



# Circulaire en biobased opties in de SDE++

Bepaling onrendabele top en CO<sub>2</sub>-reductie



**CE Delft**

*Committed to the Environment*

# Circulaire en biobased opties in de SDE++

Bepaling onrendabele top en CO<sub>2</sub>-reductie

Dit rapport is geschreven door:

Geert Warringa, Ellen Schep, Martijn Broeren, Geert Bergsma en Jaime Rozema

Delft, CE Delft, november 2019

Publicatienummer: 19.190288.150

Procestechnologie / Biomassa / Biobrandstoffen / Hernieuwbare brandstoffen / Kooldioxide / Reductie / Innovatie / Overheidsbeleid / Subsidies

Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Alle openbare publicaties van CE Delft zijn verkrijgbaar via [www.ce.nl](http://www.ce.nl)

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

© copyright, CE Delft, Delft

## CE Delft

Committed to the Environment

CE Delft draagt met onafhankelijk onderzoek en advies bij aan een duurzame samenleving. Wij zijn toonaangevend op het gebied van energie, transport en grondstoffen. Met onze kennis van techniek, beleid en economie helpen we overheden, NGO's en bedrijven structurele veranderingen te realiseren. Al 40 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



# Inhoud

	Samenvatting	5
	Verklarende woordenlijst	10
1	Inleiding	11
	1.1 Aanleiding	11
	1.2 Doelstelling	11
	1.3 Aanpak in vogelvlucht	11
	1.4 Duurzaamheid biomassa	12
	1.5 Leeswijzer	12
2	SDE++-methodiek en overzicht doorgerekende technieken	13
	2.1 Werking SDE++-methode	13
	2.2 Kenmerken biobased productieprocessen	14
	2.3 CO <sub>2</sub> -administratie en biobased ketens	15
	2.4 Bepaling CO <sub>2</sub> -reductie	15
	2.5 Besparingen door uitgespaarde emissierechten	16
	2.6 Doorgerekende technieken	16
	2.7 Conclusie	18
3	Onrendabele top en kosteneffectiviteit technieken	19
	3.1 Overzicht	19
	3.2 CO <sub>2</sub> -reductiepotentieel	21
	3.3 Onzekerheden	22
	3.4 Aanbevelingen voor alternatieve stimulering	25
4	Conclusie en discussie	27
5	Literatuur	29
A	Overzicht circulaire en biobased technieken	32
B	Technieken opgenomen in studie	36
C	Productie etheen uit ethanol	38
	C.1 Beschrijving techniek	38
	C.2 Referentietechnologie	38
	C.3 Bepaling kostprijs	39
	C.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top	40
	C.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	40
	C.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	42



D	PET-productie via depolymerisatie	44
	D.1 Beschrijving technologie	44
	D.2 Referentietechnologie	44
	D.3 Bepaling kostprijs	45
	D.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top	46
	D.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	46
	D.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	48
E	FDCA-productie	49
	E.1 Beschrijving techniek	49
	E.2 Referentietechnologie	50
	E.3 Bepaling kostprijs	50
	E.4 Bepaling marktprijs en onrendabele op	51
	E.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	52
	E.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	52
F	CCU-mineralisatie	53
	F.1 Beschrijving techniek	53
	F.2 Referentietechnologie	53
	F.3 Bepaling kostprijs	53
	F.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top	55
	F.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	55
	F.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	56
G	PLA-productie	57
	G.1 Beschrijving techniek	57
	G.2 Referentietechnologie	57
	G.3 Bepaling kostprijs	58
	G.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top	58
	G.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	58
	G.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	61
H	Inzet getorreficeerde biomassa bij staalproductie	62
	H.1 Beschrijving techniek	62
	H.2 Referentietechnologie	62
	H.3 Bepaling kostprijs	62
	H.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top	63
	H.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	63
	H.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	64
I	Geopolymeren in beton	65
	I.1 Beschrijving techniek	65
	I.2 Referentietechnologie	65
	I.3 Bepaling kostprijs	65
	I.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top	66
	I.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	66
	I.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	66
J	Productie syngas uit biomassa	67



	J.1 Beschrijving techniek	67
	J.2 Referentietechnologie	67
	J.3 Bepaling kostprijs	68
	J.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top	68
	J.5 Bepaling reductie klimaatimpact internationaal	69
	J.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	69
K	Waterstofproductie uit vergassing gemeentelijk afval	70
	K.1 Beschrijving techniek	70
	K.2 Referentietechnologie	70
	K.3 Bepaling kostprijs	70
	K.4 Bepaling marktprijs en onrendabele op	71
	K.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	71
	K.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	71
L	EPS-recycling	72
	L.1 Beschrijving techniek	72
	L.2 Referentietechnologie	73
	L.3 Bepaling kostprijs	73
	L.4 Bepaling marktprijs onrendabele top	74
	L.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal	74
	L.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO <sub>2</sub> )	75
M	Scopes in emissieberekeningen	76
	M.1 Inleiding	76
	M.2 Voorbeeld 1 - Staalproductie met getorreficeerde biokolen	76
	M.3 Voorbeeld 2 - CCU-mineralisatie	76
	M.4 Voorbeeld 3 - productie bioplastic	77
	M.5 Voorbeeld 4 - plasticrecycling	77
	M.6 Conclusie	77



# Samenvatting

## Inleiding

In de huidige SDE+-regeling wordt de onrendabele top vergoed van een aantal specifiek bepaalde hernieuwbare energietechnieken. De opvolger van deze regeling (SDE++-regeling) zal worden uitgebreid met andere CO<sub>2</sub>-besparende technieken. Uit een eerste brede verkenning bleek dat enkele (chemische) recycling en biobased opties mogelijk ook geschikt zijn om via de SDE++ te stimuleren (Navigant, 2019).

Deze potentieel interessante technieken zijn in dit eerdere onderzoek echter niet volledig in kaart gebracht en doorgerekend. In dit voorliggende verkennende onderzoek hebben we daarom een overzicht gemaakt van circulaire en biobased technieken en hebben we voor een aantal hiervan de onrendabele top en emissiereductie bepaald.

## Doel

De hoofddoelen van dit onderzoek zijn:

- de exacte biobased en circulaire technologieën nauwkeuriger definiëren;
- het in kaart brengen van de onrendabele top voor een aantal van deze maatregelen;
- de CO<sub>2</sub>-eq.-emissiereductie van deze opties vaststellen en vaststellen hoe van concrete opties de emissiereductie berekend dient te worden;
- Het berekenen van de kosteneffectiviteit (subsidie-intensiteit) uitgedrukt in €/ton CO<sub>2</sub>-eq. van de maatregelen.

Doel is om voor een aantal voorbeeldmaatregelen te verkennen of de onrendabele top en CO<sub>2</sub>-reductie vastgesteld kunnen worden conform de SDE++-methodiek en welke aandachtspunten en discussies hierbij spelen. Het gaat nadrukkelijk om een eerste verkenning.

## Resultaten

In deze studie hebben we 36 biobased en circulaire maatregelen in kaart gebracht. Hiervan hebben we er tien doorgerekend in deze studie. We hebben hierbij gekozen voor maatregelen die in relatief korte tijd doorgerekend konden worden en zoveel mogelijk aansluiten bij de praktische uitvoeringseisen van de SDE++ (zoals het hebben van een onrendabele top en een productie-eenheid waarop de subsidie gebaseerd kan worden).

Een overzicht van de kostprijs, marktprijs, emissiereductie en kosteneffectiviteit van de maatregelen is weergegeven in Tabel S1. Hierbij hebben we een onderscheid gemaakt naar emissiereductie internationaal en op Nederlands grondgebied (het doel van de SDE++-regeling is CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied).

Tabel S1 - Resultaten berekeningen

Techniek	Product	Kostprijs (€/ton product)	Marktprijs (€/ton product)	Onrendabele top (€/ton product)	Reductie in Nederland (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg product)	Reductie internationaal (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg product)	Kosteneffectiviteit/ Subsidie-intensiteit Nederland (€/ton CO <sub>2</sub> -eq.)	Kosteneffectiviteit/ Subsidie-intensiteit internationaal (€/ton CO <sub>2</sub> -eq.)
Productie etheen uit ethanol	Etheen	1.280 tot 1.400	1.050	230 tot 350	-0,4 tot 2	2,6	110 tot ∞ **	90 tot 130
PET-productie door polymerisatie	BHET	590 tot 820	520 tot 1.500	-910 tot 300	-1,3 tot 2,5	2,5	-360 tot ∞ **	-360 tot 120
FDCA-productie	FDCA	2.350 tot 7.650	1.200 tot 10.000	-7.650 tot 6.440	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
CCU-mineralisatie	CO <sub>2</sub> (in bouwproducten)	30 tot 60	0	30 tot 60	0,8	1,9	20 tot 70	20 tot 30
PLA-productie	PLA	1.870 tot 2.000	1.250 tot 1.430	440 tot 750	-2,2 tot 1,8	-0,3 tot 2,8	250 tot ∞ **	160 tot ∞ **
Inzet getorreficeerde biomassa bij staalproductie	Getorreficeerde biomassa (inzet voor staal)	200 tot 240	90 tot 160	40 tot 90	2,6	2	15 tot 30	20 tot 40
Geopolymeren in cement/beton	Cement	210 tot 240	80	130 tot 160	N.b.	N.b.	N.b.	N.b.
Productie syngas uit biomassa	Syngas*	20 tot 30	15	5 tot 15	N.b.	N.b.	N.b.	N.b.
Waterstofproductie uit vergassing gemeentelijk afval	Waterstof	1.300 tot 2.050	1.000 tot 1.400	-100 tot 1.050	N.b.	N.b.	N.b.	N.b.
EPS-recycling	EPS (piepschuim)	1.150 tot 2.250	1.400 - 1.900	-750 tot 850	-0,8 tot 3	3	-250 tot ∞ **	-250 tot 290

\* Bedragen in €/GJ.

\*\* Bij extra uitstoot in Nederland betaalt de overheid voor extra emissies. Dit scenario hebben we niet meegenomen bij de berekening van de kosteneffectiviteit.

∞ Bij een zeer lage emissiereductie (richting nul) wordt de kosteneffectiviteit in theorie oneindig groot.

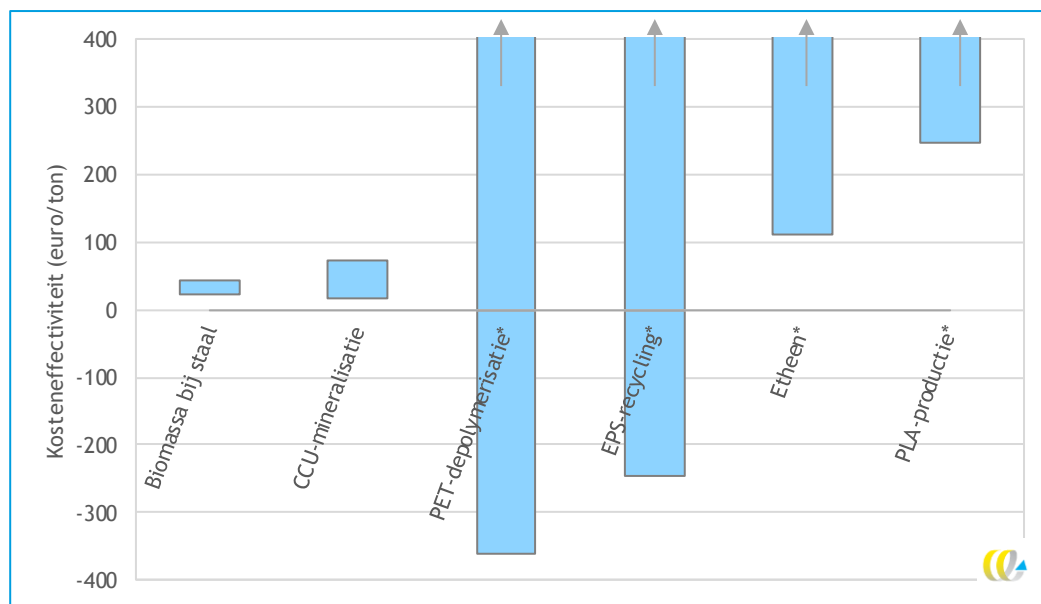
N.b. Niet bepaald in deze studie.

De tabel laat zien dat de onrendabele top (kostprijs min marktprijs) voor alle tien technieken is vast te stellen. Deze zijn weergegeven in een bandbreedte. Deze bandbreedte is relatief het meest beperkt bij de productie van geopolymere in cement (130 tot 160 euro per ton cement) en het grootste bij FDCA-productie (-7.650 tot 6.440 euro per ton FDCA). We zijn in de berekening uitgegaan van de huidige marktprijzen en van de kosten op dit moment.

Voor zes van de tien technieken was het mogelijk om de CO<sub>2</sub>-reductie te bepalen en de kosteneffectiviteit te berekenen (euro subsidie per ton reductie). Alle door ons door-gerekende technieken leiden op wereldwijd niveau tot een reductie van broeikasgassen. Het is echter niet zeker of alle technieken ook tot CO<sub>2</sub>-reductie binnen de Nederlandse landsgrenzen leiden. Bij biobased etheen, PLA-productie, EPS-recycling en PET-polymerisatie is dit alleen het geval als de technieken een fossiele productielocatie in Nederland verdringen en/of de producten in Nederland worden geconsumeerd en afgedankt. Het is daarom mogelijk dat er geen emissiereductie in Nederland optreedt of de emissies in Nederland zelfs toenemen bij deze technieken. De inzet van getorreficeerde biomassa bij staalproductie en CCU-mineralisatie leiden wel met zekerheid tot een emissiereductie in Nederland (onder de voorwaarde dat de biomassa aan de juiste duurzaamheidscriteria voldoet).

De kosteneffectiviteit van de door-gerekende technieken op Nederlands grondgebied is grafisch weergegeven in Figuur S1.

Figuur S1 - Kosteneffectiviteit (subsidie-intensiteit) Nederland, €/ton CO<sub>2</sub>-eq.



\* Bij zeer lage emissiereductie in Nederland wordt de subsidie-intensiteit heel hoog (hoge subsidiebehoefte per ton reductie), bij extra emissies in Nederland wordt intensiteit negatief (overheid betaalt voor extra emissies in Nederland). Dit hebben we niet verder berekend, conform de methodiek van het PBL.

Zowel bij staalproductie als bij CCU-mineralisatie ligt de waarde onder de 100 euro per ton. Daarmee lijken deze opties in eerste instantie relatief goedkoop te zijn in termen van CO<sub>2</sub>-winst per euro subsidie. PLA-productie, biobased etheen, EPS-recycling en PET-



depolymerisatie kunnen, zoals eerder beschreven, in het meest ongunstige geval leiden tot extra uitstoot in Nederland. Verder uitgebreider onderzoek kan waarschijnlijk de bandbreedtes van deze resultaten verkleinen.

## Onzekerheden

Bij de bepaling van de onrendabele top en CO<sub>2</sub>-emissiereductie van de technieken zijn er verschillende onzekerheden die naar voren kwamen. De meeste kunnen via verdiepend onderzoek verkleind worden. De belangrijkste zijn:

- De bepaling van de emissiereductie voor sommige circulaire en biobased technieken kan complex en specifiek zijn. In deze studie is een eerste verkenning gemaakt van de reductie op basis van beschikbare studies en/of kengetallen in de literatuur, maar deze verschillen in detailniveau. Ook zijn sommige studies betrouwbaar. Aanvullende informatie zou verzameld kunnen worden door vertrouwelijkheidsverklaringen te ondertekenen waardoor bedrijven meer informatie kunnen delen.
- De bepaling van het aandeel CO<sub>2</sub>-reductie op specifiek Nederlands grondgebied is voor een aantal technieken moeilijk te bepalen. Zoals eerder vermeld is met name onzeker of fossiele en virgin productiefaciliteiten in Nederland of in het buitenland worden vervangen. Met behulp van uitgebreider marktonderzoek en product merit orders<sup>1</sup> zou deze onzekerheid wel verkleind kunnen worden.
- Ook is het moeilijk om vooraf betrouwbaar vast te stellen welk deel van de biobased en circulaire producten in Nederland wordt geconsumeerd en afgedankt. Eén van de producenten gaf een kengetal van 5 tot 10% voor biobased kunststoffen. Op basis van een share analysis van handelsdata voor PE-kunststoffen kwamen we uit op ongeveer één derde. Deze kengetallen kennen echter onzekerheden en zouden met aanvullend onderzoek preciezer gemaakt kunnen worden.
- Veel van de technieken zijn heterogeen waardoor de onrendabele-topberekeningen moeilijk veralgemeniseerd kunnen worden voor een techniekcategorie. Voor technieken zoals etheen- en FDCA-productie zijn namelijk meerdere verschillende processen mogelijk om het product te kunnen produceren. Nader onderzoek is daarom noodzakelijk om de onrendabele top voor meerdere varianten te bepalen en te bekijken of resultaten zonder al te grote bandbreedtes gemiddeld kunnen worden.
- Een ander aandachtspunt is dat niet voor alle technieken, die wel veelbelovend kunnen zijn, een marktprijs (correctiebedrag) van de fossiele tegenhanger bepaald kan worden (de onrendabele top is de kostprijs minus de marktprijs van de fossiele tegenhanger). Dit kan mogelijk worden opgelost door een fossiel alternatief te definiëren die lijkt op het product. Als er geen marktprijzen zijn, kan ook gebruik worden gemaakt van kostprijsinschattingen van de referentietechniek of kan het correctiebedrag bepaald worden door inzage te vragen in de feitelijke transacties in een jaar van de aanvrager (volume verkocht versus prijs).

## Aanbevelingen

Vanwege de heterogeniteit van een aantal van de technieken en de uitdagingen om de CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied vast te stellen, is het te overwegen om een andersoortige subsidieregeling te ontwikkelen. Hiermee zou meer maatwerk mogelijk zijn bij de bepaling van de subsidiehoogte en kunnen ook technieken worden gesubsidieerd die

<sup>1</sup> Een merit order geeft aan wat de marginale kosten zijn van verschillende productiefaciliteiten. Deze voor de energiesector ontwikkelde methodiek wordt ook voor verschillende grondstoffen gebruikt. Wel is het zo dat deze informatie vaak niet publiek openbaar beschikbaar is, maar aan te kopen is bij gespecialiseerde commerciële partijen.



veelbelovend zijn, maar minder goed scoren op CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied. Het specifieke karakter van een aantal technieken lijkt zich minder goed te verhouden tot een generieke regeling als de SDE++.

Voor sommige technieken is grootschalige uitrol nog te vroeg, en kan versterking van innovatie en demonstratie wenselijk zijn. Omdat voor veel biobased producten de huidige markt nog klein is en het potentiële aantal aanvragers waarschijnlijk beperkt zal zijn, denken wij dat dit in de praktijk goed mogelijk is. Aandachtspunt hierbij is dat dit past binnen de Europese staatssteunkaders.

Een andere aanbeveling is om de vraag meer te stimuleren. Bijvoorbeeld door criteria op te nemen bij duurzaam inkopen voor de inkoop van biobased producten. Stimulering van de vraag heeft als voordeel dat de kans groter is dat emissiereductie op Nederlands grondgebied plaatsvindt, omdat de consumptie en afdanking waarschijnlijk in Nederland plaatsvindt. Ook sluit een vraagstimulans beter aan op de doelstelling van 15% biobased kunststoffen op de Nederlandse markt in 2030 (zoals beoogd met de transitieagenda kunststoffen behorend bij het rijksbrede programma circulaire economie). Daarentegen heeft stimulering van de productie als voordeel dat de kans groter is dat dit leidt tot additionele werkgelegenheid en toegevoegde waarde in Nederland. De keuze voor instrumenten is uiteindelijk een politieke afweging.

# Verklarende woordenlijst

## **Basisbedrag**

De kostprijs voor de productie behorend bij een specifieke technologie, uitgedrukt in euro per producteenheid.

## **Biobased technologie**

Technologie waarbij biomassa als grondstof wordt gebruikt.

## **Circulaire technologie**

Technologie gericht op het langer in de kringloop houden van grondstoffen en het vermijden van het gebruik van *virgin* grondstoffen en van finaal afval.

## **CCU**

Afkorting voor Carbon Capture en Utilisation, ofwel de afvang en het hergebruiken van CO<sub>2</sub>.

## **Correctiebedrag**

Het bedrag waarmee het basisbedrag wordt gecorrigeerd om de onrendabele top te bepalen (ofwel, de marktwaarde van het geleverde product).

## **ETS**

Afkorting voor Emissions Trading System, ofwel emissiehandelssysteem.

## **LCA**

Levenscyclusanalyse, studie naar de milieu-impact van een product of dienst, gemeten over de gehele productketen.

## **Onrendabele top**

Verskil tussen de kostprijs van een technologie en de marktprijs van een referentie-technologie, uitgedrukt in euro per producteenheid.

## **ORT-model**

Onrendabele-topmodel, rekenmodel van PBL waarmee de SDE-behoefte van verschillende technieken kan worden berekend.

## **O&M-kosten**

Jaarlijkse operationele kosten, zoals onderhoudskosten, verzekeringskosten, hulpmiddelen en resources.

## **Referentietechnologie**

Alternatieve technologie (niet biobased of circulair) waarmee de kosten en CO<sub>2</sub>-impact van een biobased of circulaire technologie worden vergeleken.

## **Subsidie-intensiteit**

Onrendabele top van een technologie, uitgedrukt in €/ton CO<sub>2</sub>-eq. Dit kengetal geeft aan hoeveel euro per ton vermeden CO<sub>2</sub>-subsidie nodig is om de SDE++-technologie financieel rendabel te maken.

## **TRL**

Technology Readiness Level, indicator voor de marktrijpheid van een technologie.



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

In de huidige SDE+-regeling wordt de onrendabele top vergoed van een aantal specifiek bepaalde hernieuwbare energietechnieken zoals windenergie, grootschalige zon-PV, geothermie en bio-energie. De evaluatie van CE Delft en SEO liet zien dat deze SDE+-regeling een effectief instrument is om hernieuwbare energietechnieken te stimuleren (CE Delft en SEO, 2016).

De SDE+-regeling zal worden opgevolgd door de SDE++-regeling. In de nieuwe SDE++-regeling zullen ook andere CO<sub>2</sub>-besparende technieken worden opgenomen. Een eerste brede verkenning naar deze opties en kosten hiervan is in 2019 afgerond (Navigant, 2019). Uit deze verkenning bleek dat enkele (chemische) recycling en biobased opties mogelijk ook geschikt zijn om via de SDE++ te stimuleren. Deze technieken zijn in dit eerdere onderzoek echter niet voldoende diepgaand doorgerekend.

Om deze opties op te nemen in de SDE++, is verdiepend onderzoek nodig. Zo moeten de exacte technologieën nauwkeuriger gedefinieerd en geselecteerd te worden, dient te worden onderzocht of een basisbedrag kan worden vastgesteld en of de CO<sub>2</sub>-emissiereductie (in Nederland) onafhankelijk te bepalen is. Dit voorliggend onderzoek is daarmee een aanvulling op de eerste verkenning uitgevoerd naar mogelijk kansrijke technieken voor de SDE++.

## 1.2 Doelstelling

Het uitvoeren van een onderzoek naar de mogelijkheden voor het opnemen van biobased en recycling opties in de SDE++. De hoofddoelen van het onderzoek zijn:

- de exacte technologieën nauwkeuriger te definiëren;
- het in kaart brengen van de onrendabele top voor een aantal van deze maatregelen;
- de CO<sub>2</sub>-eq.-emissiereductie van deze opties vast te stellen en vast te stellen hoe van concrete opties de emissiereductie berekend dient te worden;
- het berekenen van de kosteneffectiviteit (subsidie-intensiteit) uitgedrukt in €/ton CO<sub>2</sub> van de maatregelen.

Doel is om voor een aantal voorbeeldmaatregelen te verkennen of de onrendabele top en CO<sub>2</sub>-reductie vastgesteld kunnen worden conform de SDE++-methodiek en welke aandachtspunten en discussies hierbij spelen. Het gaat hierbij nadrukkelijk om een eerste verkenning.

## 1.3 Aanpak in vogelvlucht

In dit onderzoek is eerst een longlist gemaakt van 36 technieken die zich mogelijk lenen voor de SDE++. Voor een aantal hiervan (tien maatregelen) hebben we vervolgens een berekening gemaakt van de onrendabele top en bepaald of de CO<sub>2</sub>-reductie onafhankelijk vastgesteld kan worden. Hierbij hebben we gekozen voor maatregelen die in een korte tijd doorgerekend konden worden, zoveel mogelijk voldoen aan de praktische uitvoeringseisen van de SDE++-regeling en die een groot opschalingspotentieel in Nederland hebben.

Ook hebben we zoveel mogelijk gekozen voor een evenwichtige verdeling van biobased en circulaire technieken<sup>2</sup>.

Om de onrendabele top te bepalen, hebben we interviews afgenomen met marktpartijen en een brede webenquête uitgezet waarin we hebben gevraagd naar kosteninformatie.

Aannames en onzekerheden hebben we zoveel mogelijk expliciet en transparant in beeld gebracht.

## 1.4 Duurzaamheid biomassa

In dit rapport zijn circulaire en biobased technieken onderzocht. Een belangrijk aandachtspunt hierbij is dat de biomassa die wordt ingezet duurzaam is. Op dit moment zijn wettelijke duurzaamheidseisen van toepassing op de biomassa die met behulp van SDE+-subsidie wordt toegepast. Volgens de afspraken in het Klimaatakkoord gelden voor het kabinet twee uitgangspunten: alleen duurzame biomassa kan een bijdrage leveren aan de transitie naar een CO<sub>2</sub>-arme en circulaire economie, en duurzame biomassa moet uiteindelijk zo beperkt en hoogwaardig mogelijk worden ingezet. Dit geldt zowel voor biomassa van nationale als van internationale oorsprong.

Wij gaan in deze studie niet verder in op de duurzaamheidseisen die zouden kunnen gelden voor de biomassa gebruikt in de SDE++. Deze eisen dienen nader voor de technieken te worden uitgewerkt en toegepast als biobased en circulaire technieken in de SDE++ worden opgenomen.

## 1.5 Leeswijzer

De opzet van het rapport is als volgt:

- In Hoofdstuk 2 geven we een korte beschrijving van de SDE++-methode en een overzicht van de maatregelen die we hebben doorgerekend.
- In Hoofdstuk 3 beschrijven we de resultaten (onrendabele top en CO<sub>2</sub>-winst per techniek), inclusief de discussiepunten die optreden bij de bepaling ervan.
- In Hoofdstuk 4 presenteren we de conclusie en discussie. Hierbij gaan we ook kort in op alternatieve mogelijkheden voor subsidiering van biobased en circulaire maatregelen.

---

<sup>2</sup> De doorgerekende maatregelen moeten niet worden gezien als een definitieve selectie van potentiële maatregelen voor de SDE++. Ook maatregelen die nog niet zijn doorgerekend kunnen potentieel interessant zijn.

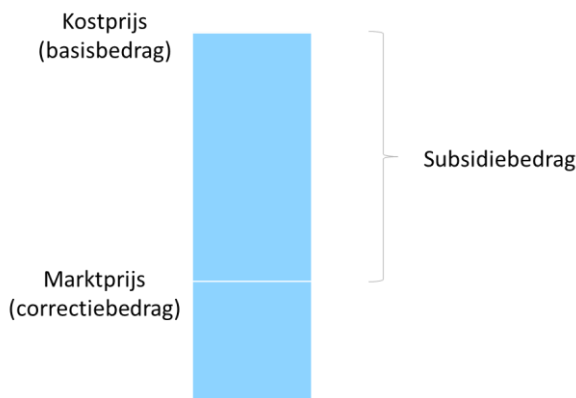
## 2 SDE++-methodiek en overzicht doorgerekende technieken

### 2.1 Werking SDE++-methode

De SDE++ is een subsidieregeling die het verschil compenseert tussen de marktprijs en kostprijs van een CO<sub>2</sub>-reducerende techniek. Het verschil tussen kost- en marktprijs wordt ook wel de onrendabele top genoemd. In oorspronkelijke SDE+-regeling werd alleen de onrendabele top gecompenseerd van hernieuwbare energietechnieken. In de SDE++-regeling wordt dit verbreed naar CO<sub>2</sub>-reducerende technieken op Nederlands grondgebied.

Om de kostprijs per eenheid opgewekte energie te bepalen, heeft (destijds) ECN het onrendabele topmodel ontwikkeld. Door in dit model generieke bedragen in te voeren van onder andere de investeringskosten, jaarlijkse kosten en brandstofkosten, wordt per techniek een kostprijs per eenheid energie berekend. De subsidie wordt jaarlijks uitgekeerd op basis van het verschil tussen de kostprijs en de gemiddelde marktprijs van de fossiele tegenhanger van het duurzame product in dat jaar, en dit te vermenigvuldigen met de geproduceerde volumes. Jaarlijks publiceert de Staatscourant de marktprijzen (die voor dat jaar gelden).

Figuur 1 - Hoogte SDE++-subsidies<sup>3</sup>



De rangschikking van technieken in de oorspronkelijke SDE+-regeling gebeurde aan de hand van de kosten per eenheid geproduceerde energie. Technieken met de laagste kosten in termen van euro per eenheid geproduceerde MWh kwamen het eerst in aanmerking voor de subsidie. In de verbrede SDE++-regeling is gekozen om te sturen op nationale (grondgebied) emissies. Daarom vindt de rangschikking van technieken plaats op basis van de kosten per eenheid CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland (in plaats van kosten per eenheid opgewekte MWh energie). Dit betekent dat technieken die het meest CO<sub>2</sub> (in Nederland) reduceren per gesubsidieerde euro voorrang hebben bij de subsidieverlening. Voor het klimaatvraagstuk is

<sup>3</sup> Een ander kenmerk is dat de subsidie is gemaximeerd: als de marktprijs onder een bepaalde waarde (de bodemprijs) daalt, is de maximale subsidie het verschil tussen de marktprijs en de bodemprijs. Voor de overzichtelijkheid is de bodemprijs niet opgenomen in de figuur.

het ook relevant om te weten wat de kosten per CO<sub>2</sub>-emissiereductie mondiaal zijn, zeker als deze sterk verschillen van de kosten ton CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland. Daarom rapporteren we zowel de kosten per ton CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland als mondiaal.

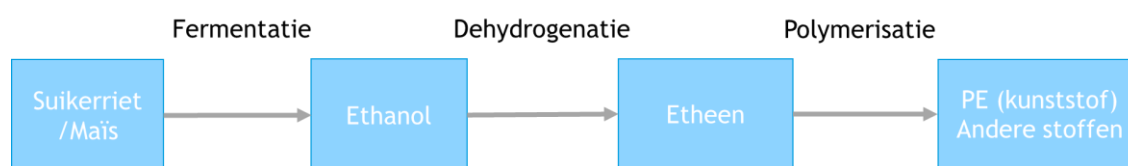
Een belangrijk kenmerk van de technieken in de SDE++-regeling is dat het product ook fossiel geproduceerd kan worden (er bestaat een goede fossiele referentietechniek). Een fossiele of duurzaam geproduceerde eenheid elektriciteit zijn bijvoorbeeld fysiek niet verschillend. Hierdoor is het goed mogelijk om de marktprijs van de fossiele tegenhanger te bepalen. Als een product niet exact dezelfde producteigenschappen heeft als het fossiele alternatief, is het in de praktijk lastiger om een correctiebedrag vast te stellen. In dit geval concurreert het product niet rechtstreeks met fossiele alternatieven maar moeten we een equivalent product definiëren. Dat geldt bijvoorbeeld voor de bioplastic-PLA dat niet hetzelfde is als de kunststof polystyreen, maar in de markt wel als vervanger daarvan wordt gezien.

In deze eerste verkenning van biobased en circulaire opties voor de SDE++ hebben we vooral gekeken naar technieken waarbij het fossiele alternatief duidelijk is, maar ook enkele opties genomen waarbij dit niet het geval is. Dit om de eerste doorrekening niet onnodig ingewikkeld te maken maar wel om ervaringen op te doen met technieken die niet aan deze eigenschap voldoen (maar toch veelbelovend kunnen zijn).

## 2.2 Kenmerken biobased productieprocessen

Een kenmerk van biobased productieprocessen is dat het eindproduct verschillende productiestappen omvat waarbij het output-product input kan vormen voor het volgende proces. Een voorbeeld is de productie van biobased-PE (een biobased plastic). Dit materiaal kan biobased worden geproduceerd door maïs/suikerbieten/tarwe (bioraffinage) in ethanol om te zetten, dat vervolgens kan worden omgezet in etheen (dehydrogenatie). Uit het biobased etheen kan Bio-PE kan worden geproduceerd (polymerisatie). Dit betekent er meerdere technieken toegepast moeten worden om het eindproduct Bio-PE te produceren. De tussenproducten kunnen echter ook voor andere toepassingen worden gebruikt. Zo is etheen ook een bulkgrondstof voor de chemische industrie.

Figuur 2 - Processchema biobased-PE



Deze interactie tussen de technieken is een belangrijk aandachtspunt voor de SDE+++subsidie, omdat het niet logisch is om meerdere technieken in hetzelfde productieproces tegelijkertijd te stimuleren. Stel bijvoorbeeld dat biobased etheenproductie wordt gesubsidieerd, kan dit alleen als de consument niet bereid is om de meerkosten van het proces te betalen in de prijs van etheen. Als de marktprijs en producteigenschappen van het fossiele en biobased of circulaire product identiek zijn, zou de volgende schakel in de keten het proces (biobased-PE-productie) zonder subsidies rendabel moeten zijn, omdat de feedstock (biobased etheen) zonder meerkosten ingekocht kan worden voor de productie van het eindproduct (biobased-PE). Wel kan een geïntegreerd proces worden gesubsidieerd die meerdere schakels in de keten omvat.

Een ander aandachtspunt is om overlap met andere stimulering in de keten te voorkomen. Zo is er voor gebruik van ethanol in transport al een bijmengverplichting (verplicht bijmengen bij benzine en diesel). Subsidie op het gebruik van ethanol in de Nederlandse economie zou leiden tot een dubbele stimulering. Subsidie op biobased etheen heeft minder risico op overlap; etheen kan weliswaar weer terug omgezet worden naar ethanol maar dit leidt tot extra kosten. Subsidies op Bio-PE zouden deze mogelijke dubbeling van ondersteuning in zijn geheel voorkomen, omdat PE niet wordt omgezet in ethanol.

## 2.3 CO<sub>2</sub>-administratie en biobased ketens

De CO<sub>2</sub>-administratie rond biobased ketens is ook van belang. Het CO<sub>2</sub>-voordeel van biobased ketens treedt met name op bij opname van CO<sub>2</sub> door planten/bomen in de landbouw en bosbouw. Dat kan wereldwijd plaatsvinden. Vanuit historische redenen wordt dit CO<sub>2</sub>-voordeel in veel landen toegerekend aan de partij die dit biologische materiaal uiteindelijk verbrandt, bijvoorbeeld in een kolencentrale of een afvalverbrandingsinstallatie. Fysiek stoten deze installaties even veel (of soms iets meer) CO<sub>2</sub> uit als bij het stoken van fossiele input (kolen, olie of gas), maar administratief wordt aan deze installaties een CO<sub>2</sub>-voordeel toegerekend dat eerder bij de groei van het materiaal plaats heeft gevonden. Dit is in lijn met de nationale emissieregistraties<sup>4</sup>.

## 2.4 Bepaling CO<sub>2</sub>-reductie

De klimaatimpactreductie hebben we in eerste instantie op wereldwijd niveau bepaald. We hebben kortom geen onderscheid gemaakt in waar de broeikasgasemissies plaatsvinden. Deze berekening is het meest zeker en sluit het beste aan bij de beschikbare data uit bestaande studies.

Daarnaast hebben we per techniek een inschatting gemaakt van welk deel van de klimaatimpact op Nederlands grondgebied plaatsvindt, zodat duidelijk wordt in welke mate het een bijdrage kan leveren aan Nederlandse klimaatdoelen.

Hierbij gebruikt men vaak de term scopes, waarmee aangegeven wordt waar in de (productie)keten broeikasgasemissies plaatsvinden:

1. Scope 1 omvat de directe CO<sub>2</sub>-uitstoot, veroorzaakt door eigen bronnen binnen de organisatie. Dit is de CO<sub>2</sub>-uitstoot uit bijvoorbeeld de schoorsteen van een biobased fabriek.
2. Scope 2 omvat de indirecte uitstoot van CO<sub>2</sub> door opwekking van zelf gekochte en verbruikte elektriciteit of warmte. Die opwekking vindt fysiek ergens anders plaats, bijvoorbeeld in een elektriciteitscentrale.
3. Scope 3 omvat de indirecte emissies die vrijkomen in de keten. Het gaat bijvoorbeeld om emissies die vrijkomen bij het oogsten en transporteren van de ingekochte biomassa van een biobased fabriek. Ook deze emissies vinden fysiek ergens anders plaats.

Het uitgangspunt in de huidige SDE++-regeling is dat Nederlandse Scope 1- en 2-emissies sowieso worden meegenomen in de analyse, en Scope 3 alleen als deze betrouwbaar vastgesteld kunnen worden. In deze studie wordt voor alle technieken gekeken naar zowel Scope 1-, Scope 2- en Scope 3-emissies, om een zo volledig mogelijk beeld te krijgen van de

<sup>4</sup> De klimaatimpact hebben we uitgedrukt in kg CO<sub>2</sub>-equivalent (eq.) per kg product. De eenheid CO<sub>2</sub>-eq. geeft aan dat hierbij niet alleen gekeken naar de uitstoot van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), maar ook naar emissies van andere broeikasgassen (zoals methaan en lachgas).





te verwachten reductie in klimaatimpact (zoals besproken in de bijlages per techniek). In Bijlage M hebben we aan de hand van een aantal voorbeelden uiteengezet in hoeverre betrouwbaar vastgesteld kan worden of emissiereducties in Nederland per scope optreden per type biobased en circulaire technieken.

## 2.5 Besparingen door uitgespaarde emissierechten

Een biobased of circulair proces kan ertoe leiden dat bedrijven minder emissierechten hoeven in te kopen. Dit geldt voor bedrijven in sectoren die onder het Europese emissiehandelssysteem vallen (EU ETS). Dit geeft een kostenvoordeel voor een circulair of biobased product. We hebben respondenten in deze studie niet expliciet gevraagd om de kosten van emissierechten te specificeren in de operationele kosten van het biobased of circulaire productieproces. Wel komen deze impliciet tot uiting op basis van het verschil tussen de kostprijs van het biobased of circulaire product en de marktprijs van het fossiele alternatief (waar de kosten van emissierechten in de prijs zijn doorvertaald).

## 2.6 Doorgerekende technieken

Om te onderzoeken welke biobased en circulaire technieken binnen de SDE++ opgenomen kunnen worden, hebben we eerst een overzicht van technieken opgesteld. Hiertoe hebben we contact gezocht met industrie, een literatuurstudie uitgevoerd en gebruik gemaakt van eigen expertise. Zo heeft de VNCI in haar routekaart 2050 weergegeven dat er binnen Nederland zo'n 30 biobased projecten zijn geïdentificeerd, variërend van pilotschaal tot commercieel toepasbaar. Ook hebben wij van de biobased delta een overzicht ontvangen van biobased projecten in Nederland. Daarbij heeft CE Delft een goed overzicht van circulaire en CCU-projecten die in de Nederlandse industrie zijn toegepast of toegepast kunnen worden. We hebben een overzicht gemaakt en deze voorgelegd aan vertegenwoordigers van de industrie. De technieken zijn weergegeven in Bijlage A.

In deze studie hebben we voor een aantal van deze technieken de onrendabele top berekend. Hierbij hebben we gekozen voor technieken die in een relatief korte tijd doorgerekend konden worden (databeschikbaarheid) en die het liefst zoveel mogelijk voldoen aan de praktische uitvoeringseisen van de SDE++. Ook is gekeken naar een goede mix van circulaire, biobased en CCU-opties. De technieken voldoen (zo veel mogelijk) aan de volgende criteria:

- De technieken moeten een onrendabele top hebben en een terugverdientijd groter dan vijf jaar (bij energiebesparende opties).
- Er wordt een biobased of circulair product gemaakt waar een duidelijke referentietechniek voor bestaat. Het liefst een fossiel alternatief dat aan exact dezelfde producteigenschappen voldoet, zodat het verschil tussen de kostprijs en (op vooral fossiel productie gebaseerde) marktprijs kan worden bepaald.
- Het gaat om generieke technieken met het liefst meerdere aanbieders en afnemers.
- Er kunnen generieke bedragen (investeringskosten en O&M-kosten) voor de technieken vastgesteld worden, zodat kosten per eenheid output berekend kunnen worden die representatief zijn voor alle aanvragers van de subsidie.  
De techniek heeft het liefst één dominante output. Bij een grote verscheidenheid aan producten is het niet goed mogelijk om één rekeneenheid vast te stellen voor het berekenen van de SDE++-basisbedragen.
- Er dient een index beschikbaar te zijn voor de marktprijzen. Deze kan de overheid jaarlijks publiceren om de verschillen tussen kost- en marktprijs te bepalen in dat jaar.
- De productievolumes moeten betrouwbaar en onafhankelijk vastgesteld en geverifieerd kunnen worden.

- De technieken dienen nu of binnen vijf jaar marktrijp te zijn (Technology Readiness Level 8-9).
- De technieken leiden tot een zo groot mogelijke emissiereductie op Nederlands grondgebied en kunnen verder uitgerold worden (reductiepotentieel).
- Binnen het productieproces van een product, waarbij meerdere tussenproducten ontstaan, wordt bij voorkeur één techniek gesubsidieerd, omdat anders oversubsidiëring plaatsvindt. Wel kan een geïntegreerd proces worden gesubsidieerd waarbij meerdere stappen in de productie aan elkaar geschakeld zijn.

In Tabel 1 zijn de technieken weergegeven die zijn doorgerekend in deze studie. Dit zijn circulaire, biobased als CCU-maatregelen technieken met een TRL-niveau 8-9 die een onrendabele top en een grote potentie voor verdere opschaling hebben. Het CO<sub>2</sub>-reductiepotentieel van de technieken is groot, maar in hoeverre dit op Nederlands grondgebied optreedt, verschilt per techniek (hier gaan we verder op in bij de doorrekening in het volgende hoofdstuk).

Tabel 1 - Technieken die zijn doorgerekend in deze studie

Technologie	Product	Fossiel alternatief	Categorie
Productie etheen uit ethanol	Etheen (uiteindelijk vooral Bio-PE, bioplastic)	Etheen uit fossiele bronnen	Biobased
PET-productie via depolymerisatie	BHET naar PET (recycled plastic)	Virgin PET (niet gerecycled)	Circulair
FDCA-productie	FDCA (uiteindelijk PEF, bioplastic)	Kunststoffen uit fossiele bronnen	Biobased
CCU-mineralisatie	Mineralisatie (bouwmaterialen)	Productie bouwmaterialen zonder inzet afgevangen CO <sub>2</sub>	CCU
PLA-productie	PLA (bioplastic)	Polystyreen (kunststof uit fossiele bron)	Biobased
Inzet getorreficeerde biomassa bij staalproductie	Getorreficeerde biomassa (uiteindelijk staal)	Staalproductie met koleninzet	Biobased
Geopolymeren in beton	Cement (uiteindelijk beton)	Regulier cement	Circulair
Productie syngas uit biomassa	Syngas (bijvoorbeeld voor waterstof)	Syngas uit fossiele bronnen	Biobased
Waterstofproductie uit vergassing gemeentelijk afval	Waterstof	Waterstof uit fossiele bronnen	Circulair
EPS-recycling	EPS (gerecycled kunststof)	Virgin EPS (niet gerecycled)	Circulair

In Bijlage B is een tabel opgenomen met daarin de belangrijkste criteria voor opname in deze studie en enkele afwegingen. De technieken die we hebben doorgerekend moet niet worden beschouwd als een selectie van alle technieken uit de longlist die mogelijk interessant zijn voor de SDE++. We hebben binnen de scope van deze studiekeuzes moeten maken. Er zijn nog maatregelen op de longlist die potentieel interessant zijn en in een later stadium uitgewerkt kunnen worden.

## 2.7 Conclusie

In dit hoofdstuk is een beschrijving weergegeven van de SDE++-methodiek en hebben we de maatregelen gepresenteerd waarvan we de onrendabele top en CO<sub>2</sub>-reductie bepalen. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in het volgende hoofdstuk.



# 3 Onrendabele top en kosteneffectiviteit technieken

## 3.1 Overzicht

Een overzicht van de kostprijs, marktprijs en kosteneffectiviteit van de maatregelen is weergegeven in Tabel 2. Een meer gedetailleerde omschrijving van de technieken, inputwaarden en aannames bij de berekeningen is weergegeven in Bijlage B tot en met J.

De onrendabele top is bepaald door uit te gaan van typische projecten. Hiervoor zijn investeringskosten en jaarlijkse O&M-kosten verzameld uit de literatuur en een marktconsultatie en vervolgens ingevuld in het ORT-model. De kosteneffectiviteit (subsidie-intensiteit) is berekend door de onrendabele top te delen door de emissiereductie per eenheidproduct.

We merken hierbij op dat er een grote bereidwilligheid van de meeste bedrijven was om mee te werken; de respons op de webenquête was hoog. De bandbreedtes in de cijfers zijn desondanks relatief groot. Dit komt deels omdat het om innovatieve technieken gaat die onzekerheden kennen in de kostprijs. Daarnaast gaat het om bedrijfsgevoelige informatie die bedrijven alleen in een grote bandbreedte willen en kunnen presenteren. Door vertrouwelijkheidsverklaringen te ondertekenen, en cijfers niet openbaar te presenteren, kunnen de bandbreedtes (met nader onderzoek) worden verkleind.

Tabel 2 - Resultaten berekeningen

Techniek	Product	Kostprijs (€/ton product)	Marktprijs (€/ton product)	Onrendabele top (€/ton product)	Reductie NL (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg product)	Reductie int. (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg product)	Subsidie-intensiteit NL (€/ton CO <sub>2</sub> -eq.)	Subsidie-intensiteit int. (€/ton CO <sub>2</sub> -eq.)
Productie etheen uit ethanol	Etheen	1.280 tot 1.400	1.050	230 tot 350	-0,4 tot 2	2,6	110 tot ∞/n.v.t.	90 tot 130
PET-productie door polymerisatie	BHET*	590 tot 820	520 tot 1.500	-910 tot 300	-1,3 tot 2,5	2,5	-360 tot ∞ *****	-360 tot 120
FDCA-productie	FDCA	2.350 tot 7.650	1.200 tot 10.000	-7.650 tot 6.440	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
CCU-mineralisatie	CO <sub>2</sub>	30 tot 60	0	30 tot 60	0,8	1,9	20 tot 70	20 tot 30
PLA-productie	PLA	1.870 tot 2.000	1.250 tot 1.430	440 tot 750	-2,2 tot 1,8	-0,3 tot 2,8	250 tot ∞ *****	160 tot ∞ *****
Inzet getorreficeerde biomassa bij staalproductie	Getorreficeerde biomassa**	200 tot 240	90 tot 160*****	40 tot 90	2,6	2	15 tot 30	20 tot 40
Geopolymeren in cement/beton	Cement	210 tot 240	80	130 tot 160	N.b.	N.b.	N.b.	N.b.
Productie syngas uit biomassa	Syngas****	20 tot 30	15	5 tot 15	N.b.	N.b.	N.b.	N.b.

Techniek	Product	Kostprijs (€/ton product)	Marktprijs (€/ton product)	Onrendabele top (€/ton product)	Reductie NL (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg product)	Reductie int. (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg product)	Subsidie-intensiteit NL (€/ton CO <sub>2</sub> -eq.)	Subsidie-intensiteit int. (€/ton CO <sub>2</sub> -eq.)
Waterstofproductie uit vergassing gemeentelijk afval	Waterstof	1.300 tot 2.050	1.000 tot 1.400	-100 tot 1.050	N.b.	N.b.	N.b.	N.b.
EPS-recycling	EPS	1.150 tot 2.250	1.400 - 1.900	-750 tot 850	-0,8 tot 3	3	-250 tot ∞/n.v.t.	-250 tot 290

- \* In het geval van mineralisatie is er wel een opbrengstprijis voor CO<sub>2</sub>, maar deze opbrengsten zijn al verdisconteerd in het basisbedrag.
- \*\* BHET is een bouwsteen voor PET (kunststof).
- \*\*\* Het eindproduct is staal, maar wij hebben voor dit proces de onrendabele top per eenheid te vervangen poederkool berekend.
- \*\*\*\* Bedragen in €/GJ.
- \*\*\*\*\* Inclusief vermeden ETS-kosten.
- \*\*\*\*\* Bij extra uitstoot in Nederland betaalt de overheid voor extra emissies. Dit scenario hebben we niet meegenomen bij de berekening van de kosteneffectiviteit.
- ∞ Bij een zeer lage emissiereductie (richting nul) wordt de kosteneffectiviteit in theorie oneindig groot.
- N.b. Niet bepaald in deze studie.

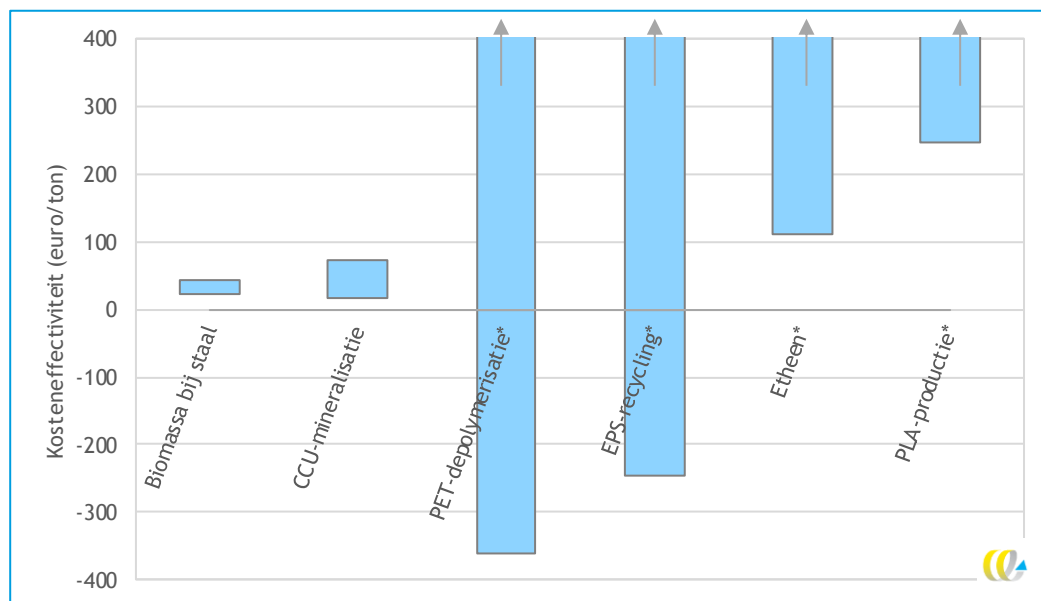
De tabel laat zien dat de onrendabele top (kostprijs min marktprijs) voor alle technieken is vast te stellen. Deze zijn weergegeven in een bandbreedte. Deze bandbreedte is relatief het meest beperkt bij de productie van geopolymeren in beton (130 tot 160 euro per ton cement) en het grootste bij FDCA-productie (-7.650 tot 6.440 euro per ton FDCA). We zijn in de berekening uitgegaan van de huidige marktprijzen en van de kosten op dit moment. Verandering in marktprijzen in de toekomst en lagere kosten door innovatie van technieken hebben we niet meegenomen.

Voor zes van de tien technieken was het mogelijk om de CO<sub>2</sub>-reductie te bepalen en de kosteneffectiviteit (euro subsidie per ton reductie) te berekenen. Deze is zowel berekend op basis van de reductie van broeikasgassen in Nederland als wereldwijd. Alle door ons doorgerekende technieken leiden op wereldwijd niveau tot een reductie van broeikasgassen. Het is echter niet zeker of alle technieken ook tot CO<sub>2</sub>-reductie binnen de Nederlandse landsgrenzen leiden. Bij biobased etheen, PLA-productie, EPS-recycling en PET-polymerisatie is dit alleen het geval als de technieken een fossiele productielocatie in Nederland verdringen en/of de producten in Nederland worden geconsumeerd en afgedankt.

Het is daarom mogelijk dat er geen emissiereductie in Nederland optreedt of de emissies in Nederland zelfs toenemen bij deze technieken. Dit betekent dat de kosten per ton reductie oneindig groot kunnen worden (als de emissiereductie richting de nul gaat) of de overheid betaalt voor extra uitstoot in Nederland.

De inzet van getorreficeerde biomassa bij staalproductie en CCU-mineralisatie leiden wel met zekerheid tot een emissiereductie in Nederland (onder de voorwaarde dat de biomassa aan de juiste duurzaamheidscriteria voldoet). De kosteneffectiviteit van de doorgerekende technieken op nationaal niveau is grafisch weergegeven in Figuur 3.

Figuur 3 - Kosteneffectiviteit (subsidie-intensiteit) Nederland, €/ton CO<sub>2</sub>-eq.



\* Bij zeer lage emissiereductie in Nederland wordt de subsidie-intensiteit heel hoog (hoge subsidiebehoefte per ton reductie), bij extra emissies in Nederland wordt intensiteit negatief (overheid betaalt voor extra emissies in Nederland). Dit hebben we niet verder berekend, conform de methodiek van het PBL.

Zowel bij staalproductie als bij CCU ligt de waarde onder de 100 euro per ton. Daarmee lijken deze opties in eerste instantie relatief goedkoop te zijn in termen van CO<sub>2</sub>-winst per euro subsidie. PLA-productie, biobased etheen, EPS-recycling en PET-depolymerisatie kunnen, zoals eerdere beschreven, in het meest ongunstige geval leiden tot extra uitstoot in Nederland. Verder uitgebreider onderzoek kan waarschijnlijk de bandbreedtes van deze resultaten verkleinen.

### 3.2 CO<sub>2</sub>-reductiepotentieel

Alhoewel we dit niet kwantitatief hebben onderzocht in deze studie, is het ook interessant om te bepalen wat de totale potentiële emissiereductie is van de technieken. Dit potentieel is erg afhankelijk van het toekomstige aantal aanvragers, de mate waarin technieken verder opgeschaald kunnen worden en in hoeverre kostprijsreductie mogelijk is waardoor technieken op langere termijn zonder subsidies concurrerend kunnen zijn.

Voor veel van de technieken is het potentieel voor (internationale) emissiereductie groot. De technieken zijn innovatief en omvatten momenteel slechts een klein deel van de markt. Zo zijn er in Europa nog geen fabrieken gebouwd voor de productie van biobased etheen (en biobased PE dat hieruit wordt geproduceerd) en voorziet één Braziliaanse fabriek van het bedrijf Braskem, met een marktaandeel van 90% biobased, in slechts 0,2% van het wereldwijde aanbod<sup>5</sup>. Ook is de FDCA-markt nog nauwelijks ontwikkeld. De productiefaciliteit van 5 kton voor FDCA, die Avantium volgens nieuwsberichten in de komende jaren wil bouwen<sup>6</sup>,

<sup>5</sup> Bij wereldwijde vraag naar PE van ongeveer 100 Mton, zie: [As Global Plastics Demand Expands Rapidly, Sustainability is Key to Future of Plastics Industry, IHS Markit Says](#)

<sup>6</sup> [‘PEF/FDCA flagship plant Avantium operationeel in 2023’](#)

voorziet in 0,01% van de potentiële vraag<sup>7</sup>. Deze cijfers geven weer dat het potentieel voor opschaling en kostenreductie door leereffecten<sup>8</sup> voor deze technieken groot is.

De potentie voor CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied is vooral groot bij de inzet van biomassa in het productieproces van staal. De hoogovens in IJmuiden zetten jaarlijks zo'n 1,3 miljoen ton poederkolen in. Bij een CO<sub>2</sub>-uitstoot van 2,6 ton per ton kolen zou door de inzet van biomassa in potentie meer dan 3 Mton CO<sub>2</sub>-gereduceerd kunnen worden. Een aandachtspunt hierbij is dat er voldoende biomassa beschikbaar dient te zijn en dat deze voldoen aan duurzaamheidscriteria (zie ook Paragraaf 1.4).

### 3.3 Onzekerheden

Bij de bepaling van de onrendabele top en CO<sub>2</sub>-emissiereductie van de technieken zijn er verschillende onzekerheden die naar voren kwamen. De meeste kunnen via verdiepend onderzoek verkleind worden. De belangrijkste zijn:

#### Bepaling emissiereductie kan complex en specifiek zijn

Een aandachtspunt is dat de bepaling van de emissiereductie voor sommige circulaire en biobased technieken complex en specifiek kan zijn. Zo is de CO<sub>2</sub>-reductie van de inzet van geopolymeren bij betonproductie sterk afhankelijk van het type samenstelling van het cement, het cement dat wordt vervangen en de eigenschappen van het soort beton dat wordt geproduceerd. Om de CO<sub>2</sub>-uitstoot te kunnen bepalen, is deels vertrouwelijke bedrijfsinformatie noodzakelijk. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor de bepaling van het reductiepotentieel van FDCA<sup>9</sup>. Om de CO<sub>2</sub>-reductie onafhankelijk vast te stellen, is daarom nader onderzoek noodzakelijk. Dit kan bijvoorbeeld door vertrouwelijkheidsverklaringen te ondertekenen waardoor bedrijven meer informatie kunnen delen.

Voor een betrouwbare bepaling van de CO<sub>2</sub>-reductie dienen het liefst analyses te worden uitgevoerd die vergelijkbaar zijn tussen de technieken onderling (vergelijkbare scope, vergelijkbare emissiefactoren, etc.). In deze studie is voor zes van de tien technieken een eerste verkenning gemaakt van de reductie op basis van beschikbare studies en/of kengetallen in de literatuur, maar deze verschillen in detailniveau. Om te komen tot nog meer eenduidige en vergelijkbare cijfers, is bij voorkeur een nadere studie noodzakelijk. Dit betekent dat idealiter per techniek een aparte studie wordt uitgevoerd waarin exact dezelfde uitgangspunten en kengetallen worden gehanteerd.

<sup>7</sup> Van FDCA wordt PEF geproduceerd dat wordt gezien als een fossiele concurrent van PET. De mondiale productie van PET is zo'n 76.000 kton per jaar.

<sup>8</sup> De bestaande fossiele fabrieken zijn veel grootschaliger, producenten hebben meer ervaring en fabrieken zijn beter geoptimaliseerd.

<sup>9</sup> Deze is sterk afhankelijk van de toepassing van het product. De CO<sub>2</sub>-winst is groter als (nu nog niet te recyclen) multilaags verpakkingen worden vervangen dan als (wel recyclebare) PET-flessen worden vervangen. Om te komen tot een betrouwbare inschatting, moeten idealiter meerdere scenario's worden uitgewerkt voor de potentiële toepassing van het product. De LCA-studies waarin dit wordt onderzocht zijn echter vertrouwelijk.

## Vaststellen emissiereductie op Nederlands grondgebied

De bepaling van het aandeel CO<sub>2</sub>-reductie op specifiek Nederlands grondgebied is voor een aantal technieken complex. De studie liet zien dat Scope 1- en 2-emissiereducties<sup>10</sup> bij biostaal en CCU-mineralisatie vrijwel zeker in Nederland plaatsvinden.<sup>11</sup> Voor de overige technieken is het niet zeker of Scope 1- en 2-emissies in Nederland worden gereduceerd. Bij deze technieken is de hamvraag of het biobased of circulaire productieproces een Nederlandse fossiele fabriek vervangt. Het is in deze verkennende studie niet mogelijk geweest om een exact kengetal voor Nederlands grondgebied te bepalen. Wij zijn daarom uitgegaan van een bandbreedte van 0 tot 100% (of wel vervanging in Nederland of niet). Daarbij is het vaststellen van de locatie van Scope 3-emissiereducties voor alle technieken moeilijk (zie Tekstbox 1).

Met aanvullend onderzoek zou nader kunnen worden bepaald of het aandeel emissiereductie in Nederland preciezer te bepalen is, bijvoorbeeld op basis van een wereldwijde kostencurve (merit order) die aangeeft welke fabrieken het minst competitief zijn en het eerst worden verdrongen bij een nieuwe biobased of circulaire investering. Maar ook bij een aanvullende studie zal er sprake zijn van onzekerheden omdat de concurrentiepositie van productielocaties dynamisch kan zijn en van verschillende factoren afhankelijk is.

### Tekstbox 1 - Scope 3-emissiereductie in Nederland

Voor alle technieken geldt dat het niet zeker is in welke mate Scope 3-emissiereducties (emissies in de keten) in Nederland optreden. Dit is bijvoorbeeld sterk afhankelijk van het aandeel van de biobased producten dat in Nederland worden geconsumeerd en verbrand. Wij hebben waar mogelijk schattingen gedaan van het aandeel van de consumptie in Nederland. Volgens één van de bedrijven is bijvoorbeeld naar schatting slechts 5 tot 10% van de Nederlandse productie van plastics bestemd voor de Nederlandse markt, maar dit zal per product en bedrijf verschillen. Een andere producent gaf namelijk aan dat mogelijk een groot deel van de productie mogelijk in Nederland afgezet zou kunnen worden. Op basis van een share analysis van statische data kwamen we uit op ongeveer één derde consumptie in Nederland voor PE. Dit zou nader onderzocht kunnen worden op basis van meer gedetailleerde marktanalyses.

Ook bij de inzet van getorreficeerde biomassa in het staalproces of bij CCU-mineralisatie is ook niet met zekerheid vast te stellen of Scope 3-emissies in Nederland worden gereduceerd. Bij CCU-mineralisatie is het de vraag welke partijen de CO<sub>2</sub> gaan inzetten in bouwproducten. Wij zijn in onze berekening uitgegaan van een buitenlands bedrijf, maar dit zou ook een Nederlandse partij kunnen zijn. Bij de inzet van getorreficeerde biomassa is het de vraag of de biomassa uit Nederland of uit het buitenland wordt geïmporteerd en/of getorreficeerde. Beide opties zijn mogelijk, en niet op voorhand vast te stellen. Om dit te bepalen zou aan de aanvragers gevraagd kunnen worden wat hun afzet en/of inkoopplannen zijn, maar het is de vraag hoe zo'n aanpak zich verhoudt tot een generieke regeling.

## Hoe representatief zijn berekeningen onrendabele top en emissiereductie voor techniekcategorieën?

Een ander aandachtspunt bij biobased en circulaire technieken is dat processen erg specifiek kunnen zijn. Om een onrendabele top te berekenen en de emissiereductie te bepalen, dient een keuze te worden gemaakt voor een bepaald proces. Dit neemt niet weg

<sup>10</sup> Dit zijn vooral de emissies uit de schoorsteen van de fabriek en elektriciteit en warmte.

<sup>11</sup> Bij de inzet van getorreficeerde biomassa wordt namelijk het huidige Nederlandse staalproductieproces vergroend en bij CCU wordt CO<sub>2</sub> afgevangen uit bestaande Nederlandse (afval)verbrandingsinstallaties.



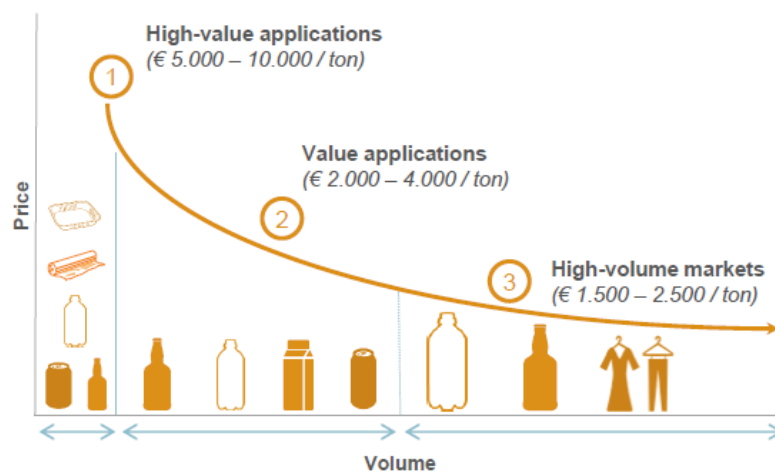
dat er meerdere wegen naar Rome leiden, omdat met een andere type proces en samenstelling een vergelijkbaar product kan worden ontwikkeld. Dit geldt onder andere voor beton op basis van geopolymeren, biobased etheen, syngasproductie, PET-productie via depolymerisatie en FDCA-productie. Een uitdaging is dan ook om per techniek te bepalen in hoeverre de berekeningen veralgemeniseerd kunnen worden voor andere aanvragers van de technieken. Hiertoe is nader onderzoek noodzakelijk, bijvoorbeeld door de onrendabele top en emissiereductie van meerdere varianten te bepalen en te onderzoeken of deze met een beperkte bandbreedte uitgemiddeld kunnen worden.

## Hoe om te gaan met het ontbreken van marktindices?

Een ander aandachtspunt is dat niet alle technieken, die wel veelbelovend kunnen zijn, een marktindex hebben. Bij een aantal van de technieken, zoals CCU-mineralisatie, FDCA- en PLA-productie zijn geen fossiele alternatieven aanwezig die aan exact dezelfde producteigenschappen voldoen. Voor syngas geldt dat dit een tussenproduct is en dat hiervoor geen liquide markt bestaat. Hierdoor is het moeilijk om een correctiebedrag vast te stellen.

Dit kan mogelijk worden opgelost door een fossiel alternatief te definiëren die lijkt op het product. Een risico is echter dat dit leidt tot een incorrecte schatting van de onrendabele top, omdat de eigenschappen van het fossiele alternatief toch te verschillend zijn. Zo kan FDCA (waarmee PEF wordt geproduceerd) ingezet worden voor verschillende toepassingen, waardoor de betalingsbereidheid van klanten naar verwachting zal verschillen per toepassing (zie Figuur 4). Als het PEF wordt ingezet in de high volume markets, wordt het makkelijker om de opbrengsten te bepalen omdat de marktprijs dichterbij komt van het alternatief PET (en de bouwsteen tereftaalzuur die lijkt op FDCA).

Figuur 4 - Opbrengsten PEF per toepassing



Bron: Avantium.

Als er geen marktprijzen zijn, kan gebruik worden gemaakt van kostprijnschattingen van de referentietechniek, zoals bij syngas. Hier kan ook de positie van de subsidie in de keten worden heroverwogen door bijvoorbeeld waterstofproductie te subsidiëren in plaats van syngasproductie.

Omdat wij verwachten dat het aantal aanvragers voor een aantal (innovatieve) techniek-categorieën in eerste instantie beperkt is bij uitbreiding van de SDE++, zou in plaats van marktindices te hanteren, het correctiebedrag ook bepaald kunnen worden door inzage te vragen in de feitelijke transacties in een jaar van de aanvrager (volume verkocht versus prijs). Op basis hiervan kunnen in latere jaren marktindices worden vastgesteld als er meer aanvragers zijn en meer ervaring met de technieken is opgedaan. Dat verhoudt zich echter minder goed tot een generiek instrument als de SDE++.

### 3.4 Aanbevelingen voor alternatieve stimulering

Mocht het niet mogelijk zijn om biobased en circulaire technieken op te nemen in de SDE++, zou alternatieve stimulering mogelijk kunnen zijn. Alhoewel dit niet de hoofdvraag was van dit onderzoek, kunnen we wel op de hoofdlijnen een aantal aanbevelingen doen. Deze aanbevelingen zijn echter geen uitputtende analyse van alternatieve stimuleringsmogelijkheden.

#### Meer gerichte subsidies

De SDE++ is een generieke exploitatiesubsidie waarbij basisbedragen worden vastgesteld voor techniek-categorieën. Dit werkt goed voor techniek-categorieën die min of meer vergelijkbaar zijn zoals bij hernieuwbare energie, maar leidt tot uitdagingen bij een aantal biobased en circulaire technieken die meer heterogeen van aard zijn en waarbij vaak maar enkele aanbieders actief zijn. Vanwege de eerdergenoemde onzekerheden bij het vaststellen van emissiereducties op Nederlands grondgebied en heterogeniteit van de techniek-categorieën, is het te overwegen om een aparte subsidieregeling te ontwikkelen waarbij de subsidie specifiek kan worden bepaald voor een bedrijf of toepassing. Hierbij zou niet alleen geselecteerd kunnen worden op CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied, maar ook op criteria zoals potentie voor opschaling, potentie voor toekomstige kostenreductie en toegevoegde waarde en lokale werkgelegenheid in Nederland. Hiermee wordt meer maatwerk mogelijk en kunnen ook veelbelovende technieken worden gesubsidieerd die minder goed scoren op CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied. Dit moet echter wel passen binnen de Europese regels voor Staatssteun.

#### Voor binnenlandse CO<sub>2</sub>-reductie kan ook de vraag worden gestimuleerd

Voor een aantal van de biobased productieprocessen zou ook de vraag gestimuleerd kunnen worden om binnenlandse CO<sub>2</sub> te reduceren. Een groot deel van de Nederlandse productie is namelijk bestemd voor de export, waardoor het biogene deel van de verbranding in buitenlandse AVI's zal toenemen en het voordeel niet aan Nederland kan worden toegeschreven. Bij stimulering van de vraag speelt dit probleem minder. Daarbij gaf één van de producenten van bioplastics aan dat de vraag meer invloed heeft op investeringsbeslissingen dan subsidies. Stimulering van de vraag zou bijvoorbeeld kunnen gebeuren door specifiekere criteria te gebruiken bij duurzame inkoop van materialen door de overheid. Dit kan bijvoorbeeld een verplichting zijn voor biobased plastics. Een voordeel is dat het risico dat een productiefaciliteit na de subsidieperiode uit bedrijf wordt genomen kleiner is. Een nadeel is echter dat stimulering van de vraag waarschijnlijk minder invloed heeft voor een producent om Nederland specifiek als productielocatie te kiezen. Een product zou immers bijvoorbeeld ook elders in Europa kunnen produceren en naar Nederland te exporteren bij stimulering van de Nederlandse vraag. Dit is weliswaar goed voor de binnenlandse CO<sub>2</sub>-reductie, maar minder voor werkgelegenheid en vergroening van de Nederlandse industrie



Het is ook denkbaar het gebruik van bijvoorbeeld buitenlands geproduceerd Bio-PE te stimuleren in een Nederlandse verpakkingenfabriek. Dit is vergelijkbaar met het biobrandstoffenbeleid voor de transportsector. In dit geval is het denkbaar dat er door consumptie en afdanking in Nederland een gunstig CO<sub>2</sub>-resultaat ontstaat en dat de CO<sub>2</sub>-emissie voor productie in het buitenland niet meegerekend wordt.

Bij het stimuleren van de vraag zou ook aangesloten kunnen worden bij de systemen van producentenverantwoordelijkheid. Dit zou ook veel administratieve kosten kunnen schelen. Zo administreert het afvalfonds verpakkingen al alle verpakkingen die op de Nederlandse markt worden afgezet en int hier een heffing over. Tot 1 januari 2019 was deze heffing voor bio afbreekbare verpakkingen lager dan die voor fossiele verpakkingen. Het Afvalfonds Verpakkingen zou opnieuw differentiatie in de tarieven kunnen aanbrengen door het tarief op fossiele plastics te verhogen en op bioplastics te verlagen.

Ook sluit een vraagstimulus beter aan op de doelstelling van 15% biobased kunststoffen op de Nederlandse markt in 2030 zoals beoogd met de transitie kunststoffen behorend bij het rijksbrede programma circulaire economie.

## 4 Conclusie en discussie

In de studie hebben wij onderzoek gedaan naar de mogelijkheden voor het opnemen van biobased en recycling opties in de SDE++. Doel is om voor een aantal voorbeeldmaatregelen te verkennen of de onrendabele top en CO<sub>2</sub>-reductie vastgesteld kunnen worden conform de SDE++-methodiek en welke aandachtspunten en discussies hierbij spelen.

In deze studie hebben wij een overzicht gemaakt van 36 biobased, circulaire en CCU-technieken en voor tien van deze technieken een berekening gemaakt van de onrendabele top, de CO<sub>2</sub>-reductie en de subsidie-intensiteit. Hiertoe hebben we interviews afgenomen met marktpartijen, een webenquête uitgezet en een literatuurstudie uitgevoerd. Het viel ons hierbij op dat de respons hoog was. Er was veel bereidwilligheid vanuit de industrie om kosteninformatie aan te leveren.

Bij de doorrekening van de technieken kwamen een aantal aandachtspunten en discussiepunten naar voren. Zo is het een uitdaging om voor een aantal van de biobased technieken om de CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied vast te stellen. Met name onzeker is waar fossiele en virgin productiefaciliteiten worden vervangen. Met behulp van uitgebreider marktonderzoek en product merit orders zou deze onzekerheid wel verkleind kunnen worden. Ook zijn veel van de technieken heterogeen waardoor de onrendabele top berekeningen moeilijk veralgemeniseerd kunnen worden voor een techniekcategorie. Er zijn namelijk meerdere verschillende processen mogelijk om een bepaald product te kunnen produceren.

Deze aandachtspunten gelden overigens niet voor alle technieken. Voor de inzet van getorreficeerde biomassa bij staalproductie en CCU-mineralisatie lijkt het bijvoorbeeld goed mogelijk om de (administratieve) CO<sub>2</sub>-emissiereductie op Nederlands grondgebied vast te stellen. Voor alle technieken, maar bij grote volumes in het bijzonder, geldt dat de biomassa die wordt ingezet duurzaam geproduceerd dient te zijn.

Om de CO<sub>2</sub>-emissiereductie (op Nederlands grondgebied) vast te stellen, dient idealiter voor iedere techniek een aparte studie te worden opgezet, waarbij dezelfde uitgangspunten worden gehanteerd om te waarborgen dat de CO<sub>2</sub>-reductie op een vergelijkbare manier is vastgesteld. Bij de verkenning in deze studie bleek dat niet voor alle technieken studies beschikbaar zijn en dat een deel van de informatie bedrijfsgevoelig en daarmee vertrouwelijk is. In een aanvullend onderzoek zouden aanvullende CO<sub>2</sub>-reductieberekeningen kunnen worden uitgevoerd zodat voor alle technieken zowel een kosten en CO<sub>2</sub>-effect bekend zou worden.

Vanwege de heterogeniteit van een aantal van de technieken en de uitdagingen om de CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied vast te stellen, is het te overwegen om een andersoortige subsidieregeling te ontwikkelen. Hiermee zou meer maatwerk mogelijk zijn bij de bepaling van de subsidiehoogte en kunnen ook technieken worden gesubsidieerd die veelbelovend zijn, maar minder goed scoren op CO<sub>2</sub>-reductie op Nederlands grondgebied. Het specifieke karakter van een aantal technieken lijkt zich minder goed te verhouden tot een generieke regeling als de SDE++. Voor sommige technieken is grootschalige uitrol nog te vroeg, en kan versterking van innovatie en demonstratie wenselijk zijn. Omdat voor veel biobased producten de huidige markt nog klein is en het potentiële aantal aanvragers waarschijnlijk beperkt zal zijn, denken wij dat dit in de praktijk goed mogelijk is. Aandachtspunt hierbij is dat dit past binnen de Europese staatssteunkaders.

Een andere aanbeveling is om de vraag meer te stimuleren. Bijvoorbeeld door criteria op te nemen bij duurzaam inkopen voor de inkoop van biobased producten. Stimulering van de vraag heeft als voordeel dat de kans groter is dat emissiereductie op Nederlands grondgebied plaatsvindt. Ook sluit een vraag reductie stimulans beter aan op de doelstelling van 15% biobased kunststoffen op de Nederlandse markt in 2030 zoals beoogd met de transitie kunststoffen behorend bij het rijksbrede programma circulaire economie. Daarentegen heeft stimulering van de productie als voordeel dat de kans groter is dat dit leidt tot additionele werkgelegenheid en toegevoegde waarde in Nederland. De keuze voor instrumenten is uiteindelijk een politieke afweging.

## 5 Literatuur

Accenture, 2009. *Bio Ethlyne Business Case : Evaluation of an investment in a 500 kta Ethanol to Ethylene plant to be built along side the ARG Ethylene Pipe Line*. [Online] Available at: <https://edepot.wur.nl/176951> [Geopend 2019].

Afvalfonds Verpakkingen, 2018. *Verpakkingen in de circulaire economie - Recycling verpakkingen Nederland 2017*, Leidschendam: Afvalfonds Verpakkingen.

Businesswire, 2018. *As Global Plastics Demand Expands Rapidly, Sustainability is Key to Future of Plastics Industry, IHS Markit Says*. [Online] Available at: <https://www.businesswire.com/news/home/20180518005048/en/Global-Plastics-Demand-Expands-Rapidly-Sustainability-Key> [Geopend 2019].

CE Delft en SEO, 2016. *Evaluatie van de SDE+ regeling*, Delft: sn

CE Delft, 2016. *Update prioritering handelingsperspectieven verduurzaming betonketen*, Delft: CE Delft.

CE Delft, 2019. *Verkenning uitsorteren en recyclen van bioplastic PLA - Analyse van kosten, baten en CO2-emissiereductie voor PLA van consumentenverpakkingen*, Delft: CE Delft.

COWI A/S ; Utrecht University, 2018. *Environmental impact assessments of innovative bio-based products : Task 1 of "Study on Support to R&I Policy in the Area of Bio-based Products and Services"*, Brussels: European Commission.

Crnomarković, M. et al., 2018. *Case studies on potentially attractive opportunities for bio-based chemicals in Europe*, sl: Biobased Industries.

ECN, 2014. *The Economy of Large Scale Biomass to Substitute Natural Gas (bioSNG) plants*, Petten: ECN.

Eerhart, A., Faaij, A. & Patel, M., 2012. Replacing fossil based PET with biobased PEF; process analysis, energy and GHG balance. *Energy & Environmental Science*, Issue 5, pp. 6407-6422.

Fraunhofer, 2018. *Verbundvorhaben: Nachhaltige Verwertungsstrategien für Produkte und Abfälle aus biobasierten Kunststoffen; Teilvorhaben 2,3,5: Recycling von biobasierten Werkstoffen, ökologische Bewertung zur Strategieentwicklung in Richtung hochwertiger Recyclingoption*, Oberhausen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT).

Giannoulakis, S., Volkart, K. & Bauer, C., 2014. Life cycle and cost assessment of mineral carbonation for carbon capture and storage in European power generation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Issue 21, pp. 140-157.

Huijgen, W. J., 2007. *Carbon Dioxide Sequestration by Mineral Carbonation*. 1e red. Delft: Technische Universiteit Delft.

IEA ETSAP, 2010. Syngas Production from Coal. *IEA ETSAP Technology Brief S01* , Issue May.

Intratec, 2013. *Technology Economics: Ethylene Production Via Ethanol Dehydration*. San Antonio (TX): Intratec Solutions.

IPCC, 2018. *Mineral carbonation and industrial uses of carbon dioxide*, Genève: IPCC.



JRC, 2019. *Insights in the European market for bio-based chemicals*, Sevilla: Joint Research Centre.

KEMA, 2010. *Statusoverzicht en impactanalyse van torrefactie in Nederland*, Arnhem: KEMA Nederland B.V..

KIDV, 2016. *PET-trays: op weg naar structurele oplossingen*, Den Haag: Stichting Kennisinstituut Duurzaam Verpakken (KIDV).

Kochar, N., Merims, R. & Padia, A., 1981. Gasohol Developments: Ethylene from Ethanol. *Chemical Engineering Progress (June)*, 77(6), pp. 66-71.

Koppejan, J., Cremers, M., Wild, M. & Junginger, M., 2016. *Biomass Torrefaction. Technology Status and Commercialisation, Webinar, 27 Oct 2016*, sl: IEA Bioenergy.

Kraussler, M. et al., 2018. Techno-economic assessment of biomass-based natural gas substitutes against the background of the EU 2018 renewable energy directive. *Biomass Conversion and Biorefinery*, Volume 8, pp. 935-944.

KVAB, 2015. *De chemische weg naar een CO2-neutrale wereld*, Brussel: Koninklijke Vlaamse Academie van België.

Lehne, J. & Preston, F., 2018. *Making Concrete change : Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*, London: The Royal Institute of International Affairs.

Molenveld, K. & Bos, H., 2019. *Biobased plastics 2019*, Wageningen: WUR.

Navigant, 2019. *Verkenning SDE+ met industriële opties*, Utrecht: Navigant Consulting, Inc.

PlasticInsight , 2019. *Purified Terephthalic Acid (PTA) Properties, Production, Price, and Market*. [Online]  
Available at: <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/purified-terephthalic-acid-pta/>  
[Geopend 20 September 2019].

PlasticsEurope, 2011. *Polyethylene Terephthalate (PET) (Bottle Grade) : Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*, Brussels: PlasticsEurope.

PlasticsEurope, 2012. *General-Purpose Polystyrene (GPPS) and High-Impact Polystyrene (HIPS) : Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*, Brussels: PlasticsEurope.

PlasticsEurope, 2014a. *High-density Polyethylene (HDPE), Low-density Polyethylene (LDPE), Linear Low-density Polyethylene (LLDPE) : Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers. Update December 2016*, Brussels: PlasticsEurope.

PlasticsEurope, 2014b. *Polypropylene (PP) - Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers*, Brussels, Belgium: PlasticsEurope.

Polyestertime, 2019. *May ethylene price Europe*. [Online]  
Available at: <https://www.polyestertime.com/may-ethylene-price-europe-2/>  
[Geopend 15 augustus 2019].

Ramboll, 2019. *Identification and analysis of promising carbon capture and utilisation technologies, including their regulatory aspects*, Brussel: European Commission.

SenterNovem, 2005. *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO2-emissiefactoren*, Den Haag: RVO (voorheen SenterNovem).



Styring, P. & Jansen, D., 2011. *Carbon Capture and Utilisation in the Green Economy: Using CO2 to Manufacture Fuel, Chemicals and Materials*, York: The Centre for Low Carbon Futures.

Tides Center, 2010. *The Business Case for Commercial Production of Bioplastics in Maine*, Maine: Maine Technology Institute.

TNO, 2018. *Productiekosten- en brutowinst analyse van vier chemische recycling processen*, Den Haag: TNO.

Tsiropoulos, I. et al., 2015. Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 90(March), pp. 114-127.

TÜV Rheinland LGA Products GmbH, 2019. *Life Cycle Assessment for End of Life Treatment of Expandable Polystyrene (EPS) from External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*, Köln: TÜV Rheinland.

WRI/WBCSD, 2004. *The Greenhouse Gas Protocol - A Corporate Accounting and Reporting Standard, revised edition*, Geneva/Washington: World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development.

WUR, 2017a. *Recyclingopties voor PET-schalen*, Wageningen: Wageningen Universiteit en Research.

WUR, 2017b. *Bio-based and biodegradable plastics - Facts and Figures Focus on food packaging in the Netherlands*, Wageningen: WUR.



# A Overzicht circulaire en biobased technieken

In Tabel 3 zijn de technieken weergegeven en daarbij een aantal belangrijke kenmerken voor de SDE++-subsidie.



Tabel 3 - Overzicht circulaire en biobased technieken

Nr.	Door-gerekend	Cate-gorie	Technologie	Feedstock	Product	Voorbeeld van bedrijven	Inschatting TRL	Fossiel alternatief	Eén dominante output
1	Nee	B	Ketenverlenging-technologie	Org. reststromen	Middenlange vetzuurketens (MFCA)	Chaincraft	7-9	Deels	Nee
2	Nee	B	FDCA-productie	Furaan	FDCA voor PEF/PET	Avantium, Corbion	7	Deels, tereftaalzuur is vergelijkbaar	Ja
3	Ja	B	Duurzaam staalproductie	Biomassa omgezet in biocokes	(bio)Staal		8-9	Ja	Ja
4	Nee	B	Asfaltproductie	Lignine	Asfalt	H4A	8-9	Ja, bitumen	Ja
5	Nee	B	Integrated Cascading Catalytic Pyrolysis (ICCP)	Hout (of glycerine)	BTX (benzeen, toluen, xyleen)	BioBTX	6-7	Ja	Ja
6	Nee	B, C	Pyrolyse	Ideaal: agrarisch afval, snoeihout, bermgras MSW	Pyrolyseolie, warmte, elektriciteit, Pyrolyse-olie	BTG-BTL, Twence, empyro, Plastic Energy	7-9	Nee (pyrolyse-olie), wel warmte en elektriciteit (SDE+)	Nee
7	Nee	B, C	Hydrotreatment	Bio-oliën, bijvoorbeeld pyrolyse-olie Pyrolyse-olie uit plastic	Bionafta Nafta	Sabic	7-9	Ja	Ja
8	Nee	B	Naftakraken	Renewable diesel/nafta	Etheen, propeen, etc.	Sabic	N.b.	Ja	Nee
9	Nee	B	Torrefactie	Houtachtige productie	Biokool	Torgas, Torr-Coal, Topell, ECN	7-8	Ja, maar met name energietoepassing	Ja
10	Ja	B	Dehydrogenatie	Ethanol	Bio-etheen	Braskem	9	Ja	Ja
11	Nee	B	Bio-PE-productie (polymerisatie)	Bio-etheen	Bio-PE	Braskem	8-9	Ja	Ja
12	Ja	B	Bio-PLA-productie	Melkzuur (bijvoorbeeld uit maïs, suikerbiet, tarwe)	Bio-PLA	Total Corbion PLA	8-9	Nee, maar vergelijkbaar met polystyreen	Ja
13	Ja	B	Bio-PEF productie	Ethanol, FDCA	Bio-PEF		8-9	Ja	Ja
14	Nee	B	Biologische conversie	Algen	Omega's, kleurstoffen, proteïnen	DSM en Evonik (Nebraska)	8	Nee	Nee
15	Ja	C	Depolymerisatie PET-afval	PET-afval	PET-monomeren	Ioniqa	8-9	Ja	Ja

Nr.	Door-gerekend	Cate-gorie	Technologie	Feedstock	Product	Voorbeeld van bedrijven	Inschatting TRL	Fossiel alternatief	Eén dominante output
16	Nee	C	Lagetemperatuur-vergassing	Plastics	Syngas	Royal Dahlman, BTG	5-7	Ja	Ja
17	Nee	C	Medium temperatuur-vergassing	Plastic afval	Syngas, methanol	Enerkem	5-7	Ja	Nee
18	Nee	C/B	Geïntegreerde hydrolyse	Plastics, biomassa	Pyrolyseolie, syngas	Obbotec/GreenMod em, Fraunhofer, Shell/lh2, Energy, Plastic Energy	5-7	Nee	Nee
19	Nee	C	Betonrecycling	Beton-afval	Beton	Rutte groep	9	Ja	Ja
20	Nee	C	Geopolymeren in beton	Geopolymeren	Duurzaam beton/cement	Ascem	7-9	Ja	Ja
21	Ja	CCU	CCU	CO <sub>2</sub> uit rookgassen	Mineralisatie (bouwmaterialen)	Twence	8-9	Nee	Ja (bijvoorbeeld beton, olivijn, cement, steen of zand)
22	Nee	CCU	CCU	CO <sub>2</sub> uit rookgassen	Energiedragers/ Chemicaliën	Twence, Coval	4-5	Nee	Nee
23	Nee	CCU	CCU	CO <sub>2</sub> uit rookgassen	Polyolen voor PUR	Covestro	7-8	Ja	Ja
24	Ja	C	PVC-recycling	PVC-afval	PVC-recylaat	Van Werven	9	Ja	Ja
25	Ja	C	EPS-recycling	EPS	EPS-recylaat	Polystyrene Loop Coöperatief	8-9	Ja	Ja
26	Nee	C	Kozijnenrecycling	Oude deuren/kozijnen	Halffabricaat voor uit vers hout	A. van Liempd	7-9	Ja, voor kunststofkozijnen	Ja, maar lastig eenheid te definiëren
27	Nee	B	Biosuccinium technologie	Org. reststromen	Barnsteenzuur	Roquette (fabriek in Italië)	7-9	Ja	Ja
28	Nee	B	Bio-solventsproductie	Melkzuur (bijvoorbeeld uit maïs, suikerbiet, tarwe)	Ethylactate, other lactate-esters	Corbion	N.b.	Nee	Nee
29	Nee	C	Lime-free/gypsum free lactic acid production	Kalk, suiker	Melkzuur, PLA	Corbion	N.b.	Nee	Ja

Nr.	Door-gerekend	Cate-gorie	Technologie	Feedstock	Product	Voorbeeld van bedrijven	Inschatting TRL	Fossiel alternatief	Eén dominante output
30	Nee	B	Self Healing Concrete	Melkzuur (bijvoorbeeld uit mais, suikerbiet, tarwe)	Additief voor beton	Basilisk/ Corbion	N.b.	Nee	Ja
31	Nee	B	Bio-aromaten	Furfural	Bio-MPA (3-methulftaalzuur anhydride)	Biorizon	6	Ftaalzuuranhydride (PA)	Ja, bio-MPA
32	Nee	CCU	Gasfermentatie	CO, CO <sub>2</sub> (vooral CO) uit rookgassen staalindustrie	Ethanol	Lanzatech, Steeanol	8-9	Ja	Ja
33	Nee	B	Biocomposieten op basis van natuurvezels	Natuurvezels, zoals hennep, miscanthus	Biocomposieten		N.n.b	N.n.b.	N.n.b.
34	Nee	B	Biobased isolatiemateriaal	Vlas, hennep, e.d.		Onder andere Isovlas, meerdere aanbieders	9	Ja (glaswol, steenwol)	Afhankelijk van grondstof
35	Ja	B	Hogetemperatuur vergassing	Getorreficeerde biomassa (houtachtige rest-stromen)	Syngas	Chemelot/Torrgas	8-9	Ja	Ja
36	Ja	C	Hogetemperatuur vergassing	Huisvuil	Syngas	RWE/Chemelot	8-9	Ja	Ja

## B Technieken opgenomen in studie

In Tabel 4 staan de belangrijkste kenmerken van de technieken die zijn doorgerekend in deze studie.

Tabel 4 - Doorgerekende circulaire en biobased technieken

Technologie	Product	Fossiel of niet circulair alternatief	TRL niveau 8-9	Markt-index beschikbaar	Een dominante output	Productievolumes vast te stellen	Groot CO <sub>2</sub> -reductie-potentieel/potentie voor opschaling
Productie etheen uit ethanol	Etheen (uiteindelijk vooral Bio-PE)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PET-productie via depolymerisatie	BHET naar PET	✓	✓	~	✓	✓	✓
FDCA-productie	FDCA (uiteindelijk PEF)	~	✓	~	✓	✓	✓
CCU-mineralisatie	Mineralisatie (bouwmaterialen)	~	✓	~	✓	✓	✓
PLA-productie	PLA	~	✓	✓	✓	✓	✓
Inzet getorreficeerde biomassa bij staalproductie	Getorreficeerde biomassa (uiteindelijk staal)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Geopolymeren in beton	Cement (uiteindelijk beton)	~	✓	✓	✓	✓	✓
Productie syngas uit biomassa	Syngas	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Waterstofproductie uit vergassing gemeentelijk afval	Waterstof	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EPS-recycling	EPS	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Een aantal van de technieken heeft eigenschappen die minder goed aansluiten op de SDE++, maar die we toch hebben doorgerekend:

- CCU voor mineralisatie in bouwmaterialen heeft geen fossiel alternatief en er is geen marktindex beschikbaar voor de CO<sub>2</sub>-opbrengsten<sup>12</sup>. Wel heeft het proces een onrendabele top en heeft van de CCU-toepassingen de minste discussies over CO<sub>2</sub>-winst (het gaat om permanente opslag in materialen). Daarom is deze maatregel toch opgenomen voor doorrekening.

<sup>12</sup> Bij de onrendabele top berekening zijn we uitgegaan van de betalingsbereidheid van afnemers voor de CO<sub>2</sub> voor toepassing in hun bouwmaterialen (op basis van de inkoopkosten waarbij de businesscase nog positief is). Nader onderzocht zou kunnen worden hoe deze betalingsbereidheid zich verhoudt tot bijvoorbeeld de EU ETS-prijs.

- FDCA (grondstof voor bioplastics) heeft geen fossiel alternatief met exact dezelfde producteigenschappen, maar heeft wel een groot toepassingspotentieel als vervanger voor meerdere kunststoffen (onder andere PET). Daarom is ook deze maatregel opgenomen.
- PLA heeft geen fossiel alternatief met exact dezelfde producteigenschappen, maar PLA is wel vergelijkbaar met polystyreen en heeft ook een groot toepassingspotentieel. Daarom is ook deze maatregel opgenomen om door te rekenen.
- Geopolymeren in cement/beton zijn een alternatief voor reguliere cementen, maar hebben wel een andere samenstelling waardoor deze niet exact gelijk zijn. Dit leidt tot een complexe omrekening van gegevens. Wel is de productie van beton verantwoordelijk is voor 8% van de mondiale CO<sub>2</sub>-emissies, waardoor het potentieel voor emissie-reductie groot is.
- Voor PET-depolymerisatie (BHET) is geen marktindex beschikbaar. Wel zijn er prijzen van vergelijkbare alternatieven beschikbaar.
- Voor syngas zijn geen marktindices beschikbaar, omdat dit product een tussenproduct is en niet verhandeld wordt. Wel is de potentiële CO<sub>2</sub>-winst van dit proces groot, omdat het een fossiel alternatief met kolen of aardgas vervangt en grootschalig zou kunnen worden ingezet.

# C Productie etheen uit ethanol

## C.1 Beschrijving techniek

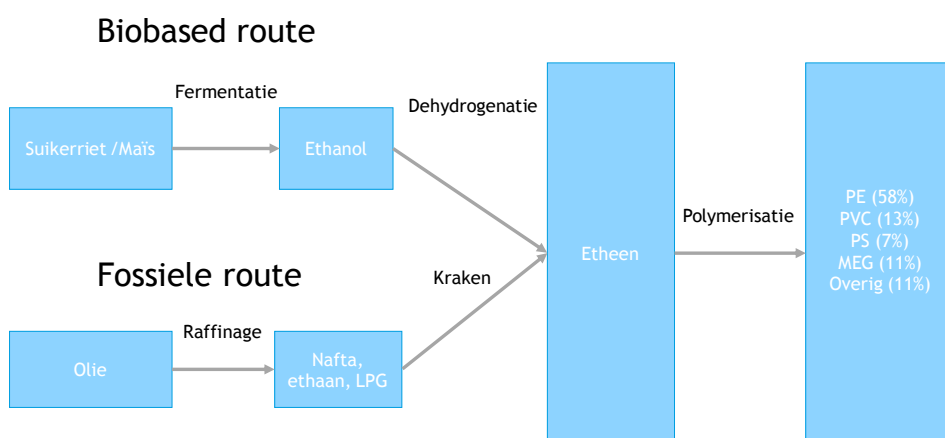
Etheen is een gasvormige stof met de scheikundige formule  $C_2H_4$  die als feedstock dient voor verschillende chemische toepassingen. Met een wereldwijde productie van 150 mln ton per jaar, is het een bulkproduct waarmee de helft van alle plastics wordt geproduceerd. Voorbeelden zijn PE, PVC, PS en PET (Crnomarković, et al., 2018).

Biobased etheen kan worden geproduceerd uit methanol en ethanol. In dit rapport bepalen we de onrendabele top voor productie van etheen uit ethanol waarbij ethanol wordt geproduceerd uit suikerriet. In dit proces wordt het ethanol verdampt en verwarmd in een oven. De stoom wordt in verschillende reactoren geleid, waar het ethanol wordt omgezet. De gekoelde stoom wordt vervolgens in een kolom geleid, waar het vrijkomende water wordt gecondenseerd. De volgende stappen in het proces zijn compressie, wassen en purificatie. Het proces waarmee etheen uit ethanol wordt geproduceerd heet dehydrogenatie (Intratec, 2013).

## C.2 Referentietechnologie

De referentietechnologie is de productie van etheen uit aardolie. In de fossiele route is etheen één van de producten uit het kraken van fossiele nafta, ethaan en LPG. Deze stoffen worden geproduceerd bij de raffinage van olie. De biobased en fossiele productie routes van etheen zijn schematisch weergegeven in Figuur 5. Voor de overzichtelijkheid hebben we productie van etheen uit methanol niet opgenomen in de figuur.

Figuur 5 - Productieketen etheen



Bron: (Crnomarković, et al., 2018).

### C.3 Bepaling kostprijs

Voor het bepalen van de onrendabele top hebben we een literatuurstudie uitgevoerd en een interview afgenomen met een marktpartij. De investeringskosten voor een etheenfabriek met een capaciteit van 500 kton langs de ARG pijplijn (die loopt van de Rotterdamse haven, via Terneuzen en België naar Duitsland) bedragen volgens een verkennende businesscase van Accenture 200 mln euro (Accenture, 2009). De kosten voor de fabriek in Brazilië vielen met 290 mln dollar, en een capaciteit 200 kton, beduidend hoger uit.

Verreweg de grootste kostenpost voor de productie van etheen zijn de inkoopkosten voor ethanol. Deze bedragen volgens (Crnomarković, et al., 2018) bijna 90% van de kostprijs. Ook uit de businesscase van Accenture (2009) volgt dat de inkoopkosten van ethanol dominant zijn in de kostprijs. Dit werd bevestigd in het telefonisch interview met een marktpartij. Hierbij is de omzettingsfactor (benodigde hoeveelheid ton ethanol per ton geproduceerde eenheid etheen) van groot belang. Volgens de businesscase van Accenture bedraagt de omzettingsfactor 1,7 tot 1,9; volgens een marktpartij is deze factor minder gunstig met 2,2 tot 2,3. We hanteren een middenwaarde van 2,25.

Marktpartijen hebben geen cijfers verschaft over de overige variabele kosten (ander dan inkoop van ethanol). De businesscase van Accenture presenteert waarden van zo'n 50 mln euro per jaar voor O&M-kosten. Volgens (Crnomarković, et al., 2018) bedragen de O&M-kosten zo'n 10% van kostprijs in termen van euro per ton; de afschrijvingskosten van de investering bedragen slechts een fractie van de kostprijs.

In Tabel 5 hebben we de inputparameters voor het ORT-model samengevat. Uitgangspunt is een fabriek met een productiecapaciteit van 500 Kton. Voor de financiële parameters (inflatie en rente) zijn we uitgegaan van de parameters die zijn gebruikt in het concept-advies SDE++ voor industriële technieken.

Tabel 5 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	200-725	€ mln
Kosten ethanol (prijs € 475/ton)	428-534	€ mln/jaar
Overige variabele kosten	50	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	500	Kton
Levensduur	15	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

Deze waarden invullen leidt tot de volgende kostprijs per ton geproduceerde etheen.

Tabel 6 - kostprijs etheen uit ethanol

Technologie	Eenheid	Waarde
Etheen uit ethanol	€/ton	1.280 tot 1.400



## C.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top

De marktprijs van etheen wordt gebruikt voor het bepalen van het correctiebedrag en de onrendabele top. Volgens ISIC lag de contractprijs van etheen in mei 2019 op 1.075 euro per ton etheen (Polystertime, 2019). Accenture kwam in 2009 tot een marktprijs van 1.050 euro per ton etheen (Accenture, 2009). Afhankelijk van de range basisbedragen (€ 1.280 tot 1.400) bedraagt de onrendabele top hiermee ongeveer 230 tot 350 euro per ton etheen.

## C.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

Doordat de teelt van suikerriet CO<sub>2</sub> uit de lucht vastlegt, brengt de verbranding van eindproducten die uit etheen worden geproduceerd geen ‘nieuwe’ koolstof de lucht in. Dit vertaalt zich in CO<sub>2</sub>-reductie door een hoger aandeel biogene stoffen in de AVI. We rekenen dus hier de opname van CO<sub>2</sub> door suikerriet productie in Brazilië dus toe aan een vermindering van CO<sub>2</sub>-emissie van afvalverbranding in Nederland.

Bij de bepaling van CO<sub>2</sub>-impact van de productie van biobased etheen speelt het probleem dat niet duidelijk is welk eindproduct uit de etheen wordt geproduceerd. Zoals weergegeven in Figuur 5 kunnen dit meerdere kunststoffen zijn of andere chemicaliën. Omdat biobased PE (een plastic) de belangrijkste toepassing is van etheen, hanteren we als uitgangspunt dat HDPE wordt geproduceerd:

- We vergelijken de klimaatimpact (uitgedrukt in kg CO<sub>2</sub>-equivalenten) van 1 kg petrochemisch geproduceerd HDPE met de klimaatimpact van 1 kg bio-HDPE.
- De hele productieketen tot en met de productie van HDPE en de uiteindelijke end-of-life van de twee productsystemen (HDPE en bio-HDPE) wordt meegenomen. De omzetting tot een eindproduct (bijvoorbeeld een consumentenverpakking), distributie en de gebruiksfase worden dus niet meegenomen, aangezien hier geen verschillen bestaan tussen de twee productsystemen.
- Voor de end-of-life wordt aangenomen dat de koolstof die in HDPE en bio-HDPE aanwezig is vrijkomt als CO<sub>2</sub>. Aan biogene CO<sub>2</sub>-emissies wordt geen klimaatimpact toegekend<sup>13</sup>, in lijn met de nationale emissieregistraties volgens de IPCC-richtlijnen.

Tabel 7 vergelijkt de geschatte klimaatimpact van de gemiddelde petrochemische Europese HDPE-productie- en afvalfase met die van biobased productie. Van de totale uitstoot van de fossiele productie zit het grootste deel in de raffinage en etheenproductie (eerste kolom). De tweede kolom geeft de geschatte klimaatimpact van de biobased productie van ethanol in Brazilië uit suikerriet, transport van ethanol naar de EU, etheenproductie, polymerisatie tot bio-HDPE en de afvalfase in Europa.

<sup>13</sup> Om ervoor te zorgen dat de koolstofbalans klopt, wordt ook de opname van CO<sub>2</sub> tijdens het groeien van suikerriet niet meegenomen als negatieve emissie. Dit betekent in feite dat de fysieke opname van CO<sub>2</sub> in biobased producten als voordeel wordt toegerekend aan de verbrandingsfase in plaats van de landbouwfase. Dit heeft geen gevolgen voor de wereldwijde klimaatimpact, maar wel voor de locatie waar deze emissies (niet) meegenomen worden.

Tabel 7 - Klimaatwinst HDPE-productie uit bio-etheen (kg CO<sub>2</sub>-eq./kg etheen)

Productiestap	Klimaatimpact fossiel (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg etheen)	Klimaatimpact biobased (kg CO <sub>2</sub> -eq./kg etheen)	Vershil
Grondstofwinning, raffinage, etheenproductie	1,5	-	
Teelt, ethanolproductie in Brazilië	-	1,2	
Transport ethanol naar EU	-	0,3	
Etheenproductie		0,5	
Polymerisatie	0,3	0,3	
End-of-life (verbranding)	3,1	-	
<b>Totaal</b>	<b>4,9</b>	<b>2,3</b>	<b>2,6</b>

- Toelichting fossiel: Uitsplitsing klimaatimpact op basis van totalen en contributieanalyse uit (PlasticsEurope, 2014a). Klimaatimpact verbranding bepaald op basis van structuurformule.
- Toelichting biobased: Uitsplitsing klimaatimpact op basis van totalen en contributieanalyse uit (Tsiropoulos, et al., 2015), SE-C scenario. De berekening voor transport van ethanol naar EU is gebaseerd op de Biograce-I calculator voor broeikasgasemissies (Biograce) en een omzettingsrendement van 1,74 kg ethanol per ton ethyleen (Kochar, et al., 1981).

De geschatte broeikasgasreductie die gerealiseerd kan worden door de productie van bio-HDPE uit Braziliaans suikerriet in plaats van petrochemisch geproduceerd HDPE bedraagt ca. 2,6 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg HDPE over de hele levenscyclus. Dit betreft de wereldwijde reductie.

Een aantal onzekerheden in deze analyse zijn:

- Literatuurwaardes voor de klimaatimpact van de productie van bio-HDPE lopen uiteen. De hier gebruikte waardes zijn conservatief.
- De klimaatimpact van de productie van bio-HDPE houdt geen rekening met de mogelijke emissies uit directe en indirecte landgebruiksverandering (*land use change*; LUC). Volgens (Tsiropoulos, et al., 2015) zouden deze tussen de 0,2 en 2,4 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg bio-HDPE kunnen toevoegen, waardoor in het ergste geval het voordeel van bio-HDPE ten opzichte van petrochemisch HDPE bijna teniet gedaan wordt. Schattingen van de impact van LUC zijn echter onzeker.
- De gebruikte klimaatimpactdata voor de productie van petrochemisch HDPE geeft de gemiddelde Europese productie weer. Het gebruikte rapport geeft echter weinig inzicht in de gebruikte data, bijvoorbeeld wat betreft de variaties binnen Europa. Recent onderzoek voor de Europese Commissie concludeerde dat de klimaatimpact van petrochemische plasticproductie tot ca. 25% kan variëren tussen Europese landen en tot ca. 50% binnen Europese landen, bijvoorbeeld door verschillen in de efficiëntie en energiemix van raffinaderijen (COWI A/S ; Utrecht University, 2018).

## Reductie in Nederland

Een belangrijk uitgangspunt voor de SDE++-subsidie is dat de emissie zoveel mogelijk op Nederlands grondgebied dient plaats te vinden. Bij de productie van biobased etheen zal de uitstoot in Nederland in eerste instantie vooral toenemen, omdat de extra uitstoot in Nederland immers 0,5 kg CO<sub>2</sub> per kg etheen bedraagt. De CO<sub>2</sub>-winst op Nederlands grondgebied die hier tegenover staat is afhankelijk van de vraag welke investeringen worden verdrongen (een Nederlandse fabriek of een buitenlandse) en welk deel van de etheen en bio-PE in Nederland wordt geconsumeerd. Volgens producenten van PE ligt het aandeel waarschijnlijk niet hoger dan 5 tot 10% en is het overgrote deel bestemd voor consumptie in

het buitenland. Op basis van een analyse van gegevens van Prodcop komen we uit op maximaal 30% <sup>14</sup>.

Dit betekent dat de klimaatwinst door end of life waarschijnlijk voor een groot deel in het buitenland neerslaat. De klimaatwinst in Nederland is daarmee vooral afhankelijk van het feit of een buitenlandse of Nederlandse fossiele etheenproducent wordt verdrongen door de investering (dit zou een Nederlandse investering kunnen zijn omdat een etheenproducent door de subsidie kiest voor een groene investering in plaats van een fossiele fabriek). Afhankelijk van de aannames bedraagt de klimaatwinst op Nederlands grondgebied in het gunstigste geval 2 kg per kg geproduceerd etheen en in het meest ongunstige geval een extra uitstoot van 0,4 kg per kg etheen.

Tabel 8 - Reductie broeikasgassen mondiaal en in Nederland (kg CO<sub>2</sub>-eq./kg etheen)

	CO <sub>2</sub> -uitstoot wereldwijd	CO <sub>2</sub> -uitstoot in Nederland
Grondstofwinning, raffinage, etheenproductie	-1,5	-1,5 tot 0*
End-of-life (verbranding)	-3,1	-1 tot -0,15**
Extra uitstoot door teelt, ethanol en etheenproductie	1,7	0,5
Transport	0,3	-
<b>Totaal uitstoot (afgerond)</b>	<b>-2,6</b>	<b>-2 tot 0,4</b>

\* Afhankelijk of buitenlandse of Nederlandse investering wordt verdrongen.

\*\* Bij 5 tot 30% Nederlandse consumptie van bio-etheen en PE.

## C.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

De subsidie-intensiteit is de subsidie (dus kostprijs - marktprijs) per gereduceerde ton CO<sub>2</sub>. Hoe dichterbij 0 de waarde is, des te *voordeliger* is de maatregel voor de overheid. Als er echter sprake is van extra CO<sub>2</sub>-uitstoot op Nederlands grondgebied zal de subsidie-intensiteit negatief worden. Dit betekent dat de Nederlandse overheid *betaalt* voor extra uitstoot.

Mondiaal komt de subsidie-intensiteit uit op een range van 90 tot 130 euro per ton CO<sub>2</sub>-reductie. Voor Nederland hangt de subsidie-intensiteit sterk af van de grootte en richting van de emissiereductie. Bij een reductie van 2 ton CO<sub>2</sub>-eq. per ton etheen bedraagt de subsidie-intensiteit 110 euro per ton. Als de reductie lager, maar positief is zal deze hoger is. Als de reductie negatief is, is de subsidie-intensiteit ook negatief.

<sup>14</sup> Op basis van gegevens van Prodcop hebben we een eerste inschatting gemaakt van het huidige aandeel in Nederland geproduceerde PE dat ook in Nederland wordt geconsumeerd. Cijfers laten zien dat in 2018 in Nederland 1.284 kton werd geproduceerd, 762 kton werd geïmporteerd en 1.478 geëxporteerd. De Nederlandse consumptie kan hiermee worden berekend op 568 kton (productie plus import minus export). Als we aannemen dat Nederlandse consumenten geen voorkeur hebben voor buitenlands of Nederlands geproduceerd PE, bedraagt de consumptie van Nederlands geproduceerd PE 356 mln kg. Dit komt overeen met minder dan één derde van de Nederlandse productie van 1.284 Kton. Een cruciale aanname hierbij is dat consumenten geen voorkeur hebben voor Nederlands geproduceerd of geïmporteerd etheen en PE. De consumptie van Nederlands etheen en PE kan ook veel lager of hoger zijn, afhankelijk van de doorvoer van het geïmporteerde PE naar het buitenland.

Tabel 9 - Subsidie-intensiteit productie etheen uit ethanol

	Eenheid	Waarde
Subsidie-intensiteit mondiaal	€/ton CO <sub>2</sub>	90 tot 130
Subsidie-intensiteit Nederland	€/ton CO <sub>2</sub>	110 tot ∞*

\* Of negatief bij een negatieve emissiereductie.

Bij toename van de uitstoot in Nederland is de subsidie-intensiteit negatief. In dat geval worden Nederlandse overheidsgelden ingezet terwijl de emissies in Nederland toenemen.

# D PET-productie via depolymerisatie

## D.1 Beschrijving technologie

Depolymerisatie is een vorm van chemische recycling waarbij PET-afval wordt omgezet naar een grondstof voor nieuwe PET-producten (BHET). De methode kan eindeloos worden herhaald. Deze vorm van chemische recycling met een relatief korte keten wordt aangeduid als monomeerrecycling en over het algemeen als milieukundig en economische gunstiger beschouwd dan feedstockrecycling met een langere keten (bijvoorbeeld pyrolyse).

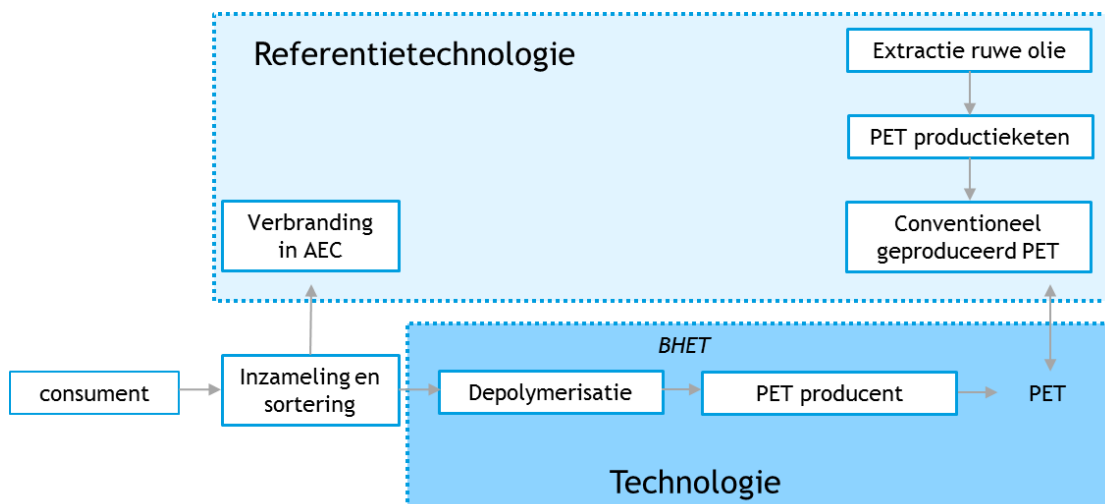
PET wordt nu vooral *virgin* geproduceerd, (onder andere) in Nederland. Na gebruik in sommige toepassingen, bijvoorbeeld statiegeldflessen, kan het goed mechanisch gerecycled worden. In andere toepassingen, zoals zogeheten PET-trays, is mechanische recycling echter niet goed mogelijk (KIDV, 2016). Daarnaast wordt PET-verpakkingsafval vaak eenmalig gerecycled naar textiel of verpakkingsmateriaal niet voor voedsel. Meermalige recycling is met dergelijk PET-afval wel mogelijk met chemische recycling, zoals depolymerisatie tot PET-monomeren. PET-depolymerisatie wordt momenteel (onder andere) door Nederlandse bedrijven ontwikkeld.

## D.2 Referentietechnologie

In de referentie vindt er geen PET-recycling plaats. Voor de productieroute via chemische recycling richt deze analyse zich expliciet op het gebruik van afgedankt PET dat niet mechanisch gerecycled kan worden, zoals PET-trays. De referentie voor deze grondstof is dat dit verwerkt wordt in een gemiddelde Nederlandse afvalenergiecentrale (AEC).

Hiernaast betekent iedere ronde recycling dat er één ronde minder *virgin* (petrochemisch) PET geproduceerd hoeft te worden. In Figuur 6 staan zowel de technologie als de referentietechnologie in één figuur weergegeven.

Figuur 6 - Figuur depolymerisatie PET-afval



### D.3 Bepaling kostprijs

Voor het bepalen van de kostprijs is gebruik gemaakt van kostengegevens uit de literatuur. Er is één kostenstudie over PET-glycolyse beschikbaar. TNO heeft een financiële analyse gemaakt voor PET glycolyse, dit is het demonstratieproces van depolymerisatie (TNO, 2018). Glycolyse is een depolymerisatie-proces waarbij met behulp van de toevoeging van glycolyse PET wordt gedepolymeriseerd naar BHET. De financiële analyse is opgesteld door procestechnologen van TNO, maar wordt niet ondersteund door marktpartijen. Van marktpartijen hebben we vanuit concurrentieoverwegingen geen kosteninformatie ontvangen; daarom maken we gebruik van de gegevens van TNO, als best beschikbaar.

TNO gaat uit van investeringskosten van € 18,7 miljoen voor een fabriek met een productiecapaciteit van 20 kton per jaar. De levensduur van de fabriek is 20 jaar.

In Tabel 10 hebben we de inputparameters voor het ORT-model samengevat. Uitgangspunt is een fabriek met een productiecapaciteit van 20 kton. In de overige variabele kosten zijn ook de feedstockkosten opgenomen. Hier is gewerkt met de waarden uit de gevoeligheidsanalyse van TNO, omdat de prijs van de feedstock erg volatiel is. Voor de financiële parameters (inflatie en rente) zijn we uitgegaan van de parameters die zijn gebruikt in het conceptadvies SDE++ voor industriële technieken.

Tabel 10 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	18,7	€ mln
Overige variabele kosten	9,2-13,2*	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	20	Kton
Levensduur	20	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

\* Variabele kosten zijn inclusief rente, deze is in de berekening apart meegenomen.

De kostprijs ligt in een range van 590 tot 820 euro per ton BHET. TNO komt op productiekosten van 605 euro per ton feedstock (PET-afval).

Tabel 11 - Kostprijs PET-productie via depolymerisatie

Technologie	Eenheid	Waarde
PET-productie via depolymerisatie	€/ton	€ 590 tot 820

#### D.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top

Zonder PET-recycling zal het PET worden verbrand in een AEC en zal nieuw PET moeten worden geproduceerd. De referentie is de prijs van BHET of een vergelijkbaar product dat gebruikt kan worden voor PET-productie.

Volgens experts is er nog geen vaste marktprijs voor BHET, omdat de markt nog in ontwikkeling is. Wel kan het worden vergeleken met de standaardmonomeren PTA en MEG die gebruikt worden bij het maken van PET. Voor PTA/MEG bestaat ook geen vaste marktprijs, deze is nogal volatiel. Volgens PlasticInsights (PlasticInsight, 2019) lag de prijs van PTA rond de 650 euro per ton in Duitsland in 2017. De prijs van MEG lag rond de 1.500 euro per ton. Voor Nederland zijn geen cijfers bekend. Volgens experts ligt de gemiddelde meerprijs van BHET rond de € 300/ton ten opzichte van de fossiele referentie. We gaan uit van een range van € 520-1.500. Bij lage kosten en een hoge marktprijs is er op basis van deze gegevens geen sprake van een onrendabele top, deze is negatief (-€ 910); de maximale onrendabele top bedraagt 300 euro per ton BHET.

#### D.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

In deze vergelijking wordt de klimaatimpact van virgin (petrochemisch) geproduceerd PET (polyetheentereftalaat) vergeleken met de klimaatimpact van gerecycled PET dat via depolymerisatie uit afgedankt PET geproduceerd wordt.

We hanteren de volgende uitgangspunten:

- We vergelijken de klimaatimpact (uitgedrukt in kg CO<sub>2</sub>-equivalenten) van 1 kg petrochemisch geproduceerd virgin PET met de klimaatimpact van 1 kg gerecycled PET geproduceerd via depolymerisatie.
- Voor de productieroute via chemische recycling richt deze analyse zich expliciet op het gebruik van afgedankt PET dat niet mechanisch gerecycled kan worden. De referentie voor deze grondstof is dat dit verwerkt wordt in een gemiddelde Nederlandse afval-energiecentrale (AEC). Omdat de toepassing van afgedankt PET de verbranding in een AEC voorkomt, wordt de klimaatimpact van de vermeden verbranding in mindering gebracht. **De resultaten zijn hierdoor echter alleen geldig voor de situatie waarin de grondstof voor de depolymerisatie daadwerkelijk bestaat uit afgedankt PET dat niet mechanisch gerecycled kan worden.**
- Voor de productie van virgin PET wordt de gehele productieketen, vanaf de extractie van ruwe grondstoffen tot aan de polymerisatie meegenomen. Voor de productie van gerecycled PET uit depolymerisatie wordt gekeken naar de alle processen vanaf de inzameling en sortering van afgedankt PET tot aan de productie van gerecycled PET. Aangenomen wordt dat het chemisch gerecyclede PET chemisch identiek is aan virgin PET. In de rest van de levenscyclus (omzetting tot eindproduct, gebruiksfase, afdanking) is de klimaatimpact van beide soorten PET gelijk; deze wordt daarom buiten beschouwing gelaten.



- Er wordt geen klimaatimpact toegerekend aan de gebruikte grondstof voor het chemische recyclingproces (afgedankt PET dat niet gerecycled kan worden). De klimaatimpact is weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12 - Klimaatimpact voor de productie van virgin PET en gerecycled PET uit depolymerisatie, kg CO<sub>2</sub>-eq./kg PET

Productiestap	Virgin PET	Gerecycled PET uit depolymerisatie	Vershil
Productieproces	2,5	1,3	
Vermeden verbranding PET	N.v.t.	-1,5	
<b>Totaal</b>	<b>2,5</b>	<b>-0,1</b>	<b>2,5</b>

Toelichting: Totalen kunnen afwijken door afronding.

De geschatte reductie die gerealiseerd kan worden als virgin PET vervangen wordt door gerecycled PET geproduceerd uit de depolymerisatie van afgedankt PET dat niet mechanisch gerecycled kan worden bedraagt ca. 2,5 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg PET. Dit betreft de wereldwijde reductie; de reductie in Nederland kan anders uitvallen, afhankelijk van welke onderdelen van de productiefase van virgin PET in Nederland en in het buitenland plaatsvinden.

Er kan hierbij een aantal kanttekeningen geplaatst worden:

- De resultaten zijn alleen geldig voor de situatie wanneer het depolymerisatieproces gebruik maakt van PET dat anders verbrand zou worden in een AEC.
- De gebruikte klimaatimpactdata voor de productie van virgin PET geeft de gemiddelde Europese productie weer. Het gebruikte rapport geeft echter weinig inzicht in de gebruikte data, bijv. wat betreft de variaties binnen Europa. Recent onderzoek voor de Europese Commissie concludeerde dat de klimaatimpact van petrochemische plastic-productie tot ca. 25% kan variëren tussen Europese landen en tot ca. 50% binnen Europese landen, bijvoorbeeld door verschillen in de efficiëntie en energiemix van raffinaderijen (COWI A/S ; Utrecht University, 2018).

## Reductie in Nederland

Belangrijk bij de vaststelling van de reductie in Nederland door PET-recycling is of de (virgin) PET-productie in Nederland of het buitenland wordt vermeden. Deze informatie is niet te achterhalen en hangt bijvoorbeeld af van de kostenstructuur van PET-productie in verschillende landen. Daarom hanteren we een bandbreedte van 0-100%.

Een tweede effect is dat er minder PET in de AEC's wordt verbrand. Dit kan zowel in Nederland als in het buitenland plaatsvinden. Als de verbranding in het buitenland plaatsvindt, leidt dit niet tot een CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland. Bij verbranding in Nederland hangt dit af van de mate waarin de afname van Nederlands afval leidt tot een toename van import. Als er minder PET wordt verbrand kan dit leiden tot een toename van de import van afval; in dat geval vindt er geen CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland plaats. Ook kan de benutting van de AEC omlaaggaan. In zo'n geval vindt er wel CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland plaats. Het is onduidelijk of in Nederland minder PET-afval wordt opgevuld door een importtoename. Daarom hanteren we een bandbreedte van 0-100%.



Tabel 13 laat zien dat de klimaatimpact in Nederland per kg geproduceerd PET -2,5 tot 1,3 kg CO<sub>2</sub>-eq. bedraagt. Dit is dus erg onzeker doordat niet bekend is of PET-recycling tot minder afvalverbranding en minder PET-productie in Nederland of dat deze activiteiten in het buitenland gereduceerd worden.

Tabel 13 - Klimaatimpact in Nederland voor de productie van virgin PET en gerecycled PET uit depolymerisatie, kg CO<sub>2</sub>-eq./kg PET

Productiestap	Mondiaal	Nederland
Productieproces virgin	-2,5	-2,5 tot 0
Recycling proces	1,3	1,3
Vermeden verbranding PET	-1,5	-1,5 tot 0
<b>Totaal (afgerond)</b>	<b>-2,5</b>	<b>-2,5 tot 1,3</b>

Toelichting: Totalen wijken af door afronding.

## D.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

Tabel 14 laat de subsidie-intensiteit van PET-depolymerisatie zien. Mondiaal bedraagt deze 0 tot 120 euro per ton CO<sub>2</sub>-reductie. Als er geen sprake is van een onrendabele top, is de subsidie-intensiteit negatief. In de praktijk zal dit betekenen dat er geen subsidie nodig is.

Tabel 14 - Subsidie-intensiteit PET-depolymerisatie

	Eenheid	Waarde
Subsidie-intensiteit mondiaal	€/ton CO <sub>2</sub>	-360 tot 120
Subsidie-intensiteit Nederland	€/ton CO <sub>2</sub>	-360 tot ∞/n.v.t.

\* Bij een negatieve emissiereductie is de subsidie-intensiteit niet berekend.

Voor Nederland hangt de subsidie-intensiteit ook samen met de broeikasgasemissiereductie alhier. Als de emissiereductie in Nederland afneemt, zal de subsidie-intensiteit toenemen. Als de emissiereductie negatief wordt, en er dus sprake is van extra uitstoot op Nederlands grondgebied, wordt de subsidie-intensiteit negatief. Dit is niet verder berekend.

# E FDCA-productie

## E.1 Beschrijving techniek

De stof 2,5-furaandicarboxylzuur (FDCA) is een chemische bouwsteen voor met name de productie van het bioplastic-PEF. FDCA wordt gezien als een groen alternatief voor het op fossiele grondstoffen gebaseerde tereftaalzuur. Deze stof wordt gebruikt om PET te produceren (dat lijkt op PEF). De stoffen FDCA en tereftaalzuur zijn daarmee niet één-op-één vergelijkbaar, maar worden wel gebruikt om vergelijkbare producten te maken.

PEF is een alternatief voor PET-kunststoffen, maar heeft betere materiaaleigenschappen zoals een hogere barrièrewerking voor koolzuurgas en zuurstof en een lager smeltpunt.<sup>15</sup> Door de verbeterde eigenschappen kan het PEF volgens marktpartijen voor verschillende toepassingen worden gebruikt. De toepassing van het materiaal bepaalt voor een (groot) deel de milieuwinst. De milieuwinst zal bijvoorbeeld hoger zijn als het PEF een complexe multilaag verpakking kan vervangen (die moeilijk te recycelen is) dan als een product wordt vervangen dat alleen uit PET bestaat. Ook zouden flessen in de toekomst van PEF wellicht dunner gemaakt kunnen worden dan de flessen van PET.

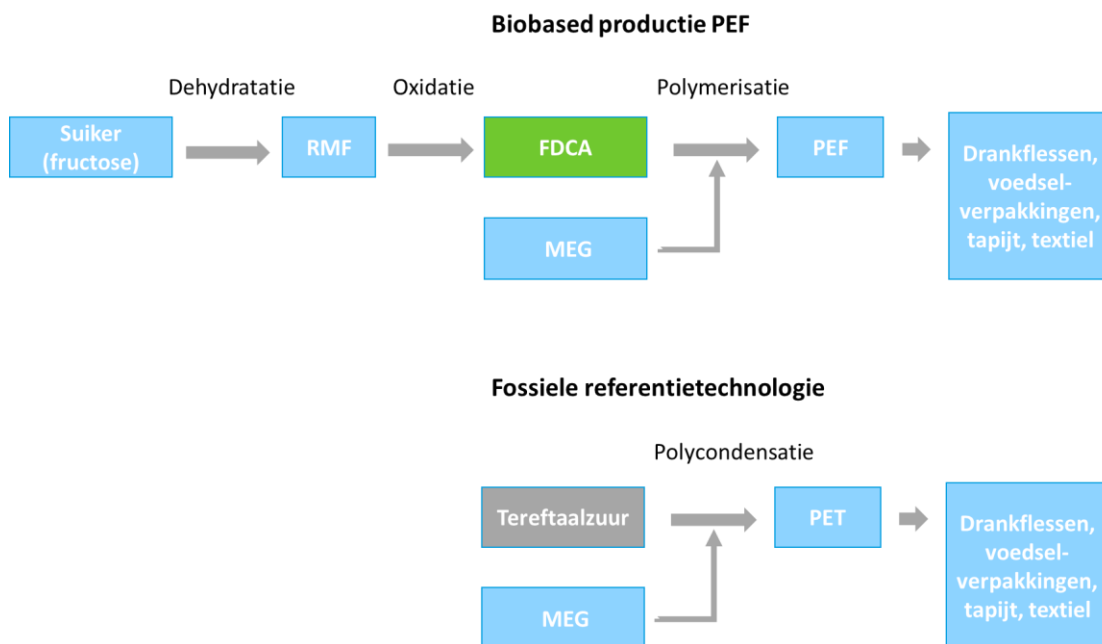
PEF wordt nog niet op grote schaal geproduceerd, waardoor in tegenstelling tot PET nog geen leereffecten hebben opgetreden. Bedrijven die betrokken zijn bij PEF-productie zijn Avantium, Corbion, Tokyo Seikan Kaisha, Avalon Industries, Origin Materials. FDCA kan op verschillende manieren worden geproduceerd. Eén van de routes is katalytische dehydratatie van suikers in methanol waarmee RMF wordt geproduceerd. Deze stof wordt vervolgens omgezet in FDCA op basis van een katalytische oxidatie in een zuur. Door PEF en MEG te polymeriseren wordt PEF geproduceerd. Een alternatieve route is verhitting van fructose waardoor de stof 5-hydroxymethylfuryfural (HMF) van fructose wordt afgehaald. Vervolgens wordt het HMF met enzymatische stappen omgezet in FDCA (Dessbesell et al, 2018).<sup>16</sup>

<sup>15</sup> <http://www.hollandbioplastics.nl/wat-zijn-bioplastics/materiaal-overzicht/>

<sup>16</sup> <https://www.c2w.nl/achtergrond/fdca-race-naar-de-markt/item19724>



Figuur 7 - FDCA-productie uit RMF en fossiel alternatief



## E.2 Referentietechnologie

De referentietechnologie hangt sterk af van de toepassing van het PEF. Omdat het PEF andere materiaaleigenschappen heeft als conventionele plastics kan de toepassing verschillen en dus de materialen die worden vervangen. Dit kan variëren van een multi-laagse verpakking tot een kunststof zoals PET. De stof die het meeste lijkt op FDCA is tereftaalzuur voor PET-productie. Tereftaalzuur wordt gemaakt door paraxyleen (een basisgrondstof uit de petrochemische industrie) te oxideren.

## E.3 Bepaling kostprijs

FDCA wordt nog niet op grote schaal geproduceerd. Een consortium van Avantium en BASF had plannen om een fabriek met een capaciteit van 50 kton te bouwen in Antwerpen. Deze samenwerking is echter gestopt vanwege (volgens de media) een dispuut. Het zou hierbij gaan om een totale investering van 300 mln euro. Dit bedrag is veel hoger dan een eerdere inschatting uit de literatuur (Bos et al, 2013), waarin een bedrag van minimaal 70 mln euro is genoemd voor een fabriek met dezelfde omvang. De kosten lijken daarmee in de praktijk hoger te zijn dan schattingen uit de literatuur. De investeringskosten nemen relatief toe bij een kleinere schaalgrootte. Voor een fabriek met een schaalgrootte van 5 kton bedragen de investeringskosten volgens een marktpartij tussen de 80 en 120 mln euro. Als geen rekening wordt gehouden met schaalvoordelen zou dit resulteren in benodigde investeringskosten van 1,2 miljard euro voor een fabriek van 500 kton. We hanteren deze waarde daarom als een uiterst maximum.

Belangrijke operationele kosten zijn de inkoop van fructose, variabele utilities (katalysatoren, energie, etc.) en personeelskosten. Voor de productie van één ton FDCA is tussen de 1,25 en 3 ton fructose benodigd (afhankelijk van omzettingsverliezen). Bij een fructoseprijs van 400 tot 800 euro per ton en 50 kton FDCA-productie, gaat het om een jaarlijkse kostenpost van 25 tot 120 mln euro. De kosten van variabele utilities en personeel zijn

geraamd op zo'n 50 tot 100 mln euro per jaar; de levensduur van de fabriek is naar verwachting zo'n 15 jaar.

De financiële parameters, voor een fabriek met een jaarlijkse productie van 50 kton, zijn samengevat in Tabel 15.

Tabel 15 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	300-1.200	€ mln
Kosten fructose	25-120	€ mln/jaar
Overige variabele kosten	50-100	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	50	Kton
Levensduur	15	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

Met het invullen van deze parameters in het onrendabele topmodel komt de kostprijs uit op 2.350 tot 7.650 euro per ton FDCA-productie. Dit is een ruime bandbreedte op basis van de inputcijfers uit het onrendabele topmodel.

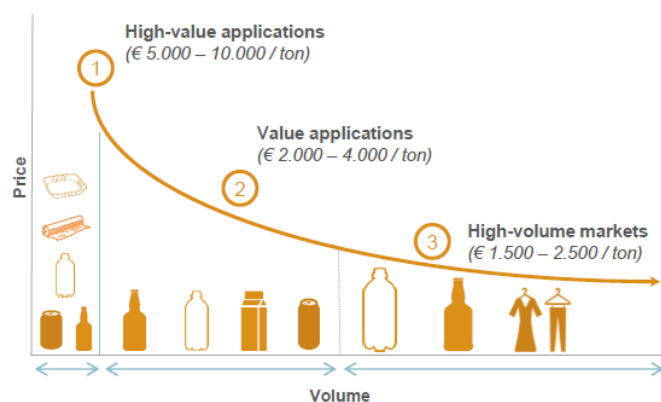
Tabel 16 - Kostprijs FDCA

Technologie	Eenheid	Waarde
FDCA-productie	€/ton	2.350-7.650

## E.4 Bepaling marktprijs en onrendabele op

De referentie van FDCA hangt sterk af van de toepassing. Een presentatie van Avantium laat zien dat de opbrengstprijzen van FDCA kan variëren tussen de 1.500 en 10.000 euro per ton, afhankelijk van de toepassing.

Figuur 8 - Opbrengsten PEF per toepassing



Bron: Avantium.

De betalingsbereidheid voor het FDCA ligt mogelijk nog wat hoger, omdat FDCA een duurder bestandsdeel is dan MEG in de productie. De marktprijs van tereftaalzuur bedraagt volgens marktpartijen momenteel zo'n 1.200 euro per ton.<sup>17</sup> Dit zou de onderbandbreedte vormen van de betalingsbereidheid voor FDCA (bij vervanging in de markten waarin PEF tegen hoge volumes kan worden verkocht). Voor de toepassingen met hoge waarden is er geen sprake van een onrendabele top. SDE++-subsidies zouden daarmee geschikt zijn om de onrendabele top te vergoeden voor toepassing in de high-volume markten. We hanteren in deze studie een bandbreedte van 1.200 tot 10.000 euro per ton. De bandbreedte rondom de opbrengsten is echter groot. Om de daadwerkelijke opbrengsten vast te stellen zou overwogen kunnen worden om jaarlijks inzicht te vragen in de financiële transacties (volume maal verkoopprijs). Dit leidt tot een onrendabele top van -€ 7.650 tot 6.440. Ook hier is de bandbreedte groot.

## E.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

De CO<sub>2</sub>-reductie van FDCA is volgens marktpartijen sterk afhankelijk van de toepassing. Bij de vervanging van producten die uit meerdere kunststoflagen bestaan en daardoor moeilijk recyclebaar zijn, is de milieuwinst veel groter dan wanneer een puur fossiel kunststof wordt vervangen (zoals PET). Er zijn bij ons geen openbare LCA-studies bekend die de milieuwinst op het niveau van specifieke toepassingen hebben bepaald<sup>18</sup>. We hebben de CO<sub>2</sub>-winst daarom niet verder gekwantificeerd in deze studie.

Met een uitgebreidere analyse zou een CO<sub>2</sub>-berekening wel gedaan kunnen worden. Binnen het tijdsbestek van deze studie was deze helaas echter niet goed mogelijk.

### Reductie in Nederland

Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.

## E.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.

---

<sup>17</sup> Wij hebben geen openbare bron kunnen vinden met marktprijzen. Marktprijzen worden jaarlijks gepubliceerd door het bedrijf ICIS (tegen betaling). Dit zijn bedragen die volgens marktpartijen betrouwbaar zijn en breed geaccepteerd en gebruikt.

<sup>18</sup> Wel is op polymeerniveau eerder een vergelijking opgesteld van de klimaatimpact van 1 kg polyethyleen furanoaat (PEF) op basis van FDCA en die van 1 kg polyethyleen tereftalaat (PET). Het verschil tussen deze polymeren is dat het tereftaalzuur dat in PET gebruikt wordt vervangen wordt door FDCA, waardoor PEF geproduceerd wordt. Deze analyse op basis van experimentele data toonde aan dat de totale (cradle-to-grave) klimaatimpact van PEF per kg zo'n 45 tot 55% lager ligt dan die van PET (Eerhart, et al., 2012). Dit komt overeen met een klimaatimpactreductie van 2 tot 2,5 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg PEF.



# F CCU-mineralisatie

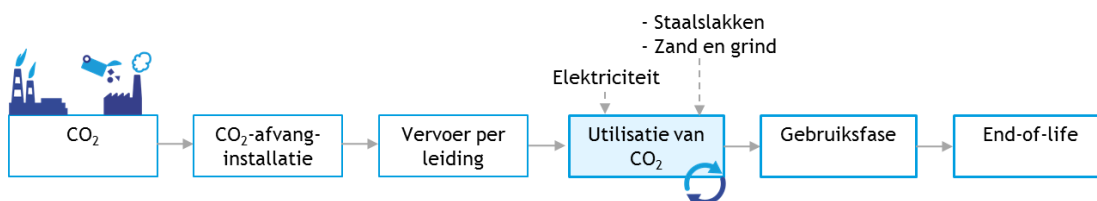
## F.1 Beschrijving techniek

*Carbon Capture and Utilisation (CCU)* is het afvangen van CO<sub>2</sub> om vervolgens te verwerken in producten en daarmee (tijdelijk) op te slaan in bijvoorbeeld bouwmaterialen, plastics en mierenzuur. Wij gaan hier uit van langcyclische<sup>19</sup> opname van CO<sub>2</sub> via mineralisatie in bouwmaterialen. We gaan in dit voorbeeld uit van opslag met de Carbstone-technologie.

Allereerst worden rookgassen afgevangen bij afvalverbrandingsinstallaties of fabrieken. Hieruit wordt CO<sub>2</sub> afgescheiden met diverse technieken. In het geval er een pijpleiding ligt naar de afnemer van de CO<sub>2</sub>, kan het in gecomprimeerde toestand vervoerd worden. Bij vervoer per vrachtwagen dient de CO<sub>2</sub> vloeibaar te worden gemaakt.

De afgevangen CO<sub>2</sub> wordt ingezet in combinatie met staalslakken (restproduct staal) voor de productie van allerlei producten, waaronder stenen. In het productieproces worden de staalslakken gecarboniseerd waarna zand en grind worden toegevoegd om stenen te produceren.

Figuur 9 - Processchema CCU-mineralisatie



## F.2 Referentietechnologie

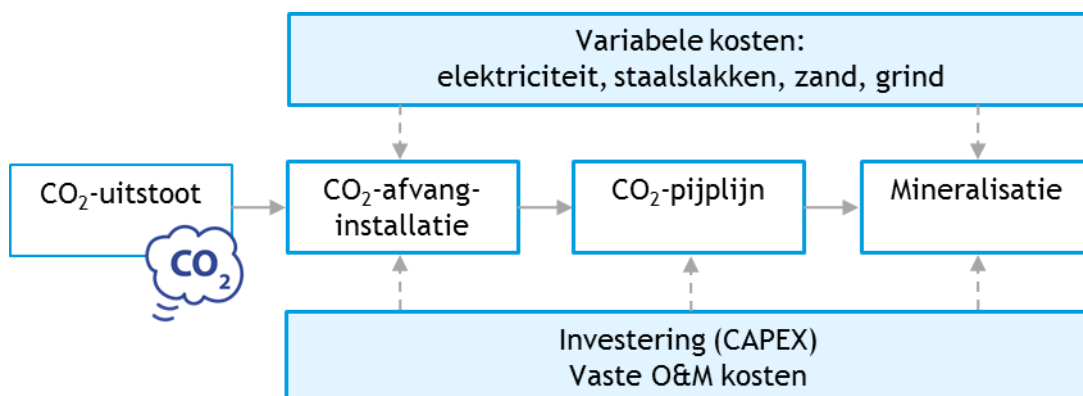
De referentietechnologie houdt in dat de bouwmaterialen worden geproduceerd zonder dat gebruik wordt gemaakt van afgevangen CO<sub>2</sub>. De CO<sub>2</sub> wordt hierdoor niet afgevangen en komt in de lucht terecht.

## F.3 Bepaling kostprijs

Voor het bepalen van de kostprijs is gebruik gemaakt van kostengegevens uit een studie van CE Delft voor Twence. De belangrijkste kostenfactoren voor de technologie is het afvangen, opwaarderen en transporteren van de CO<sub>2</sub>. In Figuur 10 presenteren we een kostenschema van CCU-mineralisatie.

<sup>19</sup> Dit wil zeggen dat de CO<sub>2</sub> voor een lange periode wordt opgeslagen.

Figuur 10 - Kostenschema CCU-mineralisatie



De investeringskosten voor afvang en infrastructuur liggen naar schatting tussen € 32 en € 46 miljoen bij een afvangcapaciteit van 100 kton CO<sub>2</sub> per jaar. Daar bovenop zijn er operationele kosten en opbrengsten. De afgevangen CO<sub>2</sub> wordt verkocht aan een afnemer die deze gebruikt om voor het productieproces van de bouwmaterialen. Door de inzet van CO<sub>2</sub> treedt een kostenbesparing op, omdat de stenen op een lagere temperatuur kunnen uitharden.

Twence heeft een inschatting gegeven van de verwachte verkoopprijs van het afgevangen CO<sub>2</sub> als deze wordt ingezet voor de productie van bouwmaterialen door een buitenlandse partij. Deze prijs is gebaseerd op de waarde waarbij de businesscase positief uitvalt. Deze waarden zijn vertrouwelijk.

In Tabel 17 hebben we de inputparameters voor het ORT-model samengevat. Uitgangspunt is de afvang van 100 kton CO<sub>2</sub>. Voor de financiële parameters (inflatie en rente) zijn we uitgegaan van de parameters die zijn gebruikt in het conceptadvies SDE++ voor industriële technieken.

Tabel 17 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	32-46	€ mln
Variabele kosten minus opbrengsten verkoop CO <sub>2</sub>	(-1)-0,2*	€ mln/jaar
Jaarlijkse afvang	100	Kton
Levensduur	15	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

\* We splitsen hier variabele kosten en opbrengsten niet op omdat de marktgegevens vertrouwelijk zijn.

Deze waarden invullen leidt tot de volgende subsidiebedragen per ton afgevangen CO<sub>2</sub>.

Tabel 18 - Subsidiebedrag CCU-mineralisatie

Technologie	Eenheid	Waarde
CCU-mineralisatie	€/ton afgevangen CO <sub>2</sub>	30 tot 60

## F.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top

In het geval CCU voor mineralisatie is er geen sprake van een correctiebedrag. We hebben in dit voorbeeld namelijk het basisbedrag berekend inclusief de opbrengsten uit de verkoop van de afgevangen CO<sub>2</sub> voor de inzet in bouwmaterialen. Dit is dus al de onrendabele top. De CO<sub>2</sub>-opbrengsten zijn in dit voorbeeld berekend op basis van de maximale prijs waarbij de inzet van CO<sub>2</sub> voor bouwmaterialen nog rendabel is.

Een alternatief zou zijn om het basisbedrag te berekenen exclusief de opbrengsten van CO<sub>2</sub>, en deze jaarlijks te corrigeren op basis van de marktprijs van CO<sub>2</sub>. Dit zou kunnen door inzicht te vragen in de financiële transacties (conform FDCA-productie).

## F.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

Door de afvang van CO<sub>2</sub> en de toepassing hiervan in stenen (CCU) vindt emissiereductie plaats (zie Tabel 19). Dit komt door (i) de lang cyclische opslag van CO<sub>2</sub> die anders zou worden uitgestoten en (ii) de vervanging van traditionele productie van stenen waarbij cement wordt gebruikt. De emissiereductie wereldwijd bedraagt 1,9 ton CO<sub>2</sub> per ton afgevangen CO<sub>2</sub>.

Voor het opstellen van de CO<sub>2</sub>-reductie hebben wij de volgende uitgangspunten toegepast:

- We gaan bij de productie van de stenen uit van het de laagst mogelijke hoeveelheid staalslakken (20%) en de laagste opname van CO<sub>2</sub> (5%). Het overige deel wordt volledig aangevuld door grind (lagere CO<sub>2</sub>-voetafdruk dan zand).
- Het exacte elektriciteitsverbruik is onbekend. We nemen aan dat per ton stenen een gelijke hoeveelheid elektriciteit benodigd is als bij de productie van een ton Portland cement (Ecoinvent proces ‘Cement Portland {Europe without Switzerland} | production’). Dit is gelijk aan 0.005 kWh elektriciteit per ton stenen.
- We nemen aan dat de stenen een perfect substituuut zijn voor traditionele stenen gemaakt van cement.
- Wij gebruiken de emissies uit Ecoinvent v3.4 en anders gemodelleerde emissies door CE Delft.

### Reductie in Nederland

Door de afvang van CO<sub>2</sub> vindt er sowieso CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland plaats. Waar de vermeden productie van cement en de productie van bouwmaterialen plaatsvindt is onzeker. In de case van Twence wordt de CO<sub>2</sub> in het buitenland ingezet bij de productie van stenen. Het is echter niet uit te sluiten dat bij opschaling of nieuwe projecten de CO<sub>2</sub> in Nederland wordt ingezet. Daarom hanteren we een bandbreedte van 0-100%.





Tabel 19 - Klimaatimpact voor de productie van bouwmaterialen met afgevangen CO<sub>2</sub> ten opzichte van reguliere bouwmaterialen, kg CO<sub>2</sub>-eq./ton afgevangen CO<sub>2</sub>

Productiestap	CO <sub>2</sub> -reductie wereldwijd (ton CO <sub>2</sub> /ton afgevangen CO <sub>2</sub> )	CO <sub>2</sub> -reductie nationaal (ton CO <sub>2</sub> /ton afgevangen CO <sub>2</sub> )
Benodigd energiegebruik voor CO <sub>2</sub> -afvang	-0,1	-0,1
Energiegebruik voor compressie en opwaardering	-0,1	-0,1
Transport	0	0
Energiegebruik productie stenen	-0,1	-0,1 tot 0
Vermeden energiegebruik voor productie cement	1,3	0 tot 1,3
CO <sub>2</sub> -reductie door opslag in bouwmaterialen	1	1
<b>Totaal (afgerond)</b>	<b>1,9</b>	<b>0,8 tot 1,9</b>

## F.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

De subsidie-intensiteit is de subsidie (dus kostprijs - marktprijs) per gereduceerde ton CO<sub>2</sub>. Deze kan worden bepaald op basis van het SDE++-basisbedrag, de marktprijzen en de CO<sub>2</sub>-reductie.

Tabel 20 geeft de subsidie-intensiteit. Wereldwijd bedraagt deze 20 tot 30 euro per ton CO<sub>2</sub>-reductie. Voor Nederland is deze 20 tot 70 euro per ton. Voor Nederland is de bandbreedte groter, omdat onzeker is welk deel van de emissiereductie in Nederland wordt gerealiseerd. Hoe hoger de subsidie-intensiteit des te hoger is de overheidsbijdrage per ton CO<sub>2</sub>-reductie.

Tabel 20 - Subsidie-intensiteit CCU-mineralisatie

	Eenheid	Waarde
Subsidie-intensiteit wereldwijd	€/ton CO <sub>2</sub>	20 tot 30
Subsidie-intensiteit Nederland	€/ton CO <sub>2</sub>	20 tot 70

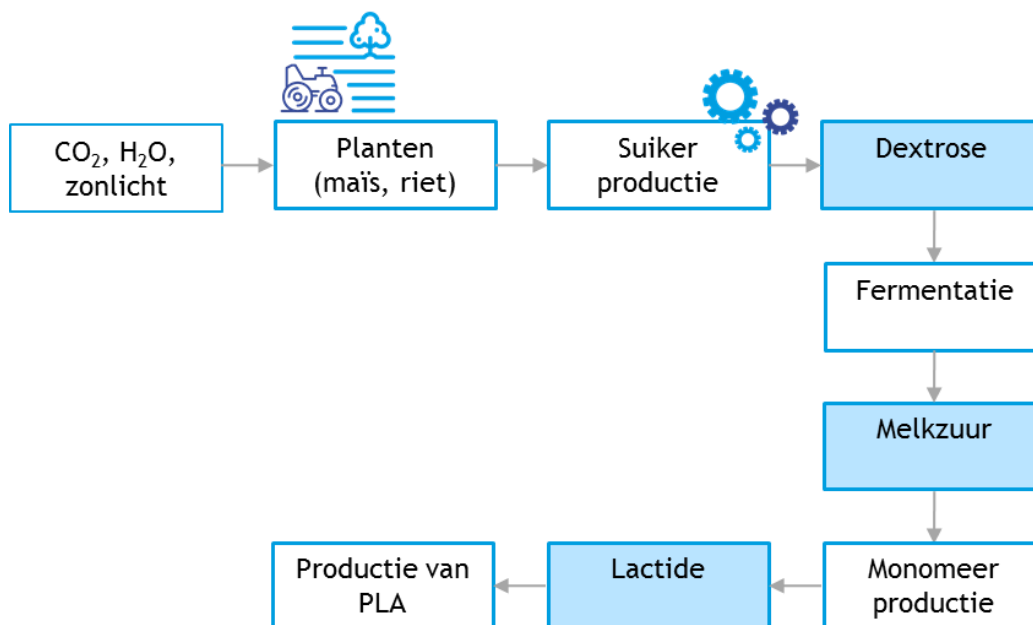
# G PLA-productie

## G.1 Beschrijving techniek

PLA (Polylactide) is een biobased plastic die wordt geproduceerd uit hernieuwbare grondstoffen zoals maïs en suikerriet. PLA wordt veelal gebruikt als kunststoffolie en het verpakken van voedsel, maar wordt ook ingezet als onder meer chirurgisch hecht draad, drinkbekers, theezakjes, etc.

PLA wordt geproduceerd uit lactide (melkzuur). Deze stof wordt geproduceerd door fermentatie van suikers of zetmeel. Om tot PLA te komen, wordt het melkzuur gepolymeriseerd. Deze plastic is biologisch afbreekbaar in een industriële composteringsinstallatie. Wij gaan hieruit van productie van PLA door fermentatie met behulp van bacteriën zoals verschillende grote bedrijven toepassen.

Figuur 11 - Processchema bio-PLA



Bron: Bewerkt op basis van NatureWorks.

## G.2 Referentietechnologie

We vergelijken de productie van PLA met de productie van polystyreen. Alhoewel, afhankelijk van de toepassing, meerdere soorten kunststoffen concurreren met PLA, wordt polystyreen in de markt gezien als de meest dominante concurrent.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Bron: Interview marktpartij.

### G.3 Bepaling kostprijs

Voor het bepalen van de kostprijs maken we gebruik van kostengegevens uit de literatuur en deze zijn getoetst door een producent.

De voornaamste kostenfactoren bij de productie van PLA zijn de inkoop van dextrose, chemicaliën en nutriënten voor fermentatie, procesrendement (geïsoleerde suiker uit biomassa) en energiekosten (Tides Center, 2010).

In Tabel 21 hebben we de inputparameters voor het ORT-model samengevat. Uitgangspunt is een fabriek met een productiecapaciteit van 75 kton PLA per jaar. Voor de financiële parameters (inflatie en rente) zijn we uitgegaan van de parameters die zijn gebruikt in het conceptadvies SDE++ voor industriële technieken.

Tabel 21 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	122-222	€ mln
Variabele kosten	70	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	75	Kton
Levensduur	25	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

Als deze waarden worden ingevuld in het onrendabele topmodel komt het basisbedrag uit op 1.870 tot 2.000 euro per ton PLA. Deze waarde komt overeen met de bandbreedte van de kosten die in de literatuur worden genoemd: 1.850-2.000 euro per ton PLA (JRC, 2019; Molenveld & Bos, 2019).

Tabel 22 - Basisbedrag PLA-productie

Technologie	Eenheid	Waarde
PLA-productie	€/ton	1.870 tot 2.000

### G.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top

We vergelijken de kosten van PLA met die van een ton Polystyreen (PS), omdat dit volgens experts de grootste fossiele concurrent is van PLA. Volgens WUR (2017b) ligt de marktprijs van PS tussen de 1.250 en 1.430 euro per ton. De onrendabele top bedraagt daarmee 440 tot 750 euro per ton PLA.

### G.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

Omdat PLA een (relatief) nieuwe polymersoort is, heeft het andere eigenschappen dan conventionele petrochemische plastics. Dit maakt het gecompliceerder om vast te stellen waar PLA mee vergeleken zou moeten worden, omdat het niet eenduidig is wat PLA in de markt zou vervangen. Daarnaast kan er, afhankelijk van de toepassing, meer of minder gewicht benodigd zijn, omdat de technische eigenschappen en dichtheid verschillen.

De volgende uitgangspunten worden hier gehanteerd:

- We vergelijken hier de klimaatimpact van PLA met polypropyleen (PP) en polystyreen (PS). PP is, vanuit PLA gezien, een conservatieve vergelijking; de klimaatimpact van PP ligt relatief laag ten opzichte van andere polymeersoorten die PLA mogelijk kan vervangen<sup>21</sup>. Daarnaast wordt PP nu al deels gerecycled, terwijl dit voor PLA niet het geval is. PS is daarentegen een gunstigere vergelijking vanuit PLA gezien; de klimaatimpact van de productie is hoger, en in de afdankingsfase wordt het niet gerecycled (wanneer het via consumentenafval afgedankt wordt).
- We gebruiken een bandbreedte voor de hoeveelheid benodigd materiaal: 1 kg PP of PS wordt vergeleken met zowel 1 kg PLA als 1,2 kg PLA. Deze range wordt gehanteerd om de onzekerheden in de inzet van verschillende materialen in verschillende toepassingen weer te geven. In sommige toepassingen is een één-op-één-vervanging denkbaar, in andere zal meer materiaal benodigd zijn. De bovengrens van +20% is gebaseerd op (COWI A/S ; Utrecht University, 2018), waarin gekeken is naar bekertjes voor koude dranken. Uitgedrukt per kg PLA betekent het dat een vergelijking wordt opgesteld met 1 kg PP of PS en met 0,83 kg PP of PS.
- De klimaatimpact van de (cradle-to-factory gate, tot en met omzetting en distributie) productie van PLA en PP is gebaseerd op het Biospri-project (COWI A/S ; Utrecht University, 2018), een recent afgerond onafhankelijk onderzoek. Voor PS is gebruik gemaakt van informatie van PlasticsEurope (2012) voor de polymeerproductie, en hetzelfde Biospri-project voor de omzetting en transport (aannee: klimaatimpact voor PLA en PS is vergelijkbaar). De gebruiksfase wordt niet meegenomen omdat hier geen klimaatimpact plaatsvindt. Voor de afdankingsfase wordt voor PLA en PS uitgegaan van verbranding met energierugwinning en is de klimaatimpact bepaald door CE Delft. Er is hierbij gerekend met een lagere verbrandingswaarde van 17,9 MJ/kg voor PLA en 38,7 MJ/kg voor PS, en de gemiddelde elektriciteit- en warmterendementen van Nederlandse afvalenergiecentrales (AECs). Voor PP wordt uitgegaan van 50% recycling en 50% verbranding in een AEC; op dit moment bedraagt de recycling van kunststof voor verpakkingen in Nederland 50% wordt de andere helft verbrand met energierugwinning (Afvalfonds Verpakkingen, 2018).

De resultaten zijn weergegeven in Tabel 23.

<sup>21</sup> De productie van PP heeft een geschatte klimaatimpact van 1,63 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg (cradle-to-factory gate). Voor andere relevante polymeersoorten die PLA mogelijk kan vervangen ligt deze hoger. Dit is bijvoorbeeld het geval voor polystyreen (PS; 2,25 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg), polyethyleen tereftalaat (PET; 2,19 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg), en polyethyleen (PE; 1,79-1,87 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg). Deze waarden in deze vergelijking zijn gebaseerd op Europese productieprocessen zoals onderzocht in opdracht van PlasticsEurope (2011; 2012; 2014a; 2014b).

Tabel 23 - Klimaatimpact van PLA, PP en PS over de hele levenscyclus, in kg CO<sub>2</sub>-eq.

	1 kg PLA (zonder recycling)	1 kg PLA (met 50% recycling)	1 kg PP (met 50% recycling)	0,83 kg PP (met 50% recycling)	1 kg PS (zonder recycling)	0,83 kg PS (zonder recycling)
Productieproces	1,9	1,9	2,8	2,3	3,3	2,7
Afdankingsfase	1,2	0,65	0,5	0,4	1,9	1,6
<b>Totaal</b>	<b>3,1</b>	<b>2,55</b>	<b>3,3</b>	<b>2,7</b>	<b>5,2</b>	<b>4,3</b>
Reductie klimaatimpact van 1 kg PLA (zonder recycling)	N.v.t.	N.v.t.	0,3	-0,3	2,2	1,3
Reductie klimaatimpact van 1 kg PLA (met 50% recycling)	N.v.t.	N.v.t.	0,85	0,25	2,75	1,85

Toelichting: Totalen kunnen afwijken door afronding. Opname van CO<sub>2</sub> tijdens biomassaproductie en uitstoot bij afdankingsfase zijn beide meegenomen.

Deze eerste analyse resulteert in een bandbreedte voor de klimaatimpactreductie van tussen de -0,3 (hogere klimaatimpact) en 2,2 kg CO<sub>2</sub>-eq. per kg PLA (lagere klimaatimpact). In Tabel 23 is te zien dat de productie van PLA een lagere klimaatimpact heeft dan die van PP en PS, onder andere omdat hier CO<sub>2</sub> uit de atmosfeer wordt opgenomen. In de afdankingsfase scoort PP beter vanwege recycling, terwijl PS slechter scoort omdat hier uitgegaan is van verbranding.

Er kan hierbij een aantal kanttekeningen geplaatst worden:

- Zoals aangestipt is het vervangen van (0,83 kg) PP een conservatieve referentie, terwijl (1 kg) PS vermoedelijk juist relatief gunstig is. Wanneer PLA ingezet wordt ter vervanging van andere polymeersoorten liggen de resultaten voor klimaatimpact dus waarschijnlijk tussen deze twee uitersten.
- In deze analyse is ervan uitgegaan dat PLA na gebruik verbrand wordt in Nederlandse AEC's. Het is echter ook mogelijk om afgedankt PLA te recyclen. Volgens het Biospri-project kan hiermee de gehele (cradle-to-grave) klimaatimpact van PLA aanzienlijk lager uitvallen (COWI A/S ; Utrecht University, 2018). In een recente analyse is het voordeel van het (chemisch) recyclen in plaats van verbranden in een AEC geschat op 1,1 kg CO<sub>2</sub>-eq. per kg afgedankt PLA (CE Delft, 2019) (Fraunhofer, 2018). Bij een recyclingspercentage van 50% (zoals voor de gemiddelde verpakking die in Nederland op de markt gebracht wordt) zou hiermee een aanvullende klimaatimpactreductie van 0,55 kg CO<sub>2</sub>-eq. per kg PLA gerealiseerd kunnen worden. Hoewel de analyse dus de huidige situatie weergeeft, is dit niet per se representatief voor een toekomstig, geoptimaliseerd systeem.
- De recycling van kunststoffen uit verpakkingen heeft ook een onrendabele top die gedekt wordt via producentenverantwoordelijkheid en bijdragen van het verpakkende bedrijfsleven aan het Afvalfonds Verpakkingen. Als PP wel gerecycled wordt en PLA niet zijn er minder kosten voor het afvalfonds. Dit argument pleit er voor om bij de vergelijking voor stimulans van productie/toepassing geen rekening te houden met verschillen in de afvalfase. Deze worden immers door ander beleid met ook kosten en opbrengsten gerealiseerd. We presenteren daarom een PLA-waarde zonder en 1 met 50% recycling.
- De gebruikte klimaatimpactdata voor de productie van virgin PET geeft de gemiddelde Europese productie weer. Het gebruikte rapport geeft echter weinig inzicht in de gebruikte data, bijv. wat betreft de variaties binnen Europa. Recent onderzoek voor de Europese Commissie concludeerde dat de klimaatimpact van petrochemische plastic-productie tot ca. 25% kan variëren tussen Europese landen en tot ca. 50% binnen

Europese landen, bijv. door verschillen in de efficiëntie en energiemix van raffinaderijen (COWI A/S ; Utrecht University, 2018).

Met 50% recycling bedraagt de milieuwinst 0,25 tot 2,75 kg CO<sub>2</sub>-eq. Dit leidt tot een totale bandbreedte van -0,3 tot 2,75 kg CO<sub>2</sub>-eq.-reductie per kg PLA.

## Reductie in Nederland

Bij de productie van PLA zal de uitstoot in Nederland in eerste instantie vooral toenemen. Door de productie van PLA wordt namelijk 1,9 kg CO<sub>2</sub>-eq. per kg PLA uitgestoten. In hoeverre er ook CO<sub>2</sub>-winst op Nederlands grondgebied plaatsvindt hangt af van twee vragen. De eerste vraag is welke investeringen worden verdrongen. Als we uitgaan van gelijkblijvende consumptie is het de vraag of er PS- of PP-productiecapaciteit in Nederland of het buitenland wordt verdrongen. Omdat de PS- en PP-markten internationale markten zijn hanteren we hier een bandbreedte van 0-100%. De tweede vraag is welk deel van de PLA in Nederland wordt geconsumeerd. Voor PE hebben we ingeschat dat ongeveer 5-30% van de consumptie in Nederland plaatsvindt. We nemen aan dat het consumptieprofiel voor PLA/PS/PP vergelijkbaar is. Daarom hanteren we een bandbreedte van 5-30% voor de klimaatwinst in de verbrandingsfase.

Dit leidt tot een bandbreedte van -2,2 (dus extra uitstoot in Nederland) tot 1,8 kg CO<sub>2</sub>/kg PLA in Nederland.

## G.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

De subsidie-intensiteit is de subsidie (dus kostprijs - marktprijs) per gereduceerde ton CO<sub>2</sub>. Deze kan worden bepaald op basis van het SDE++-basisbedrag, de marktprijzen en de CO<sub>2</sub>-reductie. Mondiaal bedraagt de minimale subsidie-intensiteit 195 euro per ton. Als de onrendabele top groter wordt en/of de emissiereductie kleiner, neemt de subsidiebehoefte per ton CO<sub>2</sub> toe. Bij een negatieve emissiereductie is de subsidie-intensiteit negatief, dit is niet verder berekend. Voor Nederland bedraagt de minimale subsidie-intensiteit bij een positieve emissiereductie € 250/ton.

Tabel 24 - Subsidie-intensiteit

	Eenheid	Waarde
Subsidie-intensiteit mondiaal	€/ton CO <sub>2</sub>	160 tot ∞/nvt*
Subsidie-intensiteit Nederland	€/ton CO <sub>2</sub>	250 tot ∞/nvt*

\* Of negatief bij een negatieve emissiereductie, dit is niet verder berekend.

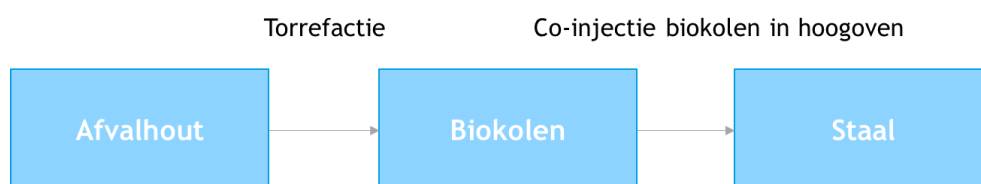
# H Inzet getorreficeerde biomassa bij staalproductie

## H.1 Beschrijving techniek

Bij het huidige productieproces van staal in Nederland wordt gebruik gemaakt van poederkool. Door de poederkool (deels) te vervangen door getorreficeerde biomassa, kan CO<sub>2</sub>-winst worden gerealiseerd. Deze CO<sub>2</sub>-winst zou administratief volledig in Nederland worden gerealiseerd.

De inzet van getorreficeerde biomassa is technisch bewezen en kan in de praktijk worden toegepast. Het staalbedrijf ArcelorMittal heeft een demo project (genaamd Torero) ontwikkeld waarmee in Gent waarmee 120 Kton afvalhout gaat worden omgezet in getorreficeerde biomassa (biokolen) die poederkool kunnen vervangen in het staalproces. Het project is schematisch weergegeven in Figuur 12.

Figuur 12 - Inzet getorreficeerde biomassa in staal productieproces



Het bedrijf TataSteel geeft aan dat biokolen ook in de fabriek in IJmuiden kunnen worden ingezet. Hiermee is er een grote potentie om de CO<sub>2</sub>-uitstoot op Nederlands grondgebied te reduceren.

## H.2 Referentietechnologie

De referentietechnologie is de inzet van poederkolen bij de productie van staal. Hierbij wordt er geen gebruik gemaakt van getorreficeerde biomassa.

## H.3 Bepaling kostprijs

Wij hebben de kostprijs berekend per ton input van de biomassa in het staalproductieproces. Dit is een wat andere benadering dan de huidige SDE+-regeling waarin de kostprijs wordt uitgerekend per ton geproduceerd product (in dit geval per ton geproduceerd staal). Om een basisbedrag te berekenen per ton outputproduct bij meestook in een bestaande productiefaciliteit, dienen namelijk de investeringskosten van de staalfabriek voor een deel te worden gealloceerd aan de inzet van de biomassa. Een dergelijke (relatief ingewikkelde) berekening is ook toegepast voor de berekening van het basisbedrag van biomassameestook in kolencentrales.

Een soortgelijke berekening voor de productie van staal zou kostengegevens vergen van het huidige staalproductieproces (vertrouwelijke informatie). De onrendabele top kan echter ook worden bepaald op basis van de meerkosten van de inkoop, waardoor het niet nodig is om gegevens over het staalproductieproces in kaart te brengen. Dit doen we door de marktprijs van de getorreficeerde biomassa te vergelijken met de marktprijs van poederkool (correctiebedrag). Het basisbedrag wordt dan bepaald door de inkoopkosten van de getorreficeerde biomassa; het correctiebedrag is de marktprijs van poederkool.

De marktprijs van getorreficeerde biomassa bedraagt volgens marktpartijen naar schatting zo'n 180 euro per ton. Kema (2010) noemt een waarde van 150 euro per ton. We hanteren daarom een range van 150 tot 180 euro per ton. Omdat de energie-inhoud van deze biomassa echter lager is dan die van kolen (factor 1,3)<sup>22</sup>, moet per ton te vervangen kolen een factor 1,3 meer biomassa worden ingekocht. De kostprijs van de inkoop is daarmee voor 210 tot 240<sup>23</sup> euro per ton te vervangen poederkool. Deze range hanteren we als basisbedrag.

Tabel 25 - Kostprijs inzet getorreficeerde biomassa bij staalproductie

Technologie	Eenheid	Waarde
Getorreficeerde biomassa bij staalproductie	€/ton (te vervangen poederkool)	210 tot 240

#### H.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top

Het correctiebedrag wordt bepaald door marktprijs van poederkool. Deze ligt volgens marktpartijen momenteel rond de 90 euro per ton (100 dollar per ton). Daar komt bij dat in de referentie EU ETS-rechten moeten worden ingekocht voor het gebruik van poederkool. Bij een marktprijs van 25 euro per ton CO<sub>2</sub> gaat het om ongeveer 65 euro per ton vermeden inzet van poederkool.<sup>24</sup> De vermeden kosten per ton poederkool bedragen daarmee in totaal 155 euro. De onrendabele top bedraagt afgerond 40 tot 90 euro per ton te vervangen poederkool.

#### H.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

Er is naar ons weten geen gedetailleerde studie bekend waarin de CO<sub>2</sub>-reductie is bepaald van wieg tot graf voor de inzet van biomassa in een staalproductieproces in IJmuiden. We kunnen wel een eerste inschatting maken op basis van algemene kengetallen.

De emissiefactor van kolen die worden ingezet in het staalproces bedraagt volgens de lijst van standaardemissiefactoren van (SenterNovem, 2005) 89,8 kg/GJ. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van getorreficeerde biomassa bedraagt volgens een presentatie van (Koppejan, et al., 2016) voor een webinar van de Internationale Energy Agency, afhankelijk van het type biomassa, zo'n 14 kg/GJ.

Op basis van deze indicatie getallen bedraagt het verschil in CO<sub>2</sub>-uitstoot grofweg zo'n 75 kg/GJ. Dit is omgerekend 2 ton CO<sub>2</sub>-reductie per ton vermeden poederkool inzet. De berekening is weergegeven in Tabel 26.

<sup>22</sup> De stookwaarde van kolen in het staalproductieproces is 29 GJ/ton (SenterNovem, 2005). Van getorreficeerde biomassa bedraagt deze 22 GJ/ ton (Koppejan, et al., 2016).

<sup>23</sup> De marktprijs van 150 tot 180 euro per ton maal een factor 1,3 is (afgerond) 200 tot 240 euro per ton.

<sup>24</sup> Bij een emissiefactor van 2,6 ton CO<sub>2</sub> per ton poederkool en een EU ETS-prijs van 25 euro per ton gaat het om 2,6 \* 25 = 65 euro per ton.



Tabel 26 - Berekening reductie CO<sub>2</sub>-uitstoot per ton vermeden poederkool

A	CO <sub>2</sub> -uitstoot kolen in staalproductieproces	90	Kg/GJ
B	CO <sub>2</sub> -uitstoot getorreficeerde biomassa	14	Kg/GJ
C	Stookwaarde getorreficeerde biomassa	22	GJ/ton
D	Stookwaarde koleninzet staalproces	29	GJ/ton
E = A*D/1.000	CO <sub>2</sub> -uitstoot per ton kolen	2,6	Ton/ton
F = B*C/1.000	CO <sub>2</sub> -uitstoot per ton biomassa	0,4	Ton/ton
G = F *D/C	CO <sub>2</sub> -uitstoot biomassa per ton vermeden poederkool	0,5	Ton/ton
H = E-G	CO <sub>2</sub> -winst per ton vermeden poederkool (afgerond)	2,0	Ton/ton

We benadrukken dat het gaat om een eerste analyse op basis van algemene kengetallen. Het gaat daarmee om ordegrottes. De CO<sub>2</sub>-winst kan meer specifiek worden bepaald als een aparte aanvullende studie wordt uitgevoerd.

## Reductie in Nederland

De reductie in Nederland is groter dan de wereldwijde reductie. Als de getorreficeerde biomassa in het buitenland wordt geproduceerd vinden de emissies over de levenscyclus van de biomassa in het buitenland plaats (emissies voor het oogsten, transport en torreficeren van de biomassa). Bij de benadering dat de CO<sub>2</sub>-uitstoot in Nederland (administratief) nul bedraagt, is de CO<sub>2</sub>-winst 2,6 ton per ton vermeden inzet van poederkool.

## H.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

De subsidie-intensiteit voor de inzet van getorreficeerde biomassa in het staalproductieproces bedraagt naar schatting zo'n 15-30 euro per ton CO<sub>2</sub>-reductie in Nederland en 20-40 euro per ton wereldwijd. Opvallend is dat de subsidie-intensiteit voor Nederland lager is dan wereldwijd. Dit komt doordat de reductie in Nederland groter is dan wereldwijd.

Tabel 27 - Subsidie-intensiteit inzet biomassa bij staalproductie

	Eenheid	Waarde
Subsidie-intensiteit mondiaal	€/ton CO <sub>2</sub>	20 tot 40
Subsidie-intensiteit Nederland	€/ton CO <sub>2</sub>	15 tot 30

# I Geopolymeren in beton

## I.1 Beschrijving techniek

Cement, een belangrijk bestanddeel van beton, is verantwoordelijk voor 8% van de wereldwijde CO<sub>2</sub>-uitstoot (Lehne & Preston, 2018). De emissies komen vrij bij chemische en thermische verbrandingsprocessen die nodig zijn voor de productie van het cement.

Geopolymeer is de populaire aanduiding voor de groep van alternatieve materialen om cement en beton te produceren. Het gaat om een wijde range van materialen die sterk kunnen verschillen in samenstelling, productiemethode en gebruik. Soms is er sprake van geopolymeercementen die toegevoegd kunnen worden aan betonmengsels op een manier die vergelijkbaar is met de manier waarop huidige cementen gebruikt worden. In andere gevallen worden geopolymeren geproduceerd in een betoncentrale met een op maat gemaakte samenstelling aan toeslagmaterialen en additieven.

Voor alle methoden geldt dat normprocedures doorlopen moeten worden om de veiligheid van deze alternatieve bindmiddelen aan te tonen. Aangezien de procedures voor niet-constructieve toepassingen relatief eenvoudig zijn, worden geopolymeren in eerste instantie toegepast in beton-producten voor niet-constructieve toepassingen (CE Delft, 2016).

In deze onrendabele top berekening gaan we uit van een geopolymeer dat wordt geproduceerd door het bedrijf ASCEM. Dit bedrijf bereidt een productiemethode voor van een cement waarbij geopolymeren worden inezet. De scheikundige term voor het proces heeft alkalische activatie.

## I.2 Referentietechnologie

De referentietechnologie is de productie van ‘regulier’ cement en beton.

## I.3 Bepaling kostprijs

De kostprijs voor de productie van cement op basis van geopolymeren is gebaseerd op een productiefaciliteit met een capaciteit van maximaal 60 kton per jaar. Het gaat om een innovatieve techniek, waarbij eerst een kleinschalige productiefaciliteit operationeel gemaakt dient te worden voordat een opschaling mogelijk wordt (na 2023). De financiële parameters zijn samengevat in Tabel 28.

Tabel 28 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	1-5	€ mln
Variabele kosten	1-12	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	6-60	Kton
Levensduur	5	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

Invulling van deze waarden in het onrendabele topmodel leidt tot een basisbedrag van 210 tot 240 euro per ton cement.

Tabel 29 - Kostprijs geopolymere bij cement- en betonproductie

Technologie	Eenheid	Waarde
Geopolymere bij cement- en betonproductie	€/ton cement	210 tot 240

#### I.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top

Het correctiebedrag wordt gevormd door de marktprijs van portlandklinker gebaseerde cementen. Deze bedraagt ongeveer 80 euro per ton (CE Delft, 2016). De onrendabele top komt hiermee uit op 130 tot 160 euro per ton.<sup>25</sup>

#### I.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

Van deze techniek zijn nog geen betrouwbare LCA-gegevens beschikbaar die de gehele techniek omvatten. Daarom hebben we geen klimaatimpact opgenomen in deze berekening.

#### Reductie in Nederland

Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.

#### I.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.

<sup>25</sup> Een basisbedrag van 210 tot 240 euro per ton minus de opbrengsten van 80 euro per ton komt overeen met een onrendabele top van 130 tot 160 euro per ton.

# J Productie syngas uit biomassa

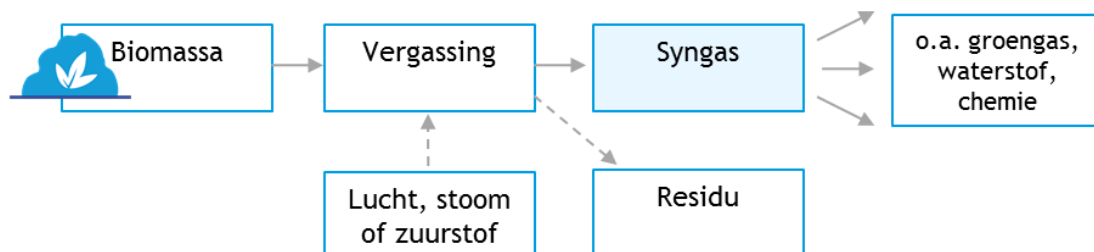
## J.1 Beschrijving techniek

Syngas is een geproduceerd gasmengsel dat bestaat uit koolstofmonoxide, kooldioxide en waterstofgas. Syngas is geen eindproduct op zich, maar is een tussenproduct voor diverse productieprocessen. Uit syngas kunnen synthetische koolwaterstoffen worden gemaakt, zoals waterstof, kerosine en ethanol. Syngas kan ook gebruikt worden als grondstof voor de chemie, bijvoorbeeld bij de productie van ammoniak.

Door het vergassen van getorreficeerde (verkolde) biomassa kan bio-syngas worden geproduceerd. Dit kan onder meer gebruikt worden voor de productie van groengas, dit wordt al ondersteund door de SDE+. Hiernaast kan het gebruikt worden voor andere biobased toepassingen, bijvoorbeeld in de chemie of voor de productie van groene waterstof.

In Nederland zijn diverse partijen bezig met één of meerdere stappen uit proces van de productie van syngas uit biomassa. Torrgas heeft een proefinstallatie van 1 MW en heeft een SDE+-beschikking ontvangen voor een installatie waarmee groengas geproduceerd kan worden. Op de Chemelot campus wil men bio-syngas gebruiken voor de productie van groene waterstof.

Figuur 13 - Syngas door biomassavergassing



Hiernaast kan ook uit de vergassing van afval syngas worden verkregen. Dit is een alternatief voor verbranding (met energierugwinning). In Bijlage K wordt dit behandeld met als toepassing waterstof.

## J.2 Referentietechnologie

Syngas kan op verschillende manieren worden geproduceerd, wel kan de samenstelling van het geproduceerde syngas verschillen. Doorgaans wordt syngas geproduceerd uit aardgas of kolen. Het syngas wordt geproduceerd in een stoomkraker, het kan ook een *bijproduct* zijn van een ander productieproces, zoals staalproductie.

### J.3 Bepaling kostprijs

Voor de bepaling van de kostprijs is gebruik gemaakt van gegevens die zijn ontvangen van marktpartijen, aangevuld en getoetst aan schattingen uit de literatuur. Schattingen uit de literatuur verschillen van gegevens van marktpartijen, omdat hier geen gebruik is gemaakt van getorreificeerde biomassa en de samenstelling van het eindproduct kan verschillen. Wel geeft het een nuttig inzicht in de orde grootte van de kosten.

ECN heeft in 2014 een uitgebreide studie gedaan naar de kosten van bio-syngas in een grootschalige van fabriek van 1 GW-input. Zij gaan uit van investeringskosten van USD<sub>2013</sub> 1.100 per kW input. ECN komt op een bedrag van USD<sub>2013</sub> 24 per gigajoule voor een fabriek in Europa die draait op houtsnippers uit Noord-Europa. Ruim de helft van de kosten wordt bepaald door de kosten van de biomassa, één derde door afschrijvingskosten en één derde door overige kosten (ECN, 2014).

Kraussler, et al. (2018) onderzochten de kostprijs van het maken bio-SNG door biomassa-vergassing. Zij laten zien dat de kostprijs sterk afhangt van de schaal van de installatie en varieert tussen de € 85 en 135 per MWh (€ 23-37,5 per GJ).

Op basis van een eigen berekening komen op een inschatting van het basisbedrag van € 18-27 per GJ. Belangrijkste onzekerheden zijn de kosten van de biomassa en de investeringskosten.

Tabel 30 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	50-80	€ mln
Variabele kosten	2-3 + kosten biomassa	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	-800.000	GJ
Levensduur	15	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

Tabel 31 - Kostprijs syngas door biomassavergassing

Technologie	Eenheid	Waarde
Syngas door biomassavergassing (afgerond)	€/GJ	20-30

### J.4 Bepaling marktprijs en onrendabele top

Omdat syngas een tussenproduct is, dat niet verder wordt verhandeld, zijn er geen marktprijzen beschikbaar. Bij de fossiele productieroute van syngas is aardgas of kolen nodig. Ook is er energie nodig om een kraakinstallatie te laten draaien en zijn er afschrijvingskosten van deze installatie. Kosten verschillen sterk per installatie en het doel van de productie. Ook hangen de kosten sterk af van de marktprijzen van gas of kolen.

Uit een studie van ETSAP volgen kosten van syngas uit kolen in de VS van tussen de 15,6 en 19,3 \$ per GJ (IEA ETSAP, 2010). In euro's van 2019 is dat ongeveer € 12,50-15,40 per GJ. We gebruiken deze range voor het berekenen van de subsidie-intensiteit. Dit leidt (afgerond) tot een onrendabele top van € 5-15 per GJ. Veel recentere studies zijn niet



beschikbaar, omdat de focus van het meeste kostenonderzoek op biobased productieprocessen ligt.

## **J.5 Bepaling reductie klimaatimpact internationaal**

Van deze techniek zijn nog geen betrouwbare LCA-gegevens beschikbaar die de gehele techniek omvatten. Daarom hebben we geen klimaatimpact opgenomen in deze berekening.

### **Reductie in Nederland**

Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.

## **J.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)**

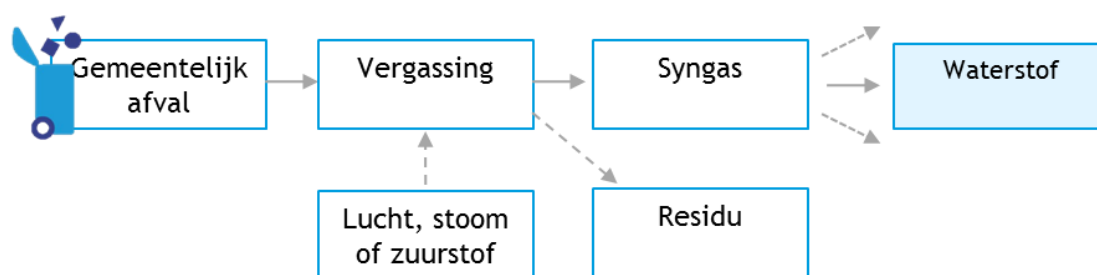
Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.

# K Waterstofproductie uit vergassing gemeentelijk afval

## K.1 Beschrijving techniek

Bij afvalvergassing wordt op een temperatuur van tussen de 900 en 1.650°C afval vergast tot syngas en soms roet en char. Het geproduceerde syngas kan voor verschillende doeleinden worden ingezet (zie ook Bijlage J). In deze casus wordt het syngas gebruikt voor de productie van waterstof.

Figuur 14 - Productie van waterstof uit gemeentelijk afval



In Nederland en het buitenland zijn diverse initiatieven die de productie van waterstof uit afval onderzoeken. De waterstof kan voor diverse toepassingen worden gebruikt, bijvoorbeeld in de industrie of als energiedrager.

## K.2 Referentietechnologie

Door gebruik te maken van afvalvergassing wordt de productie van waterstof uit fossiele bronnen, zoals via syngas uit aardgas vermeden. We gaan ervan uit dat productie van waterstof uit aardgas door stoomreforming het meest gangbare fossiele alternatief is. Hiernaast zal, zonder vergassing, het gemeentelijk afval worden verbrand in een AEC.

## K.3 Bepaling kostprijs

Voor de bepaling van de kostprijs hebben gebruik gemaakt van kostenparameters van een marktpartij en deze getoetst aan de literatuur. In de kostencijfers wordt uitgegaan van een jaarproductie van 35.000 tot 40.000 ton waterstofproductie per jaar.

Tabel 32 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	500-600	€ mln
Variabele kosten	50-60 (exclusief afval)	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	35.000-40.000	Ton
Levensduur	25	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	4%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	20,5%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

Dit leidt tot de volgende bedragen voor de kostprijs:

Tabel 33 - Kostprijs waterstofproductie uit afvalvergassing

Technologie	Eenheid	Waarde
Waterstof uit afvalvergassing	€/ton H <sub>2</sub>	1.300 tot 2.050

De kostprijs wordt geschat op 1.300 tot 2.050 euro per ton waterstof. Belangrijksten verdere onzekerheid in de kosten zijn de kosten van het afval. In de huidige situatie krijgen verwerkingsbedrijven betaald voor de verwerking van afval. Mocht dit omslaan, dan zullen de kosten sterk stijgen.

#### K.4 Bepaling marktprijs en onrendabele op

De referentie is de marktprijs voor waterstof. Deze wordt nu nog grotendeels bepaald door de marktprijs van aardgas, als dominante waterstofroute. De prijs is volatiel. In de berekening van de basisbedragen voor de SDE++ voor 2020 is uitgegaan van een waterstofprijs van 1.560 euro per ton. Marktpartijen noemen een prijs van € 1.000-1.400. Dit leidt tot een onrendabele top van -100 tot 1.050 euro per ton.

#### K.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

Er zijn geen studies bekend waarin de klimaatimpact van afvalvergassing tot waterstof is bepaald, ten opzichte van fossiele waterstofproductie en de verbranding van afval in een AEC. Een marktpartij is momenteel bezig met de ontwikkeling van een studie, maar deze is op dit moment nog niet beschikbaar. Daarom is er geen klimaatimpact berekend.

#### Reductie in Nederland

Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.

#### K.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

Deze is niet gekwantificeerd in deze studie.



# L EPS-recycling

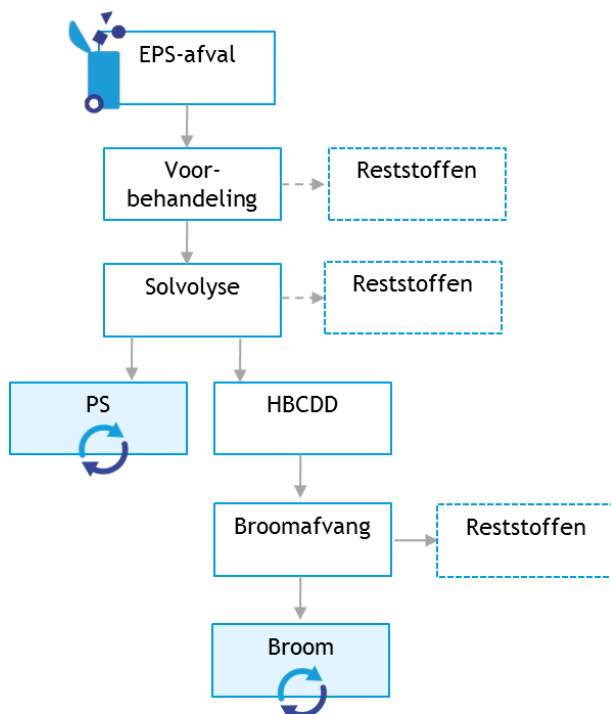
## L.1 Beschrijving techniek

EPS (expanded polystyreen) wordt in de volksmond ook wel piepschuim genoemd. Het is een witte kunststof die voor vele doeleinden gebruikt kan worden. EPS is een goede warmte-isolator en wordt daarom vaak als isolatiemiddel gebruikt, bijvoorbeeld als dakisolatie. Ongeveer de helft van het EPS wordt nu al gerecycled. Het wordt geperst of geshredderd en de korrels worden opnieuw gebruikt in de isolatie- of kunststofbranche. EPS waarin de broomhoudende vlamvertrager HBCDD (verboden sinds 2015) is gebruikt, kan echter nog niet goed worden gerecycled en belandt vaak in de afvalenergiecentrale. Door chemische recycling kan bouwpiepschuim worden verwerkt tot schone basisgrondstoffen (PS). Ook XPS (geëxtrudeerd polystyreen) is een kunststof dat vaak als isolatiemateriaal wordt gebruikt, bijvoorbeeld aan de buitenzijde van gebouwen zoals bij keldervloeren. Ook XPS kan worden gerecycled.

In Terneuzen bouwt het PS Loop Cooperative een proeffabriek voor de verwerking van EPS en, een klein deel, XPS.

Figuur 15 laat een versimpeld schematisch overzicht van EPS-recycling zien. Hierin is bijvoorbeeld transport en de verdere behandeling van reststoffen niet meegenomen. Deze kunnen bijvoorbeeld worden verbrand in een AEC of worden gestort.

Figuur 15 - Schematisch overzicht EPS-recycling

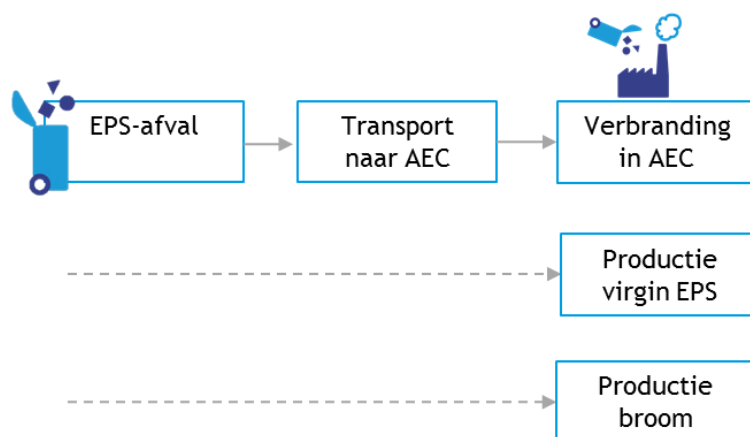


Bron: Bewerkt, op basis (TÜV Rheinland LGA Products GmbH, 2019).

## L.2 Referentietechnologie

EPS-recycling vervangt drie processen. Zonder deze techniek zal het isolatiemateriaal worden verbrand (met energieopwekking) en worden broom en nieuw PS geproduceerd uit virgin materialen. Figuur 16 geeft een overzicht van de drie processen die door EPS-recycling worden vermeden.

Figuur 16 - Referentietechnologie EPS-recycling



Bron: Bewerkt, op basis (TÜV Rheinland LGA Products GmbH, 2019).

## L.3 Bepaling kostprijs

Voor het bepalen van het basisbedrag maken we gebruik van gegevens uit de literatuur en marktpartijen. TNO heeft onderzoek gedaan naar de productiekosten en brutowinst van een aantal recyclingprocessen bepaald (TNO, 2018). Hiervoor is onder meer het Creasolv-proces waarmee EPS uit de bouw wordt genomen als voorbeeld gebruikt. Volgens experts zijn de gegevens uit deze studie indicatief in de goede richting. Experts hebben de cijfers aangescherpt. Er zijn geen andere studies bekend waarin de kosten van EPS-recycling zijn berekend. Voor het ORT-model zijn de volgende inputparameters gebruikt:

Tabel 34 - Inputparameters ORT-model

Parameter	Waarde	Eenheid
Investeringskosten	10-12	€ mln
Inkoop EPS-afval	0-0,8	€ mln/jaar
Overige variabele kosten	1-3,5	€ mln/jaar
Jaarlijkse productie	3	Kton
Levensduur	7	Jaar
Inflatie	2%	Percentage
Rente vreemd vermogen	3%	Percentage
Rendement op eigen vermogen	15%	Percentage
Aandeel eigen/vreemd vermogen	30%/70%	Aandeel

Onzekerheden in de kosten zijn de prijs waartegen de het afval ingekocht kan worden en de hoeveelheid afval die beschikbaar is. Op termijn wordt verwacht dat de prijs voor het afval mogelijk negatief wordt. Ook regelgeving speelt hierin een rol. Hiernaast is de acceptatie

van gerecycled polystyreen een belangrijke onzekerheid. Dit leidt tot een kostprijs-inschatting van 1.150 tot 2.250 euro per ton. Uit de studie van TNO volgt een gemiddelde prijs per ton gerecycled EPS van € 1.720.

Tabel 35 - Kostprijs EPS-recycling

Technologie	Eenheid	Waarde
EPS-recycling	€/ton	€ 1.150-€ 2.250

#### L.4 Bepaling marktprijs onrendabele top

In de referentie moet 'virgin' PS en virgin broom worden geproduceerd. De marktprijs van PS ligt tussen de 1.400 en 1.900 euro per ton. Deze prijs is relatief volatiel en hangt af van de olieprijs en de prijs van styreen. Hiernaast wordt ook broom afgescheiden, dit hoeft niet dan niet uit virgin grondstoffen te worden geproduceerd. Dit leidt tot een onrendabele top van maximaal € 850. Bij een lage kostprijs en hoge marktprijs is er geen sprake van een negatieve onrendabele top van € 100. In die situatie is het in principe niet nodig om subsidie te geven.

#### L.5 Bepaling reductie broeikasgassen mondiaal

Omdat de chemische recycling van EPS nog niet grootschalig plaatsvindt, zijn er geen LCA's beschikbaar die gemeten data hebben gebruikt. Op basis van experimentele data zijn echter wel al twee studies uitgevoerd. Ten eerste heeft het PolyStyreneLoop een gedetailleerde LCA laten uitvoeren. Daarnaast heeft TNO een grove analyse uitgevoerd. Beide studies hebben tekortkomingen voor dit onderzoek; de eerste biedt geen volledig inzicht in de gebruikte modellering, terwijl de tweede zeer grof is en op een aantal aannames berust. Daarnaast verschillen de methodologische keuzes die in de studies gemaakt zijn.

Ondanks de verschillen in de studies komen zij allebei tot de conclusie dat de chemische recycling van EPS kan resulteren in een klimaatimpactreductie van ca. 3 kg CO<sub>2</sub>-eq./kg EPS-afval. Omdat het hier gaat om resultaten op basis van experimentele data dienen deze als onzeker/een eerste inschatting gezien te worden.

Het hierboven aangegeven resultaat is gebaseerd op de *input* van het proces; de klimaat-impact van *de verwerking van 1 kg input aan EPS-afval* wordt vergeleken voor twee technologieën (verbranding met energieretrieving of chemische recycling). In de TNO-studie wordt aangenomen dat het recyclingproces 95% van de EPS die in de input aanwezig is kan terugwinnen. Als dit inderdaad het geval is, zal de hierboven genoemde klimaat-impactreductie van 3 kg CO<sub>2</sub>-eq. ook naar verwachting grofweg representatief zijn voor *de productie van 1 kg PS* via EPS-recycling (in plaats van via virgin productie).

#### Reductie in Nederland

In hoeverre de reductie in Nederland plaatsvindt hangt af van een drietal hoofdfactoren:

- Door de recycling wordt de productie van *virgin* PS vermeden, doordat het gerecycled PS als grondstof gebruikt kan worden. De demonstratiefabriek in Terneuzen is mede-ontwikkeld door een Nederlandse EPS-producent. Het is daarom in deze case aan-nemelijk dat de klimaatwinst van het vermijden van virgin PS-productie in Nederland wordt gerealiseerd. Toch kan het ook zijn dat door de recycling minder *virgin* EPS in een



ander land wordt geproduceerd. Het is onzeker hoe dit bij andere projecten zal zijn. We hanteren daarom een bandbreedte van 0-100%.

- Het teruggewonnen broom kan weer worden gebruikt voor broomproductie. De demonstratiefabriek ligt naast en is mede-ontwikkeld door een broomproducent. Het aandeel van dit proces in de klimaatimpact is beperkt.
- Door de recycling van EPS wordt verbranding vermeden. Nederlands afval wordt niet per definitie in Nederland verbrand, maar bijvoorbeeld ook in Duitsland. Bouwafval wordt vanwege het volumineuze karakter vaak dichtbij verbrand. Omdat niet zeker is waar het afval verbrand zal worden, dit kan bijvoorbeeld ook België zijn, werken we met een bandbreedte van 50-100%.

Dit leidt tot de volgende inschatting van de klimaatimpact in Nederland (negatieve klimaatimpact is reductie is gunstig).

Tabel 36 - Klimaatimpact in Nederland van EPS-recycling, kg CO<sub>2</sub>-eq./kg EPS

Productiestap	Wereldwijd	Nederland
Productieproces virgin PS/Br	-3,0	-3,0 tot 0
Recycling proces	1,5	1,5
Vermeden verbranding PET	-1,5	-1,5 tot -0,75
<b>Totaal</b>	<b>-3,0</b>	<b>-3 tot 0,75</b>

Toelichting: Totalen kunnen afwijken door afronding.

## L.6 Bepaling subsidie-intensiteit (euro per ton CO<sub>2</sub>)

De subsidie-intensiteit is de benodigde hoeveelheid subsidie per ton CO<sub>2</sub>-reductie. Dit is de onrendabele top gedeeld door de CO<sub>2</sub>-winst per eenheid. De onderwaarde is € -250. Aan de onderkant van de bandbreedte is er geen sprake van een onrendabele top en is de subsidie-intensiteit negatief. In dit geval zal er waarschijnlijk geen SDE++ worden uitgekeerd. Als er sprake is van een zeer lage emissiereductie in Nederland, zal de subsidie-intensiteit heel hoog worden. Als er sprake is van extra emissies op Nederlands grondgebied wordt de subsidie-intensiteit negatief. Dit is verder niet doorgerekend.

Mondiaal ligt de subsidie-intensiteit op -250 tot 290 euro per ton CO<sub>2</sub>-reductie.

De intensiteit ligt lager, omdat de verwachte hoeveelheid gereduceerde CO<sub>2</sub> hoger ligt. Ook is de bandbreedte kleiner, omdat de grootte van de emissiereductie minder onzeker is.

Tabel 37 - Subsidie-intensiteit EPS-recycling, €/ton CO<sub>2</sub>-reductie

	Eenheid	Waarde
Subsidie-intensiteit mondiaal	€/ton CO <sub>2</sub>	- 250 tot 290
Subsidie-intensiteit Nederland	€/ton CO <sub>2</sub>	- 250 tot ∞/n.v.t.*

\* Bij een negatieve emissiereductie is de subsidie-intensiteit niet berekend.

# M Scopes in emissieberekeningen

## M.1 Inleiding

Aan de hand van vier voorbeelden lichten we toe of de emissies in de verschillende scopes aan Nederland kunnen worden toegerekend of dat dit onzeker is. We benoemen welke emissies van een techniek en referentietechniek onder de respectievelijke scopes vallen en waar deze plaatsvinden. Ook laten we zien of we weten of een reductie aan Nederland toegerekend kan worden. Bij groene vakken kan dit wel met zekerheid worden vastgesteld, bij de rode vakken niet.

## M.2 Voorbeeld 1 - Staalproductie met getorreficeerde biokolen

	Techniek <i>Staalproductie met biokolen</i>	Referentietechniek <i>Staalproductie met poederkool</i>	Richting
Scope 1	Emissies schoorsteen staalfabriek In Nederland	Emissies schoorsteen staalfabriek In Nederland	Reductie in NL
Scope 2	Elektriciteit staalproductieproces Toegerekend aan Nederland	Elektriciteit staalproductieproces Toegerekend aan Nederland	0
Scope 3	Ketenemissies: o.a. biomassawinning, - transport en torrefactie Locatie onzeker	Ketenemissies: o.a. kolenwinning en - transport Locatie onzeker, deels buitenland	Onzeker

## M.3 Voorbeeld 2 - CCU-mineralisatie

	Techniek <i>CCU: CO<sub>2</sub>-afvang voor mineralisatie</i>	Referentietechniek <i>Verbranding in AVI</i>	Richting
Scope 1	Emissies schoorsteen afvanginstallatie In Nederland	Emissies schoorsteen AVI In Nederland	Reductie in NL
Scope 2	Elektriciteit afvanginstallatie Toegerekend aan Nederland	Elektriciteit AVI Toegerekend aan Nederland	Reductie in NL
Scope 3	Ketenemissies: o.a. energie toepassing CO <sub>2</sub> in bouwmaterialen Locatie onzeker	Ketenemissies: o.a. energieproductie reguliere bouwmaterialen Locatie onzeker	Onzeker

## M.4 Voorbeeld 3 - productie bioplastic

	Techniek <i>Productie bioplastic</i>	Referentietechniek <i>Productie fossiel alternatief</i>	Richting
Scope 1	Emissies schoorsteen productie-installatie bioplastic  In Nederland	Emissies schoorsteen productie-installatie fossiel plastic  Locatie onzeker	Onzeker
Scope 2	Elektriciteit productie-installatie  Toegerekend aan Nederland	Elektriciteit productie-installatie  Locatie onzeker	Onzeker
Scope 3	Ketenemissies: o.a. verbranding bioplastic (0), biomassaproductie en -toevoer  Locatie onzeker	Ketenemissies: o.a. verbranding plastic (> 0), aanvoer grondstoffen  Locatie onzeker	Onzeker

## M.5 Voorbeeld 4 - plasticrecycling

	Techniek <i>Plasticrecycling</i>	Referentietechniek <i>Plasticproductie uit virgin grondstoffen + verbranding in AEC</i>	Richting
Scope 1	Emissies schoorsteen recyclinginstallatie  In Nederland	Emissies schoorsteen plasticfabriek  Locatie onzeker	Onzeker
Scope 2	Elektriciteit recyclinginstallatie  Toegerekend aan Nederland	Elektriciteit plasticfabriek  Locatie onzeker	Onzeker
Scope 3	Ketenemissies: o.a. verbranding gerecycled product  Locatie onzeker	Ketenemissies: o.a. verbranding virgin producten (+), winning grondstoffen (+)  Locatie onzeker	Onzeker

## M.6 Conclusie

Scope 1- en 2-emissiereducties vinden bij de biostaal en CCU-mineralisatie met zekerheid in Nederland plaats. Bij de inzet van getorreficeerde biomassa in het staalproces wordt het huidige Nederlandse staalproductieproces vergroend; bij CCU wordt CO<sub>2</sub> afgevangen uit bestaande (afval)verbrandingsinstallaties. Dit leidt met zekerheid tot emissiereductie op Nederlands grondgebied.

Voor de overige technieken is het niet zeker of Scope 1- en 2-emissies in Nederland worden gereduceerd. Het is immers onzeker of emissies uit een fabriek in het buitenland of in Nederland wordt verdrongen.

In een nader onderzoek waarbij ook de merit orders van productie van verschillende productiefaciliteiten worden betrokken zoals beschikbaar bij verschillende commerciële partijen kan wel voorspeld worden hoe verschillende markten idealiter gaan reageren op meer of minder productie of vraag uit Nederland.

Voor alle technieken geldt dat het niet zeker is welk deel van de Scope 3-emissiereducties in Nederland optreden. Dit is sterk afhankelijk van het aandeel van de biobased producten in Nederland worden geconsumeerd en verbrand. Ook bij CCU-mineralisatie en biostaal is de locatie van de Scope 3-emissiereducties onzeker. Het is bijvoorbeeld niet zeker in welk land het CO<sub>2</sub> wordt ingezet in de bouwmaterialen (CCU-mineralisatie) of waar de biomassa vandaan wordt gehaald en getorreficeerde (biostaal).