno-economische data DAC-technologie voor ADAPT -en TRANSFORM-scenario's

Nr.	Technologie	Sector	Eenheid	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	Levensduur [yr]
				Investeringskosten [Mln €(2015)/UoC]			Vaste O&M-kosten [Mln euro (2015)/UoC/yr]			Variabele kosten [Mln euro (2015)/UoA]			Energie input [PJ] per UoA			
1511	CO <sub>2</sub> Directe DAC	Gasvoorziening	Mton/j	600	450	300	34	28	22	0	0	0	5,9	4,9	3,8	15
1939	P2L FT route, externe H <sub>2</sub> , incl. DAC	Raffinaderij	PJ/j	65	51	37	3	2	1	0	0	0	2,1	2,1	1,9	20
1956	P2L FT route, lage temp. elektrolyse, DAC	Raffinaderij	PJ/j	115	84,5	54	5	3,5	2	0	0	0	2,7	2,6	2,5	20
1960	P2L FT route, hoge temp. elektrolyse, DAC	Raffinaderij	PJ/j	97,2	91,1	64,6	4,9	4,6	3,23	0	0	0	2,4	2,3	2,2	20
2361	Methanol uit externe H <sub>2</sub> en DAC	Chemische industrie	PJ/j	44	33	22	2	1,5	1	0	0	0	1,75	1,75	1,75	20

DAC: direct air capture; P2L: power-to-liquids; FT: Fischer-Tropsch

UoC: unit of capacity

UoA: unit of activit

Energy & Materials Transition

Radarweg 60  
1043 NT Amsterdam  
[www.tno.nl](http://www.tno.nl)