



# NEGATIEVE EMISSIES

Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland

## **Achtergrondstudie**

**Bart Strengers, Hans Eerens, Winand Smeets, Gert Jan van den Born en Jan Ros**

**7 februari 2018**

PBL

## **Colofon**

### **NEGATIEVE EMISSIES. Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland.**

© PBL Planbureau voor de Leefomgeving

Den Haag, 2018

PBL-publicatienummer: 2606

## **Contact**

bart.strengers@pbl.nl

## **Auteurs**

Bart Strengers, Hans Eerens, Winand Smeets, Gert Jan van den Born en Jan Ros

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Strengers B., H. Eerens, W. Smeets, G.J. van den Born en J. Ros (2018), NEGATIEVE EMISSIES. Technisch potentieel, realistisch potentieel en kosten voor Nederland, Den Haag: PBL.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is voor alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en wetenschappelijk gefundeerd.

# Inhoud

BEVINDINGEN	5
VERDIEPING	20
<b>1 Negatieve emissies</b>	<b>20</b>
<b>2 CO<sub>2</sub>-afvang</b>	<b>24</b>
2.1 Biomassacentrales	24
2.2 Biogascentrales	26
2.3 Staalindustrie	27
2.4 Hoge temperatuur warmte in de industrie	29
2.5 Afvalverbrandingsinstallaties (AVI's)	29
<b>3 Vergassing</b>	<b>31</b>
<b>4 Chemie</b>	<b>36</b>
4.1 Etheen	40
4.2 Styreen	40
4.3 Methanol	42
4.4 CO <sub>2</sub> als grondstof	42
4.5 Koolstof als grondstof	43
<b>5 Beton</b>	<b>45</b>
<b>6 De bouw</b>	<b>48</b>
<b>7 Landbouw</b>	<b>50</b>
<b>8 Bossen</b>	<b>52</b>
<b>9 Biochar</b>	<b>54</b>
<b>10 Silicaten</b>	<b>57</b>
<b>11 Direct Air Capture</b>	<b>61</b>
<b>12 Transport en opslag</b>	<b>64</b>
<b>13 Biomassapotentieel</b>	<b>67</b>
13.1 Binnenlands gebruik en ongebruikt potentieel	67
13.2 Import van biomassa	70
13.3 Zeewier	73
<b>Referenties</b>	<b>76</b>



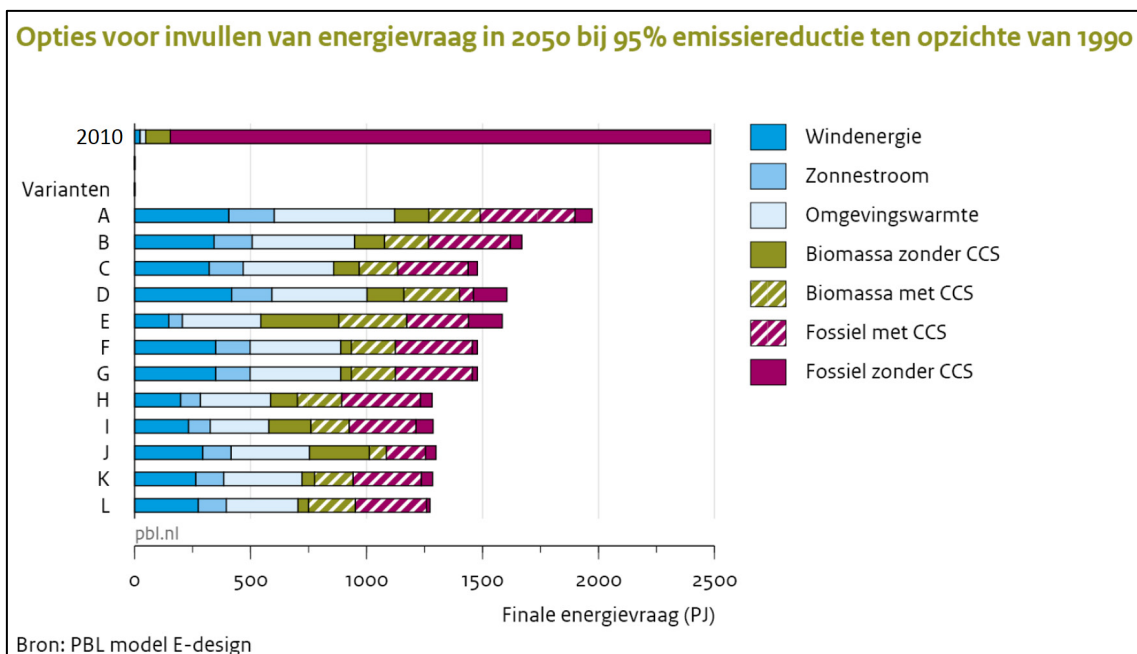
# BEVINDINGEN

- Om aan het Parijsakkoord te voldoen zijn op nationale, Europese en mondiale schaal omvangrijke hoeveelheden negatieve emissies vrijwel onvermijdelijk, dat wil zeggen maatregelen waarmee CO<sub>2</sub> aan de atmosfeer wordt onttrokken.
- De combinatie van bio-energie met afvang en opslag van CO<sub>2</sub> (BECCS) en het afvangen van CO<sub>2</sub> in het productieproces van biobrandstoffen hebben met afstand het grootste potentieel voor negatieve emissies in Nederland. Het toekomstige aanbod van duurzaam geproduceerde biomassa is daarvoor bepalend (zie hieronder).
- Indien biomassa wordt verbrand in een centrale, een ketel of bij de productie van staal, dan kan 90 tot 100% van de koolstof in de biomassa worden omgezet in negatieve emissies (99 tot 110 kton CO<sub>2</sub> per PJ biomassa). Indien gebruikt voor de productie van biobrandstoffen, dan is dat maximaal de helft. Toch past het gebruik voor biobrandstoffen goed in een transitiepad richting 2050 voor toepassingen zonder CO<sub>2</sub>-vrij alternatief.
- Naast BECCS en biobrandstoffenproductie, zijn er ook andere negatieve emissieketens die vaak minder aandacht krijgen in de literatuur. De voor Nederland relevante opties zijn de rol van landgebruik, groene grondstoffen in de chemie, duurzaam bouwen, groen beton, olivijn, en Direct Air Capture (DAC).
- Een eerste orde schatting van het *technisch* potentieel voor negatieve emissies in Nederland komt uit op rond de 150 Mton CO<sub>2</sub> per jaar (zie tabel B.2). Technisch potentieel is hierbij gedefinieerd als de som van het maximaal haalbare voor de verschillende opties op basis van de huidige of toekomstige emissies of productieniveaus en zonder rekening te houden met onderlinge afhankelijkheid tussen de opties en grenzen aan de beschikbaarheid van duurzame biomassa.
- Het *realistisch* potentieel komt veel lager uit. Voor 2030 moet 13 Mton mogelijk worden geacht en voor 2050 34 Mton (zie tabel B.2). Realistisch potentieel is hierbij gedefinieerd als dat deel van het technisch potentieel dat redelijkerwijs gerealiseerd zou kunnen worden op basis van bestaand beleid, de huidige stand van de techniek en grenzen aan het tempo waarin de betreffende opties gerealiseerd kunnen worden.
- De beschikbaarheid van duurzame biomassa uit Nederland is maximaal 230 PJ en dus lijkt (grootschalige) import noodzakelijk. Voor het genoemde realistische potentieel in 2030 is de benodigde hoeveelheid biomassa minimaal 170 PJ en in 2050 minimaal 410 PJ (zie tabel B.2). Het is vrijwel zeker dat de benodigde hoeveelheid biomassa die volgt uit het technisch potentieel (minimaal 2250 PJ) niet haalbaar zal zijn.
- Bovenstaande potentiëlen en de beschikbaarheid van biomassa zijn *indicatief* op basis van literatuur, enkele experts en eigen eerste inschattingen, maar zijn uiteindelijk sterk afhankelijk van de inrichting van (het pad naar) het energiesysteem in 2050 en de technologische ontwikkelingen in belangrijke productieprocessen. Nader integraal onderzoek (bijvoorbeeld op basis van scenario-analyses) is nodig om het potentieel van negatieve emissies aan de praktijk van de energietransitie te verbinden.
- De neveneffecten op andere beleidsterreinen dan klimaat worden soms benoemd maar zijn verder grotendeels buiten beschouwing gelaten.
- De additionele kosten voor negatieve emissies lopen sterk uiteen van alleen kosten voor transport en opslag (~€10 per ton) voor die processen waarin een (vrijwel) zuivere CO<sub>2</sub>-stroom vrijkomt, tot honderden euro's per ton voor andere opties zoals biochar, bosaanplant of DAC.

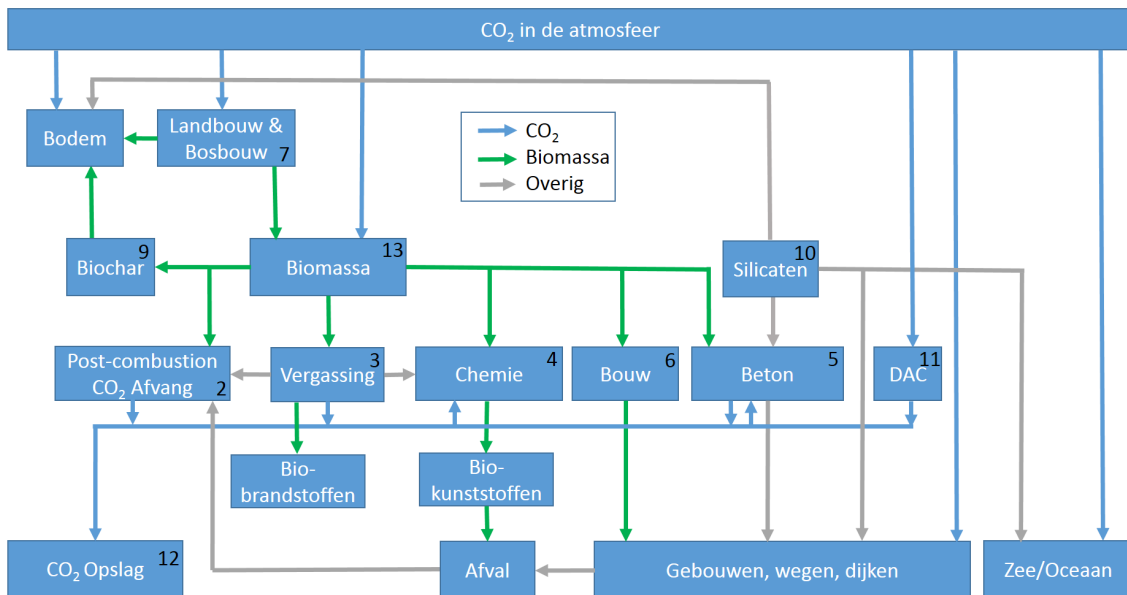
In december 2015 hebben bijna alle landen ter wereld overeenstemming bereikt over het Parijsakkoord dat als doel heeft de mondiale opwarming te beperken tot 2°C en, indien mogelijk, tot 1.5°C. De meest gehanteerde - en tevens meest ruime - interpretatie van het akkoord is dat met een tweederde kans (66%) de mondiale opwarming tot maximaal twee graden ten opzichte van begin vorige eeuw beperkt moet blijven in het jaar 2100. Op basis van een groot aantal modelberekeningen volgt hieruit dat de totale hoeveelheid CO<sub>2</sub> (en andere broeikasgasen) die nog uitgestoten mag worden door de mensheid, het zogenaamde 'Carbon Budget', ligt tussen 600 en 1200 miljard ton (Gton), ofwel 17 tot 33 keer de huidige jaarlijkse mondiale CO<sub>2</sub> emissies. Dit vereist dat in de tweede helft van deze eeuw de antropogene broeikasgasemissies (in CO<sub>2</sub>-equivalenten) in evenwicht zijn met de opname daarvan. Omdat er altijd bronnen van broeikasgasen zullen blijven, met name in de landbouw, leidt dit vrijwel onvermijdelijk tot de noodzaak van 'negatieve emissies' op grote schaal; het actief verwijderen en vastleggen van CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer.

Als we aannemen dat iedere wereldburger recht heeft op de uitstoot van een gelijke hoeveelheid CO<sub>2</sub>-emissies, dan leidt een mondiaal 2°C-doel voor Nederland tot een reductie in 2050 met 85 tot 95%. Een 1,5°C-doel impliceert een reductie van meer dan 100%. Een reductie van 80% zou mogelijk kunnen zijn zonder negatieve emissies in Nederland, maar zoals Figuur B.1 laat zien is een reductie van 95% (of meer) vrijwel ondenkbaar zonder negatieve emissies, zeker als we de kosten niet buitenproportioneel willen laten oplopen.

Bio-energie in combinatie met het afvangen en opslaan van CO<sub>2</sub> (BECCS) is de meest toegepaste negatieve emissieketen in vrijwel alle mondiale, regionale en nationale emissiescenario's. Echter, twintig jaar onderzoek en pilotprojecten hebben nog niet geleid tot grootschalige toepassing van CCS al dan niet in combinatie met biomassa. Sterker nog, de ontwikkeling stagneert: op dit moment zijn er mondiaal slechts 21 CCS-installaties die per jaar 37 Mton CO<sub>2</sub> kunnen vastleggen (GCCSI 2017). Het is daarom essentieel en urgent dat er op zowel mondiale, Europese als nationale schaal een discussie wordt gevoerd over de noodzaak en omvang van negatieve emissies en hoe die te bereiken (EASAC 2018; van Vuuren *et al.* 2017).



**Figuur B.1** Een gewenste broeikasgasemissiereductie in Nederland van 95% in 2050 leidt in alle hier getoonde modelberekeningen tot negatieve emissies, in dit geval de combinatie van biomassa met CCS (BECCS). Alleen scenario J heeft een relatief klein aandeel van negatieve emissies. Bron: (Ros en Schure 2016).



**Figuur B.2** Negatieve emissieketens. De nummers verwijzen naar het verdiepingshoofdstuk waarin het betreffende onderdeel wordt uitgewerkt. DAC=Direct Air Capture.

Cruciaal in de discussie ten aanzien van BECCS is dat grootschalige toepassing grote hoeveelheden biomassa nodig heeft, wat vragen oproept rond landbeschikbaarheid, de concurrentie met voedselproductie, biodiversiteit en de mate waarin die biomassa koolstofneutraal kan worden geproduceerd (Heck *et al.* 2018). Maar naast BECCS zijn er ook andere negatieve emissie technologieën waarin biomassa hoogwaardiger wordt ingezet zoals de productie van biobrandstoffen op basis van vergassing, toepassingen in de chemie, het toevoegen van biomassa aan beton of het toepassen van meer hout in de bouw (houtskeletbouw) of het verspreiden van biochar over (landbouw)grond (zie figuur B.2). Deze toepassingen zijn nog steeds gebaseerd op biomassa en daarom wordt in dit rapport ook gekeken naar land-gerelateerde technieken of methodes die geen biomassa nodig hebben zoals aanpassingen in de landbouwpraktijk ter verhoging van de koolstofinhoud van de bodem en het aanplanten van bos. Daarnaast zijn er technieken die niet zijn gekoppeld aan fotosynthese zoals het vastleggen van CO<sub>2</sub> door verschillende toepassingen van olivijn of andere silicaten en 'direct air capture', ofwel het direct uit de lucht halen van CO<sub>2</sub> door grote installaties.

In dit rapport wordt voor het eerst op een rij gezet wat de bijdrage van Nederland zou kunnen zijn aan het bewerkstelligen van negatieve emissies. Alle voor Nederland relevante opties (inclusief BECCS) zoals hierboven benoemd, worden behandeld gebruikmakend van recente literatuur, eigen eerste inschattingen en input van enkele experts<sup>1</sup>. Dit rapport is een eerste verkenning zonder enige beleidsaanbevelingen en moet worden beschouwd als een eerste bouwsteen om uiteindelijk beleidsopties te kunnen formuleren. De neveneffecten op andere beleidsterreinen dan klimaat worden benoemd maar zijn verder buiten beschouwing gelaten. Nader integraal onderzoek (bijvoorbeeld op basis van scenario-analyses) is nodig om het potentieel van negatieve emissies aan de praktijk van de energietransitie te verbinden.

Tabel B.2 geeft een overzicht van de potentiëlen van de verschillende opties. Het geschatte totale technische potentieel komt voorsnog uit op 139 tot 158 Mton CO<sub>2</sub> per jaar, waarvan op basis van een eerste inschatting minimaal 13 Mton in 2030 en minimaal 34 Mton in 2050 gerealiseerd zou kunnen worden. Hierbij moet het technisch worden geïnterpreteerd als de som van het maximaal haalbare voor de verschillende opties op basis van de huidige of toe-

<sup>1</sup> CO<sub>2</sub>-afvang bij vergistingsinstallaties is voorsnog niet meegenomen omdat dit een uitgebreid CO<sub>2</sub>-net zou vergen of transport van vloeibare CO<sub>2</sub> over de weg. Indien in de toekomst gekozen zou worden voor grote centrale (mest)vergisters (>1000 m<sup>3</sup>/uur), dan zou deze optie interessant kunnen worden. In dat geval zouden de kosten in de orde van €70 tot €80 per ton CO<sub>2</sub> liggen, inclusief transport.

komstige emissies en zonder rekening te houden met eventuele groei of krimp van de verschillende sectoren. Ook wordt geen rekening gehouden met grenzen aan de beschikbaarheid van duurzame biomassa en onderlinge afhankelijkheid tussen opties, zoals de mogelijkheid dat staal in sommige toepassingen vervangen kan worden door kunststoffen. Het realistisch potentieel moet worden beschouwd als dat deel van het technisch potentieel dat redelijkerwijs gerealiseerd zou kunnen worden op basis van bestaand beleid, de huidige stand van de techniek en grenzen aan het tempo waarin de betreffende optie gerealiseerd kan worden.

Per optie worden de geschatte jaarlijks kosten per ton vastgelegde CO<sub>2</sub> en de stand van de betreffende techniek gerapporteerd in termen van Technology Readiness Level (TRL). Dit is een veel gebruikte begrip om het ontwikkelstadium van een technologie te benoemen. Een 'level' tussen 1 en 9 geeft aan in hoeverre een technologie commercieel beschikbaar is, waarbij level 1 betekent dat er een eerste idee staat beschreven voor een bepaalde technologie en level 9 dat de technologie bewezen succesvol is en beschikbaar op de markt.

In het navolgende deel van de bevindingen wordt voor iedere optie uit tabel B.2 kort toegelicht waarop de getoonde cijfers zijn gebaseerd. Een meer uitgebreide toelichting, inclusief alle referenties is te vinden in het verdiepingsdeel van dit rapport. Daarin wordt ook, voor zover relevant de energiebehoefte van de verschillende opties behandeld.

**Tabel B.1** Technology Readiness Level (TRL) op basis van (EC 2014).

TRL	Omschrijving
1	Basisprincipes geobserveerd en gerapporteerd
2	Technologisch concept of toepassing geformuleerd
3	Experimenteel bewijs van het concept
4	Technologie gevalideerd in een laboratorium
5	Technologie gevalideerd in een relevante (industriële) omgeving
6	Technologie gedemonstreerd in een relevante (industriële) omgeving
7	Prototype gedemonstreerd in een operationele omgeving
8	Product klaar voor toepassing en goedgekeurd
9	Product wordt commercieel toegepast in een operationele omgeving

**Post-combustion CO<sub>2</sub> opvang.** De eerstgenoemde categorie in tabel B.2 is het afvangen (en opslaan, daarover later meer) van CO<sub>2</sub> uit verbrandingsgassen (post-combustion). Dit is een ver ontwikkelde techniek die vooral toepasbaar is bij grote vaste puntbronnen: elektriciteitscentrales, staalproductie en grote ketels voor hoge temperatuur warmte.

Indien de drie nieuwste *kolen centrales* (uit 2015 en 2016), de Amercentrale en de bestaande operationele *gas centrales* worden omgebouwd tot biomassa- of biogas centrales dan leidt dit tot een zeer groot technisch potentieel voor negatieve emissies van rond de 30 Mton CO<sub>2</sub> per jaar. Binnen de huidige regeringsplannen en ook op basis van recente PBL-studies lijkt het open houden van de centrales die nu op kolen stoken echter *geen* logische keuze, maar bezien vanuit het perspectief van de genoemde (mondiale) noodzaak van negatieve emissies zouden ze mogelijk toch een rol kunnen spelen de overgangsfase van de energietransitie in Nederland. Dat geldt wellicht nog sterker voor biogas centrales omdat die een rol kunnen spelen in het zeker stellen van de elektriciteitsproductie als zon en wind het laten afweten (intermittency). Bij de *staalindustrie* zou CO<sub>2</sub> afgevangen kunnen worden bij het bestaande hoogovenproces, maar vooralsnog zet men in op vervanging door het veel schonere en energie-efficiëntere HIsarna-proces waarbij vrijwel zuivere CO<sub>2</sub> vrijkomt door verbranding van koolstof met zuivere zuurstof. Eind oktober 2017 is in IJmuiden een eerste duurproef gestart met een HIsarna-installatie en men verwacht in 2022 te beginnen met het bouwen van een demo-plant. Indien de huidige productie wordt vervangen door HIsarna dan ontstaat een negatief emissiepotentieel van 4,8 Mton. Op basis van de huidige plannen is het realistisch te verwachten dat zo'n 15% van de staalproductie in 2030 door HIsarna zal zijn vervangen in combinatie met CCS en biomassa als grondstof. Aangezien vrijwel zuivere CO<sub>2</sub> vrijkomt zijn de extra kosten en energieverbruik van het afvangen van CO<sub>2</sub> in het HIsarna-proces laag. Opgemerkt dient te worden dat als het productieproces wordt geëlektrificeerd, het negatieve potentieel verdwijnt. Het is niet de verwachting dat dit al in 2050 op grote schaal het geval zal zijn.



**Tabel B.2** Het technisch en realistisch potentieel (toelichting zie tekst) voor negatieve emissies in Nederland in 2030 en 2050, inclusief kosten, benodigde hoeveelheid biomassa (in PJ per vermeden ton CO<sub>2</sub> en cumulatief) en technologische status uitgedrukt als 'Technology Readiness Level' (zie tabel B.1 en tekst voor uitleg). De kosten van CO<sub>2</sub>-transport en opslag zoals vermeld in de laatste 2 regels van de tabel, moeten worden opgeteld bij die opties waar een (vrijwel) pure CO<sub>2</sub>-stroom vrijkomt, aangegeven met een \*.

Optie/Sector	Technisch pot.	Realistisch pot.		Add. Kosten <sup>a</sup>	Bio-massa	TRL
		2030	2050			
			Mton CO <sub>2</sub> per jaar		€/ton	PJ/Mt
<b>Post-combustion CO<sub>2</sub> afvang*</b>	<b>46-55</b>	<b>4,6</b>	<b>17</b>			
Kolencentrales naar biomassa met CCS	23	0 <sup>b</sup>	0 <sup>b</sup>	40-60	10	8
Biogascentrales	6-8	nihil	>0	50-100	33	8
Staalindustrie Hlsarna proces	4,8	0,7	4,8	0	9	6-8
Hoge temperatuur warmte	7-14	2,5	7,4	60-110	10	8
Biogeen deel AVI's	4,9	1,4	4,9	60-80	-	7-8
<b>Vergassing*</b>	<b>&gt;45-55<sup>c</sup></b>	<b>&gt;2,3<sup>d</sup></b>	<b>&gt;&gt;2,3<sup>d</sup></b>	<b>0</b>	<b>~20</b>	<b>5-7</b>
Productie Fisher Tropsch-biobrandstof	45-55	2,3 <sup>d</sup>	>>2,3 <sup>d</sup>	0	18-22	5-6
<b>Chemie</b>	<b>16<sup>e</sup></b>	<b>2,7<sup>e</sup></b>	<b>7,5<sup>e,f</sup></b>	<b>60-80</b>	<b>~31</b>	
Melkzuur vervangt styreen	0,15	0,07	0,15			8-9
Styreen uit biomassa	1	nihil	0,3			4-5
Etheen uit biomassa	4,2	0,6	1,5			8-9
Methanol uit biomassa	0,2	0,05	0,1			8-9
Biogeen CO <sub>2</sub> als grondstof	>0,8	0,2	0,8			8-9
Biogeen C als grondstof	2,2	0,6	2,2			7-9
<b>Beton</b>	<b>10,6-11</b>	<b>1,7-2,1</b>	<b>2,6-3</b>	<b>&lt;0-70</b>		
Vastlegging tijdens gebruiksfase	0,6-1	0,6-1	0,6-1	0		-
Groen beton (Olivijn, olifantsgras, etc.)	10	1,1	2,0	<0-70	9	6-7
<b>Bouw</b>	<b>&gt;0,6</b>	<b>0,3</b>	<b>0,6</b>	<b>?</b>	<b>9</b>	<b>8-9</b>
<b>Landbouw, maatregelenmix</b>	<b>2,3</b>	<b>0,6</b>	<b>1</b>	<b>0-50</b>		<b>9</b>
<b>Bosaanplant</b>	<b>3</b>	<b>0,5-1</b>	<b>1,2</b>			<b>9</b>
In bestaande natuurterreinen	0,8		0,3	50		9
Op voormalige landbouwgrond	2,2	0,5-1	0,9	>200		9
<b>Biochar</b>	<b>6</b>	<b>nihil</b>	<b>0-1</b>	<b>100-500</b>	<b>18</b>	<b>3-6</b>
<b>Silicaten, ophoogzand door olivijn</b>	<b>9</b>	<b>0,2</b>	<b>1,4</b>	<b>70</b>		<b>5-6</b>
<b>Direct Air Capture (DAC)*</b>	<b>n.v.t.</b>	<b>nihil</b>	<b>nihil</b>	<b>250-850</b>		<b>4-8</b>
<b>Totaal neg. emissies in Mton CO<sub>2</sub></b>	<b>139-158</b>	<b>&gt;13</b>	<b>&gt;34</b>			
<b>Totaal benodigde biomassa in PJ</b>	<b>&gt;2250</b>	<b>&gt;170</b>	<b>&gt;415</b>			
CO <sub>2</sub> -transport per 250 km bij >10Mt/jr				1,5-3,5		9
CO <sub>2</sub> -opslag onder zee	1200 <sup>g</sup>	20	>34	6-10		8-9

<sup>a</sup> Het gaat hier om de **additionele** kosten voor negatieve emissies.

<sup>b</sup> De kolencentrales worden vooralsnog in 2030 gesloten. Daarom is het realistisch potentieel op nul gezet.

<sup>c</sup> Dit is op basis van een indicatief brandstofverbruik in 2050, inclusief scheep- en luchtvaart maar nog exclusief het gebruik van groen gas, zie hoofdstuk 3 voor details.

<sup>d</sup> Dit is een schatting op basis van het beleidsvoorstel van de Europese Commissie, maar de werkelijke hoeveelheid zou hoger kunnen liggen, afhankelijk van de uitwerking van het Europese beleid.

<sup>e</sup> De totaalwaarde is geschat op basis van de hoeveelheid koolstof in de huidige feedstock. De getoonde opties tellen niet op tot de totaalwaarde omdat niet alle ketens in detail zijn uitgewerkt in hoofdstuk 4.

<sup>f</sup> Hiervan kan 2,1 Mton binnen Nederland worden gerealiseerd op basis van de huidige capaciteit van de afvalverbrandingsinstallaties (AVI's), tenzij er sprake is van duurzame stort.

<sup>g</sup> Dit is de **totale** opslagcapaciteit in lege olie- en gasvelden onder het Nederlands deel van de Noordzee.

Bij *hoge temperatuur warmte* is nog veel onduidelijk over de precieze potentiële omvang, invulling en implicaties van opties. Als je uitgaat van de vervanging van (WKK) gasketels in de industrie op natuurlijke momenten, dan is volgens Koelemeijer *et al.* (2017) het technisch potentieel voor biomassaketels met CO<sub>2</sub>-afvang ongeveer 7,4 Mton in 2030. In deze studie zijn we voornamelijk uitgegaan van 1/3 deel in 2030 en het volledige potentieel in 2050. Nader onderzoek is nodig om te bepalen in hoeverre dit ook echt haalbaar is.

Bij de 12 Nederlandse afvalverbrandingsinstallaties (AVI's) is ongeveer 70% van het afval dat wordt verbrand van biogene oorsprong. Toepassing van CCS leidt dus direct tot negatieve emissies. Het niet-biogene deel, dat voornamelijk uit kunststoffen bestaat, leidt tot negatieve emissies indien deze kunststoffen zijn geproduceerd uit biomassa. Om dubbeltelling te voorkomen wordt dit deeltogerekend aan de chemie. In het regeerakkoord wordt een 'indicatief' doel gesteld van 2 Mton CO<sub>2</sub>-afvang bij AVI's in 2030 waarvan 1,4 Mton als negatief kan worden beschouwd op basis van het biogene aandeel. Als we er voor 2050 van uitgaan dat de huidige verbrandingscapaciteit van 7,7 Mton per jaar wordt gehandhaafd, dat het biogene deel niet afneemt en dat er maximaal CCS wordt toegepast om te kunnen voldoen aan de 95%-doelstelling dan komt het realistisch potentieel op 4,9 Mton. Volgens Ros en Daniels (2017) bedragen de kosten voor CO<sub>2</sub>-afvang bij AVI's ongeveer €60 per ton voor grote installaties tot €80 per ton voor de kleinere.

**Vergassing** is een technologie voor de thermische omzetting van vaste droge biomassa in waterstof, koolstofhoudende energiedragers of grondstoffen voor de chemische industrie. Het doel van vergassen van biomassa is de vervaardiging van een productgas of gereinigd synthegas dat bestaat uit een mengsel van koolstofmonoxide (CO) en waterstof (H<sub>2</sub>), en daarnaast CO<sub>2</sub> en een hoeveelheid methaan (CH<sub>4</sub>). Daarnaast wordt Superkritisch Vergassen (SCW) door verschillende partijen als een veelbelovende optie gezien. De meest eenvoudige toepassing is de verbranding van het gas voor de productie van elektriciteit en warmte, maar veel interessanter voor de energietransitie zijn de toepassingen waarbij biobrandstoffen worden geproduceerd of grondstoffen voor de chemie en waarbij zuivere CO<sub>2</sub>-gasstromen ontstaan die opgeslagen kunnen worden:

- de productie van synthetische biodiesel en synthetische bio-kerosine met behulp van Fischer-Tropsch (FT) synthese;
- de productie van bio-methanol dat bijgemengd kan worden in benzine of als grondstof kan dienen voor de chemie dan wel verder opgewaardeerd kan worden tot bioDME;
- de productie van synthetisch aardgas of bio-methaan (CH<sub>4</sub>) door middel van methanisering (methaan-synthese);
- de productie van waterstof (H<sub>2</sub>).

Bij de eerste drie toepassingen is het doel om zoveel mogelijk koolstofatomen uit de biomassa om te zetten in een koolstofhoudende energiedrager. De vierde toepassing lijkt alleen dan een logische optie als er een hoge waarde wordt toegekend aan het opslaan van CO<sub>2</sub> aangezien hiermee de hoogwaardige koolwaterstoffen uit de biomassa verloren gaan.

Omdat bij bovenstaande toepassingen een zuivere CO<sub>2</sub>-stroom ontstaat - m.a.w. het is onderdeel van het productieproces - zijn er geen additionele kosten voor het realiseren van negatieve emissies, behalve die voor compressie, transport en opslag. Daarom worden in tabel B.2 de huidige kosten op nul gesteld. Het potentieel van de hoeveelheid afvangbare CO<sub>2</sub> van de vergassingsoptie is afhankelijk van verdere ontwikkeling van genoemde toepassingen en de mate waarin die onderdeel zullen zijn van de energietransitie. Voornamelijk gaan de ontwikkelingen traag en komen toepassingen slechts moeizaam van de grond.

De eerst genoemde toepassing, biomassavergassing gevolgd door FT-synthese, is een sleuteltechnologie voor de productie van biobrandstoffen. Weliswaar zijn veel technologische barrières het afgelopen decennium opgelost, maar er zijn nog steeds maar enkele demo-fabrieken operationeel in de wereld (TRL 5 tot 6). De commercialisering wordt met name bemoeilijkt door het prijsverschil met fossiele brandstoffen (momenteel zo'n 50% duurder) en de grote

investeringen die nodig zijn om een commerciële FT-fabriek te bouwen. Ook is er onduidelijkheid over de Europese regelgeving met betrekking tot geavanceerde biobrandstoffen.

De totale hoeveelheid CO<sub>2</sub> die potentieel in Nederland verwijderd kan worden met de productie van vloeibare FT-biobrandstoffen kan zeer groot worden (tot wel 55 Mton in 2050), maar hangt sterk af van de Europese regelgeving voor geavanceerde biobrandstoffen en de keuzes die worden gemaakt in het verloop van de energietransitie. Voor het realistisch potentieel van FT-synthese in 2030 in tabel B.2 is uitgegaan van het voorstel van de Europese Commissie een minimum aandeel geavanceerde biobrandstoffen van 0,5% te realiseren vanaf 1 januari 2021, oplopend naar minimaal 3,6% in 2030. Hiervoor zal ongeveer 16 PJ geavanceerde biobrandstoffen nodig zijn om deze doelstelling in Nederland te halen waarbij ongeveer 2,3 Mton CO<sub>2</sub> kan worden afgevangen ervan uitgaande dat de doelstelling volledig wordt ingevuld met FT-bio-brandstoffen.

Voor Nederland is het essentieel om tijdig te onderzoeken of de biomassa die nu grootschalig wordt geïmporteerd voor de meestook in kolencentrales, na 2023 in stand gehouden kan worden en vervolgens kan worden benut voor de verdere ontwikkeling en uitrol van innovatieve biomassatoepassingen.

De **chemie** in Nederland produceert jaarlijks ongeveer 6,6 Mton aan grondstoffen voor de kunststofverwerkende industrie. Door toepassing van biomassa kunnen negatieve emissies worden gerealiseerd doordat de biomassa wordt opgeslagen in de geproduceerde kunststoffen en door het toepassen van CCS op de AVI's of door duurzame stort. Echter, het vervangen van aardolie door biomassa als feedstock is een ingrijpend proces. Het vergt soms vérgaande aanpassingen in het huidige productieproces of het bouwen van geheel nieuwe fabrieken en installaties.

Er zijn zeven bulkchemicaliën die samen ruim 80% van de Europese productie omvatten: polyetheen (PE), polypropyleen (PP), polyvinylchloride (PVC), polyurethaan (PUR), polystyreen (PS), polyethyleentereftalaat (PET), en polyamide (PA). Om deze te vervangen door op biomassa gebaseerde alternatieven zijn er in principe verschillende routes denkbaar:

- Omzetting van biomassa naar *bestaande* platformchemicaliën<sup>2</sup> zoals etheen, glycerol, ethanol of onverzadigde vetzuren zoals adipinezuur, glucaarzuur of azijnzuur.
- Omzetting naar *nieuwe* platform- of bulkchemicaliën met dezelfde eigenschappen als bestaande chemicaliën (zoals melkzuur ter vervanging van styreen) of met met geheel nieuwe eigenschappen zoals furaandicarbonzuur (FDA) waarvan biologisch afbreekbare flessen kunnen worden gemaakt.
- Vergassing van biomassa naar synthesegas, gevolgd door Fischer-Tropsch synthese van basiskoolwaterstoffen (zie ook paragraaf 3.2).

De jaarlijkse productie van de zeven bulkchemicaliën bevat circa 3,9 Mton aan C-atomen of 14,4 Mton in termen van CO<sub>2</sub>. Indien de feedstock volledig vervangen zou worden door biomassa dan is het potentieel aan negatieve emissies gelijk aan 13 Mton CO<sub>2</sub> bij een afvangeficiëncy van 90%. Daarnaast kunnen CO<sub>2</sub> en C ook als grondstof dienen voor allerlei productieprocessen in de chemie, zoals bijvoorbeeld bij de kunstmestproductie (CO<sub>2</sub>) en de productie van koolstofanodes voor de aluminiumsector. Als die CO<sub>2</sub> en C uit biomassa worden geproduceerd is ook hier een mogelijke bron van negatieve emissies die kan oplopen tot 3 Mton.

Zoals aangegeven stoten de Nederlandse AVI's per jaar ongeveer 7,7 Mton CO<sub>2</sub> uit waarvan 30% of 2,3 Mton CO<sub>2</sub> voornamelijk afkomstig is van kunststoffen. Daarmee kan dus maximaal 2,1 Mton aan negatieve emissies aan Nederland worden toegekend (90% van 2,3 Mton), tenzij een andere verrekening wordt toegepast voor chemische producten die in het buitenland worden verbrand of gestort. Daarnaast is het de vraag in hoeverre in het kader

---

<sup>2</sup>Er zijn een aantal mogelijke productieroutes voor boven genoemde bulkchemicaliën op basis van biomassa als feedstock. Binnen deze routes worden chemicaliën geproduceerd (zoals melkzuur of tereftaalzuur), die worden aangeduid met de term 'platformchemicaliën'.

van het streven naar een meer circulaire economie de input van grondstoffen zal afnemen; immers in een circulaire economie worden de C-moleculen van alle producten maximaal hergebruikt en wordt er minimaal afval verbrand of gestort. Anderzijds zouden kunststoffen voor sommige toepassingen staal kunnen vervangen. De combinatie van deze factoren zou het technisch potentieel positief of negatief kunnen beïnvloeden, maar vooralsnog laten we dit hier buiten beschouwing.

De chemische sector in Nederland wil in 2030 15% van de feedstock ofwel 75 PJ vervangen door biomassa (Krebbekx *et al.* 2013). Dit levert een negatief emissiepotentieel van 1,9 Mton waarvan ongeveer 0,6 Mton afgevangen kan worden bij de Nederlandse AVI's. Voor 2050 wordt uitgegaan van een Europese scenariostudie waarin de twee meest relevante scenario's uitkomen op ongeveer 35% van de feedstock die vervangen zal zijn door biomassa (Cefic 2013). Uitgaande van de huidige omvang van de chemiesector zou dat neerkomen op een negatief emissiepotentieel van 4,5 Mton CO<sub>2</sub>, waarvan maximaal 2,1 Mton in Nederland afgevangen zou kunnen worden in de AVI's. Overigens geldt dit alleen indien sprake is van een productieproces met dezelfde output, bijvoorbeeld wanneer etheen op basis van aardolie wordt vervangen door etheen op basis van biomassa. Als fossiele chemicaliën worden vervangen door een ander chemische stof op basis van biomassa, bijvoorbeeld styreen door melkzuur dan kan het negatieve emissiepotentieel kleiner of groter worden, afhankelijk van de verhoudingen in koolstofinhoud.

In tabel B.2 wordt een aantal belangrijke mogelijkheden benoemd voor negatieve emissies binnen de chemie. De technische en realistische potentiëlen tellen niet op tot het totaal omdat er meer productieroutes zijn waarbinnen biomassa toegepast kan worden dan uitgewerkt in dit rapport. Om alle mogelijkheden binnen de chemie in kaart te brengen is vervolgonderzoek in nauwe samenwerking met de sector noodzakelijk.

Indien een chemisch proces is overgeschakeld op biomassa (waar uiteraard de nodige kosten aan verbonden zijn), dan moeten er voor het verkrijgen van negatieve emissies *additionele* kosten worden gemaakt bij de AVI's voor afvang; vandaar dat de kosten in tabel B.2 daaraan gelijk zijn gesteld.

**Beton** bestaat uit cement, toeslagmaterialen (zand, grind), water, en hulpstoffen. Cementproductie leidt tot relatief hoge CO<sub>2</sub>-emissies. Meer dan de helft hiervan wordt veroorzaakt door procesemissies waarbij een koolstofhoudend product, meestal kalksteen (of mergel), wordt omgezet in een halffabricaat voor cementproductie, klinker, dat geen koolstof bevat. In 2018 of 2019 stopt de mergelwinning in Limburg en daarmee stopt ook de productie van klinker in Nederland. De cementindustrie produceert ongeveer 5% van de wereldwijd door mensen veroorzaakte CO<sub>2</sub> uitstoot. Voor andere broeikasgassen is de bijdrage nihil. Zodra Nederland geen klinkerproductie meer heeft - maar nog wel cementproductie - wordt de bijdrage minder dan 1% van de nationale emissies (en de betreffende emissies komen dan vrij in het buitenland). In Nederland is de totale betonproductie rond 16 miljoen m<sup>3</sup> of 40 Mton waarbij 2,6 Mton CO<sub>2</sub> vrijkomt, exclusief de energie-gerelateerde emissies voor het produceren van klinker en transport.

Indien de proces-emissies worden afgevangen, dan ontstaan negatieve emissies doordat in de gebruiksfase beton en cement weer langzaam CO<sub>2</sub> opnemen uit de atmosfeer (Xi *et al.* 2016). Voor Nederland is dat 0,6 tot 1,1 Mton per jaar, inclusief vastlegging door het malen van het oude beton bij hergebruik. Complicatie is dat de vastlegging in beton nu niet wordt meegenomen in de emissieregistratie en we dus blijkbaar op een andere plek in de koolstofcyclus de vastlegging te groot inschatten. Het is dus de vraag in hoeverre de huidige vastlegging als zodanig kan en mag worden ingeboekt.

Negatieve emissies kunnen ook worden bereikt doordat materiaal kan worden toegevoegd aan het beton dat CO<sub>2</sub> bevat of opneemt. Er bestaan thans meerdere interessante opties, zoals zand vervangen door olivijn, door het gebruik van organische toeslagmaterialen/hulpstoffen zoals Miscanthus-vezels (olifantsgras), door kiezels te vervangen door vliegashoudend cement uit AVI's dat eerst met CO<sub>2</sub> heeft gereageerd of door cement of beton te vervangen door een stof die CO<sub>2</sub> opneemt gedurende de productie. Met deze technieken is op kleine schaal geëxperimenteerd;

voordat tot toepassing in de bouwpraktijk kan worden overgegaan dient een goedkeuringstraject te worden afgelegd, dat voor dragende constructies 10 jaar kan bedragen. Voor niet-dragende constructies zijn de eisen minder streng en daar zullen deze toepassingen naar verwachting in eerste instantie hun weg kunnen vinden. Voor de inschatting in tabel B.2 is er van uitgegaan dat het in 2030 mogelijk moet zijn een kwart van de niet-dragende constructies hiermee te produceren, oplopend tot 50% van de totale betonproductie in 2050.

In de **bouw** kan door toename in het gebruik van hout in de woningbouw de grond, weg- en waterbouw (de GWW-sector) veel extra koolstof worden opgeslagen. Houtskeletbouw (hsb) is een hoogwaardige prefab bouwmethode voor woningen tot 4 verdiepingen hoog, die veelvuldig wordt toegepast in Canada, de VS en Scandinavië. In Groningen zijn meer dan 500 hsb-woningen gebouwd vanwege de aardbevingsbestendigheid (VDM 2017). Ook is aangetoond dat het mogelijk is hoogbouw in hout uit te voeren, zoals bij het HAUT-project in Amsterdam. Het technische potentieel is niet gekwantificeerd, maar uit een onderzoek door W/E (2016) blijkt dat houtskeletwoningen de helft minder CO<sub>2</sub> verbruiken in de bouwfase vergeleken met gangbare woningen van vergelijkbare omvang en dat er veel meer koolstof wordt vastgelegd. Een eerste orde kwantificering laat zien dat bij een verzesvoudiging van het aantal laagbouw-woningen op basis van houtskeletbouw en een toename van het gebruik van hout in de GWW-sector in 2030 ongeveer 0,3 Mton CO<sub>2</sub> per jaar kan worden vastgelegd en evenzeer vermeden door vervanging van beton en baksteen. Als dit verdubbelt tot 2050 dan kan dit oplopen tot 0,6 Mton CO<sub>2</sub>. Er zijn geen hsb-studies die kosten berekenen in termen van € per vastgelegde ton CO<sub>2</sub>.

In de **landbouw** bestaan goed inpasbare maatregelen die maximaal kunnen leiden tot een toename van de koolstofvoorraad in de bodem die overeenkomt met 2,3 Mton per jaar in termen van CO<sub>2</sub>. De belangrijkste zijn:

- het beperken of niet uitvoeren van kerende grondbewerking waardoor het organisch materiaal minder blootgesteld wordt aan oxidatie;
- zoveel mogelijk gebruik maken van vanggewassen of stikstofbindende gewassen die vervolgens worden onderploegd;
- het verbeteren van de gewasrotatie al is deze in veel gevallen al geoptimaliseerd;
- het zoveel mogelijk achterlaten van gewasresten;
- beter akkerrandenbeheer;
- niet of minder frequent 'scheuren' van het grasland waardoor minder organisch materiaal verloren gaat (in de huidige regelgeving mag dit eens in de 5 jaar gebeuren);

Er bestaan geen kostenschattingen voor de afzonderlijke maatregelen maar Van den Born *et al.* (2018) schatten dat deze klasse van maatregelen liggen in de orde van €40 à €50 per ton CO<sub>2</sub>.

Naast een verhoging van het koolstofgehalte, kennen bovenstaande maatregelen ook verschillende positieve neveneffecten waaronder een verbeterd vochtvasthoudend vermogen van de bodem, betere infiltratie bij stevige regenbuien en meer biodiversiteit. Lesschen *et al.* veronderstellen dat in de praktijk de landbouwbedrijven hun beproefde en vertrouwde werkwijze van o.a. grasland scheuren en ploegen niet zomaar zullen verlaten. Daarvoor kunnen zij zowel bedrijfseconomische, agronomische of logistieke redenen hebben. Als daar rekening mee wordt gehouden komt het meer realistisch potentieel van landbouwbedrijven uit op bijna 0,8 Mton CO<sub>2</sub> per jaar.

De maatregelen kunnen op relatief korte termijn worden genomen en feitelijk al snel in de bedrijfsvoering worden doorgevoerd. Deels betekent dit iets niet of minder doen en deels aanvullende werkzaamheden, zoals een vanggewas wat voor een aantal uitspoelingsgevoelige zandgebieden al een verplichte maatregel is. In lijn met Ros en Daniels (2017) gaan we er van uit dat in 2030 de jaarlijkse vastlegging kan zijn opgelopen tot 0,6 Mton en dat dit kan worden uitgebreid tot 1 Mton in 2050.

In de veenweidegebieden kan ontwatering leiden tot hoge emissies van broeikasgassen. Als het gehele veenpakket in Nederland zou oxideren dan zou 2 Gton CO<sub>2</sub> worden uitgestoten

(Koster 2017). Om oxidatie te voorkomen zijn er verschillende maatregelen mogelijk waarbij het niet primair gaat om extra koolstofopslag, maar om het verminderen van het verlies aan koolstof. Echter, als het veen uiteindelijk weer kan aangroeien, zou er sprake kunnen zijn van negatieve emissies. Natuurgebieden waar deels sprake is van hergroei zijn o.a. de Deurnsche Peel, Mariapeel en Bargerveen, maar ook daar zijn de hydrologische condities nog niet optimaal voor veengroei.

De Nederlandse **bossen** beslaan met 365.000 ha ongeveer 11% van het landoppervlakte. Hiervan is 58% (multifunctioneel) productiebos en de rest natuurbos. In de productiebossen wordt met enige regelmaat gekapt en in natuurbossen vindt extensief beheer plaats dat vooral is gericht op natuurdoelen. Uit de meest recente bosinventarisatie blijkt dat in Nederland in vier jaar tijd sprake was van een afname van 5.400 ha. Dit kwam door natuurontwikkeling en de omzetting naar landbouwgrond, bebouwd gebied en infrastructuur.

In Nederland wordt jaarlijks circa 1,25 miljoen m<sup>3</sup> hout geoogst. Het bos legt jaarlijks ongeveer 1,65 Mton CO<sub>2</sub> vast en dit zal bij continuering van het huidige bosbeleid dalen tot 0,8 Mton CO<sub>2</sub> in 2050. Dit komt door het geleidelijk oplopen van de gemiddelde leeftijd van de Nederlandse bossen. Door actief bosbeheer kan de jaarlijkse vastlegging door bossen worden verhoogd. Actief bosbeheer betekent intensieve verjongingskap en aanplant met een cyclus van 20-100 jaar. Door bij het herplanten gebruik te maken van sneller groeiende boomsoorten kan de vastlegging worden versneld en wordt het bos productiever. Hierdoor kan de afname van de CO<sub>2</sub>-vastlegging worden tegengegaan en kan mogelijk zelfs extra vastlegging worden bewerkstelligd (maar is hier verder buiten beschouwing gelaten).

In het Actieplan bos- en hout hebben terreinbeheerders en een groot aantal bedrijven in de houtsector voorgesteld om 25.000 ha bos aan te planten in bestaande natuurterreinen en 75.000 ha op huidige landbouwgronden. De koolstofvastlegging rond 2030 wordt geschat op 0,5 tot 1,0 Mton CO<sub>2</sub> oplopend tot 1,2 Mton in 2050. De kosten voor het actieplan zijn ongeveer €50 per ton CO<sub>2</sub> als uitgegaan wordt van bestaande natuur tot vele honderden euro's per ton CO<sub>2</sub> als er sprake is van grondaankoop.

**Biochar** lijkt op houtskool maar heeft een andere structuur, samenstelling en kwaliteit en kan worden gebruikt als bodemverbeteraar. Door het hoge koolstofgehalte en de stabiliteit – het kan tot duizenden jaren in de bodem aanwezig blijven – leidt dit tot negatieve emissies. Biochar wordt gemaakt uit organisch materiaal middels een proces dat pyrolyse heet: een thermochemische omzetting van het organische materiaal in afwezigheid van zuurstof.

Het technisch potentieel voor biochar is zeer groot. Als wordt uitgegaan van een verspreiding van 45 ton biochar per ha op 820.000 ha akker- tuinbouw- en groenvoedergewassenareaal, dan is het cumulatieve potentieel 30 Mton C of 110 Mton CO<sub>2</sub>. Hierbij is uitgegaan van een optimale koolstofinhoud van 90% en dat 10% mineraliseert in de eerste maanden.

Gezien dit grote potentieel in combinatie met de mogelijke verbetering van de bodemvruchtbaarheid, waren de verwachtingen een tiental jaren geleden hoog gespannen en zijn er veel (wetenschappelijke) studies uitgevoerd, waaronder een uitgebreide Europese veldstudie in acht landen, waaronder Nederland. Het algemene advies dat hieruit volgde was zeer terughoudend te zijn met biochartoepassingen omdat er geen extra (economische) waarde is en omdat biochar vervuild kan zijn terwijl het niet meer verwijderd kan worden wanneer het eenmaal is toegepast. De meest recente studie is een meta-analyse van He *et al.* (2017) waarin op basis van 91 studies wordt geconcludeerd dat de doeltreffendheid van biochar als een klimaatmitigatieoptie nog steeds erg onzeker is, onder andere door de slecht begrepen interactie tussen biochar en stikstof en de mogelijk (zeer) grote invloed op de microbiële bodemecologie en het functioneren van ecosystemen als geheel.

Vooralsnog gaan we er daarom van uit dat de bijdrage aan negatieve emissies in 2030 nihil zal zijn. Voor 2050 gaan we er van uit dat er niet meer dan maximaal 1 Mton CO<sub>2</sub> vastgelegd kan worden, mede op basis van de benodigde hoeveelheid landbouwgrond; bij een toepassing van 45 ton biochar per hectare is er 7500 hectare nodig om 1 Mton CO<sub>2</sub> vast te leggen en daarnaast is een veelvoud van dit oppervlak nodig om de benodigde biochar te produceren.

De kosten van toepassen van biochar worden met name bepaald door de kosten van de gebruikte feedstock. In 2014 varieerden de prijzen voor biochar van €200 per ton voor lage kwaliteit biochar tot €1500 voor hoge kwaliteit. Dit vertaalt zich in een prijs van €100 tot €500 per ton CO<sub>2</sub>, nog afgezien van de kosten voor verspreiding over het land.

**Silicaten** omvatten bijna 95% van de aardkorst en bestaan in tal van variëteiten. Verschillende silicaten, waaronder olivijn, kunnen reageren met CO<sub>2</sub> en vormen dan stabiele carbonaten. De snelheid van CO<sub>2</sub>-vastlegging van dit natuurlijke proces is zeer laag, maar door dit te versnellen kunnen in potentie grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> worden vastgelegd. In 2009 verscheen een invloedrijke kritische studie waarin werd geconcludeerd dat het verspreiden van olivijn langs stranden en kustgebieden niet rendabel is voor het vastleggen van CO<sub>2</sub> in de omvang waarin dat noodzakelijk is (Hangx en Spiers 2009). Deze conclusie kwam met name voort uit hun aanname dat het olivijn extreem fijn vermalen moet worden (tot 2 micrometer) om voldoende snel te reageren en dat het verspreiden van olivijn in grote hoeveelheden - 5 miljard ton om 30% van de wereldwijde emissies te compenseren - enorme uitdagingen vormt op het vlak van economie, infrastructuur en gezondheid. Professor Olaf Schuiling, al tientallen jaren de bekendste bepleiter van de olivijn-optie, publiceerde hierop een commentaar waarin hij stelde dat Hangx en Spiers de reactietijd veel te hoog inschatten, o.a. omdat de berekeningen waren gebaseerd op 100% verwerking en op eenvormige deeltjes in plaats van een verdeling over deeltjes van verschillende afmetingen (Schuiling en de Boer 2010).

Op basis van een studie van Montserrat *et al.* (2017) naar de mogelijke toepasbaarheid van olivijn in kustwateren, lijkt voor Nederland de vervanging van ophoogzand voor kustverdediging door olivijn een interessante optie. Het verbruik hiervan is gemiddeld 26 Mton per jaar. Afhankelijk van korrelgrootte, temperatuur, waterbeschikbaarheid, zuurgraad en de ijzerfractie in het gebruikte olivijn kan de CO<sub>2</sub>-opname over een periode van 25 jaar toenemen tot 9 Mton per jaar.

De schattingen van de energiebehoefte voor transport en het fijn malen van olivijn lopen uiteen van 0,8 tot 2,7 GJ per ton CO<sub>2</sub> en zijn vooral afhankelijk van de gewenste korrelgrootte en de afstand tot de mijn.

De wereldproductie was 5 jaar geleden ongeveer 9 Mton, waarvan 3,5 Mton in Noorwegen. De grootste afnemers zijn de hoogovens. De productie van bestaande Europese mijnen kan op korte termijn worden opgevoerd tot 6 Mton per jaar. Aangezien grootschalige toepassing van olivijnzand in kustwateren nog het nodige onderzoek en voorbereiding vergt, gaan we er hier van uit dat op zijn vroegst in 2023 kan worden begonnen met het gebruik van 0,5 Mton olivijn als ophoogzand en dat dit zou kunnen uitgroeien tot de volledige 26 Mton in 2050 waardoor in dat jaar uiteindelijk bijna 5 Mton CO<sub>2</sub> wordt vastgelegd. Uiteraard is deze opschaling speculatief en wellicht te optimistisch. Nader onderzoek is nodig om meer realistische schattingen te geven.

Olivijnzand is significant duurder dan gewoon zand. Bij een afstand tot de kust van 20 kilometer kost zandwinning minder dan €3 per ton. Volgens het bedrijf GreenSand kost het winnen van olivijnzand met een korrelgrootte tot 2 mm ongeveer €14 per ton, inclusief het laden in een schip. Het vervoer naar Nederland kost ongeveer €6 tot €12 per ton. Het vermalen van het olivijn tot deeltjes van 200 micrometer kost €4 à €5 per ton. Dit alles leidt tot een meerprijs van €24 per ton olivijn hetgeen zich vertaalt in €70 per ton CO<sub>2</sub> indien wordt gerekend met de CO<sub>2</sub>-opname over een periode van 30 jaar waarin ongeveer 40% van het olivijn zal zijn opgelost in het zeewater. Langere periodes leiden tot lagere kosten.

Het oplossen van olivijn in zeewater leidt tot verhoogde niveaus van metalen zoals silicium, ijzer en nikkel. Silicium en ijzer stimuleren de groei van micro-organismen in het water en kan tot extra CO<sub>2</sub>-opname leiden maar mogelijk ook het ecosysteem negatief beïnvloeden. Nikkel is potentieel toxisch. Daarnaast verhoogt olivijn de pH-waarde van het water. Dit lijkt positief aangezien dit de verzuring van de oceanen door opname van CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer tegengaat. Het is dus belangrijk (en verplicht binnen de EU-wetgeving) om mogelijke positieve en negatieve effecten op het zeemilieu te onderzoeken.

**Direct Air Capture (DAC)** betreft het afvangen van CO<sub>2</sub> uit de buitenlucht door het actief, meestal door ventilatoren, in contact te brengen met een chemische stof waaraan CO<sub>2</sub> zich bindt. Vervolgens wordt het CO<sub>2</sub> weer vrijgemaakt door verhitting tot 100 of 900 °C, afhankelijk van de gebruikte techniek. Het geconcentreerde CO<sub>2</sub>-gas dat dan ontstaat kan vervolgens worden opgeslagen. Belangrijke voordelen van DAC-systemen zijn dat zij niet locatiespecifiek zijn en dat ze geen last hebben van onzuiverheden zoals die in verbrandingsgassen voorkomen waardoor degradatie wordt veroorzaakt van het bindingsmiddel. Het grootste nadeel is de energiebehoefte van 7,7 tot 12,5 GJ per ton afgevangen CO<sub>2</sub>, die voor 80% uit warmte bestaat en voor 20% uit elektriciteit. Dit impliceert dat eigenlijk alleen energiebronnen gebruikt kunnen worden die (vrijwel) CO<sub>2</sub>-neutraal zijn of die niet elders gebruikt kunnen worden.

DAC is nog steeds een beginnende technologie met vooral experimenten op laboratoriumschaal. Het Zwitserse Climeworks heeft de technologie inmiddels opgeschaald naar demonstratie- en pilotprojecten. Ze hebben een fabriek in Zürich die 900 ton CO<sub>2</sub> per jaar afvangt voor een belendend kassencomplex en een kleinere fabriek in Reykjavik in IJsland die 50 ton per jaar afvangt en opslaat in basaltlagen. De fabriek in Zurich verbruikt bijna 11 GJ per ton CO<sub>2</sub>, voornamelijk afkomstig van 'onbruikbare' restwarmte. Overigens spreekt Climeworks de verwachting uit dat zij in 5 jaar de warmtebehoefte hebben gehalveerd tot 4,5 GJ/ton door de ontwikkeling van adsorptiemiddelen met een betere verhouding tussen de reactiviteit met CO<sub>2</sub> en de benodigde energie voor regeneratie.

In theorie kan een DAC-installatie eenvoudig worden opgeschaald en is het technisch potentieel onbeperkt. Het afvangen van 1 Mton CO<sub>2</sub> per jaar zou vijf afvanginstallaties van 1 km lang nodig maken op een oppervlak van 1,5 km<sup>2</sup>. Voor het afvangen van de Nederlandse emissies zou een oppervlak van 250 km<sup>2</sup> nodig zijn. Volgens Climeworks is het mogelijk installaties te bouwen die 3,5 keer minder oppervlak nodig hebben en die 24 kton CO<sub>2</sub> per ha per jaar kunnen afvangen.

Gezien de energiebehoefte zijn er studies die aangeven dat DAC-installaties gebouwd zouden moeten worden in gebieden waar het systeem op zonne-energie kan draaien. De ruimte die dan nodig is voor het opwekken van voldoende energie zou het benodigde oppervlak verhogen met ten minste een factor 20.

Kostenschattingen voor DAC (*zonder* CO<sub>2</sub>-opslag) zijn erg onzeker en lopen sterk uiteen van €35 tot €850 per ton CO<sub>2</sub>. Vooral de lagere schattingen worden sterk betwist en meer realistische schattingen komen dan ook uit aan de bovenkant van de range: €500 tot €850 per ton. Climeworks heeft zich ten doel gesteld aan te tonen dat afvangkosten van rond €510 (CHF 600) per ton mogelijk zijn en dat dit in opeenvolgende fabrieken te reduceren valt tot ten minste de helft. Hun lange-termijn-doel voor 2050 is €85 per ton CO<sub>2</sub>.

Er bestaan maar een paar studies die de mogelijke rol van DAC in mitigatiescenario's hebben onderzocht. Deze laten zien dat de bijdrage van DAC sterk afhankelijk is van het uiteindelijke doel in termen van de CO<sub>2</sub> concentratie, de kosten van andere mitigatietechnologieën, de discount-rate en aannames over het tempo waarin DAC-installaties gebouwd en opgeschaald kunnen worden. Het lijkt er op dat DAC uiteindelijk vooral een rol kan spelen in het compenseren van decentrale verspreide emissiebronnen, zoals van gebouwen en voertuigen die moeilijk op een andere manier aangepakt kunnen worden, vooral bij een beperkte beschikbaarheid van biobrandstoffen. Hier gaan we er van uit dat DAC op zijn vroegst pas in de tweede helft van deze eeuw een significante bijdrage zal leveren.

In het voorgaande zijn veel opties en hun kosten beschreven tot aan het punt waar een (vrijwel) pure CO<sub>2</sub>- stroom ontstaat (aangeduid met een \* in tabel B.2). De kosten voor **transport en permanente ondergrondse opslag** komen hier nog bij.

De opslag van CO<sub>2</sub> in Nederland zal in eerste instantie plaatsvinden in lege olie- en gasvelden. Dit is een beproefde en bekende techniek die eigenlijk al sinds de jaren '50 op vrij grote schaal in de olie-industrie in de praktijk wordt gebracht voor het verhogen van de opbrengst van olievelden (Extended Oil Recovery of EOR).



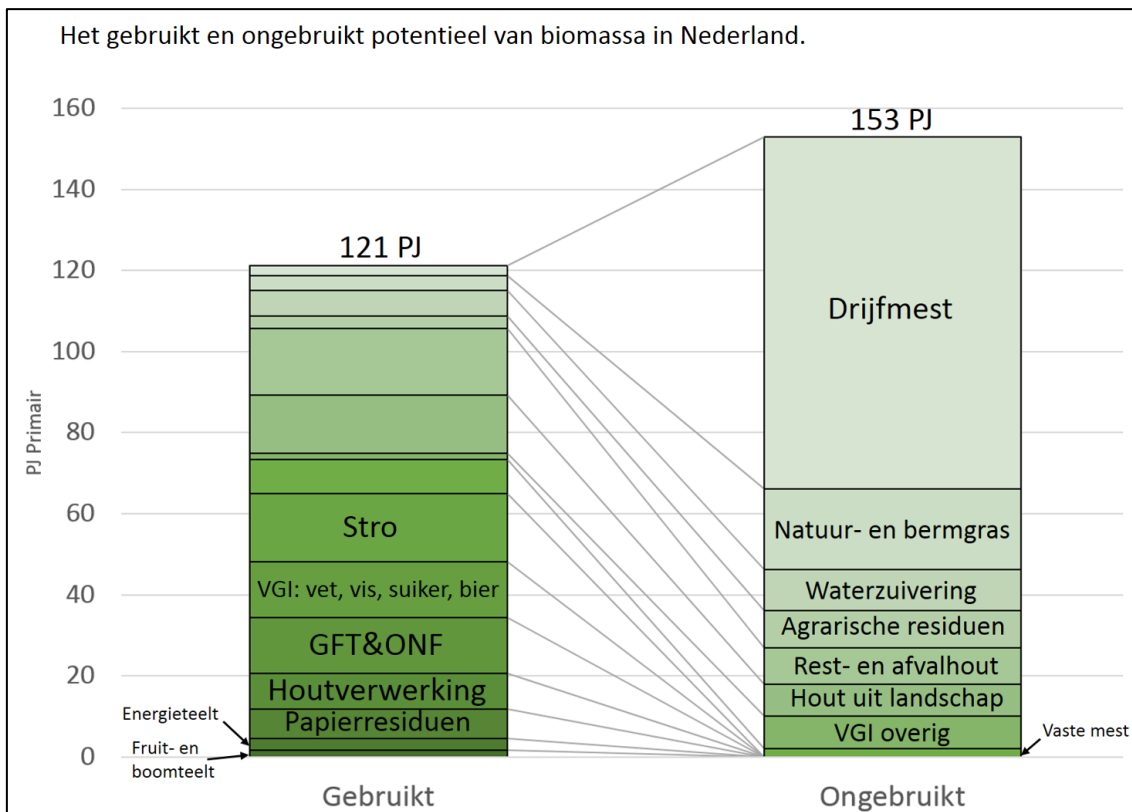
Wat met name van belang is, is dat alle (milieu)-risico's goed in beeld worden gebracht alvorens een leeg reservoir in gebruik wordt genomen. Ook is het belangrijk, vooral bij de eerste velden, dat na afsluiting monitoring van het reservoir plaatsvindt om zeker te zijn dat er geen lekkages plaatsvinden.

Nederland heeft relatief veel opslagcapaciteit voor CO<sub>2</sub>. Geen rekening houdend met het Groninger gasveld is dit 2,7 tot 3,2 Gton, waarvan ongeveer 1,2 Gton onder zee. In aquifers kan nog eens 0,7 tot 1,5 Gton worden opgeslagen. Het Groninger gasveld voegt hier minimaal 7 Gton aan toe, maar is wel als het meest controversieel te beschouwen. Deze capaciteit is daarmee toereikend om de hoeveelheden uit tabel B.2 op te slaan, die alles bij elkaar opgeteld in 2050 gelijk zijn aan ongeveer 0,5 Gton CO<sub>2</sub>. Hierbij zal vooral het maatschappelijk draagvlak een issue zijn, maar ook bij de in dit opzicht minder problematische opslag onder de zeebodem is de capaciteit tot 2050 ruim voldoende, in elk geval voor de hier benoemde negatieve emissies. Eventuele CCS van fossiele CO<sub>2</sub>-bronnen is daarin dan nog niet meegenomen. Maar los van de opslagcapaciteit, zal vooral het tempo waarin CCS gerealiseerd kan worden de beperkende factor zijn. PBL beschouwt 20 Mton in 2030 als 'redelijke' bovengrens hetgeen ook als indicatief doel is benoemd in het Regeerakkoord uit 2017. In hoeverre dit echt realistisch is, is onderwerp van discussie.

De kosten van het transport van CO<sub>2</sub> via pijpleidingen zijn afhankelijk van de afstand, de capaciteit (of dikte) van de pijp en of het op land (onshore) is of in de zee (offshore). Bij capaciteiten van meer dan 10 MtCO<sub>2</sub> per jaar zijn de extra kosten voor transport door pijpleidingen, zeker in vergelijking met de kosten voor afvang, laag.

Wat betreft de opslag in lege olie- en gasvelden worden de 'medium' kosten in de Nederlandse situatie geschat op €6 tot €10 per ton CO<sub>2</sub> of €2 tot €14 per ton voor de totale range aan schattingen. Deze grote range wordt mede veroorzaakt doordat het lastig is in te schatten wat het effect is op de kosten ten gevolge van aansprakelijkheid en verplichtingen met betrekking tot langdurige monitoring van mogelijke lekkages uit de ondergrondse opslag.

Ten slotte speelt **de beschikbaarheid van biomassa** die duurzaam en betaalbaar is, voor veel opties een belangrijke rol. Zoals weergegeven in tabel B.2 impliceert het realistisch potentieel aan negatieve emissies dat er meer dan 170 PJ biomassa in 2030 nodig zou zijn en meer dan 410 in 2050 (en het technisch potentieel een veelvoud daarvan). In figuur B.3 wordt het huidige gebruik van biomassa in Nederland gezet naast het ongebruikte potentieel voor vijftien categorieën. Uit deze getallen, die uitgebreid worden toegelicht in hoofdstuk 13, volgt dat er in Nederland bijna 275 PJ gebruikte en ongebruikte biomassa beschikbaar zou kunnen zijn voor energietoepassingen, waarvan een derde afkomstig is van drijfmest. Verdere verhoging van het potentieel zou mogelijk kunnen zijn door uitbreiding van de energieteelt (b.v. suikerbieten) of de houtoogst, maar tegelijkertijd is het niet ondenkbaar dat het aanbod van drijfmest uit de veehouderij (die bovendien alleen gebruikt kan worden voor vergisting) zal afnemen. We gaan er daarom van uit dat 275 PJ als bovengrens voor Nederland moet worden gezien, uitzonderd een mogelijke bijdrage van zeewier van 18 PJ in 2050.



**Figuur B.3** Het gebruikt en ongebruikt potentieel van biomassa in Nederland. Bij de kolom 'Gebruikt' zijn alleen die categorieën van tekst voorzien, die geen ongebruikt potentieel hebben.

Echter, zoals ook kan worden afgeleid uit figuur B.2 zal bij 95% emissiereductie in 2050 de primaire vraag naar biomassa veel hoger zijn, zeker als het beleid ter bevordering van negatieve emissies wordt geïntensiveerd. Daarom zal import van biomassa noodzakelijk zijn, die volgens onze eerste orde schatting zal liggen tussen 200 en 370 PJ in 2030 en 530 tot 1480 PJ in 2050, en mogelijk (veel) hoger indien een groter deel van het technisch potentieel wordt gerealiseerd, zie tabel B.3 (en hoofdstuk 13 voor details).

**Tabel B.3** Noodzakelijke import van biomassa bij 95% emissiereductie en nationale en internationale beschikbaarheid.

	Technisch	Realistisch	
		2030	2050
		<i>PJ</i>	
Potentieel biomassa, binnenland	275	<230	<230
Potentieel zeewier, Noordzee	350	Nihil	18
<b>Totaal aanbod in NL</b>	<b>625</b>	<b>&lt;230</b>	<b>&lt;250</b>
<b>Totale vraag naar biomassa</b>		<b>430-600</b>	<b>780-1730</b>
<b>Benodigde biomassa obv tabel B.1</b>	<b>&gt;2250</b>	<b>&gt;170</b>	<b>&gt;410</b>
<b>Minimale noodzakelijke import</b>		<b>200-370</b>	<b>530-1480</b>
<b>Mondiale import obv inwonertal</b>			230-430
<b>Mondiale import obv BNP</b>			660-1420
<b>Europese import obv inwonertal</b>		150-525	
<b>Europese import obv BNP</b>		270-950	

Of de noodzakelijke import ook realistisch is, is afhankelijk van de buitenlandse beschikbaarheid van duurzame biomassa. Die is erg onzeker en verschillende studies geven mondiale

schattingen die sterk uiteenlopen. Hier gaan we uit van de mondiale beschikbare duurzame biomassa volgens IEA, die in 2016 een workshop organiseerde met als doel een hogere mate van consensus te bereiken. Men kwam uit op 130 tot 240 EJ per jaar in de periode 2050 tot 2060. Als we deze hoeveelheid evenredig naar inwonertal toekennen aan Nederland op basis van de verwachte populatieomvang in de wereld en in Nederland in 2050 dan betekent dat dat er 230 tot 430 PJ geïmporteerd zou kunnen worden. Alleen in het gunstigste geval is dit voldoende om de noodzakelijke import af te dekken. Als toekenning plaatsvindt op basis van het inkomen van Nederland in 2050 - uitgaande van de economische scenario's in de WLO studie van PBL en CPB - dan zou er veel meer beschikbaar zijn en zou de verwachte behoefte kunnen worden afgedekt. Ook de potentiële schattingen voor Europa lopen sterk uiteen van 6,2 tot 22,1 EJ. Op basis van inwonertal in 2030, maar zeker op basis van inkomen zou dit net (of net niet) tot ruim voldoende kunnen zijn voor de behoefte van biomassa in Nederland en dan zou het in principe niet nodig zijn om tot 2030 biomassa van buiten de EU te importeren.

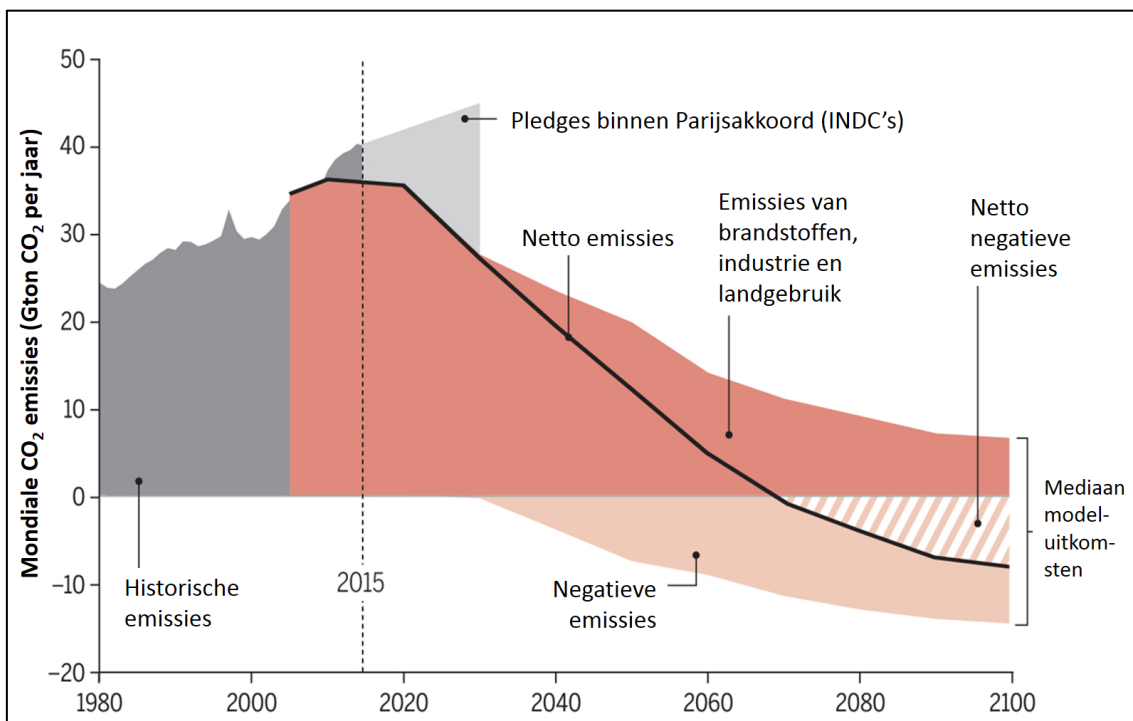
De betaalbaarheid van duurzame biomassa in de toekomst hangt af van vele (economische) factoren en is daarom lastig in te schatten. Volgens de Wit en Faaij (2010) liggen de productiekosten in 2030 in Europa voor 1<sup>e</sup> generatie bio-energiegewassen tussen €5 en €15 per GJ en tussen €1,50 en €4,50 per GJ voor houtige gewassen. Kosten voor landbouwresiduen lopen uiteen van €1 tot €7 per GJ en bosbouwresiduen van €2 tot €4 per GJ. Tevens zijn er grote verschillen in productiekosten en potentiëlen tussen de verschillende Europese landen en regio's binnen landen. Landen met hoge potentiëlen tegen relatief lage kosten zijn delen van Polen, de Baltische Staten, Roemenië, Bulgarije en Oekraïne. In West-Europa zijn het vooral Frankrijk, Spanje en Italië.

Tot slot: in het kader van het Energieakkoord zal in 2023 ongeveer 60 PJ aan gesubsidieerde duurzaam geproduceerde en grotendeels geïmporteerde houtchips en pellets worden bijgestookt in kolencentrales. Daarna zal de subsidie stoppen. Het lijkt verstandig in het licht van bovenstaande analyse om deze biomassa-stroom, waarvoor een uitgebreid duurzaamheidskader wordt ingericht, te borgen en in te zetten voor de biobased economy waarvan negatieve emissies een onderdeel kunnen zijn.

## VERDIEPING

# 1 Negatieve emissies

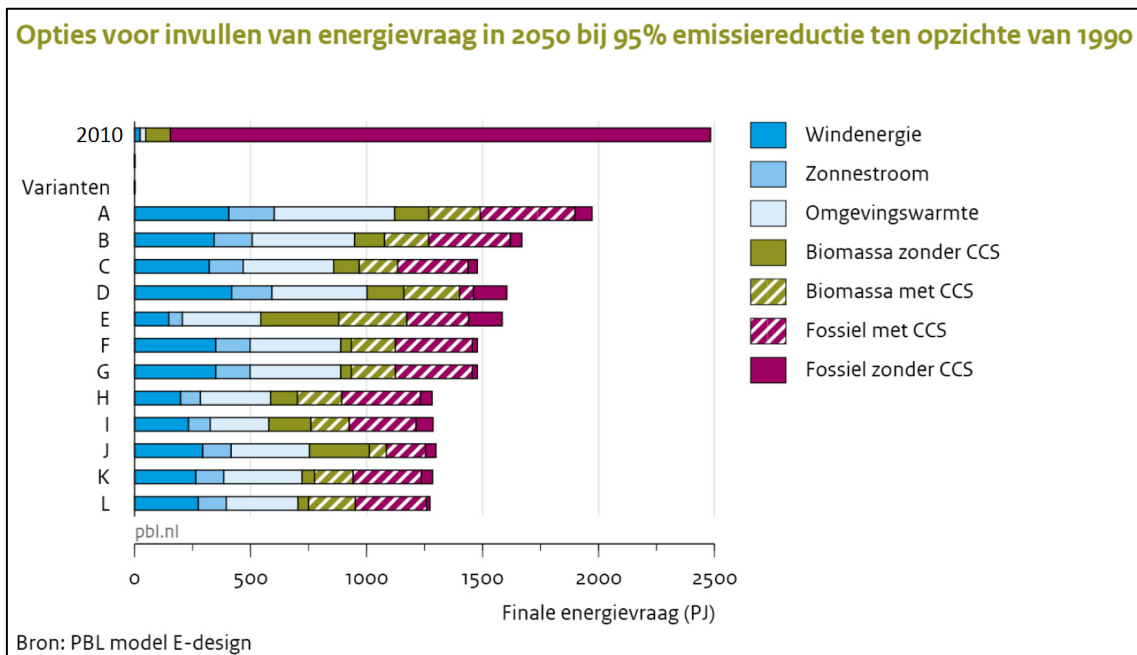
In december 2015 hebben bijna alle landen ter wereld overeenstemming bereikt over het Parijsakkoord dat als doel heeft de mondiale opwarming te beperken tot 2°C en, indien mogelijk, tot 1.5°C. De meest gehanteerde - en tevens meest ruime - interpretatie van het akkoord is dat met een tweederde kans (66%) de mondiale opwarming tot maximaal twee graden beperkt moet blijven in het jaar 2100 ten opzichte van begin vorige eeuw. In het laatste rapport van het IPCC werden 900 scenario's gepresenteerd die zijn doorgerekend met 30 Integrated Assessment Modellen (IAM's) (Edenhofer *et al.* 2014). Op basis van 76 scenario's kon worden afgeleid dat de cumulatieve hoeveelheid CO<sub>2</sub>-emissies die nog uitgestoten mag worden door de mensheid, het zogenaamde 'Carbon Budget', ligt tussen 600 en 1200 miljard ton, ofwel 17 tot 33 keer de huidige jaarlijkse mondiale CO<sub>2</sub>-emissies (Anderson en Peters 2016; Vuuren 2015; Vuuren *et al.* 2016). Dit vereist dat in het tweede helft van deze eeuw de antropogene broeikasgasemissies (in CO<sub>2</sub>-equivalenten) in evenwicht moeten zijn met de opname daarvan (zie figuur 1.1). Omdat er altijd bronnen van broeikasgassen zullen blijven, met name in de landbouw, leidt dit vrijwel onvermijdelijk tot de noodzaak van grote hoeveelheden 'negatieve emissies'; het actief verwijderen en vastleggen van CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer. Dit zou vanaf 2030 ingezet moeten worden en moeten groeien tot zo'n 10 Gton CO<sub>2</sub> per jaar in 2050 en 20 Gton CO<sub>2</sub> in 2100 (de mediaan van de modeluitkomsten) gelijk aan bijna de helft van de huidige mondiale CO<sub>2</sub> emissies.



**Figuur 1.1** Het Parijsakkoord vereist omvangrijke negatieve emissies, te beginnen vanaf ongeveer 2030. INDCs = Intended Nationally Determined Contributions. Bron: Anderson en Peters (2016).

Als wordt gekozen voor een hogere waarschijnlijkheid om beneden de 2°C opwarming te blijven of als het doel wordt verlaagd tot 1,5°C dan wordt het koolstofbudget nog kleiner. In het laatste geval in de orde van 250-400 Gton CO<sub>2</sub> (Vuuren *et al.* 2016). Overigens geven ook Europese studies aan dat negatieve emissies noodzakelijk zijn om reductiedoelstellingen van 95% of meer te realiseren in 2050 (ZEP 2015).

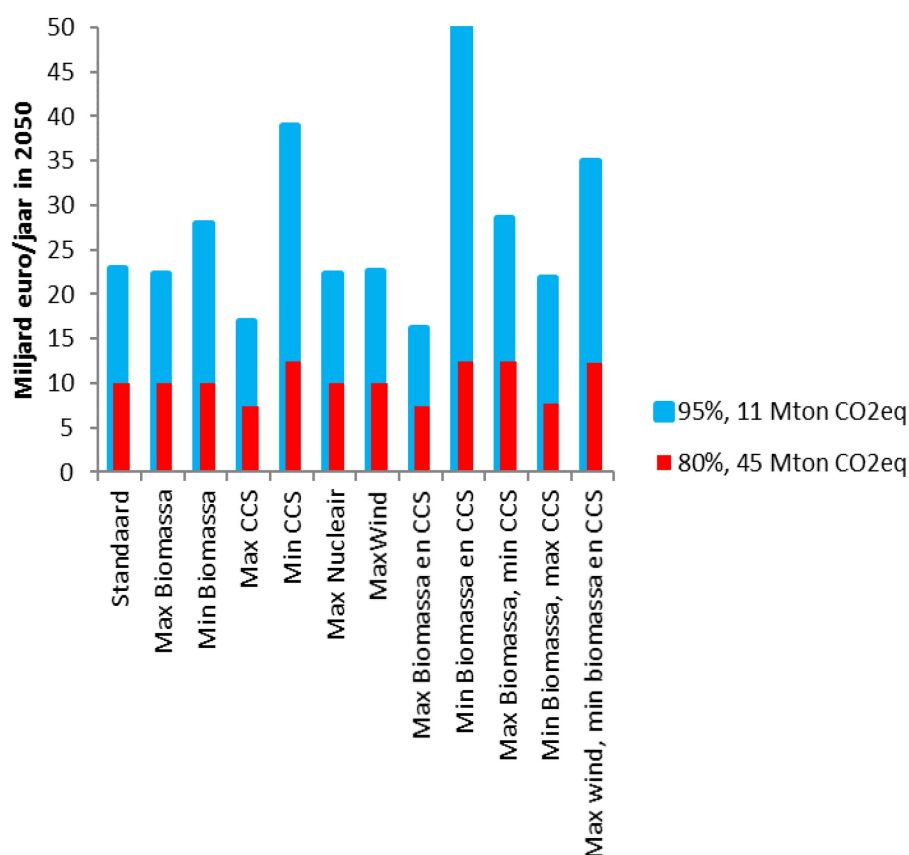
Als we aannemen dat iedere wereldburger recht heeft op de uitstoot van een gelijke hoeveelheid broeikasgassen, dan leidt een mondiaal 2°C-doel voor Nederland tot een reductie van CO<sub>2</sub>-emissies in 2050 met 85 tot 95%. Een 1,5°C-doel impliceert een reductie van meer dan 100% (Vuuren *et al.* 2016). Een reductie van 80% zou mogelijk kunnen zijn zonder een aanzienlijke hoeveelheid negatieve emissies in Nederland, maar zoals figuur 1.2 laat zien is een reductie van 95% (of meer) vrijwel ondenkbaar zonder negatieve emissies, zeker als we de kosten niet buitenproportioneel willen laten oplopen (Ros en Daniels 2017), zie figuur 1.3. Een andere manier om er naar te kijken is het eerder genoemde mondiale perspectief waarin in 2050 rond de 10 Gton negatieve emissies gerealiseerd zouden moeten zijn. Als we stellen dat Nederland een eerlijk aandeel op zich zou moeten nemen op basis van het BNP, dan zou dit in 2050 neerkomen op ongeveer 60 Mton CO<sub>2</sub> aan negatieve emissies. In dit rapport komen we vooralsnog niet verder dan 34 Mton in 2050, hetgeen nogmaals benadrukt dat deze analyse slechts een eerste stap is van waaruit verdere mogelijkheden onderzocht zouden moeten worden.



**Figuur 1.2** Een gewenste broeikasgasemissiereductie in Nederland van 95% in 2050 leidt in alle hier getoonde modelberekeningen tot negatieve emissies, in dit geval de combinatie van biomassa met CCS. Alleen scenario J heeft een relatief klein aandeel van negatieve emissies. Bron: (Ros en Schure 2016).

Bio-energie in combinatie met het afvangen en opslaan van CO<sub>2</sub> (BECCS) is de meest toegepaste negatieve emissieketen in vrijwel alle mondiale, regionale en nationale emissiescenario's. Echter, twintig jaar onderzoek en pilotprojecten hebben niet geleid tot grootschalige toepassing van CCS al dan niet in combinatie met biomassa (Kemper 2015). Sterker nog, de ontwikkeling stagneert: in 2016 waren er slechts 21 CCS-installaties die per jaar 37 Mton CO<sub>2</sub> vastleggen (GCCSI 2017). Om het Parijsdoel te halen moeten er in 2040 volgens het GCCSI ten minste 2.500 installaties zijn die per installatie ten minste 1,5 Mton per jaar kunnen vastleggen. De verwachting voor 2018 is wat positiever en lijkt er weer sprake te zijn van een

grotere toename, maar het is hoe dan ook essentieel en urgent dat er op zowel mondiale, Europese als nationale schaal een discussie wordt gevoerd over de noodzaak en omvang van negatieve emissies en hoe die te bereiken (EASAC 2018; van Vuuren *et al.* 2017).



**Figuur 1.3** Bij 95% emissiereductie lopen de kosten hoog op in scenario's met weinig gebruik van biomassa en/of CCS (BECCS). Min tot Max Biomassa = 250 PJ tot 700 PJ. Min tot Max CCS = 10 tot 50 Mton CO<sub>2</sub>. Max Nucleair = 10 GW. Max wind = 97 GW. Zonder CCS is 95% reductie niet haalbaar binnen het gebruikte model. Voor details, zie (Ros en Daniels 2017).

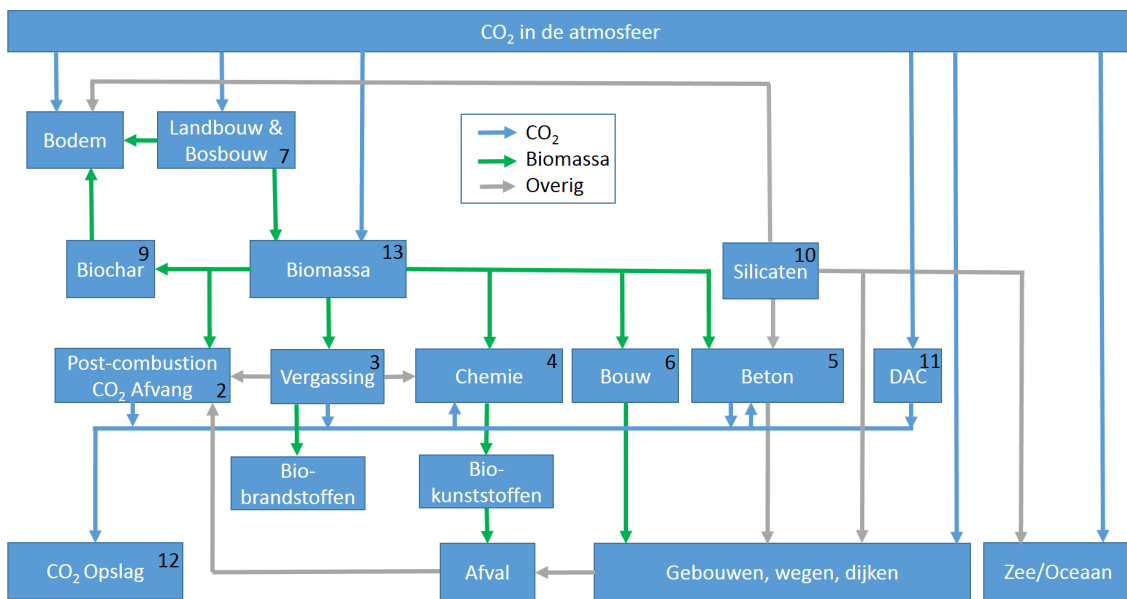
Een cruciaal aspect in de discussie ten aanzien van BECCS is dat grootschalige toepassing enorme hoeveelheden biomassa nodig heeft. Uitgaande van relatief optimistische aannames rond toekomstige (houtige) gewasopbrengsten, is er wereldwijd 380 tot 700 miljoen hectare land nodig voor 12 Gton aan negatieve emissies (Smith *et al.* 2016). Minder optimistische schattingen komen zelfs uit op 1,2 miljard hectare. Dit is 25 tot 80% van alle landbouwgrond in de wereld; tot bijna vier keer de oppervlakte van India. Dit roept belangrijke vragen op rond landbeschikbaarheid, de competitie met voedselproductie, biodiversiteit en de mate waarin die biomassa koolstofneutraal kan worden geproduceerd. Ook de logistiek die samenhangt met het transporteren van dergelijke hoeveelheden biomassa is enorm. Volgens Heck *et al.* (2018) impliceert een strikte interpretatie van de 'planetary boundary' dat het potentieel van BECCS in 2050 wordt gereduceerd tot slechts 220 Mton CO<sub>2</sub> per jaar.

Maar naast BECCS (hoofdstuk 2 en 12) zijn er ook andere negatieve emissietechnologieën, zie figuur 1.2, waarin biomassa hoogwaardiger wordt ingezet zoals de productie van biobrandstoffen op basis van vergassing (hoofdstuk 3), toepassingen in de chemie (hoofdstuk 4), in de betonsector (hoofdstuk 5) of in de bouw (zie hoofdstuk 6) en het verspreiden van biochar over (landbouw)grond (hoofdstuk 9). Deze toepassingen doen nog steeds aanspraak op de beperkte beschikbaarheid van biomassa (zie hoofdstuk 13) en daarom wordt ook gekeken naar technieken of methodes die in principe geen biomassa nodig hebben zoals aanpassingen in de landbouwpraktijk ter verhoging van de koolstofinhoud van de bodem (hoofdstuk 7) en het

aanplanten van bos (hoofdstuk 8). Daarnaast zijn er technieken die geheel los staan van biomassa of fotosynthese zoals het vastleggen van CO<sub>2</sub> door verschillende toepassingen van olivijn of andere silicaten (hoofdstuk 5 en 10) en 'direct air capture' ofwel het direct uit de lucht halen van CO<sub>2</sub> door grote installaties (hoofdstuk 11).

De wetenschappelijke interesse voor negatieve emissies neemt duidelijk toe; tussen 1990 en 2016 zijn er bijna 3.000 studies verschenen over negatieve emissies, waarvan 500 in 2016. Maar het is nog steeds bescheiden in vergelijking met de 220 duizend studies die in dezelfde periode verschenen binnen het bredere veld van klimaatverandering (Minx *et al.* 2017), zeker gezien het belang dat wordt gehecht aan het gebruik van negatieve emissies in mitigatiescenario's op mondiale, regionale en nationale schaal.

In deze achtergrondstudie wordt voor het eerst op een rij gezet wat de bijdrage van Nederland zou kunnen zijn aan het bewerkstelligen van negatieve emissies. Alle voor Nederland relevante opties (inclusief BECCS) waarmee negatieve emissies gerealiseerd kunnen worden, worden behandeld gebruikmakend van de meest recente literatuur, internetbronnen en input van verschillende experts. CO<sub>2</sub>-afvang bij vergistingsinstallaties is vooralsnog niet meegenomen omdat dit een uitgebreid CO<sub>2</sub>-net zou vergen of transport van vloeibare CO<sub>2</sub> over de weg. Indien in de toekomst gekozen zou worden voor grote centrale (mest)vergisters (>1000 m<sup>3</sup>/uur), dan zou deze optie interessant kunnen worden. In dat geval zouden de kosten in de orde van €70 tot €80 per ton CO<sub>2</sub> liggen, inclusief transport.

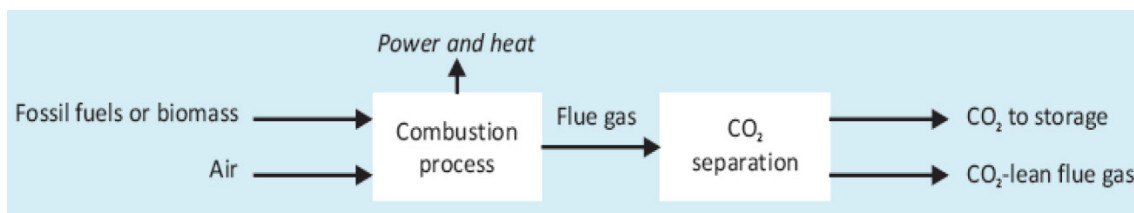


**Figuur 1.4** Negatieve emissieketens die worden behandeld in dit rapport. De groene blokken verwijzen naar opties of sectoren die negatieve emissies kunnen realiseren. De nummers verwijzen naar het hoofdstuk waarin het betreffende onderdeel wordt uitgewerkt. DAC=Direct Air Capture.

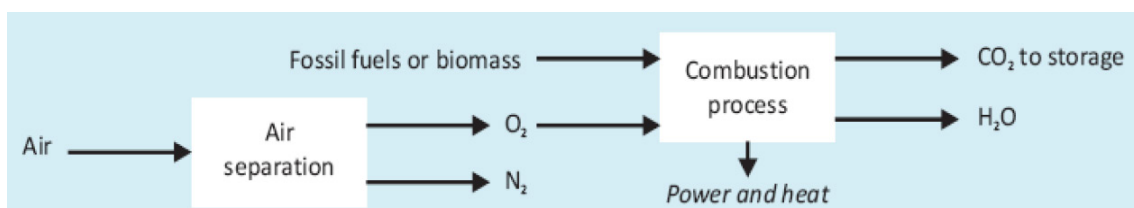
# 2 CO<sub>2</sub>-afvang

Post-combustion CO<sub>2</sub>-afvang kan worden toegepast op alle grote stationaire CO<sub>2</sub>-bronnen in de energiesector en de industrie: elektriciteitscentrales (zie paragraaf 2.1 en 2.2), de staalindustrie (2.3), en verder alle overige industrieën die hoge temperatuur warmte nodig hebben (2.4), zoals de chemie. Pre-combustion CO<sub>2</sub>-afvang wordt besproken in hoofdstuk 3. We onderscheiden hier twee typen van post-combustion CO<sub>2</sub>-afvang:

- 1) het afvangen van CO<sub>2</sub> uit de verbrandingsgassen door binding aan een (amine)oplossing gevolgd door verhitting zodat pure CO<sub>2</sub> vrijkomt (post-combustion);



- 2) verbranding met zuivere zuurstof resulterend in een mengsel van vooral CO<sub>2</sub> en water waaruit het water kan worden verdampt (oxyfuel combustion).



## Technische status

Post-combustion systemen zijn tegenwoordig beschikbaar op commerciële schaal (TRL van 8 tot 9) (ENGO 2015). Daarnaast worden vele nieuwe technieken ontwikkeld<sup>3</sup>, maar die zijn in vroege stadia van ontwikkeling (TRL 1 tot 6) en met grote onzekerheid over de uiteindelijke kosten (Kemper 2016).

In de afgelopen 10 jaar heeft oxyfuel combustion eveneens een transformatie ondergaan van laboratorium- tot pilotschaal, en is nu klaar voor grootschalige investeringsbeslissingen (TRL 7 tot 8). Pilot projecten in de USA, Australië, Spanje en Duitsland staan op het punt te worden opgeschaald naar commerciële omvang (ENGO 2015). Deze technologie staat dus aan het begin van een meer commerciële toepassing waarvan nog erg lastig is in te schatten hoe dit zich zal ontwikkelen.

## 2.1 Biomassacentrales

Kolencentrales kunnen relatief eenvoudig geschikt worden gemaakt voor het stoken op biomassa. In combinatie met CCS leidt dit tot negatieve emissies. Aangezien de vijf overgebleven kolencentrales in Nederland uiterlijk in 2030 zouden moeten sluiten, waarvan één in de komende vier jaar, lijkt dit geen vruchtbare optie (Rutte *et al.* 2017). Ook laten de studies van

<sup>3</sup> Bijvoorbeeld katalytische adsorptie met behulp van enzymen, ingekapselde oplosmiddelen, polymerische membranen, etc.



PBL zien dat kolencentrales eigenlijk niet passen in het eindbeeld van de energietransitie (Ros en Daniels 2017). Niettemin wordt door verschillende deskundigen (FluxEnergie 2015; Turkenburg 2015) en de elektriciteitsproducenten zelf (Staalduine 2018), betoogd dat ombouw een te overwegen optie zou moeten zijn, zeker in het licht van de negatieve emissie discussie en gezien het feit dat van de vijf kolencentrales er drie nog maar zeer kort operationeel zijn (zie tabel 2.1). Bovendien wil RWE de Amercentrale in Geertruidenberg openhouden tot ten minste 2040 door volledig over te schakelen op biomassa, ook als de subsidie voor bij- en meestook (voor 60 PJ biomassa per jaar waarmee 25 PJ elektriciteit zal worden geproduceerd) stopt in 2023 (Savelkouls en Lugt 2018). Wat ook een mogelijkheid is, is dat deze optie wordt gebruikt in een overgangssituatie om een duurzame stroom biomassa te garanderen, maar die uiteindelijk ingezet wordt waar geen alternatieven zijn en waar ook negatieve emissies gecreëerd kunnen worden, zoals in de brandstofproductie (zie paragraaf 3.2).

**Tabel 2.1** Enkele kenmerken van de drie nieuwste kolencentrales in Nederland.

Pro- du- cent	Locatie	Vermogen MW	Ren- de- ment	Uitstoot in 2015 MtCO <sub>2</sub>	In be- drijf	Subsi- die <sup>1</sup> M€
RWE	Geertruidenberg	600 <sup>2</sup>	42%	4,3	1994	1352
Engie	Maasvlakte	800	46%	3,2	2015	296
Uniper	Maasvlakte	1070	46%	4,7	2016	630
RWE	Eemshaven	1560	46%	8,3	2015	930
<b>Totaal</b>		<b>4030</b>		<b>20,5</b>		<b>3208</b>

<sup>1</sup>Dit betreft de maximale subsidie die is toegekend voor de bij- en meestook van biomassa in de komende acht jaar. Bron: (RVO 2017).

<sup>2</sup>En 300 MW stadsverwarming voor Breda en Tilburg.

Tot voor kort bestond het plan CCS toe te passen op de centrales van Engie en Uniper: het ROAD-project, maar dit is na een traject van 8 jaar in september 2017 gestopt doordat de financiering niet rond gekregen kon worden bij de huidige lage CO<sub>2</sub>-prijs (EZ 2017).

#### *Technisch potentieel*

Los van de hier geschetste onzekere toekomst vertegenwoordigen de vier genoemde centrales een groot potentieel aan negatieve emissies. Indien geheel overgeschakeld zou worden op biomassa, dan ontstaat een negatief emissie-potentieel van ruim 23 Mton CO<sub>2</sub> per jaar, zie tabel 2.2. Hierbij wordt uitgegaan van een gemiddeld aantal bedrijfsuren van 7000 per jaar en daarnaast dat het vermogen gelijk blijft, dat de efficiency van CO<sub>2</sub>-afvang gelijk is aan 90%, dat de energy penalty voor CCS gelijk is aan 25% en dat de stookwaarde van vaste biomassa 15,1 MJ/kg is met een emissiefactor van 109,6 kgCO<sub>2</sub>/GJ (Zijlema 2016). De energy penalty dekt CO<sub>2</sub>-afvang en compressie tot 100 bar (tabel 10 in Finkenrath (2011)).

**Tabel 2.2** Volledige overschakeling van de 3 nieuwste kolencentrales en de Amercentrale (RWE-G) op biomassa levert potentieel 23,1 Mton aan negatieve emissies.

Centrale	Input PJ	Rende- ment	Output TWh	Uitstoot MtCO <sub>2</sub>	Negatief MtCO <sub>2</sub>
RWE-G	38	40%	3,2	4,1	3,7
Engie	46	44%	4,2	5,0	4,5
Uniper	61	44%	5,6	6,7	6,0
RWE-E	89	44%	8,2	9,8	8,8
<b>Totaal</b>	<b>234</b>		<b>21,2</b>	<b>25,7</b>	<b>23,1</b>

### *Energieverbruik*

Post-combustion afvang heeft warmte nodig voor de absorptie van CO<sub>2</sub> in de amine-oplossing en voor daaropvolgende scheiding. Het comprimeren van CO<sub>2</sub> en het aandrijven van blowers die de rookgassen door de installatie stuwen kost elektriciteit. Zoals aangegeven in bovenstaande tabel wordt hier uitgegaan van een energy penalty van 25% wat overeenkomt met 2,8 GJ per ton CO<sub>2</sub>. Dit is gebaseerd op een IEA-studie van Finkenrath (2011) waarin op basis van twaalf casestudies in de EU, de VS en China een gedetailleerde schatting is gemaakt van de afname in efficiency en de kosten van CO<sub>2</sub>-afvang voor verschillende typen kolen- en gascentrales indien deze in 2020 met bestaande commerciële pre-, post- of oxyfuel- afdanginstallatie zouden worden opgeleverd. Biomassacentrales ontbreken in deze studie door gebrek aan data, maar het is bekend dat de efficiency verder omlaag gaat indien biomassa wordt (mee)gestookt doordat de calorische waarde lager is dan die van kolen. Daarom is op basis van (Schakel *et al.* 2014) in tabel 2.2 een rendement aangenomen van 44% (zonder CCS) in plaats van de oorspronkelijke 46%. De verwachting is overigens dat in de toekomst de efficiency van nieuwe elektriciteitscentrales verder omhoog zal gaan en tegelijkertijd de efficiency-penalty voor afvang en compressie zal verminderen, zie Koornneef *et al.* (2012) voor een overzicht.

### *Realistisch potentieel*

Zoals aangegeven is het plan alle kolencentrales in Nederland uiterlijk in 2030 te sluiten. Het is daarom lastig een 'realistisch potentieel' te benoemen. Zoals het er nu uitziet is dit potentieel nul, maar gezien de grote ambities voor CCS in het regeerakkoord, zou dit kunnen veranderen. De vraag in dit soort gevallen is hoe lang de afschrijvingstermijn is voor afdanginstallaties. Alleen als binnen de termijn tot 2030 - of later indien de centrales langer open zouden blijven - CCS zich terugverdient, eventueel door een subsidieregeling of op basis van een hogere CO<sub>2</sub>-prijs, dan zou het een haalbaar alternatief kunnen zijn.

### *Kosten*

Het is aannemelijk dat de kosten van CO<sub>2</sub>-opvang voor een omgebouwde of nieuwe biomassacentrale ongeveer vergelijkbaar zijn met de kosten voor een bestaande of nieuwe kolencentrale. In een recente overzichtsstudie van Rubin *et al.* (2015) wordt voor een superkritische poederkoolcentrale (SCPC) een range gegeven van \$36 tot \$53 per ton CO<sub>2</sub> met een representatieve waarde van \$46 (€40). Dit zijn de pure afdang-kosten en hierin is dus geen rekening gehouden met de efficiencyafname van de centrale. Wordt hier wel rekening mee gehouden, dan spreekt men van de CO<sub>2</sub> vermijdingskosten (avoidance costs) en ligt de range op \$45 (€40) tot \$70 (€60) per ton CO<sub>2</sub> met een representatieve waarde van \$63 (€54). Overigens wordt in de PBL-studie van Koelemeijer *et al.* (2017) gerekend met €25 per ton CO<sub>2</sub> *inclusief* transport en opslag, maar daarin is een besparing verondersteld op de aankoop van ETS-rechten van eveneens €25 per ton en wordt uitgegaan van de relatief lage kostenschattingen van het Zero Emission Platform (ZEP 2011b).

## 2.2 Biogascentrales

### *Technisch potentieel*

Nederland heeft ruim 30 grotere en kleinere gascentrales met een cumulatief vermogen van bijna 14 GW waarvan groot deel op dit moment niet operationeel is. Als alle beschikbare gascentrales in gebruik genomen zouden worden en zouden gaan draaien op biogas in combinatie met CCS, dan levert dat een enorm opvangpotentieel van bijna 35 Mton CO<sub>2</sub> per jaar. Een meer realistische schatting zou uit kunnen gaan van het CCS-potentieel voor 2030 van de huidige operationele gascentrales zoals gerapporteerd in tabel 8 van Koelemeijer *et al.* (2017). Als de betreffende centrales zouden worden gestookt op biogas dan levert dit een negatief potentieel van 6 tot 8 Mton per jaar. Dit is nog los van de mogelijke opvang van CO<sub>2</sub> in het productieproces van biogas, dat wordt behandeld in hoofdstuk 3.

Voor de huidige centrales zou 3,4 tot 4,5 miljard Nm<sup>3</sup> groen gas nodig zijn of een grotere hoeveelheid biogas of syngas met een zelfde energie-inhoud van 120 tot 160 PJ. Vergassen van biomassa kan met een efficiency van rond de 60% (Carbo *et al.* 2011) en dus zal hier 200 tot 270 PJ biomassa voor nodig zijn. De Green Deal hernieuwbaar gas (EZ en I&M 2016) spreekt over 3 miljard Nm<sup>3</sup> in 2030, maar aangezien er op dit moment pas zo'n 100 miljoen Nm<sup>3</sup> wordt geproduceerd is er nog een lange weg te gaan. Daar komt bij dat groen gas bij voorkeur gebruikt zal worden voor vervanging van fossiel aardgas waar geen alternatieven zijn voor elektrificatie. Hoge temperatuur warmte (zie paragraaf 2.4), zwaar transport en de productie van duurzame grondstoffen voor de chemie (zie hoofdstuk 4) zijn voorbeelden.

#### *Realistisch potentieel*

Volgens Ros en Daniels (2017) komen gascentrales niet of beperkt voor in de 2050-beelden. In het laatste geval zullen ze waarschijnlijk een rol spelen in het opvangen van pieken en dalen in de opwekking van duurzame energie door zon en wind. Dit zal steeds belangrijker worden naar mate de energietransitie vordert. De omvang hiervan is lastig in te schatten en de mate waarin dit afgedekt kan worden met groen gas in combinatie met CCS is zo nodig nog moeilijker, maar voor 2030 wordt het potentieel vooralsnog laag ingeschat.

#### *Energieverbruik*

De energy penalty van post-combustion afvang bij gascentrales is ongeveer 15% (Finkenrath 2011) wat overeenkomt met 1,6 GJ per ton CO<sub>2</sub>.

#### *Kosten*

De kosten voor CO<sub>2</sub>-afvang bij een gascentrale zijn beduidend hoger dan bij een kolen- of biomassacentrale. Dit komt doordat de CO<sub>2</sub>-concentratie in de verbrandingsgassen zo'n 4 keer lager ligt dan bij kolencentrales. Volgens het rapport van de IEA liggen de vermijdingskosten rond \$80 (€60) per ton (Finkenrath 2011). In de wetenschappelijke literatuur worden de kosten voor afvang geschat op \$48 (€40) tot \$111 (€95) per ton CO<sub>2</sub> en een representatieve waarde van \$74 (€64) (Rubin *et al.* 2015). De vermijdingskosten ('avoidance costs') worden geschat op \$58 (€50) tot \$121 (€100) per ton CO<sub>2</sub> met een representatieve waarde van \$87 (€75).

## 2.3 Staalindustrie

De staalindustrie in Nederland bestaat voornamelijk uit Tata Steel in IJmuiden. In de hoogovens op het terrein van Tata worden ijzererts en koolstof gemengd en zo sterk verhit (2200-2400°C) dat via een aantal chemische reacties vloeibaar ijzer ontstaat, dat wordt afgetapt en getransporteerd naar de staalfabriek voor verdere verwerking. De koolstof dient tegelijkertijd als brandstof voor de verhitting en als reductiemiddel van het ijzererts. In het proces komt hoogovengas vrij dat voor de helft uit stikstof bestaat, voor een kwart uit koolmonoxide, en de rest is CO<sub>2</sub> en een kleine fractie is waterstof.

In 2016 werd door Tata Steel ongeveer 12 Mton CO<sub>2</sub> geproduceerd. Daarvan werd ongeveer 6 Mton CO<sub>2</sub> uitgestoten op het terrein van Tata steel zelf (CBS 2017a) en de rest via het hoogovengas. Dit gas bevat 25% koolmonoxide en wordt verkocht aan NUON IJmuiden voor de opwekking van elektriciteit. De 6 Mton CO<sub>2</sub> in het hoogovengas zou afgevangen kunnen worden, maar vooralsnog investeert Tata Steel in het HIsarna-proces, een alternatief voor hoogovens waarbij 20% minder energie nodig is en 20% minder CO<sub>2</sub>-emissies vrijkomen. Bovendien vermindert de uitstoot van fijnstof, zwaveldioxide en stikstofdioxide met 60% tot 80%.

In het traditionele hoogovenproces worden ijzererts en kolen eerst voorbereid tot grote brokken (cokes) om in de hoogoven te kunnen worden gestapeld. Bij HIsarna is die voorbereidingsstap niet langer nodig: ijzererts en kolen worden in poedervorm in een cyclonreactor

geïnjecteerd om vloeibaar ijzer te maken. Door het gebruik van zuivere zuurstof produceert het HIsarna-proces nagenoeg zuivere CO<sub>2</sub> die relatief eenvoudig kan worden afgevangen en opgeslagen.

Van de 6 Mton CO<sub>2</sub> emissies op het terrein van Tata steel komt een deel uit de cokesproductie, die komen te vervallen bij het HIsarna-proces. Het overige deel heeft onder andere betrekking op ketels voor hoge temperatuurwarmte (zie volgende paragraaf).

#### *Technische status*

Eind oktober 2017 is een eerste duurproef gestart met een HIsarna-installatie voor een periode van zes maanden, met een capaciteit van ongeveer 1% van de hoogovens (60 kton per jaar). Men verwacht op zijn vroegst in 2022 te beginnen met het bouwen van een demo-plant (TLR 6-7), die eventueel gecombineerd kan worden met CCS. Deze zal een capaciteit hebben van 700 kton per jaar (Hasanbeigi *et al.* 2013). Een volgende stap kan het gebruik van getorrificeerde biomassa zijn, zodat negatieve emissies ontstaan.

Overigens is de verwachting dat op de lange termijn de productie van staal geëlektrificeerd zal worden op basis van het ULCOLYSIS of het ULCOWIN proces. Hierbij wordt, net als bij zink of aluminium, erts door middel van elektrolyse gereduceerd tot metaal. Deze technieken zijn nog in een beginstadium (TRL 4-5).

#### *Technisch potentieel*

In principe zou in het bestaande hoogovenproces kolen vervangen kunnen worden door houtskool, zoals dit bijvoorbeeld de praktijk is in Brazilië<sup>4</sup> (Sonter *et al.* 2015). De CO<sub>2</sub> uit dit hoogovengas zou dan kunnen worden afgevangen en opgeslagen waardoor negatieve emissies ontstaan. Echter, dit is geen waarschijnlijke route gezien de investeringen en plannen met het HIsarna-proces, waarbij vrijwel zuivere CO<sub>2</sub> vrijkomt. Aangezien het HIsarna-proces 20% minder energie nodig heeft zal bij volledige vervanging van de huidige productie 4,8 Mton CO<sub>2</sub> vrijkomen. Als deze CO<sub>2</sub> wordt afgevangen en opslagen *en* als wordt overgestapt op biomassa als brandstof, dan ontstaat een negatief emissiepotentieel van eveneens 4,8 Mton. Indien wordt overgeschakeld op elektrificatie, dan verdwijnt dit potentieel. Echter, het is niet onze verwachting dat dit al in 2050 op grote schaal het geval zal zijn.

#### *Realistisch potentieel*

Op basis van de huidige plannen is het realistisch te verwachten dat zo'n 15% van de staalproductie in 2030 door HIsarna kan zijn vervangen en dat er CO<sub>2</sub>-afvang kan plaatsvinden. Als we er tevens van uitgaan dat de kolen door biomassa zijn vervangen (hetgeen wat minder realistisch is) dan ontstaat een negatief potentieel van 0,7 Mton. Voor 2050 gaan we er van uit dat de volledige staalproductie is overgestapt op HIsarna, in combinatie met biomassa en CO<sub>2</sub>-afvang. Grote bottleneck zal, net als in Brazilië, het aanbod van duurzame biomassa zijn (zie hoofdstuk 13).

#### *Kosten*

De kosten van het afvangen van CO<sub>2</sub> in het HIsarna-proces zijn laag aangezien er vrijwel zuivere CO<sub>2</sub> vrijkomt. Het gaat dus vooral om de kosten voor compressie, transport en opslag, die in hoofdstuk 12 worden behandeld.

#### *Energieverbruik*

Het extra energieverbruik voor het afvangen van CO<sub>2</sub> is nihil aangezien er sprake is van een zuivere CO<sub>2</sub>-stroom die vrijkomt bij het HIsarna-proces.

---

<sup>4</sup> Overigens leidt deze praktijk tot een steeds grotere druk op natuurlijke bossen omdat het houtskoolaanbod uit plantages verre van toereikend is. Dit leidt tot hogere CO<sub>2</sub>-emissies in plaats dat er sprake is van een afname.

## 2.4 Hoge temperatuur warmte in de industrie

Een laatste belangrijk categorie voor negatieve emissies zijn de (WKK)-gasketels in de industrie, zoals de chemie, waarmee warm water en stoom (hoge temperatuur warmte) wordt geproduceerd. De analyse van Ros en Daniels (2017) laat zien dat de huidige emissies van hoge temperatuurwarmte in vele varianten van het eindbeeld van de energietransitie in 2050 negatief worden door een combinatie van biomassa en CCS.

### *Technisch potentieel*

Bij hoge temperatuur warmte is nog veel onduidelijk over de precieze potentiële omvang, invulling en implicaties van opties. Dit komt mede doordat de studies die op dit gebied beschikbaar zijn zich vaak beperken tot energiebesparing, en bovendien vaak gedateerd en/of niet toegespitst zijn op de Nederlandse situatie. [Er loopt een studie om dit beter in kaart te brengen]. In elk geval zijn voldoende schaalgrootte en continuïteit van de processen sterk bepalend voor het potentieel. De inschatting van Koelemeijer *et al.* (2017) op basis van modelresultaten is dat het potentieel van CCS bij processen waarvoor in 2050 geen CO<sub>2</sub>-vrij alternatief beschikbaar is, ligt tussen 7 en 14 Mton CO<sub>2</sub> per jaar.

Overgang van gas naar biomassa vereist vervanging van de hele ketel en bijbehorende voorzieningen, terwijl toepassing van CCS – afhankelijk van de omstandigheden – ook bij bestaande ketels kan (retrofit). Als je uitgaat van toepassing op natuurlijke momenten, is het technisch potentieel voor biomassaketels – en dus negatieve emissies – lager dan dat van CCS. Koelemeijer *et al.* (2017) komen tot een technisch potentieel in 2030 dat aan de onderkant van bovengenoemde range ligt: 7,4 Mton.

### *Realistisch potentieel*

De voornaamste beperking op het potentieel zal bestaan uit de snelheid waarmee biomassaketels en bijbehorende voorzieningen geplaatst en ingepast kunnen worden. Terecht wordt door Koelemeijer *et al.* (2017) opgemerkt dat ook veel afhangt van de prijs van duurzame biomassa, maar dit geldt voor alle opties die afhankelijk zijn van de beschikbaarheid van duurzame biomassa (zie hoofdstuk 13). Hier gaan we er van uit dat het realistisch is te veronderstellen dat in 2050 de genoemde 7,4 Mton gerealiseerd kan worden en in 2030 ongeveer 1/3 deel hiervan. Nader onderzoek is nodig om te bepalen in hoeverre dit ook echt haalbaar is.

### *Kosten*

Volgens Koelemeijer *et al.* (2017) liggen de kosten voor CO<sub>2</sub>-afvang installaties bij de productie van hoge temperatuur warmte tussen de €60 en €110 per ton CO<sub>2</sub>.

## 2.5 Afvalverbrandingsinstallaties (AVI's)

Er zijn in Nederland 12 afvalverbrandingsinstallaties (AVI's), of ook wel afvalenergiecentrales (AEC's) genoemd aangezien ze allemaal elektriciteit en warmte produceren (Klink en Vusse 2015). Gezamenlijk hebben ze een capaciteit van 7,7 Mton afval, waarvan in 2013 20% (1,6 Mton) werd gevuld met geïmporteerd afval dat voor driekwart uit Groot-Brittannië kwam. De afvalmarkt is behoorlijk in beweging. In de analyse van Klink en Vusse (2015) in opdracht van het ministerie van I&M worden een viertal scenario's tot 2022 uitgewerkt. Afhankelijk van het marktaandeel in de UK en het succes van het VANG-beleid zal dan de hoeveelheid afval liggen tussen 2,8 en 7,7 Mton. Twee scenario's gaan er van uit dat de volledige capaciteit van 7,7 Mton benut zal blijven worden door aan te vullen met geïmporteerd afval. De ondergrens van 2,8 Mton wordt alleen bereikt als de import stopt en het VANG-beleid uiterst succesvol blijkt te zijn.

### *Technisch potentieel*

Aangezien een groot deel van het afval van biogene oorsprong is, leidt het toepassen van CCS op AVI's direct tot negatieve emissies. Iedere ton afval produceert ongeveer 1 ton CO<sub>2</sub> bij verbranding, waarvan 70% van biogene oorsprong (Joosen en Jager 2003). Bij de genoemde hoeveelheid van 7,7 Mton en een afvangefficiëncy van 90% is er dus een biogeen negatief potentieel van 4,9 Mton. Het niet-biogene deel, dat voornamelijk uit kunststoffen bestaat, leidt tot negatieve emissies indien deze kunststoffen zijn geproduceerd uit biomassa. Om dubbeltelling te voorkomen wordt dit deel toegerekend aan de chemie (zie hoofdstuk 4).

### *Realistisch potentieel*

In het regeerakkoord wordt een 'indicatief' doel gesteld van 2 Mton CO<sub>2</sub>-afvang bij AVI's in 2030 (Rutte *et al.* 2017). Dit is een ambitieus doel, maar als we er van uitgaan dat dit wordt gehaald, dan leidt dit tot 1,4 Mton aan negatieve emissies. Voor 2050 is het erg lastig een inschatting te maken, maar als we er van uitgaan dat de verbrandingscapaciteit gelijk blijft, dat het biogene deel niet afneemt en dat er maximaal CCS wordt toegepast om te kunnen voldoen aan de 95%-doelstelling dan komt het potentieel op 4,9 Mton uitgaande van een afvangcapaciteit van 90%.

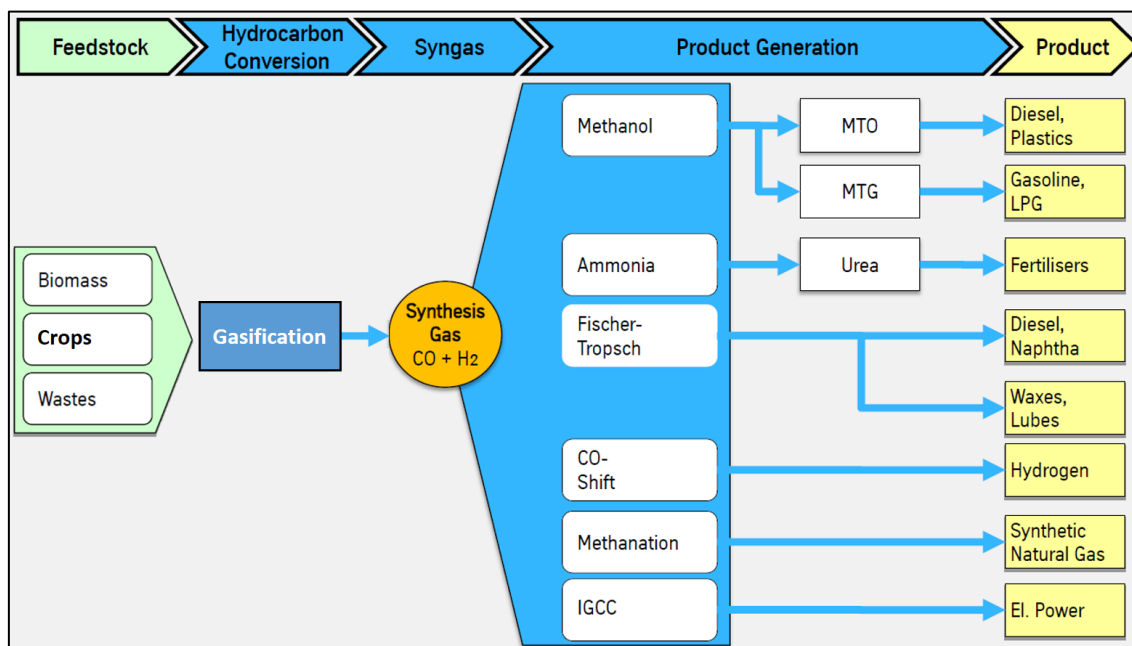
### *Kosten*

Volgens Ros en Daniels (2017) bedragen de kosten voor CO<sub>2</sub>-afvang bij AVI's ongeveer €60 per ton voor grote installaties tot €80 per ton voor de kleinere.

# 3 Vergassing

Vergassing is een technologie voor de thermische omzetting van vaste droge biomassa in waterstof, koolstofhoudende energiedragers en grondstoffen voor de chemische industrie. Het doel van vergassen van biomassa is de vervaardiging van een productgas of gereinigd synthegas dat bestaat uit een mengsel van koolstofmonoxide (CO) en waterstof (H<sub>2</sub>), en daarnaast CO<sub>2</sub> en afhankelijk van het type vergassing een hoeveelheid methaan (CH<sub>4</sub>). Het synthegas kan gebruikt worden in verschillende toepassingen, zie figuur 3.1. Bij veel toepassingen van het synthegas wordt de aanwezige CO<sub>2</sub> afgevangen. Deze afvang maakt dan deel uit van de toepassing en wordt pre-combustion CO<sub>2</sub>-afvang genoemd aangezien het gas wordt verwijderd voordat verbranding (of toepassing) plaatsvindt. Naast het gas worden ook korte keten koolwaterstoffen en vaste bijproducten zoals as en houtskool (char/cokes) geproduceerd. Input voor de vergassing zijn houtchips of pellets of biomassa dat een voorbehandeling heeft ondergaan zoals getorrificeerde biomassa of pyrolyse olie (zie hoofdstuk 9).

De meest eenvoudige toepassing is de verbranding van het gas in een gasturbine, gasmotor of ketel voor de productie van elektriciteit en warmte. Bij deze directe energietoepassingen zijn de eisen voor reiniging het minst streng. De grote aantrekkingskracht voor vergassing zit hem echter in de vele toepassingen waarbij biobrandstoffen worden geproduceerd of grondstoffen voor de chemie (zie hoofdstuk 4). Voor deze toepassingen zijn de eisen voor reiniging veel strenger.



**Figuur 3.1** Vergassing van biomassa tot synthegas kan gebruikt worden in verschillende toepassingen. Afbeelding afgeleid van (Radtke en Wulcko 2015).

Er zijn vele typen vergassers op de markt, zie (Hrbek 2016) voor een overzicht. Daarnaast wordt Superkritisch Vergassen (SCW) door verschillende partijen, waaronder Groen Gas Nederland, als een veelbelovende optie gezien (zie tekstbox 3.1). De samenstelling van het productgas en de hoeveelheid bijproducten hangt af van het type vergasser en het soort biomassa. Afhankelijk van de beoogde toepassing kan de samenstelling van het gasmengsel worden veranderd en in de beoogde richting worden gestuurd.

Het ruwe productgas bevat verontreinigingen (behalve in het geval van SCW): stof, teer (mengsel van organische stoffen), zwavelgassen (H<sub>2</sub>S en Carbonylsulfide COS), stikstofverbindingen (o.a. NH<sub>3</sub>) en alkalische (natrium en kalium) en chloorverbindingen. Voor de verdere

verwerking van het gasmengsel moeten deze verbindingen uit het productgas worden verwijderd. De soort toepassing bepaalt het vereiste niveau van reiniging en daarmee ook in belangrijke mate de kosten van een toepassing. Teerverwijdering is in nagenoeg alle toepassingen van vergassing nodig.

**Tekstbox 3.1 Superkritisch vergassen.** Superkritisch (Water) Vergassen maakt gebruik van de superkritische fase van water waarbij droge of natte biomassa of andere koolwaterstoffen uiteenvallen tot syngas. In de superkritische fase, die optreedt bij hoge druk (221 bar) en temperatuur (375 °C) verdwijnt het onderscheid tussen de gasfase en de vloeistoffase en veranderen de eigenschappen van het water fundamenteel. In gewoon water lossen organische stoffen niet op, maar superkritisch water is juist een oplosmiddel voor organische componenten en reageert zelf mee en is tevens een katalysator voor de conversiereacties. Hierdoor ontstaat een snelle en vrijwel volledige omzetting van de organische bestanddelen naar syngas. Omgekeerd lossen mineralen en zouten makkelijk op in gewoon water, maar kristalliseren en slaan neer in superkritisch water. Hierdoor wordt het mogelijk om nutriënten als ammonium en fosfaat uit de biomassa terug te winnen. In veel bestaande bio-energie processen moet eerst het watergedeelte van de grondstoffen verwijderd worden maar deze technologie maakt juist gebruik van water. Hierdoor is de technologie bij uitstek geschikt voor natte biomassa zoals rioolslib of mest.

#### *Technologische status*

Het afgelopen decennium is er veel onderzoek gedaan naar Superkritisch (Water) vergassen (Lachos-Perez *et al.* 2017). Momenteel bouwt SCW Systems een eerste demonstratiefabriek van een industriële superkritische vergasser in Alkmaar (TRL 6). De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) werken met een aantal partners aan de realisatie van een demonstratie-installatie voor het superkritisch vergassen van zuiveringsslib.

Zoals aangegeven kent superkritische vergassing vele voordelen, maar de verdere ontwikkeling van de technologie en toepassing op grote schaal zal nog de nodige tijd vergen. De belangrijkste technologische belemmeringen komen voort uit de extreme omstandigheden waaronder het proces plaatsvindt. Dit vraagt veel van de materialen die gebruikt kunnen worden waardoor de kosten vooralsnog hoog zijn (Wen *et al.* 2009).

Er zijn verschillende toepassingen van het synthesegas, waarbij zuivere CO<sub>2</sub>-gasstromen ontstaan die afgevangen kunnen worden:

1. de productie van synthetische biodiesel en synthetische bio-kerosine door middel van Fischer Tropsch (FT) synthese;
2. de productie van bio-methanol dat als grondstof kan dienen voor de chemie (zie hoofdstuk 4) of als biobrandstof bijgemengd kan worden in benzine. Ook kan bio-methanol opgevoerd worden tot bioDME; een vloeibaar gemaakt gas dat een schoon alternatief is voor diesel, zie ook paragraaf 4.3. Het proces van methanolsynthese uit synthesegas is vergelijkbaar met het FT-proces;
3. de productie van synthetisch aardgas of bio-methaan (CH<sub>4</sub>) door middel van methanisering (methaan-synthese), bijvoorbeeld op basis van de MILENA-technologie zoals ontwikkeld in Nederland door ECN (Carbo *et al.* 2011).
4. de productie van waterstof (H<sub>2</sub>).

Bij de eerste drie toepassingen is het doel om zoveel mogelijk koolstofatomen uit de biomassa om te zetten in een koolstofhoudende energiedrager. Bij de vierde toepassing is het doel om zoveel mogelijk waterstof te verkrijgen waarbij de koolstof in de biomassa vrijkomt als CO<sub>2</sub> die dan opgeslagen zou kunnen worden. Aangezien hiermee de hoogwaardige koolwaterstoffen uit de biomassa verloren gaan, lijkt dit alleen dan een logische optie als er een hoge waarde wordt toegekend aan het opslaan van CO<sub>2</sub>.



Het is ook denkbaar dat de omzetting van C-atomen uit de biomassa in koolwaterstoffen wordt geoptimaliseerd door toevoeging aan het productgas van de vergassing van waterstof (bijvoorbeeld uit power-to-H<sub>2</sub>). Optimalisatie van de productie van groene brandstoffen moet dan worden afgewogen tegen de realisatie van negatieve emissies.

Omdat het noodzakelijk is dat bij bovenstaande toepassingen CO<sub>2</sub> uit het productgas wordt verwijderd - m.a.w. het is onderdeel van het productieproces - zijn er geen additionele kosten voor het realiseren van negatieve emissies, behalve die voor compressie, transport en opslag zoals die worden besproken in hoofdstuk 12.

Het potentieel van de hoeveelheid afvangbare CO<sub>2</sub> van de vergassingsoptie kan zeer groot worden, maar is afhankelijk van verdere ontwikkeling van bovenstaande toepassingen en de mate waarin die onderdeel zullen zijn van de energietransitie. Vooralsnog gaan de ontwikkelingen traag en komen toepassingen slechts moeizaam van de grond (RVO 2015b). Omdat het FT-syntheseprocess een sleuteltechnologie is voor de productie van diesel uit biomassa, wordt het hier nader uitgewerkt.

#### *Fisher Tropsch synthese*

De technologie van vergassing gevolgd door FT-synthese van brandstoffen wordt op grote schaal toegepast in de wereld maar op dit moment uitsluitend met steenkool en aardgas als grondstof, aangeduid als respectievelijk Coal-To-Liquids (CTL) en Gas-To-Liquids (GTL). Bij inzet van biomassa is dit Biomass-To-Liquids (BTL). De route op basis van droge biomassa lijkt sterk op de fossiele routes maar kent extra uitdagingen omdat biomassa een grondstof is met een complexere chemische samenstelling. Aangezien het een tamelijk nieuwe technologie betreft is verdere optimalisatie van het proces in de toekomst waarschijnlijk en hebben de hieronder gegeven kengetallen een indicatief karakter.

In het FT-proces reageren waterstof (H<sub>2</sub>) en koolmonoxide (CO) op een katalysator tot een mengsel van langere koolwaterstofketens (C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>). Bij de conditioneringsstap van het productgas (de zogeheten water-gas-shift reactie) wordt CO onder toevoeging van water omgezet in CO<sub>2</sub> en waterstof. Om deze reactie te laten plaatsvinden dient CO<sub>2</sub> uit het gasmengsel te worden verwijderd die na een relatief eenvoudige bewerking (compressie en droging) beschikbaar is voor transport en opslag (zie hoofdstuk 12).

Gegeven de efficiency van 40% wordt er per PJ geproduceerde biobrandstof circa 140 kton CO<sub>2</sub> verwijderd. Verwijdering van 1 Mton CO<sub>2</sub> gaat dus samen met een productie van 7 PJ aan biobrandstoffen waarvoor 17 PJ droge biomassa nodig is.

Naast de zuivere CO<sub>2</sub>-gastroom die vrijkomt bij de conditionering van het productgas komt ongeveer 5% van de koolstof uit de feedstock vrij als CO<sub>2</sub> bij de verbranding van de restgassen (tail gas) uit het FT-syntheseprocess. Deze restgassen worden gebruikt voor de opwekking van elektriciteit in de fabriek. Met aanvullende post-combustion CCS-technieken zou ook deze CO<sub>2</sub> kunnen worden afgevangen (zie hoofdstuk 4). Een kleine fractie van de koolstof eindigt in de houtskool wat een restproduct is van de vergassing.

Zoals aangegeven is het technisch potentieel aan CO<sub>2</sub> die in Nederland afgevangen kan worden met de productie van vloeibare FT-biobrandstoffen onzeker. Deze ontwikkeling hangt sterk af van de beschikbaarheid van duurzaam geproduceerde biomassa (zie hoofdstuk 13) en de keuzes die worden gemaakt in het verloop van de energietransitie.

#### *Technologische status FT-biobrandstoffen*

De technologie van vergassing gevolgd door FT-synthese bevindt zich in de demofase van ontwikkeling (TRL 5 tot 6). Veel technologische barrières zoals het reinigen van het productgas zijn in het afgelopen decennium opgelost en er zijn enkele R&D en demo-fabrieken operationeel in de wereld. Er is een kleine FT-proeffabriek in aanbouw in Frankrijk waarvan het testprogramma start in 2017 en zal drie jaar duren. De Chinese firma 'Sunshine Kaidi New Energy Group' is van plan een FT-demofabriek te bouwen in Finland gebaseerd op houtresten. De beoogde capaciteit is 0,6 miljoen liter diesel per jaar en een kleinere hoeveelheid nafta. Beide fabrieken zijn klein in vergelijking met een karakteristieke commerciële FT-fabriek van 50 miljoen liter zoals beschreven in de literatuur (zie tabel 3.1).

**Tabel 3.1** Karakteristieken van een typische Fischer Tropsch biobrandstoffabriek met hout als feedstock (Atsonios *et al.* 2015).

Fabrieksgrootte in termen van biomassa-input	5 PJ
Fabrieksgrootte in termen van biobrandstofoutput	± 33 Mliter of 1,2 PJ diesel ± 22 Mliter of 0,8 PJ benzine
Efficiency <sup>1</sup>	40%
Percentage van koolstof dat terecht komt in de brandstof	30%
Percentage van koolstof dat terecht komt in de CO <sub>2</sub> stroom	50%
Hoeveelheid zuivere CO <sub>2</sub>	285 kton
Investering in de conditioneringsfase van het ruwe syngas	€200 miljoen (prijzen 2011)
Potentiele afname kosten bij een fabrieksgrootte van 10 PJ	20%
Kosten van biobrandstofproductie bij houtprijs van €60/ton	\$0,90 per liter

<sup>1</sup>Een FT-fabriek is elektrisch en thermisch onafhankelijk en produceert een surplus aan warmte, bijvoorbeeld te gebruiken voor stadsverwarming. De gegeven energie-efficiency geldt voor brandstofproductie en is exclusief dit surplus aan warmte.

De Fischer Tropsch BTL-technologie vindt dus nog geen brede toepassing en de uitrol van grotere fabrieken stagneert. De commercialisering wordt met name bemoeilijkt door het prijsverschil met fossiele brandstoffen en de grote investeringen die nodig zijn om een karakteristieke commerciële FT-fabriek te bouwen en de daarbij horende risico's voor investeerders. Ook is er onduidelijkheid over de Europese regelgeving met betrekking tot geavanceerde biobrandstoffen. Rond 2013/2014 zijn er veel grote en veelbelovende plannen voor BTL-fabrieken ontwikkeld in Europa, maar ondanks de toegezegde EU-subsidies, zijn al deze projecten gestopt of bevroren. Stimulering van de FT-technologie middels regelgeving en subsidie is cruciaal om de FT-technologie in het komende decennium in Europa in enige mate verder te ontwikkelen en uit te rollen (ETIP 2017).

#### *Kosten FT-biobrandstoffen*

De productiekosten van Fischer Tropsch biobrandstoffen zijn circa 90 dollarcent per liter onder de uitgangspunten zoals gegeven in tabel 3.1. De meerkosten van FT-biobrandstoffen ten opzichte van fossiel diesel of benzine bedragen circa 30 dollarcent per liter diesequivalent. De productiekosten worden gedomineerd door kapitaalskosten (investeringen) en kosten van de biomassa. Onderhouds- en beheerskosten zijn eveneens relevant maar duidelijk lager. Een kostenreductie is mogelijk met goedkopere biomassa en door opschaling van het proces. Voor vergassingstechnologie geldt dat grote fabrieken beduidend lagere kapitaalskosten hebben per eenheid product dan kleinere fabrieken.

#### *Technisch potentieel*

Het brandstofverbruik (benzine en diesel) van de sector transport inclusief de bunkers voor luchtvaart en zeescheepvaart was in 2015 ongeveer gelijk aan 790 PJ. Als het met elektrificatie en waterstof minder voortvarend verloopt dan eigenlijk nodig is voor de energietransitie, dan zal in 2050 nog een aanzienlijke vraag naar groene brandstoffen bestaan, zie (Ros 2017) en tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Brandstofgebruik voor verkeer en vervoer in Nederland in 2050 als elektrificatie en waterstofproductie minder voortvarend verloopt (Ros 2017).

	<b>Energiegebruik 2015</b> <i>PJ</i>	<b>Indicatie vraag naar vloeibare brandstoffen in 2050</b> <i>PJ</i>
Wegverkeer: personenauto's en licht transport	314	85-135
Wegverkeer: zwaar transport	80	70-90
Overig verkeer en mobiele werktuigen	46	55-60
NI-aandeel lucht- en scheepvaart obv NL-aandeel in mondiaal BNP <sup>a</sup>	~260	~300
<b>Totaal</b>	<b>~790</b>	<b>500-600</b>

<sup>a</sup> In de huidige situatie wordt slechts een deel van lucht- en scheepvaart bij nationale emissies meegeteld, voor Nederland overeenkomend met een energiegebruik van 110 PJ

Als het in de tabel gegeven indicatieve brandstoffengebruik in 2050 op uit biomassa zou worden geproduceerd met rendementen voor de omzetting van biomassa naar brandstof die dan rond de 50% zouden liggen, dan betekent dat een biomassavraag van 1000 tot 1200 PJ. Daarin is dan nog *geen* rekening gehouden met een vraag naar biomassa voor bijvoorbeeld groen gas. Het negatieve emissiepotentieel zou dan, bij de aanname dat ongeveer 40% van de koolstof in de biomassa terecht zou komen in de zuivere CO<sub>2</sub>-stroom, uitkomen op 45 tot 55 Mton CO<sub>2</sub>. In de luchtvaartsector is er wereldwijd veel belangstelling voor de inzet van geavanceerde biobrandstoffen. Decarbonisatie van deze snel groeiende sector is, in elk geval voor de lange afstandsvluchten, uitsluitend mogelijk met de inzet van geavanceerde biobrandstoffen. Het voordeel van deze technologie is dat niet alleen de fossiele kerosine kan worden vervangen door een duurzaam alternatief maar dat er daarnaast ook negatieve emissies kunnen worden gerealiseerd. Voor Nederland is het essentieel om tijdig te onderzoeken of de biomassa die nu grootschalig wordt geïmporteerd voor de meestook in kolencentrales, na 2023 in stand gehouden kan worden en vervolgens kan worden benut voor de verdere ontwikkeling en uitrol van innovatieve biomassatoepassingen.

#### *Realistisch potentieel FT-biobrandstoffen in Nederland*

Welk deel van het technisch potentieel als realistisch kan worden gezien, is lastig in te schatten en sterk afhankelijk van de vormgeving van de energietransitie en de beschikbaarheid van biomassa. In dit rapport gaan we uit van het beleidsvoorstel van de Europese Commissie van een minimum aandeel geavanceerde biobrandstoffen van 0,5% vanaf 1 januari 2021, oplopend naar minimaal 3,6% in 2030 (EC 2017). Als Nederland deze doelstelling wil halen in 2030 dan moeten 16 PJ geavanceerde biobrandstoffen worden geproduceerd waarvoor bij een efficiëntie van de huidige 40% ongeveer 40 PJ biomassa nodig is. Veronderstellen we dat deze vraag wordt ingevuld met de productie in Nederland van FT-biobrandstoffen dan zou hiermee circa 2,3 Mton CO<sub>2</sub> kunnen worden afgevangen.

# 4 Chemie

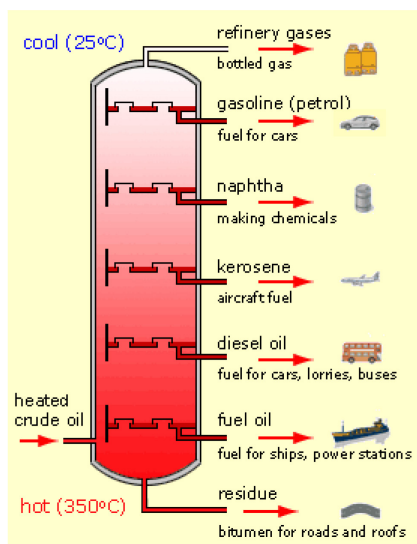
De chemische industrie in Nederland is omvangrijk. In 2015 waren er ongeveer 800 bedrijven actief met een totale netto omzet van €47 miljard en 56.000 banen, waarvan 12.000 in de farmacie. Ongeveer 80% van de in Nederland vervaardigde chemieproducten wordt geëxporteerd (zie tabel 4.1), waarvan weer ruim 80% gaat naar landen binnen Europa. De export bedroeg in 2015 circa €78 miljard (incl. doorvoer); 18% van de totale goederenexport van Nederland. Daarnaast genereert de rubber- en kunststof verwerkende industrie met 35.000 werknemers en 450 bedrijven een omzet van €8,8 miljard, waarvan 65% wordt geëxporteerd. Nederland produceert jaarlijks ongeveer 6,6 Mton aan grondstoffen voor de kunststofverwerkende industrie, die circa 5 Mton aan koolstofverbindingen bevatten of 18 Mton indien uitgedrukt in termen van CO<sub>2</sub>. Driekwart van de in de EU geproduceerde kunststoffen worden gebruikt voor vier toepassingen: verpakkingsmateriaal (40%), de bouw (20%), de auto-industrie (8%) en de elektronica (6%).

**Tabel 4.1** Grondstoffen voor en productie en gebruik van kunststoffen in Nederland (2014).

	PJ	Mton	C-gehalte <sup>1</sup> Mton CO <sub>2</sub>	Hergebruik Mton
<b>Grondstoffen</b>				
Aardolie	172	3,9	12,6	
LPG	159	3,5	10,6	
Aardgascondensaat	116	2,6	7,3	
Overig (o.a. aardgas)	50	1,1	2,7	
<b>Totaal</b>	<b>497</b>	<b>11,1</b>	<b>33,2</b>	
<b>Kunststoffen</b>				
Productie		6,6	18	
Import		3,3	8,3	
Export		-8,0	21,8	
Verbruik in NL		1,9	5,2	0,9

<sup>1</sup>Uitgaande van 2,5 ton CO<sub>2</sub> per ton kunststof

De grondstoffen voor de kunststofsector komen voornamelijk van de petrochemische industrie (zie figuur 4.1). Kunststoffen worden vervaardigd uit polymeren (lange ketens van koolstofatomen met daaraan bijvoorbeeld waterstof- (H), zuurstof- (O), stikstof- (N) en chloor- (Cl) atomen. Als grondstof voor de chemische basisindustrie dienen vooral nafta uit aardolie, LPG, aardgascondensaat en aardgas (zie tabel 4.1). Het non-energetisch gebruik is circa 70% van het gebruik van fossiele brandstoffen. Daarnaast worden nog grondstoffen afkomstig van de basischemie gebruikt zoals ammoniak.



**Figuur 4.1** Nafta uit aardolie vormt de belangrijkste grondstof voor de chemie.

Door toepassing van biomassa als grondstof in de chemie kunnen negatieve emissies worden gerealiseerd doordat de biomassa wordt opgeslagen in de geproduceerde kunststoffen en door het toepassen van CCS op de AVI's of door duurzame stort.

In dit hoofdstuk worden de mogelijkheden bekeken voor het gebruik van biomassa in de productie van de belangrijkste bulkchemicaliën die aan de basis staan van vele toepassingen en producten, zie tabel 4.2. Er zijn zeven bulkchemicaliën die samen ruim 80% van de Europese productie omvatten: polyetheen of PE, polypropyleen of PP, polyvinylchloride of PVC, polyurethaan of PUR, polystyreen of PS en polyethyleentereftalaat of PET, en polyamide of PA.

**Tabel 4.2** Enkele eigenschappen en toepassingen van de zeven meest voorkomende bulkchemicaliën en van een aantal biogene alternatieven van belangrijke platformchemicaliën.

Stofnaam	Afkorting	Chemische Formule	Aandeel in productie	Prijs in € per kg	Molmassa	Fractie C	CO2 inhoud (kg/kg)	Voorbeeld toepassing
<b>Grondstof uit aardolie</b>								
polyetheen	PE	CH <sub>2</sub>	28%	1,20	14	0,86	3,14	Plastic zakjes
polypropyleen	PP	CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH	19%	1,35	42	0,86	3,14	Statiegelflessen
polyvinylchloride	PVC	CH <sub>2</sub> CHCl	10%	0,90	63	0,38	1,41	PVC riool pijpen
polyethyleentereftalaat	PET/PETP	(CO)(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> )(CO <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O)	7%	2,50	192	0,63	2,29	Waterfles
polyurethaan	PU/PUR <sup>1)</sup>		7%		294	0,69	2,52	Kunstleer, schuim
styreen-ethyleen-butyleen-styreen	SEBS <sup>2)</sup>	PS[CH <sub>2</sub> ] <sub>n</sub> [C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> ] <sub>m</sub> -PS		1,50	292	0,90	3,32	Chloorvrij 'PVC'
(expanded) polystyreen	EPS/PS	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHCH <sub>2</sub>	7%	1,70	352	0,92	3,38	Piepschuim met CO <sub>2</sub>
nylon 6, nylon 6.6	PA6, PA6.6	(CO)(C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> )(CO)(C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> )(NH)			616	0,70	2,58	Kleding, tapijt, cosmetica
<b>Natuurlijke alternatieven</b>								
polymelkzuur	melkzuur	CH <sub>3</sub> CHCOO	6%	0,40	72	0,50	1,83	Piepschuim
methanol		CH <sub>3</sub> OH			32	0,38	1,39	Azijnzuur, formaldehyde
ethanol	alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH			46	0,52	1,91	Etheen
cellulose	pulp	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>			162	0,44	1,61	Papier, katoen (rayon)
c1,4polyisoprene	rubber	CH <sub>2</sub> CHCCH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub>			68	0,88	3,24	Vervanging rubber

<sup>1)</sup> Voor PUR is het gemiddelde van een 4-tal producten genomen (C<sub>9</sub>H<sub>6</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> of C<sub>15</sub>H<sub>10</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> met C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O of C<sub>8</sub>H<sub>9</sub>O)

<sup>2)</sup> ethyleen (CH<sub>2</sub>) en butyleen (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>) kunnen in verschillende verhoudingen met polystyreen worden gemengd, hier is gebruikt 2 x styreen + 2 x ethyleen + 1 x butyleen

Het vervangen van aardolie door biomassa als feedstock is een ingrijpend proces. Het vergt soms vergaande aanpassingen in het huidige productieproces of het bouwen van geheel nieuwe fabrieken en installaties. Dit kost tijd en geld. Figuur 4.2 geeft een overzicht van een

aantal mogelijke productieroutes voor boven genoemde bulkchemicaliën op basis van biomassa als feedstock. Binnen deze routes worden chemicaliën geproduceerd (zoals melkzuur of tereftaalzuur), die we hier aanduiden met de term 'platformchemicaliën'. Om de petrochemische bulkchemicaliën te vervangen door op biomassa gebaseerde alternatieven zijn er in principe drie verschillende routes denkbaar:

1. Omzetting van biomassa naar *bestaande* platformchemicaliën zoals etheen, glycerol, ethanol (dat ook gebruikt kan worden als brandstof) of onverzadigde vetzuren zoals adipinezuur, glucaarzuur of azijnzuur.
2. Omzetting naar *nieuwe* platform- of bulkchemicaliën met dezelfde eigenschappen als bestaande chemicaliën (zoals melkzuur ter vervanging van styreen) of met met geheel nieuwe eigenschappen zoals furaandicarbonzuur (FDA) waarvan biologisch afbreekbare flessen kunnen worden gemaakt.
3. Vergassing van biomassa naar synthesegas, gevolgd door Fischer-Tropsch synthese van basiskoolwaterstoffen (zie ook paragraaf 3.2).

Nog niet genoemd is dat CO<sub>2</sub> en C ook als grondstof dienen voor allerlei productieprocessen in de chemie, zoals bijvoorbeeld bij de kunstmestproductie (CO<sub>2</sub>) en de productie van koolstofanodes voor de aluminiumsector. Als die CO<sub>2</sub> en C uit biomassa worden geproduceerd is ook hier een mogelijke bron van negatieve emissies.

#### *Technisch potentieel*

Voor het schatten van het technische potentieel van negatieve emissies in de chemiesector kijken we eerst naar het technisch potentieel van het gebruik van biomassa als feedstock. De jaarlijkse productie van de zeven besproken bulkchemicaliën bevat circa 14,4 Mton aan C-atomen, uitgedrukt in CO<sub>2</sub>. Dit is bijna evenveel als de 15,5 Mton directe emissies van CO<sub>2</sub> door energiegebruik, die met biomassa en CCS een additioneel negatief emissiepotentieel kunnen opleveren (zie hoofdstuk 2.4). Indien de feedstock volledig vervangen wordt door biomassa en als er in de afvalfase sprake is van CCS bij de AVI's of eventueel van stort, dan zou het potentieel aan negatieve emissies gelijk zijn aan 13 Mton CO<sub>2</sub> (90% van 14,4), mits de emissies in de keten voor de overschakeling op biomassa (door transport, landbouw-emissies, etc.) worden vermeden en/of geen fossiel CO<sub>2</sub> uitstoten. Zoals aangegeven in paragraaf 2.5 stoten de Nederlandse AVI's per jaar 7,7 Mton CO<sub>2</sub> uit, waarvan 2,3 Mton niet-biogeen is en voornamelijk bestaat uit kunststoffen. Daarmee kan dus maximaal 2,1 Mton aan Nederland worden toegekend (90% van 2,3 Mton), tenzij een andere verrekening wordt toegepast voor chemische producten die in het buitenland worden verbrand of gestort. Daarnaast is het de vraag in hoeverre in het kader van het streven naar een meer circulaire economie de input van grondstoffen zal afnemen; immers in een circulaire economie worden de C-moleculen van alle producten maximaal hergebruikt en wordt er minimaal afval verbrand of gestort. Anderzijds zouden kunststoffen voor sommige toepassingen staal kunnen vervangen. De combinatie van deze factoren zou het technisch potentieel positief of negatief kunnen beïnvloeden, maar vooralsnog laten we dit hier buiten beschouwing. Het technisch potentieel voor de vervanging van fossiel CO<sub>2</sub> en C als grondstof door een bio-geen alternatief levert een potentieel van ongeveer 3 Mton (zie paragraaf 4.4 en 4.5).

#### *Realistisch potentieel*

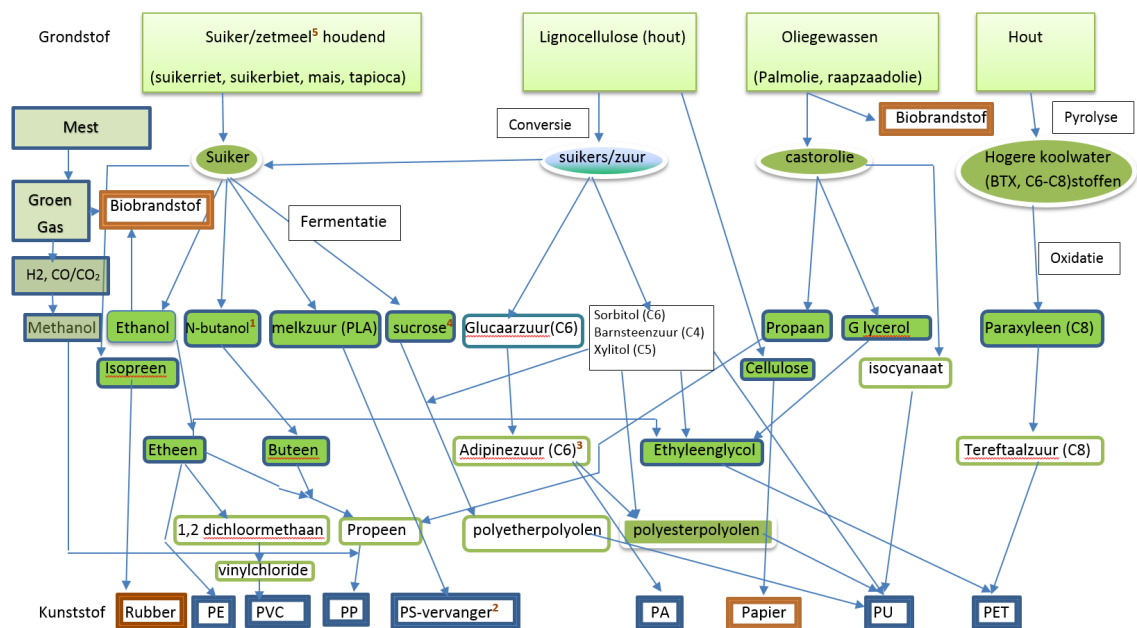
De chemische sector wil in 2030 15% van de feedstock vervangen door biomassa (Krebbekx *et al.* 2013). Dit levert een negatief emissiepotentieel van 1,9 Mton waarvan ongeveer 0,6 Mton afgevangen kan worden bij de Nederlandse AVI's, namelijk het niet-biogene deel van de genoemde 2 Mton in paragraaf 2.5. In de scenariostudie 'European Chemistry for growth' komt men in de twee meest relevante scenario's - 'Differentiated Global Action' en 'Level Playing Field' - uit op ongeveer 35% van de feedstock die vervangen zal zijn door biomassa in 2050, zie figuur 7-11 in Cefic (2013). Uitgaande van de huidige omvang van de chemie-sector zou dat neerkomen op een negatief emissiepotentieel van 4,5 Mton CO<sub>2</sub>, waarvan

maximaal 2,1 Mton in Nederland afgevangen zou kunnen worden in de AVI's. Overigens geldt dit alleen indien sprake is van een productieproces met dezelfde output, bijvoorbeeld wanneer etheen op basis van aardolie wordt vervangen door etheen op basis van biomassa, zie paragraaf 4.1. Als fossiele chemicaliën worden vervangen door een ander chemische stof op basis van biomassa, bijvoorbeeld styreen door PLA (zie paragraaf 4.2), dan kan het negatieve emissiepotentieel kleiner of groter worden, afhankelijk van de verhoudingen in koolstofinhoud (zie tabel 4.2).

Het realistische potentieel voor de vervanging van fossiel CO<sub>2</sub> en C als grondstof door biomassa is lastig in te schatten, maar in principe zijn de opties zoals benoemd in paragraaf 4.4 en 4.5 naar onze inschatting niet heel complex. Daarom zijn we uitgegaan van een vervanging van 25% in 2030 en 100% in 2050. Nader onderzoek is nodig om dit beter in te schatten.

### Kosten

Zoals aangegeven is de overschakeling op biomassa een kostbaar en tijdrovend proces dat eigenlijk los staat van de focus in dit rapport op negatieve emissies. Als er wordt overgeschakeld op dan zal meestal gebeuren om andere redenen dan negatieve emissies (concurrentievoordeel, klimaatbeleid). Met andere woorden, indien een proces is overgeschakeld op biomassa, dan liggen de additionele kosten voor negatieve emissies niet bij de chemie, maar bij de AVI's die uitgerust zouden moeten worden met CO<sub>2</sub>-afvang (zie paragraaf 2.5).



<sup>1</sup> Alternatieve route Aceton (C3) → Isopropanol (C3) → Propeen (C3)  
<sup>2</sup> Alternatief PS productieroutes 1) door dimerisatie uit butadieen (C4) afkomstig uit methanol (C2) of conversie C6-C8 aromaten uit pyrolyse hout naar PS (polystyreen)  
<sup>3</sup> Tevens kunnen PA's (polyamides) worden gemaakt (1) via suikers → barnsteenzuur (C4) → 1,4 butaandiamine (C4) → PA en (2) uit castorolie naar Sebazinezuur (C10) of 1,10-Decaandiamine (C10) of 11-amino-undecaanzuur (C11). Om een PA te maken dienen deze stoffen te reageren met 1,6-hexaandiamine (C6). Hiervoor vindt nog R&D plaats om deze uit biomassa te produceren.  
<sup>4</sup> Uit fermentatie kan ook PDO (C3, 1,3 propaandiol) worden gemaakt (commercieel beschikbaar) die tevens naar polyetherpolyolen kan worden geconverteerd.  
<sup>5</sup> Methanolproductie wordt verondersteld plaats te vinden door de reactie van CO<sub>2</sub> met waterstof (uit elektrolyse) maar kan ook uit vergassing van hout komen.  
<sup>6</sup> Zetmeel kan vrij eenvoudig naar suiker worden geconverteerd.

**Figuur 4.2** Vereenvoudigde productieroutes van de belangrijkste platformchemicaliën (aangegeven in groen, blokken die groen omlijnd zijn, zijn nog niet in productie) en bulkchemicaliën (donkerblauw omlijnd) uit biomassa. Roodomlijnde producten zijn alternatieven van het gebruik van platformchemicaliën. Papier is thans de belangrijkste toepassing van cellulose. Bron: bewerking uit (Harmsen en Hackmann 2013).

Overigens zou een complete substitutie van ruwe olie door biomassa voor de Europese chemische industrie veel landbouwgrond vergen. Om de 6,6 Mton aan grondstoffen die de Nederlandse chemische industrie produceert te vervangen door biomassa zou minimaal 3.000 km<sup>2</sup> nodig zijn, gebaseerd op suikerbiet als vervanger.

In de volgende paragrafen wordt van een aantal belangrijke routes nader uitgewerkt. Dit is niet volledig. Een volledige uitwerking van de wijze waarop de chemische industrie kan overschakelen op biomassa ligt buiten de scope van dit rapport.

## 4.1 Etheen

Etheen is één van de belangrijkste grondstoffen voor de kunststofindustrie met een breed scala aan toepassingen. De belangrijkste toepassing is die van grondstof voor polyetheen of PE (zie figuur 4.2) dat wordt geproduceerd in lage dichtheid LDPE) en hoge dichtheid (HDPE). Maar etheen is ook geschikt als grondstof voor oppervlakte-actieve stoffen, oplosmiddelen en als brandstofadditief (EDTE). De wereldwijde productie van etheen is ongeveer 80 Mton met een productiecapaciteit van 120 Mton. Etheen kan worden geproduceerd door chemische conversie (dehydrogenatie) van ethanol. Ethanol, met een wereldwijde productie in 2016 van 78 Mton, kan worden geproduceerd uit onder meer suikers en zetmeel (zie figuur 4.2). 60% van de mondiale productie van bio-ethanol vindt plaats in Brazilië uit suikerriet en in de VS uit mais, en wordt met name gebruikt als brandstof in de transportsector. Binnen Europa ligt een netwerk van etheepijpleidingen, dat zich uitstrekt van Rotterdam via België naar Zuid-Duitsland. Chemiebedrijven in Nederland, België en Duitsland onttrekken aan deze pijplijn de etheen die zij nodig hebben voor de fabricage van hun producten. Als deze pijplijn wordt gevoed met bio-etheen, kunnen al deze bedrijven eenvoudig een deel van hun productie vergroenen (BiobasedEconomy 2017).

### *Technisch potentieel*

Geschat wordt dat de productiecapaciteit in Nederland ongeveer 3,75 Mton bedraagt. Slechts zo'n 40% hiervan wordt benut. Etheen heeft een CO<sub>2</sub>-inhoud van 3,14 kg per kg styreen (zie tabel 4.2). Dit levert een negatief emissiepotentieel van 4,2 Mton bij het eerder genoemde afvangrendement bij AVI's van 90%. Dit is dus naast het potentieel door toepassing van CCS in de productie, waarvan ongeveer 4 Mton kan worden toegerekend aan etheen.

### *Realistisch potentieel*

Als we uitgaan van de eerder beschreven vervangingspercentages van 15% in 2030 en 35% in 2050, dan komt het negatieve emissiepotentieel uit op respectievelijk 0,6 en 1,5 Mton CO<sub>2</sub>. Aangezien de productie van etheen uit bio-ethanol thans ongeveer 40% duurder is dan uit fossiele energie, is het dan wel nodig dat de productiekosten sterk dalen, de ruwe olie prijs flink stijgt of dat er stimulerend beleid wordt gevoerd. In de huidige situatie is een prijs van circa €130 per ton CO<sub>2</sub> nodig om bio-ethanol concurrerend te laten zijn. Indien de voetafdruk van bio-ethanolproductie naar nul kan worden teruggebracht is dat steeds €70 per ton CO<sub>2</sub>.

## 4.2 Styreen

Het biologisch afbreekbare melkzuur of polylactic acid (PLA) kan worden geproduceerd uit suikerhoudende gewassen en kan voor veel toepassingen waar nu fossiel styreen wordt gebruikt, dienen als vervanging van. PLA is biocompatibel ("lichaamsvriendelijk") en heeft toepassingen in de medische sector zoals chirurgische hechtdraad, schroeven, haakjes e.d. voor het herstellen van fracturen. Hoogmoleculair PLA kan ook gebruikt worden als vervanging



van traditionele thermoplastische polymeren, onder meer voor verpakking van voedingswaren (trays voor fruit en vlees), films, food serviceware artikelen (drinkbekers, bordjes, bestek), vezels (woven en nonwoven toepassingen (thee zakjes), flessen en 3D printing. Daarnaast wordt het in de vorm van piepschuim aangeboden, als alternatief voor polystyreen. In de huidige berekeningswijze levert dat in de hele keten een CO<sub>2</sub>-reductie van 70% (Croezen en Lieshout 2016). Voor de overige toepassingen kan styreen direct uit biomassa geproduceerd worden, maar dit vergt een ander nog niet uitontwikkeld productieproces dan styreen uit aardolie en is (nog) niet rendabel.

#### *Technisch potentieel*

In Nederland is de maximale productiecapaciteit van styreen 1640 kton; 640 kton door Lyondell op de Maasvlakte, 550 kton door Alba en 450 kton door Shell bij Moerdijk. Op dit moment wordt de productiecapaciteit slechts voor circa 40% benut. Ongeveer de helft hiervan (330 kton) kan worden vervangen door PLA met een massaverhouding van 1:1. De CO<sub>2</sub>-inhoud is 0,5 kg CO<sub>2</sub> per kg PLA (zie tabel 4.2). Dit levert een negatief emissiepotentieel van 0,15 Mton, gegeven een afvangrendement bij de AVI's van 90%. Overigens zal vervanging van styreen door PLA niet zozeer plaatsvinden op basis van potentiële negatieve emissies, maar op basis van genoemde de CO<sub>2</sub>-reductie van 70%. Vervanging van de andere helft door op biomassa gebaseerd styreen levert een groter negatief emissiepotentieel van 1 Mton aangezien de CO<sub>2</sub>-inhoud per kg styreen gelijk is aan 3,32 kg CO<sub>2</sub>.

#### *Realistisch potentieel*

De mondiale productie van PLA wordt gedomineerd door twee bedrijven, Natureworks uit de VS produceert 140 kton uit mais en Corbion, voorheen CSM, uit Nederland produceert sinds 2014 polymelkzuur uit tapiocameel in Thailand wat in 2018 zal worden verhoogd van 75 naar 200 kton in een joint venture met de oliemaatschappij TOTAL! Voor de huidige productie wordt samengewerkt met kunststoffenproducent Synbra Technology in Etten-Leur, dat ook PLA maakt voor eigen schuimproducten. De vraag naar melkzuurproducten neemt per jaar ongeveer met 10% toe. Daarnaast heeft Corbion plannen voor een fabriek in Nederland die meer dan 100 kton PLA moet gaan produceren op basis van suikers uit suikerbieten (Verbraeken 2017).

Op basis van deze ontwikkelingen gaan we er van uit dat het mogelijk moet zijn dat de vervanging door PLA in 2030 zeker 100 kton kan zijn (dus 30%, twee keer zo veel als het overall percentage van 15%) en de volledige 330 kton in 2050. Dit zou zelfs meer kunnen zijn indien de vraag uitstijgt boven de mogelijke vervanging van de huidige toepassingen.

Zoals aangegeven is de productie van styreen uit biomassa nog in ontwikkeling en nog (lang) niet rendabel. We gaan er daarom van uit dat het aandeel in 2030 nihil zal zijn en dus niet de eerder genoemde 15% zal halen. Maar tegen 2050 – onder druk van de transitie naar een CO<sub>2</sub>-vrije samenleving – nemen we aan dat de techniek is doorgebroken en 35% vervanging kan worden gehaald.

#### *Kosten*

Zowel in de VS als Thailand vindt productie van polymelkzuur op commerciële basis plaats. Economische gezien kan bij voldoende schaal de productie van suikerbieten (inkoopprijs circa €250 per ton suiker) een concurrerende grondstof vormen voor ruwe aardolie (inkoopprijs €320 ton bij \$50 per barrel), waarbij wordt gerekend met een opbrengst van €1800 per ton PLA. Productiekosten van beide processen ontlopen elkaar nauwelijks waarmee de kosten vooral zijn gekoppeld aan de eerder genoemde kosten van CCS bij de AVI's.

## 4.3 Methanol

Methanol kan worden gemaakt uit synthesesgas door hydrogenatie van koolstofdioxiden met behulp van een geschikte katalysator zoals koperoxide, zinkoxide, of gebaseerd op chroomoxide (Hrbek 2016). Methanol is een basisgrondstof met een breed scala aan toepassingen zoals formaldehyde, azijnzuur, DME en MBTE. Wereldwijd wordt er circa 50 Mt geproduceerd. Methanol wordt in de huidige praktijk geproduceerd uit gas door de reactie van waterstof (verkregen uit gas) met CO<sub>2</sub>. Momenteel produceert BioMCM ongeveer 360 kton methanol uit aardgas en 60 kton uit groen gas en is hiermee de grootste producent in de wereld.

Methanol kan ook worden geproduceerd uit synthesesgas, dat kan worden verkregen door vergassing van biomassa (zie hoofdstuk 3). Ten slotte kan methanol uit waterstof en CO<sub>2</sub> worden geproduceerd waarbij uit 1 ton waterstof circa 8 ton methanol kan worden gemaakt. Een concreet initiatief voor methanolproductie op basis van houtachtige biomassa in Nederland was het WoodSpirit-project bij BioMCN in Delfzijl; het project moest jaarlijks één miljoen ton gepelletiseerd hout gaan verwerken. Een verwant initiatief is van AkzoNobel met onder andere BioMCN, waarin de haalbaarheid onderzocht wordt van een fabriek waarin geen hout maar huishoudelijk afval als grondstof voor de vergassing gebruikt wordt. Omdat circa 56% van het huishoudelijk afval biogeen is, is ook circa 56% van het resulterende gas biobased (Staatscourant 2015).

Vervanging van fossiel methanol door bio-methanol zal primair worden gedaan voor het reduceren van CO<sub>2</sub>-emissies. Door Croezen en Lieshout (2016) is berekend dat dit over de gehele productieketen ongeveer 0,74 kgCO<sub>2</sub>eq/kg bio-methanol bedraagt. Een reductie van 68% ten opzichte van de broeikasgasbalans gerelateerd aan de fossiele productieroute (2,2 kg CO<sub>2</sub>eq/kg). Productie van methanol uit waterstof (via elektrolyse) en CO<sub>2</sub> (uit industriële bronnen gebaseerd op biomassa) geeft in principe een reductie van 100%.

Voor Nederland geldt dat niet alle geproduceerde methanol ook in Nederland wordt gebruikt. Het toerekenen van deze voordelen verdient daarom nadere aandacht.

### *Technisch potentieel*

Indien de huidige grijze productie bij BioMCN van 360 kton wordt vervangen door groen gas dan kan 420 kton methanol leiden tot 0,2 Mton negatieve emissies (en nog 0,4 Mton in de productiefase). Overigens kan uit 660 m<sup>3</sup> gas kan ongeveer 1 ton methanol worden geproduceerd, dus voor 420 kton methanol 310 miljoen m<sup>3</sup> groen gas nodig.

### *Realistisch potentieel*

Bio-methanol uit groen gas kan thans met subsidies concurreren met de productie van methanol, productie uit glycerine of hout is door de variabiliteit van de grondprijzen moeilijk te realiseren. Methanol uit elektrolyse in combinatie met CO<sub>2</sub> lijkt een veelbelovende optie. Als we uitgaan van de eerder genoemde vervanging 15% in 2030 en 30% in 2050 voor het 'grijze' methanol dan leidt dit tot een potentieel van respectievelijk 0,05 en 0,1 Mton. Ook hier moet worden opgemerkt dat vervanging thans niet mogelijk is zonder subsidie; de prijzen voor methanol liggen rond €240 euro per ton (prijspeil 2016) en beweegt sterk mee met de prijs van ruwe olie. De prijs voor groen gas, die 30% van de productiekosten bepaalt, mag daarmee niet meer dan €0,11 per m<sup>3</sup> zijn om concurrerend te kunnen zijn. Voor methanol uit waterstof lijkt het beeld positiever, maar dit dient verder uitgewerkt te worden.

## 4.4 CO<sub>2</sub> als grondstof

De chemische industrie is ook een afnemer van CO<sub>2</sub>, waarbij CO<sub>2</sub> als grondstof, oplosmiddel, koelvloeistof, witmaker voor papier (ethyleenoxide), geneesmiddel (aspirine), blusmiddel of in frisdranken wordt gebruikt (Harmelink, 2005). Bij gebruik als grondstof, waarbij de CO<sub>2</sub> hetzij uit biomassa afkomstig is, hetzij rechtstreeks uit de lucht, kunnen negatieve emissies

worden gerealiseerd. Bij gebruik als grondstof, waarbij de CO<sub>2</sub> hetzij uit biomassa afkomstig is, hetzij rechtstreeks uit de lucht kunnen negatieve emissies worden gerealiseerd. Een aantal voorbeelden hiervan zijn:

- Productie van ureum kunstmest door ammoniak met CO<sub>2</sub> te laten reageren.
- Productie van polycarbonaat waarbij CO<sub>2</sub> reageert met fenol tot diphenylcarbonaat dat als grondstof dient voor de productie van polycarbonaat. De productie is Nederland vindt plaats door het bedrijf SABIC.
- Productie van glycerolcarbonaat uit glycerol (bijproduct biodiesel) en CO<sub>2</sub>.
- Productie van isocyanaat uit o.a. diphenylcarbonaat en CO<sub>2</sub>.
- Productie mierenzuur uit azijnzuur en CO<sub>2</sub> of CO met methanol.
- De eerder genoemde productie van methanol uit groen gas en CO<sub>2</sub>. Methanol wordt voornamelijk toegepast voor de industriële productie van azijnzuur waarbij nogmaals CO wordt gebruikt.
- Productie van fosgeen uit CO<sub>2</sub> en chloor.
- Ethyleenoxide voor de productie van CaCO<sub>3</sub> als witmaker voor de papierproductie.

**Tabel 4.3** Potentieel van negatieve emissies op basis van vervanging van fossiel CO<sub>2</sub> als grondstof door CO<sub>2</sub> uit biomassa.

Bedrijf	Product	Productie	CO <sub>2</sub> inhoud
		<i>kton</i>	
Yara, OCI	Ureum	500	370
Sabic	Polycarbonaat	400	75
	Isocyanaat	400	125
BioMCN	Methanol	420	150
Shell	Ethyleenoxide	40	11
<b>Totaal</b>		<b>1760</b>	<b>731</b>

#### *Technisch potentieel*

Het technische potentieel is gelijk aan het gebruik van CO<sub>2</sub> voor grondstoffen in Nederland die in de afvalfase duurzaam kunnen worden opgeslagen (bv door verbranding in AVI's uitgerust met CCS) en voor zover er genoeg biomassa voor beschikbaar is. Het totaal potentieel van toepassingen waarvoor productiegegevens zijn gevonden is ruim 0,7 Mton, maar het totale potentieel zal hoger liggen.

## 4.5 Koolstof als grondstof

De chemische industrie past ook pure koolstof (C) toe. Deze wordt gebruikt voor de productie van inkt, verven, slijpmiddel, zuiveringstechnologie, fietsframes, koolstofanodes voor de aluminiumsector en in de elektronica. In Nederland wordt koolstof geproduceerd uit de overblijvende fracties van de raffinaderijen, pek- en petroleumcokes (met een gemiddelde C-gehalte van >90%), (bruin)kool en soms ook biomassa (kokoschillen en olijfbospitten). Petroleumcokes kunnen niet zondermeer gebruikt worden. Eerst moeten zware metalen en zwavel worden verwijderd, waarna het opgewerkte product onder de naam 'anode grade petroleum cokes' wordt verkocht aan een aantal bedrijven voor verdere verwerking. Door vervanging van deze grondstof door koolstof uit biomassa (d.m.v. pyrolyse) kunnen negatieve emissies worden verkregen in combinatie met CCS bij de AVI's of duurzame stort.

### *Technisch potentieel*

Het technische potentieel is gelijk aan de productie van carbon in Nederland voor zover er genoeg biomassa als input aanwezig is, waarbij een grote variëteit aan biomassa kan worden toegepast (vooral hout). Een aantal bedrijven in Nederland gebruiken koolstof als grondstof. In de tabel hieronder wordt een schatting gegeven van het potentieel. Het totale potentieel in materialen ligt op circa 2,2 Mton en bij de directe emissies op 0,7 Mton.

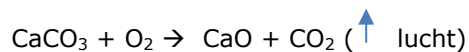
**Tabel 4.4** Potentieel van negatieve emissies op basis van vervanging van fossiel koolstof als grondstof door biomassa.

Producent	Product	Negatieve Emissie in product		Emissie in ETS
		Als C (kton)	Als CO <sub>2</sub> (kton)	CO <sub>2</sub> (kton)
Aluchemie Rotterdam	C-anode	340	1240	150
Century Aluminum Vlissingen BV	C-anode	140	513	62
ESD-SiC	SiC	20	70	115
Cabot	Carbon	65	240	250
cabot-norit	actief kool	45	165	95
	<b>Totaal</b>	<b>610</b>	<b>2228</b>	<b>672</b>

# 5 Beton

In 2012 waren 1.925 bedrijven actief in de betonsector. De toegevoegde waarde beslaat € 2,1 miljard (0,4% van BBP) en er waren ongeveer 27.000 mensen werkzaam in deze sectoren (0,3% van werkzame beroepsbevolking). De totale energieconsumptie van deze sector bedroeg in 2012 ongeveer 26 PJ.

Beton bestaat uit cement, toeslagmaterialen (zand, grind), water, en hulpstoffen. Cementproductie leidt tot relatief hoge CO<sub>2</sub> emissies per ton ten gevolge van de energiebehoefte van het productieproces, waarbij meer dan de helft van de emissies wordt veroorzaakt door procesemissies waarbij een koolstofhoudend product, meestal calciumcarbonaat ofwel kalksteen (mergel), wordt omgezet in een product, klinker, dat geen koolstof bevat:



In 2018 of 2019 stopt de mergelwinning in Limburg en daarmee stopt ook de productie van klinker in Nederland.

Gemiddeld genomen heeft in Nederland verkocht cement een klinkergehalte van circa 50%. Dit is een relatief laag gehalte vergeleken met andere Europese landen. Dit komt doordat Nederland over voldoende vervangende materialen beschikt zoals hoogovenslak en poederkoolvliegias. Nederland is een land dat relatief veel cement importeert. België en Duitsland zijn de grootste cementexporteurs naar Nederland.

De cementindustrie produceert ongeveer 5% van de wereldwijd door mensen veroorzaakte CO<sub>2</sub> uitstoot. Voor andere broeikasgassen is de bijdrage nihil. In China, de grootste cementproducerende natie ter wereld, is dit zelfs 20%. In de Europese Unie is de cementproductie verantwoordelijk voor 3% van de totale uitstoot van CO<sub>2</sub>. Zodra Nederland geen klinkerproductie meer heeft - maar nog wel cementproductie - wordt de bijdrage minder dan 1% van de nationale emissies.

In het jaar 2000 was het totale gebruik van beton over de hele wereld circa 5 miljard m<sup>3</sup>. Dat is bijna 0,7 m<sup>3</sup> per aardbewoner (Cement & beton centrum, 2016). Eén ton cement die in de Europese Unie wordt geproduceerd veroorzaakt gemiddeld 750 kg CO<sub>2</sub>-eq. Dit is inclusief de uitstoot ten gevolge van de noodzakelijke elektriciteitsproductie, de uitstoot van processen voorafgaande aan cementproductie en de (ondergeschikte) uitstoot van enkele andere broeikasgassen, zoals methaan.

## *Technisch potentieel*

Er zijn verschillende mogelijkheden om negatieve CO<sub>2</sub> emissies te creëren. Ten eerste door het gebruik van biomassaketels voor de benodigde energie gecombineerd met afvang en opslag van de vrijkomende CO<sub>2</sub>. Dit is post-combustion CO<sub>2</sub>-afvang en wordt besproken in hoofdstuk 2. Ten tweede neemt beton en cement in de gebruiksfase weer langzaam CO<sub>2</sub> op uit de atmosfeer (carbonatie). Volgens Xi *et al.* (2016) gaat dit wereldwijd om 250 Mton per jaar of ruim 40% van de procesemissies die vrijkomen bij het vervaardigen van klinker. Omgerekend is de opname door de huidige betonvoorraad in Nederland 0,5 tot 1 Mton per jaar. Daarnaast levert hergebruik door het malen van het oude beton nog 10% extra CO<sub>2</sub> vastlegging op.

Negatieve emissies kunnen ook worden bereikt doordat materiaal kan worden toegevoegd aan het beton dat CO<sub>2</sub> bevat of opneemt. Er bestaan thans meerdere interessante opties, zoals zand vervangen door olivijn (zie ook hoofdstuk 10), door het gebruik van organische toeslagmaterialen/hulpstoffen zoals Miscanthus-vezels (olifantsgras), door kiezels te vervangen door vliegias uit AVI's dat eerst met CO<sub>2</sub> heeft gereageerd zoals Carbon8 (Wiki 2015) of door cement of beton te vervangen door een stof die CO<sub>2</sub> opneemt gedurende de productie zoals Solidia Cement (Sahu en DeCristofaro 2013), Solidia Beton (Jain *et al.* 2014) of compensatiesteen (Cobouw 2016).

Cement wordt vooral toegepast voor de betonproductie en mortel (wandafwerking) en maakt ongeveer 15% van de massa van beton uit. In Nederland is de totale betonproductie rond 16 miljoen m<sup>3</sup> of 40 Mton. Ongeveer 37% daarvan wordt afgezet in de woningbouw en ruim 40% vindt zijn weg naar de utiliteitsbouw. Bij de productie van beton komt 160 kg/m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> vrij (zie tabel 5.1) en in totaal 2.6 Mton, exclusief de energie-gerelateerde emissies voor het produceren van klinker en transport. Indien volledig op 'groen' beton en hergebruik overgegaan zou worden dan zou ongeveer 630 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> worden vastgelegd wat optelt tot 10 Mton.

**Tabel 5.1** Gemiddelde CO<sub>2</sub> emissie per m<sup>3</sup> beton voor de huidige situatie (Lieshout en Nusselder 2016) en voor 2030 en 2050 op basis van een inschatting van hergebruik en het gebruik van 'groen' beton. De verschillende achtergrondkleuren geven aan dat de betreffende grondstoffen uitwisselbaar zijn.

	Huidig	Huidig	Huidig	2030	2050	Huidig	2030	2050
	€ per kg	kg CO <sub>2</sub> per kg	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> per m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> per m <sup>3</sup>	kg CO <sub>2</sub> per m <sup>3</sup>
Cement CEM I	0,085	0,818	129	85	38	106	70	31
Cement CEM III <sup>1)</sup>	0,071	0,2960	193	193	193	57,1	57,1	57,1
Solidia (CaSiO <sub>3</sub> )	0,046	-0,300	0	28	63	0,0	-8,5	-18,8
Rivierzand	0,013	0,0005	823	707	518	0,4	0,4	0,3
Betongranulaat	0,009	-0,0300	46	140	263	-1,4	-4,2	-7,9
Olivijn <sup>2)</sup>	0,030	-0,375	0	32	113	0,0	-11,8	-42,2
Riviergrind	0,018	0,0011	1016	968	939	1,1	1,0	1,0
Carbon8 (vliegashout uit AVI's)	0,018	-0,050	0	20	40	0,0	-1,0	-2,0
Biomassa (olifantsgras)	0,100	-1,500	0	28	38	0,0	-42,4	-56,3
Kalksteenmeel	0,045	0	16	16	16	0,0	0,0	0,0
<b>Totaal</b>			<b>2223</b>	<b>2218</b>	<b>2218</b>	<b>163</b>	<b>60</b>	<b>-38</b>
<b>Aandeel negatieve emissies (opgeslagen CO<sub>2</sub>)</b>						<b>-1</b>	<b>-68</b>	<b>-127</b>

<sup>1)</sup> Als de kolencentrales sluiten neemt de beschikbare hoeveelheid CEM III sterk af. Overschakeling op CEM I leidt tot meer CO<sub>2</sub> emissies.

<sup>2)</sup> Er is gerekend met vastlegging over een periode van 30 jaar.

#### Technische status

De hier beschreven technieken zijn op kleine schaal geproduceerd (TRL 6-7). Voordat tot toepassing kan worden overgegaan dient echter nog eerst een goedkeuringstraject te worden afgelegd, dat voor dragende constructies 10 jaar kan bedragen.

#### Realistisch potentieel

Het realistisch potentieel is lastig in te schatten; circa de helft van het beton wordt gebruikt voor dragende constructies en nieuwe soorten beton moeten een (langdurige) testprocedure voor goedkeuring doorlopen. Voor niet-dragende constructies zijn de eisen minder streng en daar zullen deze toepassingen naar verwachting in eerste instantie hun weg kunnen vinden. Voor een eerste inschatting wordt ervan uitgegaan dat het in 2030 mogelijk moet zijn een kwart van de niet-dragende constructies hiermee te produceren, oplopend tot 50% van de totale betonproductie in 2050. In tabel 5.1 is de gemiddelde betonsamenstelling voor de huidige situatie vergeleken met een mogelijke mix voor 2030 en 2050, gebaseerd op enerzijds toenemend hergebruik en anderzijds toenemend gebruik van 'groen' beton.

Gemiddeld zou dan in 2030 sprake zijn van een vastlegging van bijna 70 kg CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> beton wat neerkomt op 1,1 Mton op basis van huidige betonproductie van 16 miljoen m<sup>3</sup> en voor 2050 bijna 130 kg CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> wat leidt tot 2 Mton vastlegging. Hergebruik reduceert vooral de benodigde hoeveelheid cement, het aandeel in de negatieve emissies is gering (0,04 Mton in 2030 en 0,08 Mton in 2050).

Voor wat betreft de CO<sub>2</sub>-vastlegging in de gebruiksfase van cement en beton is de complicatie dat het nu niet wordt meegenomen in de emissieregistratie en we dus blijkbaar op een andere plek in de koolstofcyclus de vastlegging te groot inschatten (Brugh 2016). Het is dus de vraag

in hoeverre het huidige negatieve potentieel (ingeschat op 0,6 tot 1 Mton, zie hierboven) als zodanig kan en mag worden ingeboekt.

*Kosten*

De kosten per vermeden ton CO<sub>2</sub> zijn negatief (zoals bij Solidia) tot circa €70 per ton bij toepassing van olifantsgras (Lieshout en Nusselder 2016).

# 6 De bouw

In het positon paper van de sector bos en hout is aandacht gegeven aan het duurzaam vastleggen van hout in woningen en in grond-, water- en wegebouw (GWW) en het effect op vermeden emissie in de staal en betonsector (Nabuurs *et al.* 2016). De sector heeft nog geen exacte cijfers, maar geeft wel aan dat een toename in het gebruik van hout in de woningbouw door licht, prefab en industrieel bouwen en door meer hout toe te passen in kunstwerken en objecten in de grond-, weg- en waterbouw er veel extra koolstof kan worden opgeslagen en veel CO<sub>2</sub> kan worden vermeden in de staal en betonsector. De sector geeft ook aan dat innovaties in de houtsector het mogelijk maakt om hoogwaardig bruikbaar hout te produceren in een kortere groeicyclus van 20 tot 30 jaar.

## *Technische status*

Houtskeletbouw (hsb) is een hoogwaardige prefab bouwmethode voor woningen tot 4 verdiepingen hoog, die al veelvuldig wordt toegepast in Canada, de VS en Scandinavië. In Groningen zijn al meer dan 500 hsb-woningen gebouwd vanwege de aardbevingsbestendigheid (VDM 2017). Ook is aangetoond dat het mogelijk is hoogbouw in hout uit te voeren. Een eerste project van een uiterst luxe houten woontoren van 73 meter hoog aan het IJ in Amsterdam zal eind 2019 zijn gerealiseerd: HAUT.



**Figuur 6.1** Aan het IJ verrijst het HAUT-project: een houten woontoren van 73 meter en 21 verdiepingen bestaande uit 52 luxe woningen van 75 tot 326 m<sup>2</sup>. Op het dak komen 1250 m<sup>2</sup> zonnepanelen en een waterzuivering. Het gebruikte hout zal 3 kton CO<sub>2</sub> vastleggen. Het project is begroot op 25 tot 30 miljoen Euro.

## *Technisch en potentieel*

Nederland is niet bosrijk, maar er zijn inmiddels verschillende bedrijven die bouwen met duurzaam hout afkomstig uit Scandinavië. Het technische potentieel is niet gekwantificeerd, maar



uit een onderzoek door W/E (2016) blijkt dat houtskeletwoningen de helft minder CO<sub>2</sub> verbruiken in de bouwfase vergeleken met gangbare woningen van vergelijkbare omvang en dat er veel meer koolstof wordt vastgelegd. De maximale emissiereductie wordt geschat op 0,76 Mton, maar niet duidelijk is welk deel daarvan als negatieve emissie kan worden beschouwd. Een voorzichtige eerste orde kwantificering van wat realistisch gezien mogelijk is laat zien dat bij een verzesvoudiging van het aantal laagbouwoningen op basis van houtskeletbouw naar 10.000 in 2030, ofwel 20% van het huidige aantal woningen dat per jaar wordt gebouwd 51.000 (CBS 2017c), en een toename van het gebruik van hout in de GWW-sector in 2030 waar 0,3 Mton CO<sub>2</sub> per jaar zou kunnen worden vastgelegd en evenzoveel vermeden, met name door vermeden emissies in de staal en betonsector. Als dit verdubbelt tot 2050 dan kan dit oplopen tot 0,6 Mton CO<sub>2</sub>.

#### *Kosten*

Er zijn geen studies die kosten berekenen in termen van € per vastgelegde ton CO<sub>2</sub>. Hierbij zou een vergelijking gemaakt moeten worden tussen het gebruik van hout met het gebruik van andere materialen zoals staal en beton.

# 7 Landbouw

## *Maximaal en realistisch potentieel*

In de gemiddelde Nederlandse bodem zit in de bovenste 30 cm ongeveer 11 kg koolstof per m<sup>2</sup>. Dit resulteert tot een totale opslag van 280 miljoen ton koolstof. In Lesschen *et al.* (2012) wordt een mix van maatregelen genoemd die kunnen bijdragen aan het efficiënt vergroten van deze koolstofvoorraad in de landbouwbodem (zie tabel 9.1). De maatregelen zijn goed inpasbaar en leveren geen technische belemmeringen op. De belangrijkste zijn:

- het beperken of niet uitvoeren van kerende grondbewerking waardoor het organisch materiaal minder bloot gesteld wordt aan oxidatie;
- zoveel mogelijk gebruik maken van vanggewassen of stikstofbindende gewassen die vervolgens worden onderploegd;
- het verbeteren van de gewasrotatie al is deze in veel gevallen al geoptimaliseerd;
- het zoveel mogelijk achterlaten van gewasresten zoals stro, aardappelloof en bietenblad;
- beter akkerrandenbeheer (een vergroeningsmaatregel uit het GLB) dat ook bijdraagt aan de opbouw van stikstof in de bodem;
- niet of minder frequent 'scheuren' van het grasland waardoor minder organisch materiaal verloren gaat (in de huidige regelgeving mag dit eens in de 5 jaar gebeuren);

Bovenstaande maatregelen kennen bovendien verschillende positieve neveneffecten waaronder een beter vochtvasthoudend vermogen van de bodem, betere infiltratie bij stevige regenbuien en meer biodiversiteit. In de praktijk zal sprake kunnen zijn van een praktische combinatie van enkele van deze maatregelen. Als daar rekening mee wordt gehouden is het maximale potentieel ongeveer 2,3 Mton CO<sub>2</sub> per jaar. Lesschen *et al.* veronderstellen dat in de praktijk de landbouwbedrijven hun beproefde en vertrouwde werkwijze van o.a. grasland scheuren en ploegen niet zomaar zullen verlaten. Daarvoor kunnen zij zowel bedrijfseconomische, agronomische of logistieke redenen hebben. Als rekening wordt gehouden met een zeker implementatiepercentage komt hun meer realistisch potentieel uit op bijna 0,8 Mton CO<sub>2</sub> per jaar. Een deel van de maatregelen kunnen op relatief korte termijn worden genomen. Deels betekent dit iets niet of minder doen en deels aanvullende werkzaamheden, zoals een vanggewas wat voor een aantal uitspoelingsgevoelige zandgebieden al een verplichte maatregel is. In lijn met Ros en Daniels (2017) gaan we er van uit dat in 2030 de jaarlijkse vastlegging kan zijn opgelopen tot 0,6 Mton en dat dit kan worden uitgebreid tot ten minste 0,8 Mton en met meer inspanning tot boven de 1 Mton in 2050.

**Tabel 7.1** Potentieel voor CO<sub>2</sub>-vastlegging in de bodem volgens Lesschen *et al.* (2012). De berekende cijfers en geschatte percentages vermeld. De getallen kennen een onzekerheidsmarge met een range van ongeveer 25%.

Maatregel	Max. potentieel kton CO <sub>2</sub> / jaar	Implementatie %	Realistisch kton CO <sub>2</sub> / jaar	Max. per ha kg CO <sub>2</sub> / ha / jaar
Niet-kerende grondbewerking	475	50	238	608
Geen grondbewerking	912	20	182	1167
Vanggewas / groenbemester	311	50	156	398
Verbeteren gewasrotaties	942	20	188	1205
Gewasresten achterlaten	628	20	126	803
Akkerrandenbeheer	145	40	58	186
Niet scheuren grasland	710	30	213	3586
Totaal realistische combinaties	2270		790	2316

### *Veengronden*

In de veenweidegebieden bestaat de bodem uit een pakket van minimaal 40 cm veen tot pakketten van vele meters. De koolstof in deze veenpakketten, met uitzondering van de bovenste 30 cm is geen onderdeel van wat de bodemvoorraad wordt genoemd, maar ze bevatten wel de grootste hoeveelheid koolstof.

Ontwatering van deze gronden leidt tot de emissie van broeikasgassen, met name kooldioxide, maar ook lachgas dat als gevolg van mineralisatie vrijkomt. Uit een 3D kartering blijkt het totale holocene veenpakket in Nederland een volume te hebben van 14,6 km<sup>3</sup>. Indien dit zou oxideren dan zou 2 Gton CO<sub>2</sub> worden uitgestoten (Koster 2017). De organische stof opgeslagen in de Nederlandse veenpakketten blijkt op grond van deze emissiecijfers circa vier keer groter dan de totale organische stof in de Nederlandse bodem.

Om oxidatie - en de daarmee gerelateerde bodemdaling - te voorkomen zijn er verschillende maatregelen mogelijk (Born *et al.* 2016). Het gaat hierbij dus niet primair om extra koolstofopslag, maar om het verminderen van het verlies. Echter, als het veen uiteindelijk weer kan aangroeien, kan er sprake zijn van negatieve emissies. Dit kan alleen onder volledig natte omstandigheden (zogenaamd 'plasdras') en kan niet in combinatie met enige vorm van landbouw, met uitzondering van veenmosteelt t.b.v. de potplantsector. Natuurgebieden waar deels sprake is van hergroei zijn o.a. de Deurnsche Peel, Mariapeel en Bargerveen, maar ook daar zijn de hydrologische condities nog niet optimaal voor veengroei. Dit komt doordat grondwater wegloopt naar lager gelegen gebieden in de omgeving.

### *Kosten*

Er bestaan geen kostenschattingen voor de afzonderlijke maatregelen zoals benoemd in tabel 7.1, maar Born *et al.* (2018) schatten dat deze klasse van maatregelen liggen in de orde van €40 tot €50 per ton CO<sub>2</sub>. Soms kunnen de kosten nog lagere zijn. Zo zijn er bijvoorbeeld biologische landbouwbedrijven die zomermaaisel van natuurterreinen gratis krijgen en alleen de kosten hebben voor het onderwerken. Bedrijven die stro aankopen ten behoeve van bodemverbetering zijn duurder uit en afhankelijk van de marktprijzen.

# 8 Bossen

Het Nederlandse bos heeft een oppervlakte van 365.000 ha; ongeveer 11% van het landoppervlakte (Schelhaas *et al.* 2017). Hiervan is 58% (multifunctioneel) productiebos en de rest natuurbos. In de productiebossen wordt met enige regelmaat gekapt en in natuurbossen vindt extensief beheer plaats dat vooral is gericht op natuurdoelen (Nabuurs *et al.* 2016; Schelhaas *et al.* 2017). De meest recente bosinventarisatie laat zien dat in Nederland de afgelopen vier jaar circa 12.100 ha is ontbost en dat in dezelfde periode 6.700 ha bos is aangeplant; een netto afname van 5.400 ha. De daling komt voor rekening van natuurontwikkeling (o.a. heidecorridors, natuurgrasland en zandverstuivingen) en door het verdwijnen van tijdelijke bossen die weer in gebruik werden genomen als landbouwgrond. Maar ook omzetting naar bebouwd gebied en infrastructuur is een van de oorzaken.

Aan hout wordt in Nederland jaarlijks circa 1,25 miljoen m<sup>3</sup> geogst. Daarvan komt twee derde uit productiebos en een derde uit natuurbossen. Voor Nederland is de actuele koolstofvastlegging vrijwel even groot als in het referentiejaar 1990. In de protocollen voor het bepalen van de CO<sub>2</sub>-uitstoot en vastlegging is het uitgangspunt dat ontbossing leidt tot onmiddellijke uitstoot van opstand en strooisellaag en dat vastlegging in nieuw bos een factor veertig langzamer gaat en vastlegging in beheerde bossen nog eens een factor drie langzamer. Dit betekent dat ontbossing een veel grotere negatieve invloed heeft dan het positieve effect van bebossing. De aandacht voor de potentie van landgebruik voor het vasthouden en vastleggen van koolstof is recent in een stroomversnelling gekomen. De afspraken in Parijs en de stappen daarna door de Europese Unie hebben er aan bijgedragen dat de LULUCF sector vanaf 2021, in de periode na het aflopende Kyoto-verdrag, onderdeel wordt van de broeikasgasaccountancy. Niet zo zeer met doelstellingen maar wel met incentives die leiden tot meer vastlegging en minder emissie. Van enige afstand beschouwd is dit moment een verkennende fase van welke maatregelen mogelijk zijn. De hieronder genoemde cijfers zijn daarom onzeker maar geven wel de eerste orde van grootte aan. De komende jaren zal door PBL in samenwerking met andere instituten meer onderzoek worden verricht naar de mogelijke bijdrage van de LULUCF-sector.

## *Technisch en realistisch potentieel*

De jaarlijkse bijgroei in het Nederlandse bos is gemiddeld 7,3 m<sup>3</sup> per ha per jaar. In productiebossen is de bijgroei zo'n 10 procent hoger dan in natuurbossen. Van de totale bijgroei wordt ongeveer iets meer dan de helft geogst. Het Europese gemiddelde ligt substantieel hoger en komt gemiddeld uit op driekwart. Het Nederlandse bos legt jaarlijks ongeveer 1,65 Mton CO<sub>2</sub> vast (Schelhaas 2017). Bij continuering van het huidige bosbeleid zal de vastlegging dalen tot 0,8 Mton CO<sub>2</sub> in 2050. Dit komt door het geleidelijk oplopen van de gemiddelde leeftijd van de Nederlandse bossen. Door 'slim' bosbeheer kan de jaarlijkse vastlegging door bossen worden verhoogd. Slim bosbeheer betekent intensieve verjongingskap en aanplant met een cyclus van 20-100 jaar. Door bij het herplanten gebruik te maken van sneller groeiende boomsoorten kan de vastlegging worden versneld en wordt het bos productiever. Volgens Nabuurs *et al.* (2016) is het mogelijk om het aandeel oogst van de bijgroei te verhogen tot het Europees niveau van 75 tot 80%, met beperkte effecten op de natuurkwaliteit en behoud van de overige functies van bos. Door dit actief bosbeheer kan de afname van de genoemde CO<sub>2</sub>-opname worden tegengegaan en mogelijk zelfs extra vastlegging worden bewerkstelligd. In het actieplan bos- en hout (Staatsbosbeheer *et al.* 2017) hebben een groot aantal bedrijven in de houtsector en terreinbeheerders voorgesteld om 100.000 ha bos aan te planten, waarvan 25.000 ha kan worden aangeplant in bestaande natuurterreinen de overige 75.000 op gronden die nu in gebruik zijn door de landbouw. De schatting is dat minimaal 5 jaar nodig is alvorens het traject van bebossing, en daarmee de vastlegging structureel op gang komt. De vastlegging rond 2030 wordt geschat op 0,5 tot 1,0 Mton CO<sub>2</sub> per jaar. Bij snelle uitrol van bosaanplant en een keuze voor snelgroeiende boomsoorten kunnen er in de toekomst jaren zijn met

een vastlegging tussen de 2 tot 3 Mton CO<sub>2</sub> per jaar. Hier gaan we voornamelijk uit van 0,5 tot 1,0 Mton CO<sub>2</sub> in 2030 oplopend tot 1,2 Mton CO<sub>2</sub> per jaar in 2050.

#### *Kosten*

De kosten van koolstofvastlegging door bossen aan te planten hangen samen met de uitgangssituatie. Bestaande natuurterreinen bebossen die eigendom zijn van publieke en private terreinbeheerders brengt andere kosten met zich mee dan als eerst voormalige landbouwgrond moet worden aangekocht en er vervolgens bos wordt aangeplant. Born *et al.* (2018) schatten in dat tot 2030 de kosten voor het actieplan neerkomen op circa 50 Euro per ton CO<sub>2</sub> als uitgegaan wordt van bestaande natuur tot vele honderden euro's per ton CO<sub>2</sub> als er sprake is van grondaankoop. Veel hangt af van de veronderstellingen rond kapitaals- en onderhoudskosten en de eventuele waarde van de houtopstand.

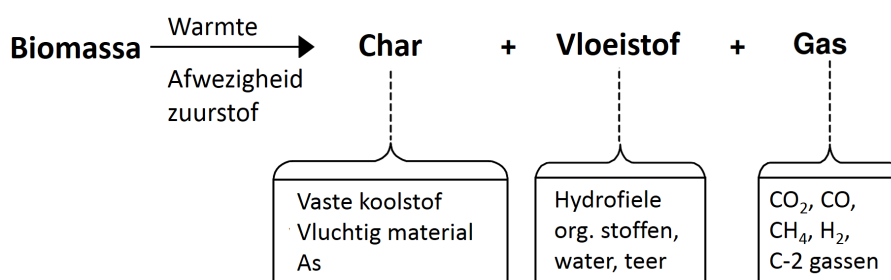
#### *Neveneffecten*

In dit rapport staat het potentieel van negatieve emissies centraal waaronder de optie om meer koolstof vast te leggen in bossen. Specifiek bij landgebruik, landgebruiksveranderingen en bosbouw geldt dat het maatschappelijke nut niet alleen draait om emissiereductie en vastlegging maar ook multifunctionele doelen zoals natuur, landschap, voedsel, recreatie, volksgezondheid en grondstoffenproductie zoals hout en andere bosproducten.

Een belangrijk neveneffect is de impact van genoemde bostransitie op het huidige landgebruik en specifiek op de voedselvoorziening, biodiversiteit en het landschap. Born *et al.* (2018) schatten in dat er vooral effect zal zijn op de omvang van de grondgebonden melkveehouderij en een daling van het areaal grond dat primair bestemd is voor landbouw. Dit zou kunnen betekenen dat door bosuitbreiding de melkveestapel daalt met 150.000 stuk wat leidt tot een lagere emissie van methaan (-7%) en lachgas (-2%) en minder uitspoeling van stikstof (-5%) en fosfaat (-4%). Daarnaast heeft dit effect op de ammoniakemissie (-4%) en op mestverwerking (-24%) en daalt het kunstmestgebruik. De verminderde methaan en lachgas emissies komen overeen met circa 1,0 Mton CO<sub>2</sub> equivalent per jaar. Deze reductie zal geleidelijk worden bereikt afhankelijk van de snelheid waarmee landbouwgrond wordt omgezet in bos. Hierbij is niet meegenomen dat de volumedaling van de veestapel buiten Nederland zou kunnen leiden tot een toename. Een groter aandeel bos binnen het bestaande natuurareaal heeft ook gevolgen voor de huidige natuur en landschap. Het effect hangt sterk samen met welke bestaande natuur wordt bebost en welk beheer er plaatsvindt. Veel vragen over de positieve en negatieve impact van meer bos zijn nog onbeantwoord, maar zullen zeker in vervolgonderzoek worden meegenomen.

# 9 Biochar

Biochar lijkt op houtskool maar heeft een andere structuur, samenstelling en kwaliteit en kan worden gebruikt als bodemverbeteraar. Door het hoge koolstofgehalte en de stabiliteit – het kan tot duizenden jaren in de bodem aanwezig blijven – leidt dit tot negatieve emissies. Biochar wordt gemaakt uit organisch materiaal zoals agrarische residuen, huishoudelijk afval, mest, hout etc. middels een proces dat pyrolyse heet: een thermochemische omzetting van het organische materiaal in afwezigheid van zuurstof (zie figuur 9.1). Het toevoegen van biochar aan de bodem kan potentieel de emissies van lachgas ( $N_2O$ ) en methaan ( $CH_4$ ) uit de bodem reduceren. Daarnaast mitigeert pyrolyse broeikasgasemissies door de co-productie van olie, synthesesgas en warmte.



**Figuur 9.1** Pyrolyse produceert (bio)char, vloeistof (bio-olie) en (syn)gas (Brownsort 2009).

De relatieve verdeling hiertussen wordt voornamelijk bepaald door de temperatuur waarbij pyrolyse plaatsvindt en de duur van het proces. De meest optimale temperatuur voor de vorming van een hoog aandeel biochar ligt tussen 350 en 450 graden bij een procesduur van maximaal 15 minuten waarbij de fractie biochar maximaal 70% zal zijn (Brownsort 2009). De koolstofinhoud van biochar kan variëren tussen 60 en 90%. Het resterende deel is een mix van mineralen en wordt met name beïnvloed door de gebruikte feedstock maar ook door de temperatuur; biochar die wordt gevormd bij hogere temperaturen bevat meer koolstof.

In de periode 2009-2012 is er een omvangrijk Europees INTERREG-project uitgevoerd naar de mogelijkheden van biochar (Haren 2014). In dit project werkten 13 partners uit zeven landen<sup>5</sup> rond de Noordzee samen voor het vaststellen van de effecten van biochar op bodem en teelt. Een aantal belangrijke conclusies op basis van 3-jarige veldproeven in deze landen waren:

- Biochar legt netto  $CO_2$  vast in de bouwvoor als het transport van biomassa en biochar binnen de regio plaatsvindt.
- Biochar verhoogt niet gewasopbrengst en gewaskwaliteit.
- Biochar verbetert niet de bodemkwaliteit.
- Bio-energie als bijproduct tijdens de biochar productie is verwaarloosbaar.
- De kwaliteit van biochar moet worden gecertificeerd omdat biochar, afhankelijk van de grondstof en het proces, verontreinigd kan zijn met zware metalen en organische microverontreinigingen zoals PAK's, PCB's en dioxinen.

Het algemene advies voor boeren dat hieruit volgde was zeer terughoudend te zijn met biochartoepassingen omdat er geen extra (economische) waarde is en omdat het vervuild kan zijn terwijl het nooit meer verwijderd kan worden wanneer het eenmaal is toegepast.

## *Technisch potentieel*

Het technisch potentieel voor biochar is groot. In de veelvuldig geciteerde studie van Woolf *et al.* (2010) wordt een theoretische bovengrens voor de wereld berekend op basis van de huidige

<sup>5</sup> Nederland, Duitsland, Denemarken, Zweden, Noorwegen, Groot-Brittannië en België

beschikbaarheid van biomassa en er van uit gaande dat de voedselveiligheid niet in gevaar komt. Zij komen uit op 1 tot 1,8 Gton Ceq (of 3,7 tot 6,6 Gton CO<sub>2</sub>eq) per jaar in 2050 of 7 tot 12% van de mondiale emissies in 2012 (JRC 2017). 30% daarvan komt door de vervanging van fossiele energie door pyrolyse, 20% door vermeden emissies van CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O – hetgeen de meest onzekere component is – en ongeveer de helft door de koolstof die wordt vastgelegd als biochar (0,5 tot 0,9 Gton C per jaar). Als er van wordt uitgegaan dat er 30 tot 60 ton biochar per hectare kan worden verspreid (Woolf *et al.* 2016) dan zou dit ieder jaar op 8 tot 30 miljoen hectare landbouwgrond moeten worden toegepast om de genoemde bovengrens te bereiken. Dit is 0,5 tot 2% van het huidige wereldlandbouwareaal (exclusief graslanden) van 1,58 miljard hectare (FAO). Aannemende dat het grootste deel van de benodigde biomassa niet afgedekt kan worden door landbouwresiduen, zou daar bovenop nog eenmalig 40 tot 260 miljoen hectare nodig zijn om die biomassa te verbouwen. Dit is 4 tot 16% van wereldlandbouwareaal.

Er zijn geen studies voor het technisch potentieel in Nederland, maar als wordt uitgegaan van 45 ton biochar per ha op het akker- tuinbouw- en groenvoedergewassenareaal dat in 2017 ruim 820.000 ha besloeg (CBS 2017b), dan is het cumulatieve potentieel 30 Mton C of 110 Mton CO<sub>2</sub>. Hierbij is uitgegaan van een optimale koolstofinhoud van 90% en dat 10% mineraliseert in de eerste maanden.

#### *Technologische status*

Hoewel het onderliggende productieproces van biochar relatief simpel is en al ver ontwikkeld, volgt uit het INTERREG project dat er nog een lange weg is te gaan voordat biochar veilig en grootschalig kan worden toegepast. Dit is in lijn met een omvangrijke en kritische review van JRC uit 2010 waarin werd gekeken naar de effecten van biochar op bodem-eigenschappen, processen en functies (Verheijen *et al.* 2010). In een recente meta-analyse op basis van 91 studies werd geconcludeerd dat de doeltreffendheid van biochar als een klimaatmitigatieoptie nog steeds erg onzeker is (He *et al.* 2017), onder andere door de slecht begrepen interactie tussen biochar en stikstof en de mogelijk (zeer) grote invloed op de microbiële bodemecologie en het functioneren van het gehele ecosysteem. Mede daarom werd in een Britse studie van de 'comittee of climate change' geconcludeerd dat biochar zich vooralsnog in TRL 3 tot 6 bevindt (CCC 2016). Wel

#### *Realistisch potentieel*

De wereldmarkt voor biochar is zeer klein met een geschatte waarde van 450 duizend dollar in 2016. Men verwacht een groei van bijna 15% per jaar tot 15 miljoen dollar; nog steeds klein in omvang (TMR 2017). Op basis van de constatering dat het enthousiasme en de aandacht voor biochar de afgelopen jaren duidelijk is afgenomen en gezien de lage TRL zoals hierboven beschreven gaan we er hier van uit dat de bijdrage aan negatieve emissies in 2030 nihil zal zijn. Voor de periode daarna zou biochar mogelijk wel een bijdrage kunnen leveren van maximaal 1 Mton CO<sub>2</sub>. Om dit te bereiken is 270 kton C in de vorm van biochar nodig. Als we uitgaan van de eerder genoemde optimale koolstofinhoud van 90% en 10% mineralisatie dan betekent dit dat er 340 kton biochar nodig is. Hiervoor is ongeveer 1,2 Mton of 18 PJ biomassa nodig. Deze hoeveelheid komt bijvoorbeeld overeen met 40% van de theoretisch oogstbare bijgroei uit 650.000 ha natuur en landschap (dit is inclusief de bossen). Als er 45 ton biochar per hectare landbouwgrond zou worden verspreid, dan moet dit jaarlijks op bijna 7500 hectare plaatsvinden om 1 Mton CO<sub>2</sub> te kunnen vastleggen. Dit is iets minder dan 1% van het Nederlandse landbouwareaal.

#### *Kosten*

De kosten van toepassen van biochar worden met name bepaald door de kosten van de gebruikte feedstock. In 2014 varieerden de prijzen voor biochar van €200 per ton voor lage kwaliteit biochar vanuit onzekere grondstof tot €1500 per ton voor hoge kwaliteit met loofhout als grondstof (Haren 2014). Op dit moment kost in Oregon (VS) een grote vrachtwagenlading

biochar van hoge kwaliteit €1375 per ton (OBS 2017). Als we er van uitgaan dat lage kwaliteit biochar 60% koolstof bevat en hoge kwaliteit 90% en dat 10% van de koolstof vrijkomt in de eerste maanden, dan komt dit neer op een prijs van €370 tot €1850 euro per ton koolstof of €100 tot €500 per ton CO<sub>2</sub>, uitgezonderd de kosten voor het verspreiden van de biochar over het land. In een recente overzichtsstudie van Smith (2016) wordt niet uitgegaan van marktprijzen, maar van werkelijke kosten en baten en komt men uit op een veel grotere range van een opbrengst van €200 per ton CO<sub>2</sub> indien alle kosten aan de onderkant van de range liggen tot een kostenpost van €500 per ton CO<sub>2</sub> indien alle kosten aan de bovenkant van de range liggen. Om positief uit te komen gaat men er van uit dat de productie van biochar energie oplevert die verkocht kan worden en dat het toepassen van biochar leidt tot verhoging van de opbrengst. Gezien de hierboven beschreven onzekerheid van dergelijk optimisme houden we vooralsnog de range van €100 tot €500 per ton CO<sub>2</sub> aan.



# 10 Silicaten

Silicaten omvatten bijna 95% van de aardkorst en bestaan in tal van variëteiten. Verschillende silicaten, zoals olivijn ( $Mg_2SiO_4$ ) of serpentijn ( $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ), kunnen reageren met  $CO_2$  en vormen dan stabiele carbonaten. De snelheid van  $CO_2$  vastlegging van dit natuurlijke proces is zeer laag, maar door dit te versnellen kunnen in potentie grote hoeveelheden  $CO_2$  worden vastgelegd. In 2009 verscheen een kritische studie waarin werd geconcludeerd dat het verspreiden van olivijn langs stranden en kustgebieden 'is not a viable method of  $CO_2$  sequestration on the scale needed' (Hangx en Spiers 2009). Deze conclusie kwam met name voort uit de constatering dat het olivijn extreem fijn vermalen moet worden (tot 2 micrometer) om voldoende snel te reageren en dat het verspreiden van olivijn in grote hoeveelheden - 5 miljard ton om 30% van de wereldwijde emissies te compenseren - enorme uitdagingen vormt op het vlak van economie, infrastructuur en gezondheid. Professor Olaf Schuiling, al tientallen jaren de bekendste bepleiter van de olivijn-optie (Schuiling 2017), publiceerde hierop een commentaar waarin hij stelde dat Hangx en Spiers de reactietijd veel te hoog inschatten, o.a. omdat de berekeningen waren gebaseerd op 100% verwerking en op eenvormige deeltjes in plaats van een verdeling over deeltjes van verschillende afmetingen (Schuiling en de Boer 2010). In 2013 publiceerde het Rathenau-instituut het rapport 'Klimaatengineering: hype, hoop of wanhoop?' (Riphagen en Brom 2013) waarin de voor- en nadelen van olivijn wederom werden uiteengezet.

## *Technische status*

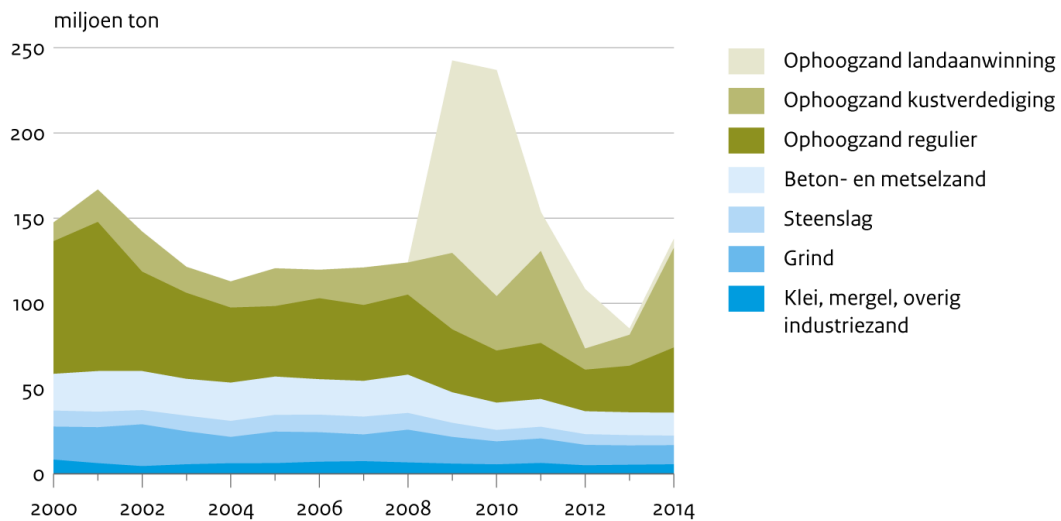
In een recente studie naar de toepasbaarheid van olivijn worden laboratoriumexperimenten en simulaties beschreven over de toepassing van olivijnzand in kustwateren (Montserrat *et al.* 2017). Hier kwam uit naar voren dat dit een interessante optie is, maar dat nader onderzoek nodig is voor een betere kwantificering van de  $CO_2$ -vastlegging onder veldcondities. Vooralsnog bevindt het onderzoek zich in TRL4 tot 5. Behalve grootschalige toepassingen in een marine omgeving kan ook gedacht worden aan kleinschaligere toepassingen op land die zich al commercieel bewezen hebben (TRL 8-9). Zo wordt voor de aanleg van het schouwpad van de Hoekse Lijn, het metrotracé langs de Nieuwe Waterweg van Hoek van Holland naar Rotterdam, 16 kton olivijn gebruikt, dat over een periode van 50 jaar ongeveer 5 kton  $CO_2$  zal vastleggen.

## *Technisch potentieel*

Volgens (Renforth 2012) zijn de mondiale silicaatvoorraden groot en heeft alleen al Groot-Brittannië genoeg gesteente om in theorie 430 Gton  $CO_2$  vastleggen. Het meer bruikbare deel met een potentiële vastlegging van ten minste 0.8 t $CO_2$  per ton gesteente beperkt dit tot 25 Gton. Köhler *et al.* (2010) komen uit op een potentiële vastlegging van 3,7 Gt  $CO_2$  per jaar voor de tropen. Het technisch potentieel is dus niet het probleem; het gaat om het vinden van zinnige toepassingen die commercieel interessant zijn.

Zoals aangegeven lijkt voor Nederland de vervanging van ophoogzand door olivijn een interessante mogelijkheid (Montserrat *et al.* 2017). Het verbruik van dit zand verschilt vrij sterk van jaar tot jaar, maar was gemiddeld 78 Mton per jaar (=52 miljoen m<sup>3</sup>) in de periode 2000-2014 (zie figuur 10.1), uitgezonderd het ophoogzand voor landaanwinning (Maasvlakte II) en uitgezonderd het gebruik als beton- en metselzand (gemiddeld 19 Mton). Vervanging van deze laatste toepassing door olivijn wordt besproken in hoofdstuk 5.

## Verbruik van oppervlaktedelfstoffen

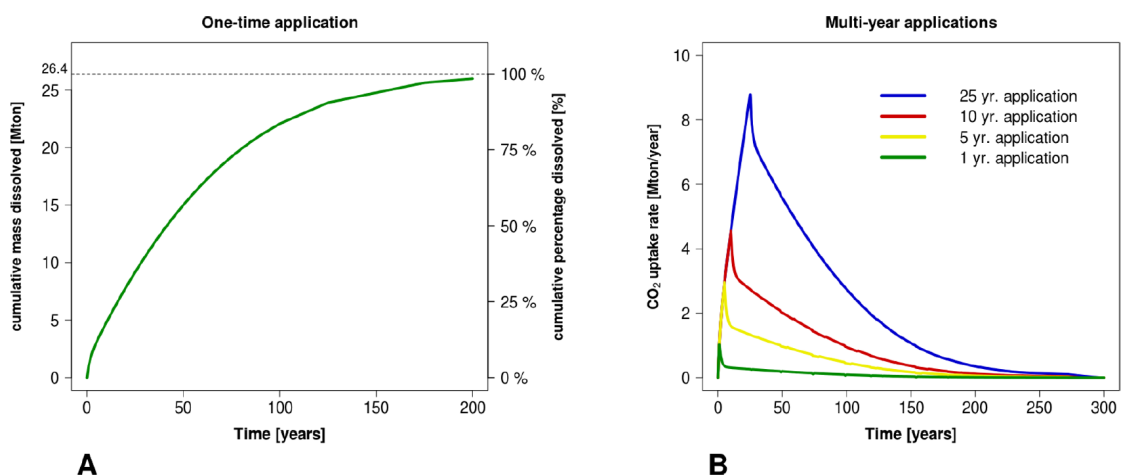


Bron: RWS Waterdienst (voor 2009); MWH (2009-2012); H2H advies (2013, 2014)

CBS/sep16  
www.clo.nl/nl006716

**Figuur 10.1** Verbruik van oppervlaktedelfstoffen in Nederland. Ophoogzand voor landaanwinning betreft met name de aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte. Bron: MNC.

Zoals aangegeven is met name de deeltjes- of korrelgrootte van belang voor de reactietijd, maar daarnaast ook de temperatuur, de beschikbaarheid van water en de zuurgraad hiervan en de ijzerfractie in het gebruikte olivijn (Griffioen 2017). Vervanging van regulier ophoogzand lijkt ongeschikt aangezien dit meestal onder wegen en huizen wordt gebruikt en niet of nauwelijks blootstaat aan water. Het ophoogzand voor kustverdediging zou wel interessant kunnen zijn. Hiervoor geldt dat het gemiddelde verbruik in de periode 2000-2014 gelijk was aan ruim 26 Mton per jaar. In Montserrat *et al.* (2017) is gesimuleerd hoe snel een dergelijke hoeveelheid olivijnzand zal reageren bij een korrelverdeling van ongeveer 200 micrometer (zie figuur 10.2A). Indien deze vervanging langere tijd wordt volgehouden zal de CO<sub>2</sub>-opname over een periode van 25 jaar toenemen tot 9 Mton per jaar (figuur 10.2B).



**Figuur 10.2** Reactiesnelheid van het eenmalig vervangen van 26,4 Mton ophoogzand door olivijnzand met een korrelgrootte van 200 micrometer (A) en CO<sub>2</sub>-opname bij verschillende periodes van vervanging (B). Bron: (Montserrat *et al.* 2017).

### *Energiebehoefte*

Het grootste deel van de energiebehoefte zit vooral in het transport en het fijnmalen van olivijn. Renforth (2012) schat de totale energiebehoefte op 0,8 tot 2,7 GJ per ton CO<sub>2</sub> afhankelijk van de gewenste korrelgrootte (en dus de reactietijd). Dit is significant hoger dan de geschatte energiebehoefte in Hangx en Spiers (2009) die uitkomen op maximaal 0,9 GJ/ton bij een korrelgrootte van 10 micrometer en een afstand van minder dan 1000 km. Voor een korrelgrootte van 200 micrometer is de energiebehoefte ongeveer 0,3 GJ/ton. Het verschil wordt met name verklaard doordat Renforth (2012) de energiebehoefte voor zeer fijn gemalen olivijn bijna een factor 3 hoger inschat.

### *Realistisch potentieel*

De wereldproductie was 5 jaar geleden ongeveer 9 Mton. De grootste producent is Noorwegen met 3,5 Mton per jaar. Op dit moment zijn de grootste afnemers de hoogovens. Volgens GreenSand kan de productie van genoemde mijnen in Europa op korte termijn worden opgevoerd tot 6 Mton per jaar. Aangezien grootschalige toepassing van olivijnzand in kustwateren nog het nodige onderzoek en voorbereiding vergt, gaan we er hier van uit dat op zijn vroegst over 5 à 6 jaar begonnen kan worden met grootschalige vervanging van het ophoogzand door olivijn. Stel dat in 2023 wordt begonnen met een hoeveelheid van 0,5 Mton en dat dit wordt uitgebreid tot 6 Mton in 2030 dan zou daarmee in dat jaar ongeveer 0,5 Mton CO<sub>2</sub> worden opgenomen. Aangezien de voorraad olivijn op aarde zeer groot is, nemen we aan dat de vervanging daarna geleidelijk verder groeit tot de volledige 26 Mton in 2050. Hierdoor zou in dat jaar uiteindelijk 4,7 Mton CO<sub>2</sub> kunnen worden vastgelegd. Uiteraard is deze verdere opschaling speculatief, maar het geeft wel aan wat er redelijkerwijs mogelijk zou kunnen zijn.

### *Kosten*

Olivijnzand is significant duurder dan gewoon zand. De gemiddelde kosten van zandwinning nemen lineair toe met de afstand. De kosten voor laden en lossen bedragen €2,40 per m<sup>3</sup>, en elke kilometer afstand tussen winningsgebied en losgebied kost 9 cent per m<sup>3</sup>. Bij een afstand tot de kust van 20 kilometer kost zandwinning dus ongeveer €4 per m<sup>3</sup> of minder dan €3 per ton. Volgens het bedrijf GreenSand kost het winnen van olivijnzand in een bestaande steengroeve in La Coruña, Spanje, met een korrelgrootte tot 2 mm ongeveer €14 per ton, inclusief het laden in een schip. Het vervoer naar Nederland kost ongeveer €6 tot €10 per ton. Olivijn uit Noorwegen is ongeveer €2 duurder door de grotere afstand. Het vermalen van het olivijn tot deeltjes van 200 micrometer kost €4 à €5 per ton. Als we uitgaan van een gemiddelde meerprijs van olivijn ten opzichte van zand van €24 per ton olivijn en van de aannames zoals beschreven in Montserrat *et al.* (2017) dan vertaalt zich dit in €70 per ton CO<sub>2</sub> indien wordt gerekend met de CO<sub>2</sub>-opname over een periode van 30 jaar waarin ongeveer 40% van het olivijn zal zijn opgelost in het zeewater. Wordt gerekend met 50 jaar, dan dalen de kosten tot €50 per ton.

### *Neveneffecten*

Het oplossen van olivijn in zeewater leidt tot verhoogde niveaus van met name magnesium (Mg<sup>2+</sup>), silicium (Si), Total Alkalinity (TA), Dissolved Inorganic Carbon (DIC), ijzer (Fe<sup>3+</sup>) en nikkel (Ni<sup>2+</sup>). Magnesium is waarschijnlijk geen probleem omdat zeewater van zichzelf al veel magnesium bevat. Silicium en ijzer stimuleren de groei van micro-organismen in het water en kan tot extra CO<sub>2</sub>-opname leiden. Op zich is dat positief, maar het algehele effect op de voedselketen zou beter onderzocht moeten worden. Nikkel, dat alleen in zeer lage concentraties voorkomt in zeewater, potentieel toxisch en mogelijk een probleem als olivijn grootschalig wordt toegepast. Volgens Montserrat *et al.* (2017) leidt grootschalige toepassing van olivijn waarschijnlijk niet tot problematische niveaus, maar het is niettemin belangrijk (en verplicht binnen de EU-wetgeving) om mogelijke effecten op het zeemilieu te onderzoeken. En slotte verlaagt de toepassing van olivijn de pH-waarde van het water. Voor zeewater is dit positief aangezien dit de verzuring van de oceanen door opname van CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer tegengaat.

Wanneer olivijn grootschalig wordt toegepast in zoetwatermilieus (zoals het Amazone-bekken) of op land, dan kan dit wel tot problemen leiden (Köhler *et al.* 2010)

# 11 Direct Air Capture

Direct Air Capture of DAC betreft het afvangen van CO<sub>2</sub> uit de buitenlucht door het actief, meestal door ventilatoren, in contact te brengen met een chemische stof waaraan CO<sub>2</sub> zich bindt. Vervolgens wordt het CO<sub>2</sub> weer vrijgemaakt en ontstaat er geconcentreerd CO<sub>2</sub>-gas dat kan worden opgeslagen. Twee belangrijke technieken zijn:

1. Installaties waarin de buitenlucht in contact wordt gebracht met een oplossing van natriumhydroxide (NaOH) dat CO<sub>2</sub> bindt en natriumcarbonaat vormt (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Vervolgens wordt calciumhydroxide (CaOH) toegevoegd zodat calciumcarbonaat (CaCO<sub>3</sub>) wordt gevormd en natriumhydroxide dat weer opnieuw gebruikt kan worden. De CO<sub>2</sub> wordt vervolgens vrijgemaakt door verhitting tot 900 °C. Voor meer details, zie (Vitali 2017).
2. Installaties met filters waarin zich een poreus granulaat bevindt met een vast sorptiemiddel (meestal een amine) dat CO<sub>2</sub> absorbeert. Het CO<sub>2</sub> laat weer los door het verzadigde filter bloot te stellen aan stoom van 100 °C.

Een derde techniek zijn de 'Artificial Trees', die geen energie nodig hebben, maar deze bevinden zich in een zeer pril stadium van ontwikkeling (Vitali 2017).

Belangrijke voordelen van DAC systemen zijn dat zij niet locatiespecifiek zijn en dat ze geen last hebben onzuiverheden zoals die in verbrandingsgassen voorkomen (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, kwik, etc.) waardoor degradatie wordt veroorzaakt van het bindingsmiddel (Sanz-Pérez *et al.* 2016).



**Figure 11.1** De eerste commerciële fabriek bij Zürich die sinds mei 2017 CO<sub>2</sub> uit de buitenlucht haalt. Iedere unit haalt 50 ton CO<sub>2</sub> per jaar uit de atmosfeer. Bron: (Brugh 2017)

## *Technologische status*

In zijn algemeenheid is DAC nog steeds een beginnende technologie met vooral experimenten op laboratoriumschaal (NRC 2015; Sanz-Pérez *et al.* 2016) met een TRL tussen 4 en 8. Volgens Socolow *et al.* (2011) is een van de belangrijkste onderzoeksuitdagingen het ontwikkelen van adsorptiemiddelen met een betere verhouding tussen de reactiviteit met CO<sub>2</sub> en de benodigde

energie voor regeneratie. Wat betreft dat laatste is er een groeiend aantal academici die onderzoek verrichten naar betere materialen en processen voor DAC. Ook zijn er verschillende start-up bedrijven, zoals het Zwitserse Climeworks, die de technologie hebben opgeschaald naar demonstratie- en pilotprojecten (Climeworks 2018). Climeworks heeft twee fabrieken draaien in Zürich en Reykjavik. De, deels gesubsidieerde, Zwitserse fabriek vangt per jaar 900 ton CO<sub>2</sub> af, zie figuur 11.1. Dit gaat naar een naastgelegen kassencomplex om de plantengroei te stimuleren. De fabriek in IJsland vangt 50 ton af dat wordt opgeslagen in basaltlagen. Zij maken gebruik van de droge filtertechniek met amine-granulaat. In Nederland houdt het bedrijf Skytree zich bezig met DAC, maar richt zich vooral op luchtzuivering en CO<sub>2</sub>-productie voor methanolproductie en 'urban greenhouses' (Skytree 2018).

#### *Technisch potentieel*

In theorie kan een DAC-installatie eenvoudig worden opgeschaald en is het technisch potentieel onbeperkt. Het afvangen van 1 Mton CO<sub>2</sub> per jaar zou vijf afvanginstallaties van 1 km lang behoeven over een oppervlak van 1,5 km<sup>2</sup> wat zou neerkomen op een bijna 6,7 KtCO<sub>2</sub>/ha/yr (Socolow *et al.* 2011). Een oppervlak van 250 km<sup>2</sup> zou nodig zijn voor het afvangen van de Nederlandse emissies van CO<sub>2</sub> in 2016 en 1,3 keer het oppervlak van Nederland voor het afvangen van de mondiale emissies. Volgens Climeworks is het mogelijk installaties te bouwen die 3,5 keer minder oppervlak nodig hebben (24 KtCO<sub>2</sub>/ha/jaar).

Aangezien DAC zeer energie-intensief is, zijn er studies die aangeven dat ze gebouwd zouden moeten worden in gebieden waar het systeem op zonne-energie kan draaien (NRC 2015). De ruimte die nodig is voor het opwekken van voldoende energie zou het benodigde oppervlak verhogen met ten minste een factor 20 en de vastlegging verlagen tot 320 tCO<sub>2</sub>/ha ofwel ongeveer 1,1 miljoen km<sup>2</sup> voor het afvangen van de huidige mondiale CO<sub>2</sub> emissies.

#### *Energiebehoefte*

DAC is zeer energie-intensief en heeft vooral veel warmte nodig (~80%) en daarnaast elektriciteit (~20%). Volgens Socolow *et al.* (2011) is de totale energiebehoefte voor de hydroxide-techniek 7,7 tot 12,5 GJ/tCO<sub>2</sub>. Dit is consistent met Vitali (2017), die een warmteconsumptie rapporteert van 6 tot 10 GJ/tCO<sub>2</sub> en een elektriciteitsconsumptie tussen 1,1 en 1,9 GJ/tCO<sub>2</sub>. De filtertechniek van Climeworks verbruikt per ton afgevangen CO<sub>2</sub> 9 GJ aan warmte (100 °C) en 1,8 GJ (500 kWh) aan elektriciteit. Deze grote energiebehoefte impliceert dat alleen energiebronnen gebruikt kunnen worden die (vrijwel) CO<sub>2</sub>-neutraal zijn<sup>6</sup> of die niet elders gebruikt kunnen worden, zoals in het geval van de DAC-plant in Zürich. Overigens spreekt Climeworks de verwachting uit dat zij in 5 jaar de warmtebehoefte hebben gehalveerd tot 4,5 GJ/ton.

#### *Kosten*

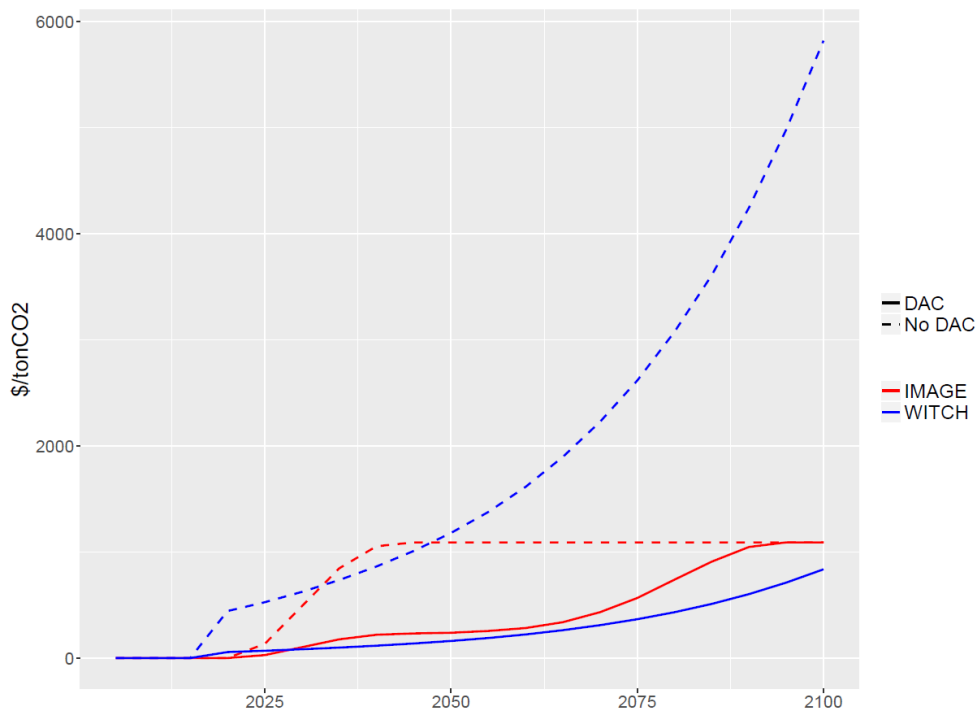
Kostenschattingen voor DAC (*zonder* CO<sub>2</sub>-opslag, zie hoofdstuk 3) zijn erg onzeker en vooral de lagere schattingen worden sterk betwist. Volgens McLaren (2012) rapporteren voorstanders €45 tot €215 per ton CO<sub>2</sub> voor techniek 1 en €35 tot €170 voor techniek 2. Op basis van een gedetailleerde berekening kwamen Socolow *et al.* (2011) veel hoger uit voor techniek 2. Zij gaven een 'realistische' schatting van €425 per ton CO<sub>2</sub> kapitaalkosten en €240 operating kosten, dus in het totaal €665 per ton. Hierbij werd aangegeven dat door een gebrek aan experimentele resultaten een onzekerheidsmarge aangehouden moet worden van +/- 50%, waarbij de ervaring leert dat de bovengrens vaak waarschijnlijker is dan de ondergrens. McLaren (2012) zelf verwacht dat DAC in de komende decennia niet beschikbaar zal zijn onder de €215 per ton. In een recentere studie rapporteerde de National Research Council (NRC 2015) een bedrag tussen €350 en €850 per ton CO<sub>2</sub>. Climeworks heeft zich ten doel gesteld aan te tonen dat afvangkosten van rond €510 (CHF 600) per ton mogelijk zijn en dat dit in opeenvolgende fabrieken te reduceren tot ten minste de helft. Hun lange termijn doel voor 2050 is €85 per ton CO<sub>2</sub>.

---

<sup>6</sup> Ter vergelijking: de emissiefactor van aardgas is 56 kg CO<sub>2</sub> per GJ.

### Realistisch potentieel

Edenhofer *et al.* (2014) rapporteren dat er maar een paar studie bestaan die de mogelijke rol van DAC in mitigatiescenario's hebben onderzocht. Deze laten zien dat de bijdrage van DAC sterk afhankelijk is van het uiteindelijke doel in termen van de CO<sub>2</sub> concentratie, de kosten van andere mitigatietechnologieën, de discount-rate en aannames over het tempo waarin DAC-installaties gebouwd en opgeschaald kunnen worden. Socolow *et al.* (2011) laten bijvoorbeeld zien dat in 2100 in de VS 10 tot 13 GtCO<sub>2</sub> per jaar afgevangen zou kunnen worden ofwel 1100 Gt cumulatief. Vitali (2017) heeft recent twee mitigatiescenario's (1,5°C en 2°C) uitgewerkt voor twee wereldmodellen, IMAGE en WITCH, waarin grootschalige DAC plaatsvindt. In het 1,5°C scenario wordt in 2100 17,5 tot 35 GtCO<sub>2</sub> per jaar afgevangen. De CO<sub>2</sub>-tax die nodig is om dit voor elkaar te krijgen loopt in IMAGE snel op tot het veronderstelde maximum van \$1100 (€985) per tCO<sub>2</sub> en in WITCH zelfs tot \$6000 (€5100) per ton CO<sub>2</sub> (zie figuur 11.2).



**Figuur 11.2** CO<sub>2</sub>-tax in een 1,5°C scenario in twee Integrated Assessment modellen waarin grootschalige DAC plaatsvindt. Bron: (Vitali 2017)

Socolow *et al.* (2011) concluderen dat DAC uiteindelijk een rol zou kunnen spelen in het compenseren van decentrale verspreide emissiebronnen, zoals van gebouwen en voertuigen (vrachtwagens, schepen en vliegtuigen). Deze bronnen zijn moeilijk op een andere manier aangepakt kunnen worden, vooral bij een beperkte beschikbaarheid van biobrandstoffen. Pritchard *et al.* (2015) voegen hier aan toe dat de tijd die nodig is voor de uitrol van DAC, er toe zal bijdragen dat DAC hooguit marginaal zal zijn. Niettemin heeft Climeworks zich tot doel gesteld om in 2025 ongeveer 1% van de mondiale emissies af te vangen (rond 300 Mton) wat volgens hen kan worden bereikt bij een jaarlijkse verdubbeling van de investeringen in DAC. Dit lijkt vooralsnog erg optimistisch bij een huidige afvang 1 kton per jaar.

Op basis van bovenstaande kan vooralsnog worden geconcludeerd dat DAC in de komende decennia geen grote bijdrage zal leveren als mitigatieoptie en gaan we er in deze studie van uit dat de bijdrage tot 2050 vooralsnog verwaarloosbaar zal zijn, tenzij Climeworks haar belofte waar zou maken.

# 12 Transport en opslag

In de voorgaande hoofdstukken zijn veel opties en hun kosten beschreven tot aan het punt waar een (vrijwel) pure CO<sub>2</sub>- stroom ontstaat. Deze CO<sub>2</sub> zal vervolgens getransporteerd en opgeslagen moeten worden ten einde negatieve emissies te realiseren. In dit hoofdstuk bespreken we het potentieel van CO<sub>2</sub>-opslag in Nederland en de bijbehorende kosten.

Het transport en ondergronds injecteren van CO<sub>2</sub> in olie- en gasvelden wordt al sinds de jaren 50 op vrij grote schaal in de praktijk gebracht. Niet als vorm van klimaatbeleid, maar voor het verhogen van de opbrengst van olievelden (Extended Oil Recovery, EOR). In 2014 lagen er wereldwijd 4800 km hogedruk pijpleidingen die gezamenlijk 60 miljoen ton CO<sub>2</sub> per jaar transporteren, met name in de VS (Mac Dowell *et al.* 2017).

## *Technische status*

De huidige transport- en opslag technieken voor wat betreft de olie- en gasvelden bevinden zich in TRL 9, maar voordat een nieuw reservoir in gebruik genomen kan worden is het belangrijk dat alle (milieu)-risico's goed in beeld worden gebracht ten aanzien van aantasting van de injectieputconstructie bijvoorbeeld door corrosieve stoffen in de CO<sub>2</sub>-stroom, koelwaterverbruik- en lozing, beheers- en afsluopties van de reservoirs in geval van calamiteiten of lekkages bij de injectieputten of de transportleidingen, de permeabiliteit en porositeit van het reservoir op korte en lange termijn (Jaju *et al.* 2016; RVO 2015a). Ook is het belangrijk, vooral bij de eerste velden, dat na afsluiting monitoring van het reservoir plaatsvindt om zeker te zijn dat er geen lekkages plaatsvinden. Het is daarom belangrijk te beginnen met de kleinere velden (zoals P18 en Q16 onder de Noordzee).

De opslag in waterhoudende lagen en zoutlagen (aquifers) is een relatief nieuwe techniek die nog veel minder ver is ontwikkeld en zich in de pilotfase bevindt (TRL 7). Het grootse pilotproject, 300 kton over een periode van 3 jaar, bevindt zich in Noord Yulin in China waar onderzoek wordt gedaan naar risico's in termen van lekkages, bodemdeformatie en daar uit volgende mogelijke aardbevingen (Nguyen *et al.* 2017).

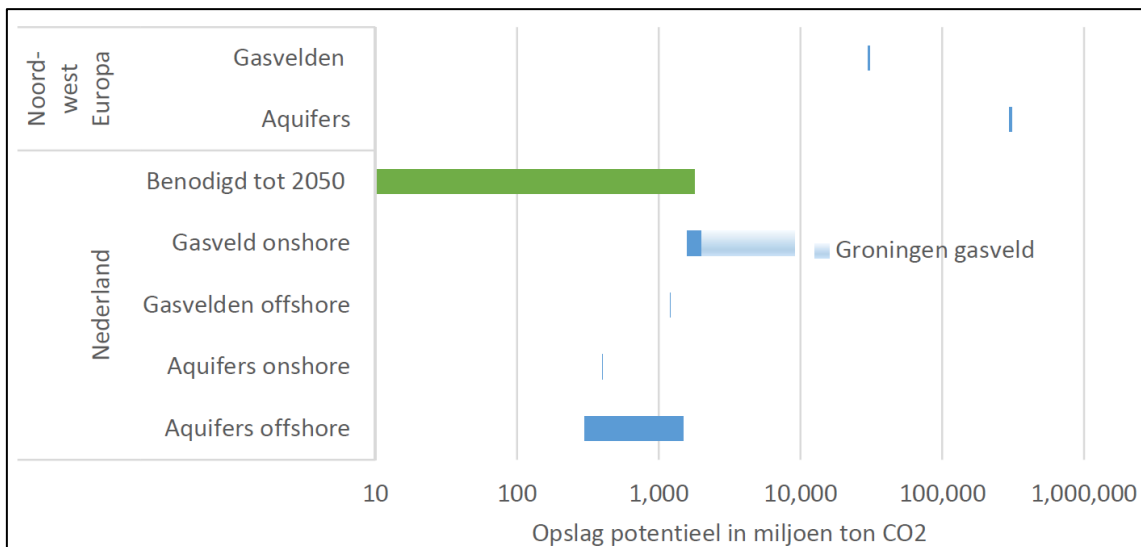
Een derde opslagtechniek is mineralisatie van CO<sub>2</sub> in ondergrondse basaltlagen zoals toegepast in IJsland door Climeworks (zie hoofdstuk 11) en waarover recent is gepubliceerd in Science (Kintisch 2016). Belangrijk voordeel hiervan is dat de CO<sub>2</sub> gegarandeerd voor eeuwig wordt vastgelegd. Ook deze vorm van opslag is in de pilotfase en is voor Nederland niet relevant aangezien wij niet over basaltformaties beschikken.

## *Technisch potentieel*

De wereldwijde opslagcapaciteit is enorm met eerste orde schattingen die uitkomen op ongeveer 11.000 Gton CO<sub>2</sub>. Hiervan wordt ongeveer 1.000 Gton afgedekt door olie- en gasvelden. Zo'n 9.000 tot 10.000 Gton wordt gevormd door aquifers. En ten slotte is er nog een significant potentieel in niet winbare kolenlagen, met als bijkomend (economisch) voordeel dat het daarin voorkomende methaan gewonnen zou kunnen worden (Mac Dowell *et al.* 2017).

Nederland is goed geoutilleerd wat betreft de opslagcapaciteit voor CO<sub>2</sub>. De geschatte hoeveelheid opslagcapaciteit in gasvelden, uitgezonderd het Groninger gasveld, is 2,7 tot 3,2 Gton CO<sub>2</sub> (zie figuur 12.1). Hiervan ligt 1,5 tot 2 Gton onder land en 1,2 Gton onder zee. Dit laatste is het minst controversieel en technologisch het meest ontwikkeld. In aquifers kan nog eens 0,7 tot 1,5 Gton CO<sub>2</sub> worden opgeslagen (Gasunie 2016; Hendriks *et al.* 2015; Neele *et al.* 2012). Het Groninger gasveld voegt hier minimaal 7 Gton CO<sub>2</sub> aan toe, maar is als het meest controversieel te beschouwen.





**Figuur 12.1** Opslagpotentieel in de ondergrond van Nederland en Noordwest Europa. Bron: Uit (Hendriks *et al.* 2015)

#### *Realistisch potentieel*

De genoemde capaciteit is toereikend om de hoeveelheden CO<sub>2</sub> zoals berekend in voorgaande hoofdstukken (en samengevat in tabel B.2) op te slaan. Alles bij elkaar opgeteld is de maximaal benodigde opslagcapaciteit voor de in dit rapport berekende negatieve emissies in 2050 gelijk aan ruim 0,5 Gton CO<sub>2</sub>. Hierbij zal vooral het maatschappelijk draagvlak een issue zijn, maar ook bij de in dit opzicht minder problematische opslag onder de zeebodem is de capaciteit tot 2050 ruim voldoende, in elk geval voor de hier benoemde negatieve emissies. Eventuele CCS van fossiele CO<sub>2</sub>-bronnen is daarin dan nog niet meegenomen. De fysieke beschikbaarheid van opslagcapaciteit zal dus niet in de eerste plaats beperkend zijn voor CCS, maar zal vooral bepaald worden door het tempo waarin CCS gerealiseerd kan worden. Koelemeijer *et al.* (2017) beschouwen daarom maximaal 20 Mton per jaar in 2030 als 'redelijke' bovengrens. In het Regererakkoord wordt dit ook als na te streven doel benoemd (Rutte *et al.* 2017). In hoeverre dit echt realistisch is, is onderwerp van discussie. Zo is het ROAD-project, dat beoogde om 2 Mton per jaar op te slaan, in september 2017 na 8 jaar beëindigd omdat de financiering niet rond gekregen kon worden bij de huidige lage CO<sub>2</sub>-prijs en doordat er veel onzekerheid bestond over het voortbestaan van de kolencentrales waar de CO<sub>2</sub>-afvang had moeten plaatsvinden (EZ 2017). Een realistische bovengrens voor 2050 is lastig in te schatten en hangt ook na 2030 af van het tempo waarin CCS gerealiseerd kan worden. Voor deze studie gaan we er vooralsnog van uit dat transport en opslag niet de grootste bottleneck is voor het realiseren van negatieve emissies.

#### *Kosten*

In een overzichtsstudie van Rubin *et al.* (2015) worden de kosten van transport (inclusief compressie) en opslag van CO<sub>2</sub> op een rij gezet. Het transport van CO<sub>2</sub> via pijpleidingen is afhankelijk van de afstand, de capaciteit (of dikte) van de pijp en of het op land (onshore) is of in de zee (offshore), zie tabel 12.1. Bij capaciteiten van meer dan 10 MtCO<sub>2</sub> per jaar zijn de extra kosten voor transport, zeker in vergelijking met de kosten voor afvang, laag. Het transport kan ook per schip uitgevoerd worden, maar vooralsnog gaat men er van uit dat transport via pijpleidingen dominant zal blijven. Dit zal zeker gelden voor Nederland waar de afstanden tot de velden relatief gering zijn (onder de 250 km), terwijl het transport per schip minder afhankelijk is van de afstand.

**Tabel 12.1** Kosten van transport van CO<sub>2</sub> in € per ton. Onshore en offshore zijn op basis van middenwaardes volgens Rubin *et al.* (2015). De kosten per schip zijn gebaseerd op ZEP (2011b), en zijn inclusief het vloeibaar maken van CO<sub>2</sub>.

Capaciteit van de pijpleiding	Onshore per 250 km	Offshore per 250 km	Per schip Tot 500 km
3 MtCO <sub>2</sub> per jaar	€6,50	€9,40	€15,00
10 MtCO <sub>2</sub> per jaar	€2,50	€3,50	€12,00
30 MtCO <sub>2</sub> per jaar	€1,50	€1,80	

De meest gedetailleerde studie over de kosten van opslag is die van het Zero Emission Platform (ZEP 2011a), waarin onderscheid wordt gemaakt tussen onshore, offshore, het type opslaglocatie (lege olie- en gasvelden versus aquifers) en in hoeverre gebruik gemaakt kan worden van bestaande infrastructuur. In de Nederlandse situatie zal vooral gebruik worden gemaakt van lege olie- en gasvelden onder zee waarvoor de 'medium' kosten door ZEP worden geschat op €6 tot €10 per ton CO<sub>2</sub>. De totale range is €2 tot €14 per ton. Dit wordt mede veroorzaakt doordat het lastig is in te schatten wat het effect is op de kosten ten gevolge van aansprakelijkheid en verplichtingen met betrekking tot langdurige monitoring van mogelijke lekkages uit de ondergrondse opslag.

# 13 Biomassapotentieel

De in dit rapport beschreven opties voor negatieve emissies zijn voor een belangrijk deel afhankelijk van de beschikbaarheid van duurzaam geproduceerde en betaalbare biomassa. In paragraaf 13.1 en 13.2 wordt uiteengezet dat het binnenlandse aanbod voor energie maximaal zo'n 230 PJ zal bedragen, maar bij 95% emissiereductie in 2050 zal de vraag veel hoger zijn, zeker als het beleid ter bevordering van negatieve emissies wordt geïntensiveerd (paragraaf 13.3). Daarom zal import van biomassa noodzakelijk zijn, maar het is de vraag of er voldoende biomassa voor Nederland beschikbaar zal komen.

## 13.1 Binnenlands gebruik en ongebruikt potentieel

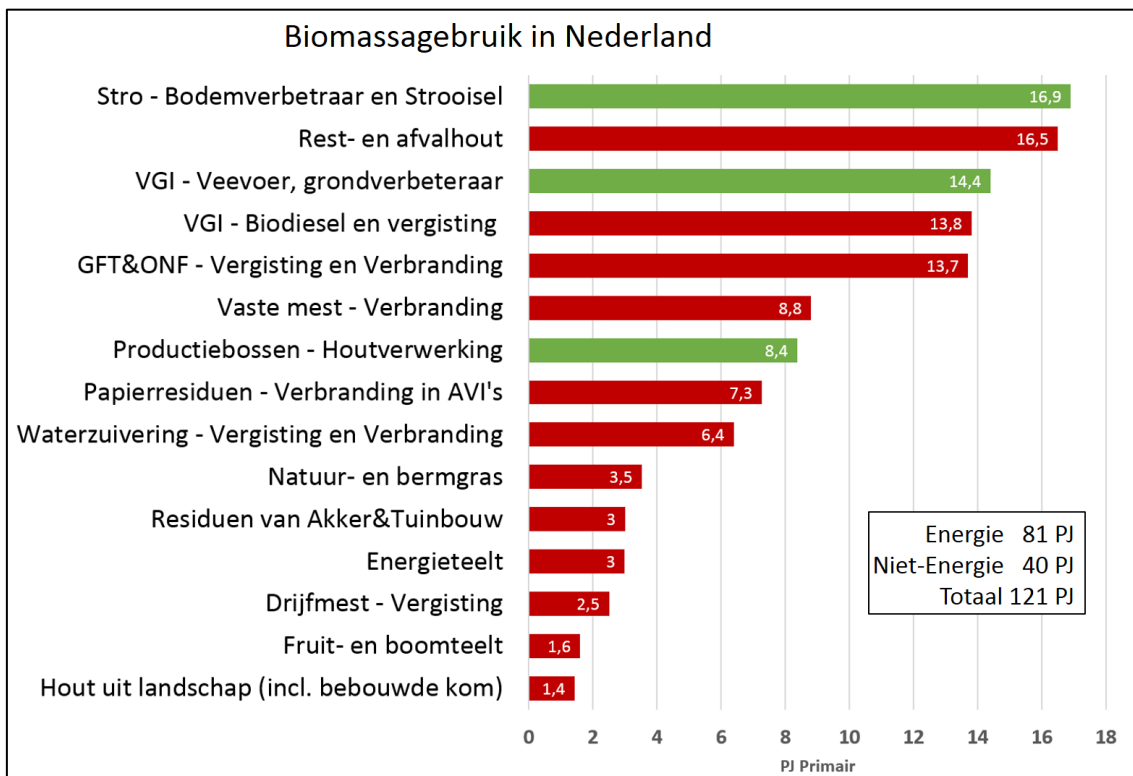
In een recente studie van DNV-GL (2017) voor GasUnie is het gebruik en de nog beschikbare biomassa in Nederland gedetailleerd in kaart gebracht op basis van een ruime selectie recente literatuur. Het huidige gebruik van Nederlandse biomassa telt op tot ruim 120 PJ zoals weergegeven in figuur 13.1. Op volgorde van omvang kunnen de volgende categorieën worden onderscheiden:

- **Stro** De grootste categorie is stro met een omvang van 17 PJ of 945 kton. Ongeveer 75% wordt geoogst, verhandeld en voor niet-energietoepassingen gebruikt zoals strooisel in de veehouderij. De rest vervult een rol als bodemverbeteraar, groenbemesting en om nutriënten en bodemkoolstof aan te vullen. Er is dus geen ongebruikt potentieel (zie figuur 13.2)
- **Rest- en afval hout** In totaal komt er in Nederland ongeveer 400 kton aan vers en droog resthout vrij (zaagsel, krullen, afkorthout etc.) uit de houtverwerkende industrie en 1300 kton afvalhout (bouw- en sloopafval, houten verpakkingen en afgedankte houten meubels). Van dit rest- en afvalhout wordt 880 kton of 16,5 PJ ingezet voor energieproductie in Nederland en 480 kton of 9 PJ wordt geëxporteerd voor energieopwekking in het buitenland. De rest wordt gebruikt voor strooisel (200 kton), pallets (120 kton) of spaanplaat. Als het exportdeel binnen Nederland gebruikt zou worden, dan levert dat een potentieel van 9 PJ.
- **VGI – Veevoer, grondverbeteraar, etc** In Nederland zijn er ongeveer 6.000 bedrijven in de VGI-industrie waar jaarlijks 8.100 kton of 36 PJ aan reststromen vrijkomen. Daarvan wordt 13,8 PJ energetisch ingezet (zie volgende categorie) en van de rest wordt ongeveer een kwart (9 PJ) ingezet als veevoer, 10% (3,6 PJ) als grondverbeteraar, en 5% (1,8 PJ) krijgt buiten de agrofoodketen een bestemming. Dit telt op tot 14,4 PJ. Al het huidige gebruik, inclusief de energetische categorie, telt op tot ruim 28 PJ en dus lijkt er een potentieel te zijn van ten minste 8 PJ. Hiervan wordt 1,8 PJ verbrand of gestort en van de rest is onbekend hoe dit precies wordt ingezet. Wordt er meer dan dit potentieel van 8 PJ ingezet voor energiedoelinden, dan zal dit ten koste gaan van bijvoorbeeld veevoer wat dan op andere wijze geproduceerd of ingekocht moet worden.
- **VGI – Biodiesel en vergisting** Van het totaal van 36 PJ bestaat 10,5 PJ uit frituurvet en restvetten die worden ingezet voor biodiesel en daarnaast wordt 3,3 PJ vergist bestaande uit reststromen van bierbrouwers (afvalwater), de visverwerkingsindustrie en de suikerindustrie (blad en loof).
- **GFT&ONF** In 2015 werd 475 kton GFT en 80 kton Organische Natte Fractie (ONF) met een primaire energie-inhoud van 4,2 PJ vergist tot 0,6 PJ groen gas, 1,1 PJ elektriciteit en 0,6 PJ warmte. In 2015 bevond zich daarnaast nog 1270 kton of 9,5 PJ GFT in het

huishoudelijk afval, die eindigde in de AVI's en dat in principe hoogwaardiger ingezet zou kunnen worden.

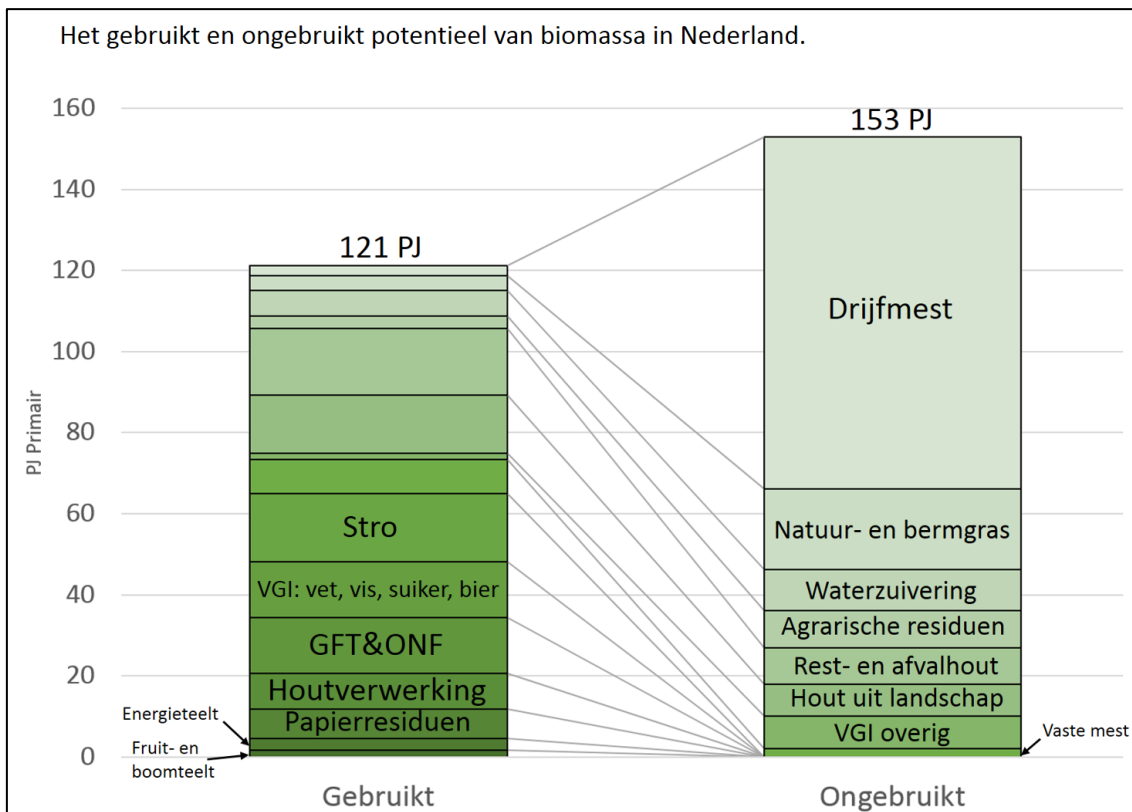
- **Productiebossen - Houtverwerking** In 2014 werd er in de productiebossen 1,1 miljoen m<sup>3</sup> (580 kton of 11,2 PJ) rondhout geoogst in Nederland waarvan driekwart (8,4 PJ) werd ingezet voor de houtverwerkende industrie in binnen (7,2 PJ) en buitenland (1,2 PJ). De rest, voornamelijk bestaande uit snelgroeiende bomen zoals wilgen en populieren werd ingezet voor energieproductie (zie energieteelt).
- **Vaste mest – Verbranding** In 2015 werd 3 miljoen ton of 10,8 PJ vaste mest geproduceerd door met name vleeskalveren en pluimvee, waarvan 8,8 PJ werd verbrand. Er is dus een ongebruikt potentieel van 2 PJ.
- **Papierresiduen** Gemiddeld wordt er in Nederland jaarlijks 2.200 kton oud papier en karton ingezameld wat gelijk is aan 80 tot 85% van alle oud papier en karton. Het resterende gedeelte, 550 kton of 7,3 PJ, is onderdeel van het huishoudelijke afval wat verbrand wordt in AVI's. Als het recyclingspercentage nog hoger zou worden, dan zou dit afnemen.
- **Waterzuivering** In totaal bevat stedelijk en industrieel afvalwater, dat behandeld wordt in 337 RWZI's en 427 AWZI's, 16 PJ aan chemische energie. In 30% van de RWZI's werd in 2015 2,4 PJ biogas gewonnen uit vergisting en omgezet in warmte en elektriciteit voor eigen gebruik. Daarnaast werd (in 2014) 320 kton of 3,6 PJ aan ingedikt zuiveringsslib geproduceerd, dat werd verbrand. In 2014 produceerden de AWZI's, die in totaal 123 kton of 1,3 PJ aan droge stof produceerden. Ruim 36 kton of 0,4 PJ werd in 2014 ingezet voor biogasproductie (4,2 kton) en energieopwekking in WKK-installaties (32 kton). Het huidige gebruik telt op tot 6,4 PJ hetgeen betekent dat er een ongebruikt potentieel bestaat van bijna 10 PJ.
- **Natuur- en Bermgras - Energie** Jaarlijks wordt ongeveer 1400 kton of 23,5 PJ natuur- en bermgras geoogst op ruim 272.000 ha. Verschraling van de bodem door de afvoer van nutriënten is in bijna alle gevallen het doel van deze beheersmaatregel, vooral in gebieden die aan de landbouw zijn onttrokken. Het gras wordt gedeeltelijk gebruikt als veevoer, voor compostering en ingezet in enkele covergistinginstallaties (bijv. WABICO). Ongeveer 15% (3,5 PJ) wordt gebruikt voor energiedoelinden (niet gas). Een groot gedeelte blijft echter onbenut.
- **Residuen van akker- en tuinbouw** Deze residuen bestaan uit 1430 kton of 17,7 PJ natte gewasresten van de akkerbouw (13,3 PJ), de tuinbouw (3,2 PJ) en de tuinbouw onder glas (1,2 PJ). Slechts 3 PJ wordt gebruikt voor energietoepassingen. De rest wordt bijna altijd ondergewerkt door het ontbreken van infrastructuur zoals oogstmachines. De gewasresten van de glastuinbouw worden voor een deel toegevoegd aan de bodem en voor een deel gecomposteerd. Toepassing voor energieopwekking lijkt voor het hedendaagse gecomposteerde gedeelte (50% of 0,6 PJ) mogelijk. Een afvoer van maximaal 70% voor akker- en tuinbouw (ruim 900 kton of 11,5 PJ) lijkt uit ecologisch oogpunt mogelijk. Voor de rest wordt aangenomen dat de gewasresten een rol vervullen als groenbemesting om nutriënten en bodemkoolstof aan te vullen. Dit leidt tot een potentieel van ruim 9 PJ (12,1 totaal potentieel minus 3 PJ die nu al gebruikt wordt).
- **Energieteelt** Zoals aangegeven bij de categorie productiebossen worden er snelgroeiende bomen geteeld voor energieproductie; namelijk 2,8 PJ waarvan 0,4 PJ wordt geëxporteerd. De teelt van energiegewassen betreft vooral koolzaad voor biodiesel, en graan en maïs voor de ethanolproductie. Energiemaïs wordt ingezet voor vergisting. In 2014 werd slechts 38 kton of 0,2 PJ aan energiegewassen geproduceerd.
- **Drijfmest** De totaal geproduceerde hoeveelheid drijfmest van rundvee en varkens in 2015 was ruim 73 miljoen ton of 89 PJ, waarvan ongeveer 90% in stallen vrij kwam. Hiervan werd 2,5 PJ of 1,7 Mton ingezet in vergisters. Er is nog een groot potentieel van bijna 87 PJ. In hoeverre dit gebruikt kan worden voor vergisting hangt af van de toekomst van de veehouderij.

- **Fruit- en boomteelt** beslaat ruim 32.000 ha en produceert 80 kton of 1,6 PJ per jaar. Grote stukken rooihout worden verkocht aan particulieren en slechts 10% wordt ingezet bij grote verbrandingsinstallaties. Dit is zo laag omdat het snoeihout vaak te vies is (bladeren, zand, stenen) waardoor het niet geschikt blijkt voor verbranding in kleinere verbrandingsinstallaties.
- **Hout uit landschap** Landschapselementen als knotbomen en hakhout vereisen elke paar jaar kap. Jaarlijks komt ongeveer 480 kton of 9,5 PJ hout beschikbaar op 70.000 ha natuurgebieden. Ongeveer 15% (1,4 PJ) wordt gebruikt voor energie en een deel voor compostering. Het potentieel is dus ruim 8 PJ, maar de knelpunten voor het verzamelen en toepassing voor energiedoeleinden zijn op dit moment dat de kosten van het beheer hoger zijn dan de biomassabatzen, het hout lastig oogstbaar is en er vaak een logistieke organisatie ontbreekt.



**Figuur 13.1** Biomassagebruik in Nederland, afgeleid van (DNV-GL 2017). De rode balken zijn categorieën die worden gebruikt voor energieproductie door verbranding, vergisting of bio-brandstofproductie (vooral biodiesel).

In figuur 13.2 wordt het huidige gebruik van biomassa in Nederland gezet naast het ongebruikte potentieel voor de hierboven onderscheiden categorieën. Het ongebruikt potentieel is niet de hoeveelheid die maximaal in Nederland geproduceerd zou kunnen worden, maar de hoeveelheid die op dit moment beschikbaar is en (nog) niet wordt benut. Uit deze getallen volgt dat er in NL bijna 275 PJ gebruikte en ongebruikte biomassa beschikbaar is, waarvan een derde afkomstig van drijfmest.



**Figuur 13.2** Het gebruikt en ongebruikt potentieel van biomassa in Nederland berekend op basis van DNV-GL (2017). Dit gaat dus niet over de hoeveelheid die maximaal in Nederland geproduceerd kan worden, maar over het ongebruikt potentieel dat op dit moment aanwezig is. In de kolom 'Gebruikt' zijn alleen die categorieën van tekst voorzien, die geen ongebruikt potentieel hebben.

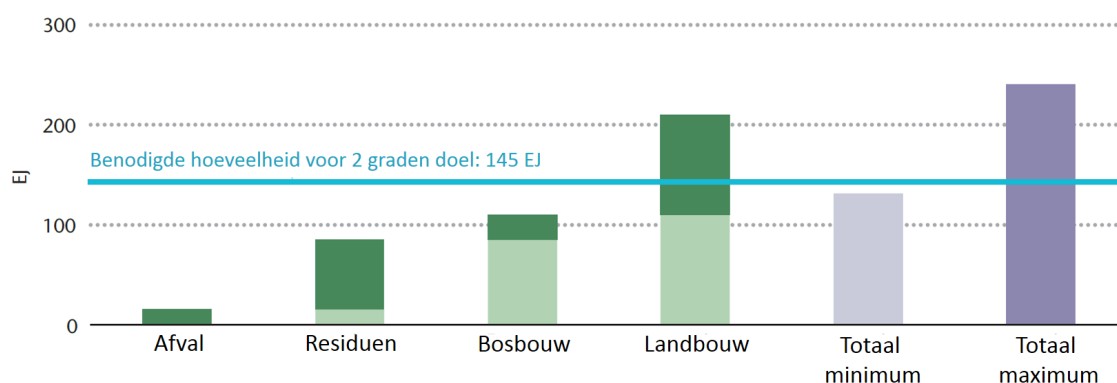
## 13.2 Import van biomassa

Zoals weergegeven in figuur 1.1 volgt uit berekeningen met het E-Design model dat biomassa een belangrijk aandeel zal hebben in de energiemix bij een emissiereductiepercentage van 95% in 2050. De laagste varianten (F, G en K) komen uit op ongeveer 220 PJ finaal energieverbruik en de hoogste variant (E) op 620 PJ. Bij een veronderstelde efficiency van gemiddeld 50% komt dit neer op een primaire behoefte aan biomassa van 440 tot 1240 PJ in 2050. Daarnaast wil de chemische minimaal 35% van de kunststoffen uit biomassa maken in 2050 (zie hoofdstuk 4) wat neerkomt op een extra biomassavraag voor grondstoffen van ongeveer 230 PJ. De totale vraag naar biomassa zal dus waarschijnlijk ergens liggen tussen 670 en 1470 PJ in 2050. De totale vraag in 2030 ligt volgens EZ (2016), die zich o.a. baseert op de NEV, tussen 430 en 600 PJ. Zoals aangegeven in paragraaf 13.1 is de som van de huidige energietoepassingen (81PJ, zie figuur 13.1) en het ongebruikte hoeveelheid biomassa (153 PJ, zie figuur 13.2) in Nederland gelijk aan ruim 230 PJ. Wij beschouwen dat als het maximale aanbod dat als realistisch kan worden beschouwd. Verdere verhoging van het potentieel zou mogelijk kunnen zijn door uitbreiding van de energieteelt (b.v. suikerbieten, zie hoofdstuk 4) of de houtoogst (zie hoofdstuk 8), maar tegelijkertijd is het niet ondenkbaar dat het aanbod van drijfmest uit de veehouderij (wat bovendien alleen gebruikt kan worden voor vergisting) zal afnemen. We gaan er hier daarom van uit dat 230 PJ als bovengrens voor Nederland moet worden gezien, uitgezonderd de mogelijke bijdrage van zeewier van 18 PJ in 2050 (zie paragraaf 13.3).

**Tabel 13.1** Noodzakelijke import van biomassa bij 95% emissiereductie en nationale en internationale beschikbaarheid.

	Technisch	Realistisch	
		2030	2050
	PJ		
Potentieel biomassa, binnenland	275	<230	<230
Potentieel zeewier, Noordzee	350	nihil	18
<b>Totaal aanbod in NL</b>	<b>625</b>	<b>&lt;230</b>	<b>&lt;250</b>
<b>Totale vraag naar biomassa</b>		<b>430-600</b>	<b>670-1470</b>
<b>Benodigde biomassa obv tabel B.2</b>	<b>&gt;2250</b>	<b>&gt;170</b>	<b>&gt;410</b>
<b>Minimale noodzakelijke import</b>		<b>200-370</b>	<b>420-1220</b>
<b>Mondiale import obv inwonertal</b>			230-430
<b>Mondiale import obv BNP</b>			660-1420
<b>Europese import obv inwonertal</b>		150-525	
<b>Europese import obv BNP</b>		270-950	

Zoals samengevat in tabel 13.1 leidt dit tot een noodzaak tot import van biomassa die ligt tussen 200 en 370 PJ in 2030 en 420 tot 1220 PJ in 2050. Hierbij is nog geen rekening gehouden met een mogelijke intensivering van het beleid rond negatieve emissies, die wellicht tot een nog hogere vraag naar biomassa zou kunnen leiden. So wie so is het zeker dat de benodigde hoeveelheid biomassa die zou volgen uit het volledig realiseren van het technisch potentieel niet haalbaar is. Of de minimale noodzakelijke import realistisch is, is afhankelijk van de buitenlandse beschikbaarheid van duurzame biomassa. Die is erg onzeker en verschillende studies geven schattingen die sterk uiteenlopen: op wereldniveau van 50 tot 400 EJ in 2050 (Deng *et al.* 2015; Klein *et al.* 2014; PBL 2014; Searle en Malins 2015). Dit heeft verschillende oorzaken zoals de keuze van bronnen die worden beschouwd (afval, landbouw- en bosbouw residuen, energiegewassen, algen, etc.), landbouw- of bosbouwopbrengsten per ha, en vooral ook welke gebieden wel of juist niet kunnen of mogen worden gebruikt voor biomassateelt zoals gedegradeerde of verlaten landbouwgronden en/of de savanne (Batidzirai *et al.* 2012). In 2016 organiseerde IRENA en IEA een workshop met als doel een hogere mate van consensus te bereiken over de mondiale beschikbare hoeveelheid duurzame biomassa in 2050-2060 binnen de verschillende categorieën (zie figuur 13.3).

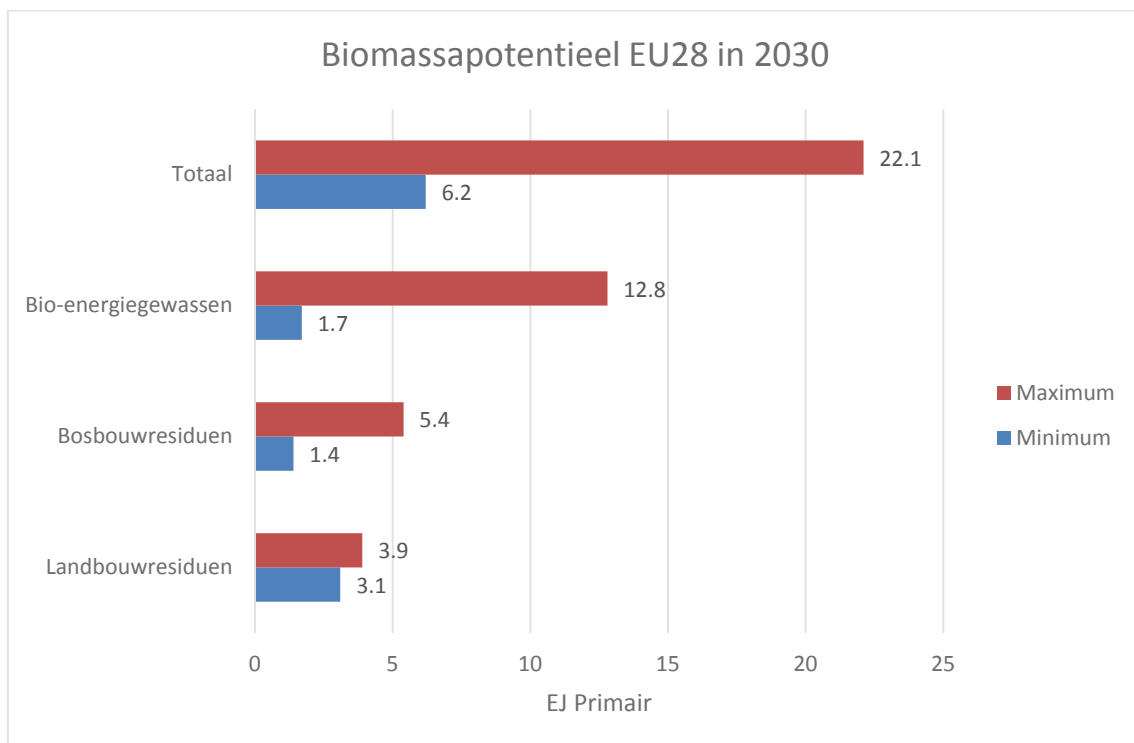


**Figuur 13.3** Mondiale beschikbare duurzame biomassa volgens IEA (2017) ligt tussen 130 en 240 EJ per jaar in 2050-2060. De IEA schat dat voor het bereiken van het twee graden doel ten minste 145 EJ biomassa nodig is (blauwe lijn).

Als we de schattingen van IEA (2017) aanhouden en evenredig naar inwonertal toekennen aan Nederland op basis van de verwachte populatie in de wereld en in Nederland in 2050 -

9,8 miljard versus 17,5 miljoen volgens (UN 2017) - dan betekent dat dat er 230 tot 430 PJ geïmporteerd zou kunnen worden. Alleen in het gunstigste geval is dit voldoende om de noodzakelijke import af te dekken. Als toekenning plaatsvindt op basis van inkomen in 2050 - uitgaande van de economische scenario's in de WLO studie van PBL en CPB (PBL en CPB 2015) - dan zou er 660 tot 1420 PJ beschikbaar zijn hetgeen meer in lijn is met de verwachte behoefte aan import. Ook de potentiële schattingen voor Europa lopen sterk uiteen. In een Europese overzichtsstudie op basis van 150 studies kwam men uit op 2,3 tot 23,8 EJ voor 2020 (Koch 2011). Voor 2030 kwamen de Wit en Faaij (2010) voor de EU28 uit op 6,2 tot 22,1 EJ. Op basis van verschillende methodes (beschikbaar 'surplus' land, modelberekeningen en een economische evaluatie) berekenden zij een potentieel voor 2<sup>e</sup> generatie bio-energiegewassen van 1,7 tot 12,8 EJ per jaar op 900.000 km<sup>2</sup> en uitgaande van een 'voedsel eerst' paradigma. Het restant, 4,5 tot 9,3 EJ, zou dan komen van landbouw- en bosbouwresiduen (zie figuur 13.4).

Op basis van inwonertal in 2030, maar zeker op basis van inkomen zou dit net (of net niet) tot ruim voldoende moeten zijn voor de behoefte van biomassa in Nederland (zie tabel 13.1) en zou het dus in principe niet nodig zijn om tot 2030 biomassa van buiten de EU te importeren.



**Figuur 13.4** Europese beschikbare duurzame biomassa ligt volgens de Wit en Faaij (2010) tussen 6,2 en 22,1 EJ per jaar in 2030.

#### Kosten

De betaalbaarheid van duurzame biomassa in de toekomst hangt af van vele (economische) factoren en zijn lastig in te schatten. Volgens de Wit en Faaij (2010) liggen de productiekosten in Europa in 2030 voor 1<sup>e</sup> generatie bio-energiegewassen tussen €5 en €15 per GJ en tussen €1,50 en €4,50 per GJ voor houtige gewassen. Kosten voor landbouwresiduen lopen uiteen van €1 tot €7 per GJ en bosbouwresiduen van €2 tot €4 per GJ. Er van uitgaande dat de import vooral zal bestaan uit houtige gewassen, dan zouden de importkosten (uitgezonderd transport) in 2030 liggen in de range van €350 miljoen tot €2 miljard.

Voor 2050 is het nog lastiger. In bijvoorbeeld de 2 graden scenario's binnen de WLO-studie van PBL, die een intensief klimaatbeleid vertegenwoordigen met een grote vraag naar biomassa, komt men uit op een gemiddelde wereldprijs van €24 per GJ in 2050 (Aalbers *et al.*



2016; Matthijsen *et al.* 2015). Op basis van tabel 13.1 zou dit neerkomen op zo'n €14 tot €30 miljard.

Er zijn overigens grote verschillen in productiekosten en potentiëlen tussen de verschillende Europese landen en regio's binnen landen. Landen met hoge potentiëlen tegen relatief lage kosten zijn delen van Polen, de Baltische Staten, Roemenië, Bulgarije en Oekraïne. In west Europa zijn het vooral Frankrijk, Spanje en Italië.

#### *Energieakkoord*

In het kader van het Energieakkoord zal in 2023 ongeveer 60 PJ (of 25 PJ in termen van output) aan duurzaam geproduceerde en grotendeels geïmporteerde houtchips en pellets worden bijgestookt in kolencentrales. Daarna zal dit stoppen aangezien de SDE+-subsidies volgens de huidige regeringsplannen vooralsnog in 2023 worden stopgezet en bovendien de kolencentrales uiterlijk in 2030 zullen sluiten. Het lijkt verstandig in het licht van bovenstaande analyse om deze biomassastroom, waarvoor een uitgebreid duurzaamheidskader wordt ingericht, te borgen en in te zetten voor de biobased economy, en waarvan negatieve emissies een onderdeel kunnen zijn.

### 13.3 Zeewier

Zeewier als bron van biomassa kan potentieel interessant zijn zodra het mogelijk wordt dit op grote schaal tegen lage kosten te telen. We behandelen zeewier hier apart omdat sommige studies uitgaan van grote potentiëlen (Soest *et al.* 2014) en er regelmatig aandacht aan wordt besteed in de media waarbij soms wordt gesuggereerd dat er grote productievolumes mogelijk zijn tegen zeer lage kosten (VPRO 2017). Vooralsnog strookt dat niet met de realiteit.

Zeewieren (macro-algen), zijn algen die per definitie uit meer dan 1 cel bestaan<sup>7</sup>. Buiten de tropen is het de snelst groeiende plant en heeft een fotosynthetische efficiëntie van 8 procent en is daarmee ruim 3 keer zo efficiënt als landplanten. Het heeft een groeicyclus die is aangepast aan het seizoen. Bruine wieren groeien b.v. in de winter van november tot in de periode juni tot september. Daarna sterft het af en begint de cyclus opnieuw. Kelpen, een soort bruinwier, bevatten hoge concentraties suiker-alcoholen, die direct uit de plant te extraheren zijn. Hierdoor kunnen allerlei conversiestappen (zoals bij de omzetting van mais naar suikeralcoholen) worden overgeslagen.

Er zijn 15 tot 20 duizend soorten zeewier die ongeveer gelijk zijn verdeeld over drie hoofdgroepen: rode, bruine en groene wieren. Tot op heden zijn er slechts enkele honderden soorten beschreven. Elke soort zeewier maakt zijn eigen specifieke suikerverbindingen waaronder galactose en melksuiker.

Vingerwier (*Laminaria Digitata*) is een bruinwier dat grote hoeveelheden van de zoetstof mannitol bevat. Als vingerwier op het juiste moment wordt geoogst – dat wil zeggen in de vroege zomer – dan bevat de plant tot 25% mannitol op droge stof basis. Dit wordt gebruikt als zoetstof, als grondstof voor zeep (vooral tegen olievlekken), voor porschuim of het kan worden gemodificeerd tot bleekmiddel. Mannitol kan ook worden omgezet naar isomannide (=een isohexide). Dit is grondstof voor een performance plastic waarvan een soortgelijk molecuul wordt gebruikt voor de schermplaatjes van mobiele telefoons (iso-sorbide, Sharp). Het heeft een hoge waarde tot €7.000 per ton tegenover gewoon polyethyleen, ongeveer €1200 per ton, en andere bulkchemicaliën die meestal €1000 tot €2000 per ton opleveren.

De exacte CO<sub>2</sub>-reductie van het gebruik van zeewier als brandstof of materiaal is berekend op basis van LCA's waarin grove aannames zijn gehanteerd voor met name de teelt. Op basis van die studies komt men uit op reductiepercentages van 70 tot 100%.

<sup>7</sup> Het onderzoek naar ééncellige algen (micro-algen) is in een stadium waarin de energiedrager minder energie bevat dan nodig is voor het productieproces.

### *Technische status*

In het onderzoeksproject AtSea, dat liep tot juli 2015 en waaraan een consortium van 13 Europese bedrijven en onderzoeksinstituten samenwerkten (waaronder ECN), had tot doel om stormbestendige textielmatten te ontwerpen waarop het zeewier kan groeien en waarvan het makkelijk te oogsten is (AtSea 2015). Acht bedrijven uit het consortium hebben het bedrijf AtSea-Technologies (AST) gestart dat tot doel heeft volledige zeewierfarms te produceren, waarbij men zich primair wil richten op de viskwekerijen in Noorwegen. Bij deze kweek komen veel nutriënten vrij die het zeewater vervuilen.

In 2016 is het Europese HORIZON2020-project Macrofuels - Macro-algae as a sustainable source for biofuels - van start gegaan met een looptijd van 4 jaar (WUR 2016). Men wil bij Denemarken op 1 hectare zeewier gaan telen en onderzoeken welke soorten het best achter-eenvolgens kunnen worden gekweekt als grondstof voor de productie van biobrandstoffen langs zowel biochemische als thermochemische weg. Binnen het project wil men de TLR verhogen van 3 naar 5.

### *Technisch potentieel*

Het AtSea project wees uit dat het mogelijk moet zijn om op één hectare ongeveer 50 ton droge stof per jaar te produceren. Eén ton droge stof bevat ongeveer 14GJ en dus levert 1 hectare 700 GJ per jaar. Het mondiale technische potentieel op basis van het gebruik van textielmatten is ongeveer 235 EJ per jaar ofwel bijna de helft van het huidige mondiale energieverbruik (Florentinus *et al.* 2014). Er is berekend dat voor de komende 300 jaar meer nutriënten in de wereldzeeën beschikbaar zijn dan er uit gehaald kunnen worden door groot-schalige zeewierteelt. In hoeverre zeewierteelt ook CO<sub>2</sub> kan opnemen uit het water en daarmee de verzuring kan tegengaan is nog niet duidelijk.

Volgens ECN zouden zeewieren op 1/10 deel van de Nederlandse Noordzee, ofwel 5 duizend km<sup>2</sup>, 350 PJ per jaar kunnen produceren. Productie zou gedeeltelijk kunnen plaatsvinden tussen tussen de huidige en de geplande windturbines op zee. Deze staan 1 km uit elkaar waardoor tussen vier turbines een gebied van 1 km<sup>2</sup> beschikbaar is. Dit zijn aantrekkelijke locaties omdat het grootste deel van de rest van de Noordzee een bestemming heeft, bijvoorbeeld voor natuur of de scheepvaart.

### *Realistisch potentieel*

De hedendaagse zeewierproductie in Nederland is verwaarloosbaar. Volgens DNV-GL (2017) is een optimistische schatting dat de grootschalige ontwikkeling van zeewierteelt begint in 2025 en dat in 2035 maximaal 30 PJ beschikbaar kan komen. DNV-GL benadrukt dat hier grote onzekerheid aan verbonden is gezien de stand van de technologie en daarom wordt een bandbreedte gehanteerd van 0 tot 18 PJ in 2030. Volgens ECN kan op zijn vroegst over 5 à 6 jaar een demofabriek gereed zijn die tussen de 50 en 100 miljoen zal kosten met operationele kosten van circa 2 miljoen Euro per maand. Op zijn vroegst kan een aantal jaren daarna een eerste commerciële fabriek worden gerealiseerd. De investeringskosten liggen tussen 1 en 3 miljard Euro en zal 1 miljoen ton droge stof zeewier per jaar kunnen verwerken. Dat levert 350 kton brandstof en 100 kton eiwitten en mineralen. Dit komt overeen met minder dan 0,02 PJ. Wij gaan daarom uit van een verwaarloosbaar realistisch potentieel in 2030 en de genoemde 18 PJ in 2050.

### *Kosten*

Bij een olieprijs van \$90 per vat is zeewier competitief bij een prijs van ongeveer €1500 per ton droge stof indien gebruikt in de fijnchemie. Bij gebruik als biobrandstof is dit pas het geval bij €250 tot €300 per ton droge stof. Op dit moment zijn de kosten tot een factor 10 hoger dan de competitieve prijs binnen de chemie.

### *Neveneffecten*

In het Macrofuels project wil men een model ontwikkelen voor de milieu-effecten, zoals het effect op de marine biodiversiteit. In de Noordzee hoef je overigens niet te bemesten want door aanvoer via de rivieren (met name van de landbouw) zitten er veel nutriënten in het zeewater.

# Referenties

- Aalbers, R., Renes, G. & Romijn, G. (2016) *WLO-klimaatscenario's en de waardering van CO<sub>2</sub>-uitstoot in MKBA's*, Den Haag: CPB/PBL.  
<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/CPB-PBL-2016-WLO-klimaatscenario's-en-de-waardering-van-co2-uitstoot-in-mkbas-2587.pdf>.
- Anderson, K. & Peters, G. (2016) 'The trouble with negative emissions', *SCIENCE* 354 (6309): 182-183 <http://science.sciencemag.org/content/sci/354/6309/182.full.pdf>.
- AtSea (2015) *TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF LARGE SCALE SEAWEED CULTIVATION IN EUROPE*, <http://www.atsea-project.eu/finalevent>,
- Atsonios, K., Kougioumtzis, M.-A., D. Panopoulos, K. & Kakaras, E. (2015) 'Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison', *Applied Energy* 138346-366 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914011064>.
- Batidzirai, B., Smeets, E.M.W. & Faaij, A.P.C. (2012) 'Harmonising bioenergy resource potentials—Methodological lessons from review of state of the art bioenergy potential assessments', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (9): 6598-6630 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112004996>.
- BiobasedEconomy (2017) *Bio-ethyleen uit suikerbieten*, <http://www.biobasedeconomy.nl/bedrijfsleven-biobased/bedrijfslevenplatforms/biorenewables-business-platform/bbpvoorbeeldprojecten/bedrijfslevenbiorenewables-business-platformbbpvoorbeeldprojectenbio-ethyleen/>, 1 september
- Born, G.J.v.d., J. van Dam & Schijndel, M.v. (2018) *REDUCTIE VAN OVERIGE BROEIKASGASSEN EN KOOLSTOF VASTLEGGING: VERKENNING VAN OPTIES OP HET TERREIN VAN VOEDSEL EN NATUUR. Achtergronddocument bij de policy brief 'Verkenning van klimaatdoelen'*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)
- Born, G.J.v.d., Kragt, F., Henkens, D., Rijken, B., Bommel, B.v. & Sluis, S.v.d. (2016) *Dalende bodems, stijgende kosten. Mogelijke maatregelen tegen veenbodemdaling in het landelijk en stedelijk gebied*, Den Haag: PBL Planbureau voor de Leefomgeving <http://www.pbl.nl/publicaties/dalende-bodems-stijgende-kosten>.
- Brugh, M.a.d. (2016) *Beton verstoort de CO<sub>2</sub>-boekhouding*. NRC. Rotterdam [https://www.nrc.nl/nieuws/2016/11/21/beton-verstoort-de-co2-boekhouding-5396382-a1532893?utm\\_source=NRC&utm\\_medium=banner&utm\\_campaign=Paywall](https://www.nrc.nl/nieuws/2016/11/21/beton-verstoort-de-co2-boekhouding-5396382-a1532893?utm_source=NRC&utm_medium=banner&utm_campaign=Paywall).
- Brugh, M.a.d. (2017) *Kooldioxide opslurpen uit de buitenlucht*. NRC Handelsblad. Rotterdam <https://www.nrc.nl/nieuws/2017/11/24/kooldioxide-opslurpen-uit-de-buitenlucht-14210797-a1582533>.
- Carbo, M.C., Smit, R., Drift, B.v.d. & Jansen, D. (2011) 'Bio energy with CCS (BECCS): Large potential for BioSNG at low CO<sub>2</sub> avoidance cost', *Energy Procedia* 42950-2954 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211004000>.
- CBS (2017a) *Emissies naar lucht door de Nederlandse economie; nationale rekeningen* <http://statline.cbs.nl/statweb/publication/?dm=slnl&pa=83300ned&d1=a&d2=a&d3=0,5,10,15,20-l&hdr=q2&stb=q1,t&vw=t>,
- CBS (2017b) *Landbouw; gewassen, dieren en grondgebruik naar regio*, [http://statline.cbs.nl/statweb/publication/?dm=slnl&pa=80780ned&d1=23-24,32,50-51,59,64-65,79,86-88,155-156,167,170,180,194,295-296,317,320-321,384,388,399-404,406,417-418,427,440,444,451,500,504,512,518-519,526&d2=0&d3=0,5,\(l-2\),\(l-1\),l&hdr=q1,q2&stb=t&vw=t](http://statline.cbs.nl/statweb/publication/?dm=slnl&pa=80780ned&d1=23-24,32,50-51,59,64-65,79,86-88,155-156,167,170,180,194,295-296,317,320-321,384,388,399-404,406,417-418,427,440,444,451,500,504,512,518-519,526&d2=0&d3=0,5,(l-2),(l-1),l&hdr=q1,q2&stb=t&vw=t),
- CBS (2017c) *Nieuwbouwwoningen; vergunningen naar opdrachtgever, eigendomsvorm 1995-2016* <http://statline.cbs.nl/StatWeb/publication/?DM=SLNL&PA=82001NED>, 19 januari
- CCC (2016) *UK Climate action considering the Paris Agreement*, London: Committee on Climate Change (CCC)
- Cefic (2013) *European chemistry for growth. Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future*, Utrecht: ECOFYS commissioned by The European Chemical Industry Council (Cefic) <http://www.cefic.org/Documents/RESOURCES/Reports-and-Brochure/Energy-Roadmap-The%20Report-European-chemistry-for-growth.pdf>.
- Climeworks (2018) *Climeworks. Capturing CO<sub>2</sub> from air*, <http://www.climeworks.com/>, 25-9-2017

- Cobouw (2016) *In de compensatiesteent ligt CO2 voor altijd vast*, <https://www.cobouw.nl/bouwbreed/nieuws/2016/11/in-de-compensatiesteent-ligt-co2-voor-altijd-vast-101127440>, 20 november
- Croezen, H. & Lieshout, M.v. (2016) *Handleiding CO2-waarden voor biobased grondstoffen volgens MJA3/MEE-methodiek*, Delft: CE Delft <https://www.rvo.nl/file/handleiding-co2-waarden-voor-biobased-grondstoffen>.
- de Wit, M. & Faaij, A. (2010) 'European biomass resource potential and costs', *Biomass and Bioenergy* 34 (2): 188-202  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953409001457>.
- Deng, Y.Y., Koper, M., Haigh, M. & Dornburg, V. (2015) 'Country-level assessment of long-term global bioenergy potential', *Biomass and Bioenergy* 74 (Supplement C): 253-267 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953414005340>.
- DNV-GL (2017) *Biomassapotentieel in Nederland. Verkennende studie naar vrij beschikbaar biomassapotentieel voor energieopwekking in Nederland*: DNV-GL  
[https://www.fluxenergie.nl/wp-content/uploads/2017/04/DNVGL\\_Rapport\\_Biomassabeschikbaarheid-in-Nederland.pdf](https://www.fluxenergie.nl/wp-content/uploads/2017/04/DNVGL_Rapport_Biomassabeschikbaarheid-in-Nederland.pdf).
- EASAC (2018) *Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?* EASAC policy report 35, Halle (Saale), Germany: European Academies Science Advisory Council (EASAC)  
[https://easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/reports\\_statements/Negative\\_Carbon/EASAC\\_Report\\_on\\_Negative\\_Emission\\_Technologies.pdf](https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Negative_Carbon/EASAC_Report_on_Negative_Emission_Technologies.pdf).
- EC (2014) *Technology readiness levels (TRL), HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2014-2015 General Annexes, Extract from Part 19 Commission Decision C(2014)4995*, Brussels: European Commission  
[http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014\\_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf).
- EC (2017) *Voorstel voor een RICHTLIJN VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD ter bevordering van het gebruik van energie uit hernieuwbare bronnen (RED II)*, Brussel: Europese Commissie (EC)  
<https://www.eumonitor.nl/9353000/1/j9vvik7m1c3qyxp/vk9pbnr2bozt>.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., S. Kadner, K., Seyboth, Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., Stechow, C.v., Zwickel, T. & Minx, J.C. (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: IPCC  
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- ENGO (2015) *Closing the gap on climate: why CCS is a vital part of the solution*: ENGO network on CCS  
<http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/197903/closing-gap-climate-ccs-vital-part-solution.pdf>.
- ETIP (2017) *FT-Liquids & Biomass to Liquids (BtL)*, [http://www.etipbioenergy.eu/?option=com\\_content&view=article&id=277](http://www.etipbioenergy.eu/?option=com_content&view=article&id=277),
- EZ (2016) *Biomassa 2030. Strategische visie voor de inzet van biomassa op weg naar 2030*, Den Haag Ministerie van Economische Zaken, Directie Groene Groei & BioBased Economy, Directoraat-Generaal Bedrijfsleven en Innovatie  
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2015/12/01/biomassa-2030>.
- EZ (2017) *Kamerbrief over beëindiging Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject (ROAD)* (ed E. Zaken), Den Haag  
<https://www.rijksoverheid.nl/documenten/kamerstukken/2017/10/20/kamerbrief-over-beeindiging-rotterdam-opslag-en-afvang-demonstratieproject-road>.
- EZ & I&M (2016) *Green Deal Business met biomassa en biobased gas*, Amsterdam: Ministerie van Economische Zaken en het ministerie van Infrastructuur en Milieu.  
<http://www.greendeals.nl/wp-content/uploads/2016/04/GD197-Business-met-Biomassa-en-Biobased-Gas.pdf>.
- Finkenrath, M. (2011) *Cost and Performance of Carbon Dioxide Capture - Working Paper*, Paris: International Energy Agency (IEA)  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/cost-and-performance-of-carbon-dioxide-capture-from-power-generation.html>.
- Florentinus, A., Hamelinck, C., Lint, S.d. & Iersel, S.v. (2014) *WORLDWIDE POTENTIAL OF AQUATIC BIOMASS (revised in 2014)*: Ecofys Bio Energy group  
<http://www.ecofys.com/files/files/ecofys-2008-worldwide-potential-of-aquatic-biomass-revision-2014.pdf>.

- FluxEnergie (2015) *Felle discussie Turkenburg – Rotmans over sluiten kolencentrales*, <https://www.fluxenergie.nl/felle-discussie-turkenburg-rotmans-over-sluiten-kolencentrales/>, 10 januari
- Gasunie (2016) *Verkenning 2050. Discussiestuk*, Groningen: Gasunie <https://www.gasunie.nl/nieuws/gasunie-verkent-2050>.
- GCCSI (2017) *The Global Status of CCS: 2017*, Docklands, Australia: Global CCS Institute <http://www.globalccsinstitute.com/webform/global-status-ccs-2017>.
- Griffioen, J. (2017) 'Enhanced weathering of olivine in seawater: The efficiency as revealed by thermodynamic scenario analysis', *Science of the Total Environment* 575 (Supplement C): 536-544 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716319258>.
- Hangx, S.J.T. & Spiers, C.J. (2009) 'Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO2 concentrations: A critical analysis of viability', *International Journal of Greenhouse Gas Control* 3 (6): 757-767 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583609000656>.
- Haren, R.v. (2014) *Biochar voor de landbouw*, Den Haag <http://www.kennisakker.nl/node/4172>.
- Harmen, P. & Hackmann, M. (2013) *Groene bouwstenen voor biobased plastics: Biobased routes en marktontwikkeling*, Wageningen: wur <http://www.groenegrondstoffen.nl/downloads/Boekjes/16GroeneBouwstenen.pdf>.
- Hasanbeigi, A., Price, L. & Arens, M. (2013) *Emerging Energy-efficiency and Carbon Dioxide Emissions-reduction Technologies for the Iron and Steel Industry*: ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY <https://china.lbl.gov/sites/all/files/6106e-steel-tech.pdf>.
- He, Y., Zhou, X., Jiang, L., Li, M., Du, Z., Zhou, G., Shao, J., Wang, X., Xu, Z., Hosseini Bai, S., Wallace, H. & Xu, C. (2017) 'Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: a meta-analysis', *GCB Bioenergy* 9 (4): 743-755 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84979221644&doi=10.1111%2fgcbb.12376&partnerID=40&md5=1cc3354a6be10576693e1d15b90798af>.
- Heck, V., Gerten, D., Lucht, W. & Popp, A. (2018) 'Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries', *Nature Climate Change* <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0064-y>.
- Hendriks, C., Koornneef, J. & Lohuis, J.O. (2015) *CCS Position Paper*, Utrecht: Ecofys [http://www.ecofys.com/files/files/2015-ecofys\\_ccus-t2013-wp07-d05-v2015.11.16-ccs-position-paper.pdf](http://www.ecofys.com/files/files/2015-ecofys_ccus-t2013-wp07-d05-v2015.11.16-ccs-position-paper.pdf).
- Hrbek, J. (2016) *Status report on thermal biomass gasification in countries participating in IEA Bioenergy Task 33*, Wenen, Oostenrijk: Vienna University of Technology [http://task33.ieabioenergy.com/download.php?file=files/file/2016/Status%20report-corr\\_.pdf](http://task33.ieabioenergy.com/download.php?file=files/file/2016/Status%20report-corr_.pdf).
- IEA (2017) *Technology Roadmap. Delivering sustainable bioenergy.*, France: International Energy Agency (IEA) <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-delivering-sustainable-bioenergy.html>.
- Jain, J., Deo, O., Sahu, S. & DeCristofaro, N. (2014) *Solidia Concrete™ - Part Two of a Series Exploring the Chemical Properties and Performance Results of Sustainable Solidia Cement™ and Solidia Concrete™*: Solida Technologies <http://solidiatech.com/wp-content/uploads/2014/02/Solidia-Concrete-White-Paper-FINAL-2-19-14.pdf>.
- Jaju, M.M., Nader, F.H., Roure, F. & Matenco, L. (2016) 'Optimal aquifers and reservoirs for CCS and EOR in the Kingdom of Saudi Arabia: an overview', *Arabian Journal of Geosciences* 9 (12): 604 <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2600-x>.
- Joosen, S. & Jager, D.d. (2003) *AFVALVERBRANDINGSINSTALLATIES - Notitie in het kader van de Marktmonitoring Duurzame Energie*, Utrecht: ECOFYS in opdracht van RVO [https://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/10/Joosen%202003%20\(NL\)%20Afvalverbrandingsinstallaties,%20Notitie%20in%20het%20kader%20van%20Marktmonitoring%20Duurzame%20Energie.pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2013/10/Joosen%202003%20(NL)%20Afvalverbrandingsinstallaties,%20Notitie%20in%20het%20kader%20van%20Marktmonitoring%20Duurzame%20Energie.pdf).
- JRC (2017) *EDGAR - Emission Database for Global Atmospheric Research*. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>, Joint Research Centre <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>.
- Kemper, J. (2015) 'Biomass and carbon dioxide capture and storage: A review', *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40401-430 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615002650>.
- Kemper, J. (2016) *Overview and recent CCS activities*, Oslo, IEAGHG [https://www.sintef.no/contentassets/d0556618d34a4563a89e8e681f781419/7-presentation\\_jasmin\\_kemper.pdf](https://www.sintef.no/contentassets/d0556618d34a4563a89e8e681f781419/7-presentation_jasmin_kemper.pdf).

- Kintisch, E. (2016) 'New solution to carbon pollution?', *SCIENCE* 352 (6291): 1262-1263  
<http://science.sciencemag.org/content/sci/352/6291/1262.full.pdf>.
- Klein, D., Humpenöder, F., Bauer, N., Dietrich, J.P., Popp, A., Bodirsky, B.L., Bonsch, M. & Lotze-Campen, H. (2014) 'The global economic long-term potential of modern biomass in a climate-constrained world', *Environmental Research Letters* 9 (7): 074017 <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=7/a=074017>.
- Klink, L.v. & Vusse, R.v.d. (2015) *Toekomstscenario's voor afvalverbranding in Nederland 2015 – 2022. Effecten van beleid en marktontwikkelingen op de Nederlandse afvalverbrandingssector* Rebel in opdracht van het ministerie van I&M  
<https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2015/12/03/toekomstscenario-s-voor-afvalverbranding-in-nederland-2015-2022/toekomstscenario-s-voor-afvalverbranding-in-nederland-2015-2022.pdf>.
- Koch, B. (2011) *Biomass Energy Europe. Final Report*: ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITAET FREIBURG <http://www.eu-bee.eu/ACC/components/ATLANTIS-DigiStore/Final%20report%20BEE18c0.pdf?item=digistorefile;264814;837&params=open;gallery>.
- Koelemeijer, R., Koutstaal, P., Daniëls, B. & Boot, P. (2017) *NATIONALE KOSTEN ENERGIETRANSITIE IN 2030*: PBL <http://www.pbl.nl/publicaties/nationale-kosten-energietransitie-in-2030>.
- Köhler, P., Hartmann, J. & Wolf-Gladrow, D.A. (2010) 'Geoengineering potential of artificially enhanced silicate weathering of olivine', *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (47): 20228-20233  
<http://www.pnas.org/content/107/47/20228.abstract>.
- Koornneef, J., van Breevoort, P., Hamelinck, C., Hendriks, C., Hoogwijk, M., Koop, K., Koper, M., Dixon, T. & Camps, A. (2012) 'Global potential for biomass and carbon dioxide capture, transport and storage up to 2050', *International Journal of Greenhouse Gas Control* 11 (Supplement C): 117-132  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583612001843>.
- Koster, K. (2017) *3D characterization of Holocene peat in the Netherlands. Implications for coastal-deltaic subsidence.*, Utrecht: University of Utrecht (UU)  
<https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/356785>.
- Krebbekx, J.A., Wolf, W.J.d., Postma, B., Duivenvoorde, G.P.J., Lenselink, J. & Meuzelaar, D.J. (2013) *De Sleutelrol waarmaken. Routekaart Chemie 2013-2030*: Berenschot  
<http://www.routekaartchemie.nl/>.
- Lachos-Perez, D., Brown, A.B., Mudhoo, A., Martinez, J., Timko, M.T., Rostagno, M.A. & Forster-Carneiro, T. (2017) 'Applications of subcritical and supercritical water conditions for extraction, hydrolysis, gasification, and carbonization of biomass: a critical review', *Biofuel Research Journal* 4 (2): 611-626  
[http://www.biofueljournal.com/article\\_46484\\_58ff9854a17636ace19a7503d5476a4c.pdf](http://www.biofueljournal.com/article_46484_58ff9854a17636ace19a7503d5476a4c.pdf).
- Lesschen, J.P., Heesmans, H., Mol-Dijkstra, J., Doorn, A.v., Verkaik, E., Wyngaert, I.v.d. & Kuikman, P. (2012) *Mogelijkheden voor koolstofvastlegging in de Nederlandse landbouw en natuur.*, Wageningen: Alterra  
<https://www.wur.nl/nl/show/Mogelijkheden-vastleggen-koolstof-in-Nederlandse-landbouw-en-natuur.htm>.
- Lieshout, M.v. & Nusselder, S. (2016) *Update prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen 2016. CO<sub>2</sub>-reductiepotentieel en CO<sub>2</sub>-reductiekosten van 17 verduurzamingsopties van beton.*, Delft: CE Delft  
[https://www.ce.nl/index.php?publicatie/update\\_prioritering\\_handelingsperspectieven\\_verduurzaming\\_betonketen\\_2016/1859](https://www.ce.nl/index.php?publicatie/update_prioritering_handelingsperspectieven_verduurzaming_betonketen_2016/1859).
- Mac Dowell, N., Fennell, P.S., Shah, N. & Maitland, G.C. (2017) 'The role of CO<sub>2</sub> capture and utilization in mitigating climate change', *Nature Clim. Change* 7 (4): 243-249  
<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3231>.
- Matthijsen, J., Aalbers, R. & Wijngaart, R.v.d. (2015) *Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving - Cahier Klimaat en energie*, Den Haag: PBL/CPB  
<http://www.wlo2015.nl/rapporten-wlo/klimaat-en-energie>.
- McLaren, D. (2012) 'A comparative global assessment of potential negative emissions technologies', *Process Safety and Environmental Protection* 90 (6): 489-500  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582012001176>.
- Minx, J.C., Lamb, W.F., Callaghan, M.W., Bornmann, L. & Fuss, S. (2017) 'Fast growing research on negative emissions', *Environmental Research Letters* 12 (3): 035007  
<http://stacks.iop.org/1748-9326/12/i=3/a=035007>.
- Montserrat, F., Renforth, P., Hartmann, J., Leermakers, M., Knops, P. & Meysman, F.J.R. (2017) 'Olivine Dissolution in Seawater: Implications for CO<sub>2</sub> Sequestration through

- Enhanced Weathering in Coastal Environments', *Environmental Science & Technology* 51 (7): 3960-3972 <http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b05942>.
- Nabuurs, G.J., Schelhaas, M.J., Oldenburger, J., Jong, A.d., Schrijver, R., Woltjer, G. & Silvis, H. (2016) *Nederlandse bosbeheer en bos- en houtsector in de bio-economie. Scenario's tot 2030 in een internationaal bio-economie perspectief*, Wageningen: Alterra en PROBOS <http://www.probos.nl/rapporten-2016/1315-nederlands-bosbeheer-en-bos-en-houtsector-in-de-bio-economie>.
- Neele, F., Veen, J.t., Wilschut, F. & Hofstee, C. (2012) *Independent assessment of high-capacity offshore CO2 storage options*, Delft, The Netherlands: TNO <http://www.globalccsinstitute.com/sites/www.globalccsinstitute.com/files/publication/s/35621/independent-assessment-high-capacity-offshore-co2-storage-options-opt.pdf>.
- Nguyen, M.C., Zhang, Y., Li, J., Li, X., Bai, B., Wu, H., Wei, N. & Stauffer, P.H. (2017) 'A Geostatistical Study in Support of CO2 Storage in Deep Saline Aquifers of the Shenhua CCS Project, Ordos Basin, China', *Energy Procedia* 1145826-5835 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217319215>.
- NRC (2015) *Climate Intervention: Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration*, Washington D.C.: National Research Council of the national academies
- OBS (2017) *Rogue Biochar™ Pricing*, <https://www.chardirect.com/rogue-biochar-pricing/>, 30 januari
- PBL (2014) *Biomassa. Wensen en grenzen.*, PBL <http://infographics.pbl.nl/biomassa/>.
- PBL & CPB (2015) *Nederland in 2030 en 2050: Twee referentiescenario's*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en het Centraal Planbureau (CPB) [http://www.wlo2015.nl/wp-content/uploads/PBL\\_2015\\_WLO\\_Nederland-in-2030-en-2050\\_1558.pdf](http://www.wlo2015.nl/wp-content/uploads/PBL_2015_WLO_Nederland-in-2030-en-2050_1558.pdf).
- Pritchard, C., Yang, A., Holmes, P. & Wilkinson, M. (2015) 'Thermodynamics, economics and systems thinking: What role for air capture of CO2?', *Process Safety and Environmental Protection* 94188-195 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582014000913>.
- Radtke, K. & Wulcko, I. (2015) *The Low Cost Gas Era Gasification versus Steam Reforming - a True Alternative? ThyssenKrupp Industrial Solutions (USA/Germany)*. . 2015 Gasification Technologies Conference. Colorado Springs, Colorado, USA [http://www.globalsyngas.org/events/resource-library?search:resource\\_year=2015&search:resource\\_company=ThyssenKrupp+Industrial+Solutions](http://www.globalsyngas.org/events/resource-library?search:resource_year=2015&search:resource_company=ThyssenKrupp+Industrial+Solutions).
- Renforth, P. (2012) 'The potential of enhanced weathering in the UK', *International Journal of Greenhouse Gas Control* 10 (Supplement C): 229-243 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583612001466>.
- Riphagen, M. & Brom, F. (2013) *Klimaatengineering: hype, hoop of wanhoop?*, Den Haag: Rathenau Instituut
- Ros, J. (2017) *Perspectief voor CO2-arm transport op de lange termijn. Notitie over biobrandstoffen voor de vaste commissie voor Infrastructuur en Milieu van de Tweede Kamer der Staten-Generaal.*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)
- Ros, J. & Schure, K. (2016) *Vormgeving van de Energietransitie*: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) <http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2016-vormgeving-van-de-energietransitie-1749.pdf>.
- Ros, J.P.M. & Daniels, B.W. (2017) *Verkenning van klimaatdoelen. Van lange termijn beelden naar korte termijn actie. Policy Brief.*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) <http://www.pbl.nl/publicaties/verkenning-van-klimaatdoelen-van-lange-termijn-beelden-naar-korte-termijn-actie>.
- Rubin, E.S., Davison, J.E. & Herzog, H.J. (2015) 'The cost of CO2 capture and storage', *International Journal of Greenhouse Gas Control* 40 (Supplement C): 378-400 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615001814>.
- Rutte, M., Pechtold, A., Buma, S. & Segers, G.-J. (2017) *Vertrouwen in de toekomst. Regeerakkoord 2017-2021*, Den Haag: VVD, D66, ChristenUnie en CDA [https://www.parlement.com/id/vkidc5cgsvzz/regeerakkoord\\_2017](https://www.parlement.com/id/vkidc5cgsvzz/regeerakkoord_2017).
- RVO (2015a) *CCS Maasvlakte (ROAD-project). Notitie reikwijdte en detailniveau van het milieueffectrapport.*: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/06/Notitie%20reikwijdte%20en%20detailniveau%20van%20het%20MER%20-%20anoniem.pdf>.
- RVO (2015b) *Rapportage hernieuwbare energie. Deel 2 Blik op innovatie*, Utrecht: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO)



- [https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/01/Rapportage%20hernieuwbare%20energie%202013%20-%20deel%20%20-%20blik%20op%20innovatie%20\[WEB\].pdf](https://www.rvo.nl/sites/default/files/2015/01/Rapportage%20hernieuwbare%20energie%202013%20-%20deel%20%20-%20blik%20op%20innovatie%20[WEB].pdf).
- RVO (2017) *Projecten in beheer SDE(+), peildatum 12 oktober 2017*, <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2017/12/SDE%20Projecten%20in%20beheer%20oktober%202017.xlsx> 10 januari
- Sahu, S. & DeCristofaro, N. (2013) *Solida Cement™ - Part One of a Two-Part Series Exploring the Chemical Properties and Performance Results of Sustainable Solida Cement™ and Solida Concrete™*: Solidia Technologies <http://solidiatech.com/wp-content/uploads/2014/02/Solida-Cement-White-Paper-12-17-13-FINAL.pdf>.
- Sanz-Pérez, E.S., Murdock, C.R., Didas, S.A. & Jones, C.W. (2016) 'Direct Capture of CO<sub>2</sub> from Ambient Air', *Chemical Reviews* 116 (19): 11840-11876 <http://dx.doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00173>.
- Savelkoul, J. & Lugt, H.v.d. (2018) *RWE wil Amercentrale openhouden tot minstens 2040*. *Energia*. [https://energeia.nl/energeia-artikel/40063345/rwe-wil-amercentrale-minstens-openhouden-tot-2040?utm\\_source=nieuwsbrief&utm\\_campaign=energeia-dagelijks&utm\\_medium=email&utm\\_content=20180110](https://energeia.nl/energeia-artikel/40063345/rwe-wil-amercentrale-minstens-openhouden-tot-2040?utm_source=nieuwsbrief&utm_campaign=energeia-dagelijks&utm_medium=email&utm_content=20180110).
- Schakel, W., Meerman, H., Talaei, A., Ramírez, A. & Faaij, A. (2014) 'Comparative life cycle assessment of biomass co-firing plants with carbon capture and storage', *Applied Energy* 131441 - null <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/308347>.
- Schelhaas, M.-J., Arets, E. & Kramer, H. (2017) *Het Nederlandse bos als bron van CO<sub>2</sub>*. *Vakblad Natuur Bos Landschap*. <http://edepot.wur.nl/423687>.
- Schelhaas, M.J. (2017) *Model set up and results for NEV2017, notitie in voorbereiding*, Wageningen: Wageningen Universiteit (WUR)
- Schuling, O. (2017), *Olivijn. De steen der wijzen*: Elmar B.V.
- Schuling, R.D. & de Boer, P.L. (2010) 'Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: A critical analysis of viability. Comment: Nature and laboratory models are different', *International Journal of Greenhouse Gas Control* 4 (5): 855-856 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175058361000068X>.
- Searle, S. & Malins, C. (2015) 'A reassessment of global bioenergy potential in 2050', *GCB Bioenergy* 7 (2): 328-336 <http://dx.doi.org/10.1111/gcbb.12141>.
- Skytree (2018) *Skytree. Cleaning the air. Everywhere*, <https://www.skytree.eu/>,
- Smith, P. (2016) 'Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies', *Global Change Biology* 22 (3): 1315-1324 <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13178>.
- Smith, P., Davis, S.J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R.B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D.P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J.G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., Shrestha, G., Friedlingstein, P., Gasser, T., Grubler, A., Heidug, W.K., Jonas, M., Jones, C.D., Kraxner, F., Littleton, E., Lowe, J., Moreira, J.R., Nakicenovic, N., Obersteiner, M., Patwardhan, A., Rogner, M., Rubin, E., Sharifi, A., Torvanger, A., Yamagata, Y., Edmonds, J. & Yongsung, C. (2016) 'Biophysical and economic limits to negative CO<sub>2</sub> emissions', *Nature Clim. Change* 6 (1): 42-50 <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2870>.
- Socolow, R., Desmond, M., Aines, R., Blackstock, J., Bolland, O., Kaarsberg, T., Lewis, N., Mazzotti, M., Pfeffer, A., Sawyer, K., Sirola, J., Smit, B. & Wilcox, J. (2011) *Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> with Chemicals. A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs*: American Physical Society (APS) <https://www.aps.org/policy/reports/assessments/upload/dac2011.pdf>.
- Soest, J.P.v., Wiltink, H., Soest, H.v., Luken, E., Londo, M., Mozaffarian, H., Himbergen, H.v., Dorp, R.v., Mechelen, X.v., Dumont, M. & Wismeijer, R. (2014) *Routekaart hernieuwbaar gas*: De Gemeent, ECN, Groen Gas Nederland, RVO.nl <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2014/07/Routekaart%20Hernieuwbaar%20gas.pdf>.
- Sonter, L.J., Barrett, D.J., Moran, C.J. & Soares-Filho, B.S. (2015) 'Carbon emissions due to deforestation for the production of charcoal used in Brazil's steel industry', *Nature Climate Change* 5359 <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2515>.
- Staalduine, J.v. (2018) *Wat te doen met die splinternieuwe maar vuile kolencentrales?* *Volkskrant*. Amsterdam, De Persgroep Nederland <https://www.volkskrant.nl/binnenland/wat-te-doen-met-die-splinternieuwe-maar-vuile-kolencentrales~a4555536/>.
- Staatsbosbeheer, Probos, Natuur&Milieu, VBNE & AVIH (2017) *Actieplan bos en hout*: Staatsbosbeheer, Probos, Natuur&Milieu, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE), Algemene Vereniging Inlands Hout en 15 andere organisaties uit de bos-en houtsector
- Staatscourant (2015) *Technische informatie over de publicatie Regeling van de Minister van Economische Zaken van 24 maart 2015, nr. WJZ/15018116, houdende vaststelling*

- van de definitieve correcties voor de stimulering van duurzame energieproductie in het jaar 2014 (ed E. Zaken), Den Haag <https://zoek.officielebekendmakingen.nl/stcrt-2015-8446>.
- TMR (2017) *Biochar Market* <https://www.transparencymarketresearch.com/biochar-market.html>,
- Turkenburg, W. (2015) *Recent studies and publications on the status, need and potential of Carbon Capture and Storage (CCS) and negative CO<sub>2</sub> emissions – a selection*, <https://www.fluxenergie.nl/wp-content/uploads/2015/12/CCS-Some-recent-studies-on-the-need-of-CCS-and-negative-CO2-emissions.pdf>,
- UN (2017) *World Population Prospects. The 2017 Revision. Key Findings and Advance Tables*, New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division [https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017\\_KeyFindings.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf).
- van Vuuren, D.P., Hof, A.F., van Sluisveld, M.A.E. & Riahi, K. (2017) 'Open discussion of negative emissions is urgently needed', *Nature Energy* 2 (12): 902-904 <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0055-2>.
- VDM (2017) *Aardbevingsbestendig bouwen*, <https://www.vdm.nl/aardbevingsbestendig-bouwen/>, 12 december
- Verbraeken, H. (2017) *Corbion maakt plannen voor bouw nieuwe melkzuurfabriek* Financieel Dagblad. Amsterdam <https://fd.nl/ondernemen/1226701/corbion-maakt-plannen-voor-bouw-nieuwe-melkzuurfabriek>.
- Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., Velde, M.v.d. & Diafas, I. (2010) *Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions*, Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/13558/1/jrc\\_biochar\\_soils.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/13558/1/jrc_biochar_soils.pdf).
- Vitali, M. (2017) *The Role of Direct Air Capture to Meet the Paris Climate Agreement: a Multi Model Assessment*, Milaan: SCHOOL OF INDUSTRIAL AND INFORMATION ENGINEERING
- VPRO (2017) *Op Energiemissie*, Hilversum [https://www.npo.nl/vpro-tegenlicht/10-12-2017/VPWON\\_1269674](https://www.npo.nl/vpro-tegenlicht/10-12-2017/VPWON_1269674).
- Vuuren, D.P.v. (2015) *Integrated Assessment: Back to the Future. Inaugural Lecture.*, Utrecht: Univerisiteit van Utrecht [https://www.uu.nl/sites/default/files/20150805-uu\\_oratie-van\\_vuuren.pdf](https://www.uu.nl/sites/default/files/20150805-uu_oratie-van_vuuren.pdf).
- Vuuren, D.v., Boot, P., Ros, J., Hof, A. & Elzen, M.d. (2016) *WAT BETEKENT HET PARIJSAKKOORD VOOR HET NEDERLANDSE LANGETERMIJN-KLIMAATBELEID?*, Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving <http://www.pbl.nl/publicaties/wat-betekent-het-parijsakkoord-voor-het-nederlands-langetermijnklimaatbeleid>.
- W/E (2016) *Klimaatwinst door bouwen in hout - onderzoek naar de potentie bij woningbouw*: W/E Adviseurs [http://www.houtinfo.nl/sites/default/files/WE\\_rapport-Klimaatwinst-door-Bouwen-in-hout\\_24okt2016.pdf](http://www.houtinfo.nl/sites/default/files/WE_rapport-Klimaatwinst-door-Bouwen-in-hout_24okt2016.pdf).
- Wen, D., Jiang, H. & Zhang, K. (2009) 'Supercritical fluids technology for clean biofuel production', *Progress in Natural Science* 19 (3): 273-284 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007108003791>.
- Wiki (2015) *Carbon8 Aggregates*, [https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon8\\_Aggregates](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon8_Aggregates), 16 January
- Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J. & Joseph, S. (2010) 'Sustainable biochar to mitigate global climate change', *Nature Communications* 156 <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms1053>.
- Woolf, D., Lehmann, J. & Lee, D.R. (2016) 'Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration', *Nature Communications* 7 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84992364779&doi=10.1038%2fncomms13160&partnerID=40&md5=180c47606e6dc9ac79a1ec07401a9408>.
- WUR (2016) *MACROFUELS: Macro-algae as a sustainable source for biofuels*, <https://www.wur.nl/en/project/MACROFUELS-Macro-algae-as-a-sustainable-source-for-biofuels.htm>, 14 december
- Xi, F., Davis, S.J., Ciais, P., Crawford-Brown, D., Guan, D., Pade, C., Shi, T., Syddall, M., Lv, J., Ji, L., Bing, L., Wang, J., Wei, W., Yang, K.-H., Lagerblad, B., Galan, I., Andrade, C., Zhang, Y. & Liu, Z. (2016) 'Substantial global carbon uptake by cement carbonation', *Nature Geosci* 9 (12): 880-883 <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2840>.
- ZEP (2011a) *The cost of CO<sub>2</sub> storage*: Zero Emissions Platform and IEAGHG <http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/119816/costs-co2-storage-post-demonstration-ccs-eu.pdf>.

- ZEP (2011b) *The Costs of CO<sub>2</sub> Capture, Transport and Storage. Post-demonstration for CCS in the EU*: European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants (ZEP) <http://www.globalccsinstitute.com/publications/costs-co2-capture-transport-and-storage>.
- ZEP (2015) *CCS for industry. Modelling the lowest-cost route to decarbonising Europe*: Zero Emissions Platform (ZEP) <http://www.zeroemissionsplatform.eu/library/publication/258-ccsforindustry.html>.
- Zijlema, P.J. (2016) *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO<sub>2</sub> emissiefactoren, versie januari 2016*: Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) <https://www.rvo.nl/file/nederlandse-lijst-van-energiesdragers-en-standaard-co2-emissiefactoren-2016pdf>.