

Bio-cokes als alternatief voor petroleumcokes en metallurgische cokes

Rapport
Delft, oktober 2012

Opgesteld door:
H.J. (Harry) Croezen
M. (Marit) van Lieshout
M.N. Sevenster (Sevenster Environmental Consultancy)



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

H.J. (Harry) Croezen, M. (Marit) van Lieshout (CE Delft) M.N. Sevenster (Sevenster Environmental Consultancy)

Bio-cokes als alternatief voor petroleumcokes en metallurgische cokes

Delft, CE Delft, oktober 2012

Publicatienummer: 12.2721.59

Opdrachtgever: Agentschap NL

Alle openbare CE-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider Harry Croezen.

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft
Committed to the Environment

CE Delft is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.



Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Gebruik van cokes in chemische processen	9
2.1	Overzicht cokesgebruik	9
2.2	Tronox	10
2.3	ESD-SIC	10
2.4	Aluchemie	11
2.5	Thermphos	11
2.6	Globaal overzicht specificaties en prijsindicaties	12
3	Productie van bio-cokes en soortgelijke producten	15
3.1	Productieroutes en hun technische rijpheid	15
3.2	Bio-cokesproductie en bio-cokesspecificaties	16
3.3	Ervaringen met toepassing van bio-cokes in de metaalindustrie	18
3.4	Technische aspecten aan vervanging van cokes door bio-cokes	19
4	Kosten (financieel en milieutechnisch)	21
4.1	Financiële consequenties van overschakelen op bio-cokes	21
4.2	Consequenties qua broeikasgasemissies (en andere milieueffecten)	23
5	Organisatie van een eventuele uitrol	25
5.1	Overwegingen van de bedrijven	25
5.2	Mogelijke invulling van uiteindelijke ketens	26
5.3	Mogelijk plan van aanpak voor verdere verkenning en uiteindelijke implementatie	27
5.4	Risico's	29
	Literatuur	31





Samenvatting

In verband met de uitwerking van de Routekaart Chemie 2030 heeft CE Delft voor VNCI een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden voor vervanging van (petroleum)cokes in de chemische sector door bio-cokes.

Cokes wordt gebruikt als reductiemiddel en/of grondstof bij een viertal bedrijven in de Nederlandse chemie (Tronox, ESD-SIC, Thermphos, Aluchemie). Het vervangen van cokes bij deze vier bedrijven kan in potentie een directe CO₂-reductie van naar verwachting enkele honderden kilotonnen/jaar opleveren.

Voor een eerste verkenning van de mogelijkheden van bio-cokes heeft CE Delft eerst een bureaustudie uitgevoerd naar informatie over kwaliteit van en productiekosten voor bio-cokes. Vervolgens heeft CE Delft contact gehad met de vier chemische bedrijven en een aantal bedrijfsbezoeken afgelegd. Daarbij zijn de technische, economische en organisatorische mogelijkheden, randvoorwaarden en wensen met betrekking tot een eventueel (gedeeltelijk) overschakelen op bio-cokes verkend.

Op basis van de tot nu toe beschikbare informatie kan worden geconcludeerd dat bio-cokes een technisch en economisch interessante innovatie is. Wil implementatie uiteindelijk gaan plaatsvinden, dan is een beter inzicht nodig in het technische en het economische potentieel.

Alle bedrijven vinden de door CE Delft ingebrachte kennis voldoende interessant om in gesprek te blijven over toepassing van bio-cokes en deze optie verder te verkennen, zowel technisch als economisch. De bedrijven zouden daartoe graag over monsters voor nadere analyse willen beschikken. Alle bedrijven hebben daarnaast een sterke behoefte aan een beter inzicht in de bestaande markt voor bio-cokes en de mogelijke ontwikkelingen daarin, zowel qua aanbod als qua prijs.

Het is belangrijk om inzicht te krijgen in de vraag:

- of er inderdaad voldoende - duurzame - biomassa of gereede bio-cokes van voldoende kwaliteit vrijkomt;
- of deze biomassa of daaruit geproduceerde bio-cokes beschikbaar kan worden gemaakt en gecontracteerd kan worden voor gebruik door Nederlandse chemische bedrijven;
- hoe contractering en toevoer van deze biomassa moet worden georganiseerd en gegarandeerd.

De betrokken bedrijven willen ook participeren in een gezamenlijk overleg om te verkennen hoe ze toelevering van bio-cokes eventueel samen kunnen oppakken en realiseren.

Alle bedrijven geven verder aan dat als bio-cokes technisch en economisch een reëel alternatief blijkt, er duidelijk moet worden gemaakt of bio-cokes ook echt een duurzaam alternatief kan zijn en hoe dit gegarandeerd kan worden.

Om verdere implementatie in gang te zetten moet feitelijk een uitvoeringsplan worden opgesteld waarin aandacht wordt besteed aan planning, benodigde onderzoekskosten en de rol die de verschillende belanghebbenden (bedrijven, koepelorganisatie, overheid) op zich nemen, zoals welke partij secretariaat voert.





1 Inleiding

Een relevante innovatie

CE Delft heeft recentelijk in het kader van het MEE-convenant een studie uitgevoerd naar maatregelen om energiegebruik en broeikasgasemissies bij Tronox te reduceren.

Tijdens deze studie is het vervangen van gecalcineerde petroleumcokes door bio-cokes geïdentificeerd als een mogelijke maatregel, waarmee het energiegebruik en de CO₂-emissie van Tronox significant kunnen worden gereduceerd. Andere bedrijven in de chemische industrie waar mogelijk bio-cokes kan worden ingezet als vervanger van cokes zijn Aluchemie, Thermphos en ESD-SIC.

Het vervangen van cokes bij deze vier bedrijven in de chemie kan in potentie een directe CO₂-reductie van naar verwachting enkele honderden kilotonnen/jaar opleveren. De vervanging is, met het oog op de prijs van petroleumcokes en metallurgische cokes, mogelijk ook zonder vergoedingen economisch rendabel.

Uitwerking in het kader van de Routekaart Chemie 2030

De VNCI werkt aan een Routekaart Chemie 2030, waarin aan de hand van concrete opties wordt uitgewerkt hoe de CO₂-uitstoot van de Nederlandse chemie in 2030 met 40% kan worden verminderd ten opzichte van 2005. Zij doet dit samen met organisatiebureau Berenschot en externe partijen en met financiële steun van het ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie.

In dit verband heeft CE Delft voor VNCI een verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheden voor vervanging van cokes in de chemische sector door bio-cokes.

In het kader van deze verkenning heeft CE Delft een globale bureaustudie uitgevoerd naar informatie over kwaliteit van en productiekosten voor bio-cokes. Daarnaast heeft CE Delft contact gehad met de vier chemische bedrijven en een aantal bedrijfsbezoeken afgelegd. Daarbij zijn de technische, economische en organisatorische mogelijkheden, randvoorwaarden en wensen met betrekking tot een eventueel (gedeeltelijk) overschakelen op bio-cokes verkend.

In dit rapport van de verkenning wordt eerst een korte beschrijving gegeven van de vier bedrijven en de rol van cokes in het proces. Vervolgens wordt in de Hoofdstukken 3 t/m 5 ingegaan op de technische, economische en organisatorische aspecten gerelateerd aan productie van bio-cokes.





2 Gebruik van cokes in chemische processen

2.1 Overzicht cokesgebruik

Bij een aantal chemische bedrijven in Nederland worden ongecalcineerde petroleumcokes, gecalcineerde petroleumcokes of metallurgische cokes als reductiemiddel en/of grondstof ingezet (zie Tabel 1).

Tabel 1 Cokesgebruik in de Nederlandse chemische industrie

	Type cokes	Consumptie (kton/jaar)	C-gehalte	Toepassing
Tronox	Gecalcineerde petroleumcokes	20	98%	Reductiemiddel
ESD-SiC	Ongecalcineerde petroleumcokes	80	95%	Grondstof en reductiemiddel
Thermphos	Metallurgische cokes	100	90%	Reductiemiddel
AluChemie	Gecalcineerde petroleumcokes	305	98%	Grondstof
Totaal (kton/jaar)		505	484,5	

Bron: ESD-SiC website, AluChemie website, TU Delft, 2008 en Thermphos website.

Cokes is vooral leverancier van koolstof, maar soms ook energieleverancier. Naast dit verschil in de toepassing, verschillen de chemische reacties waarin de koolstof betrokken is en ook de fysieke vorm waarin het materiaal toegepast wordt.

Verschillende typen cokes

Petroleumcokes is een vast product van olieraffinage dat grotendeels uit koolstof bestaat en dat wordt gemaakt door het laten 'aanbakken' van zware stookolie.

Gecalcineerde petroleumcokes is ongecalcineerde petroleumcokes, die nabehandeld is door de cokes tot 1.200-1.350 °C te verhitten. Daarbij worden nog resterende 'vluchtige componenten' uitgedreven.

Metallurgische cokes wordt geproduceerd door zogenaamde coking steenkool tot 1.100-1.150 °C te verhitten en alle 'vluchtige componenten' zoals teren uit te bakken.

De belangrijkste specificaties zijn hieronder aangegeven.

	Ongecalcineerde petroleumcokes	Gecalcineerde petroleumcokes	Metallurgische cokes
Vaste koolstof		> 98%	90%
Vluchtige koolwaterstoffen	8-12%	< 1%	< 1%
Asgehalte	0,1-0,4%	0,1-0,4%	10%
Zwavelgehalte	0,4-3%	0,4-3%	0,5-1%
Gehalte per metaal	< 200 ppm	< 200 ppm	



In de onderstaande paragrafen wordt per bedrijf een korte toelichting op de rol van cokes in het proces gegeven. In de laatste paragraaf wordt er ingegaan op wat de verschillen in de rol van cokes in het productieproces betekent voor de daaruit voortvloeiende specificatie-eisen aan de cokes.

2.2 Tronox

Het productieproces bij Tronox is gebaseerd op de omzetting van TiO_2 en FeO in de grondstof in TiCl_4 en $\text{FeCl}_2/\text{FeCl}_3$ door reacties met chloor en koolmonoxide. Fijngemalen gecalcineerde petroleumcokes worden met zuurstof omgezet in CO (en warmte), waarna de CO met de grondstof in een wervelbedreactor bij ongeveer 1.000°C - 1.050°C reageert onder de vorming van CO_2 (en warmte). Door een overmaat CO te introduceren blijft de atmosfeer in de reactor reducerend. Het resulterende CO/CO_2 -mengsel wordt verbrand - voor stoomopwekking - en op de atmosfeer geëmitteerd. Deze emissie is de verreweg grootste CO_2 -bron van Tronox .

Figuur 1 Bedrijfsterrein Tronox



De belangrijkste specificatie-eisen in verband met de processpecificaties en de rol van de cokes zijn:

- een minimaal gehalte aan waterstof om reactie met chloor te voorkomen en chloorconsumptie te minimaliseren;
- een as sintertemperatuur $> 1.000^\circ\text{C}$ om versmelting van het wervelbed te voorkomen.

2.3 ESD-SIC

Figuur 2 Bedrijfsterrein ESD-SIC



Bij ESD-SiC wordt een mengsel van zand (SiO_2) en fijngemalen petroleumcokes (C) van in totaal ongeveer 3.500 ton in een molverhouding van 1 : 3 tot een langwerpige heuvel opgeworpen. Na afdekken met een plastic folie wordt er door de hoop een krachtstroom geleid. Via in het terrein verwerkte elektroden wordt de oven onder spanning gezet. Als gevolg van de elektrische weerstand loopt in de kern van de opgebouwde hoop de temperatuur op tot ca. 2.500°C . Bij deze temperatuur ontleden het zand en de cokes, waarbij siliciumcarbide (SiC) ontstaat en zuurstof uit zand als CO wordt afgevoerd. Procesgassen worden opgevangen, ontzwaveld en gebruikt voor elektriciteitsproductie.

ESD-SiC gebruikt ongecalcineerde petroleumcokes.

2.4 Aluchemie

Fijngemalen gecalcineerde petroleumcokes is voor Aluchemie de belangrijkste grondstof voor anodes voor de aluminiumindustrie. De petroleumcokes wordt met een binder (koolteer) in een mal gebracht en gedurende twee weken bij circa 1.100°C gebakken.

Figuur 3 Bedrijfsterrein Aluchemie



In verband met de uiteindelijke toepassing is de belangrijkste eis aan de grondstof dat het een samenstelling heeft die uiteindelijk - na bakken - een optimale elektrische geleiding geeft.

Er wordt verder gecalcineerde petroleumcokes gebruikt omdat dit - anders dan ongecalcineerde petroleumcokes - niet verkleeft in opslag en - anders als metallurgische cokes - een voldoende laag asgehalte heeft en een assamenstelling heeft met beperkte concentraties metalen.

2.5 Thermphos

Thermphos produceert elementaire fosfor door reductie van fosfaten uit fosforerts, maar ook verbrandingsassen van rioolzuiverings-slib en andere secundaire grondstoffen.

Bij Thermphos wordt, net als bij productie van ruw ijzer, metallurgische cokes gebruikt in verband met de benodigde drukvastheid van de cokes. De cokes bindt de zuurstof in het fosforerts en levert een deel van de voor de reductiereacties benodigde energie. Zoals bij ijzerertsproductie en bij gecalcineerde cokes bevat metallurgische cokes nauwelijks tot geen vluchtige componenten.

Figuur 4 Bedrijfsterrein Thermphos



2.6 Globaal overzicht specificaties en prijsindicaties

Een samenvattend overzicht van de technische eisen vanuit de verschillende bedrijven aan de specificaties van de toe te passen cokes is opgenomen in Tabel 2. De gepresenteerde informatie is voornamelijk gebaseerd op openbare literatuur.

Tabel 2 Specificatie-eisen aan cokes gebruikt in de chemische industrie

	Tronox	ESD-SIC	Aluchemie	Thermphos
Gehalte vluchtige stoffen	< 0,1%	< 10%	< 1%	0,5 ¹ -2% ²
Asgehalte	< 0,5%	< 0,5%	< 0,5%	< 10%
S-gehalte	< 2%	< 2%	1-2%	< 0,5%
C-fixed	(>98%)	(> 90%)	(> 90%)	(90%)
T _{inter as}	> 1.000 °C	?	> 1.000 °C	N.v.t
Drukvastheid	N.v.t.	Hoog	Hoog	Hoog
Hardheid (Hargrove)	Hoog	?	N.v.t	?
Elektrische geleidbaarheid	N.v.t.	Laag	Hoog	Laag

Openbare informatiebronnen geven de volgende prijsindicaties:

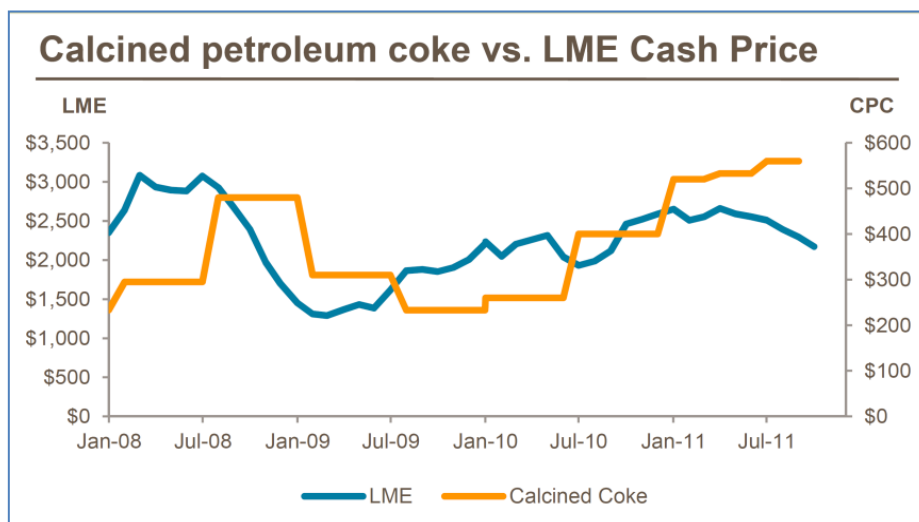
- Ongecalcineerde, laagzwavelige petroleumcokes kost \$ 100-200 per ton minder als gecalcineerde petroleumcokes.
- De lange termijn prijs voor gecalcineerde petroleumcokes bedraagt circa \$ 400-500 per ton (FOB). Korte termijn prijs kunnen sterk fluctueren en hebben het afgelopen vijf jaar gevarieerd tussen 150 en 600 €/ton.
- De lange termijn prijs voor metallurgische cokes schommelt rond de 250 €/ton (FOB) met een fluctuatie van maximaal 100 €/ton.

¹ TU Delft, 2008.

² Op basis van specificaties voor hoogoven cokes (zie <http://www.polskikoks.com/offer/coke-specification/>).

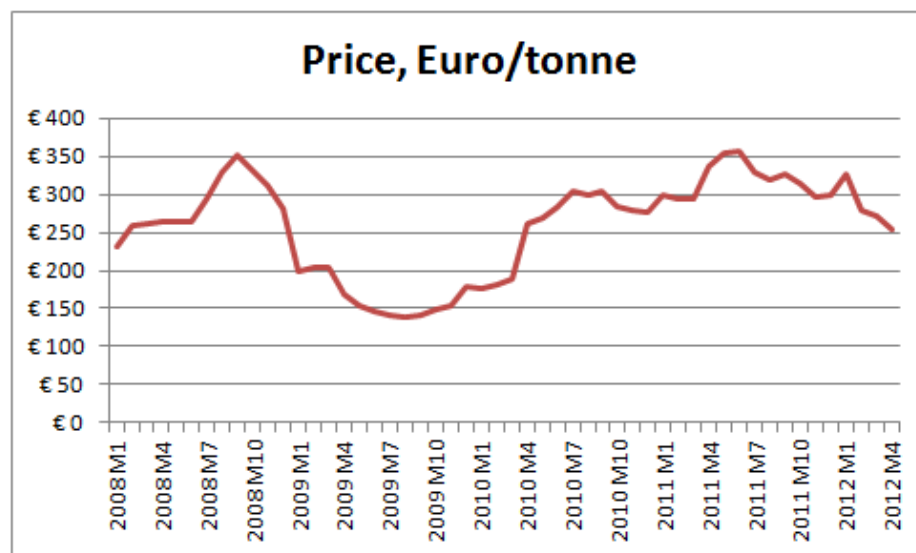


Figuur 5 Prijsontwikkeling van gecalcineerde petroleumcokes (en prijs van aluminium op de 'London Metal Exchange' beurs)



Bron: http://www.riotinto.com/documents/investors_databook/Chartbook.pdf.

Figuur 6 Prijsontwikkeling van metallurgische cokes



Bron: <http://www.steelonthenet.com/files/blast-furnace-coke.html>.





3 Productie van bio-cokes en soortgelijke producten

3.1 Productieroutes en hun technische rijpheid

Voor de productie van een cokesachtig product staan in principe twee routes open:

- traditionele bio-cokesproductie;
- hydrothermal carbonisation oftewel hydrothermische verkoling.

Een globale typering van beide productieroutes is gegeven in Tabel 3.

Tabel 3 Kenschetsen van bio-cokesproductie en hydrothermische verkoling

	Bio-cokesproductie	Hydrothermische verkoling
Proces op hoofdlijnen	Houtachtige biomassa wordt in een zuurstofloze atmosfeer verhit bij (typisch) 500-700 °C en breekt af tot gaspen, teren en bio-cokes	Behandeling van de biomassa bij verhoogde druk (10-20 bar) en temperatuur (170-300 °C) in water. De biomassa wordt ingekoold onder afscheiding van water en daarin oplosbare organische stoffen
Technische rijpheid	Commercieel beschikbaar	Op pilotschaal gedemonstreerd
Leveranciers	<ul style="list-style-type: none"> – Het Franse CML – B. V. Carbo Engineering VMR – S. A. Lambiotte & Cie S. A – Lurgi Umwelt GmbH – Impianti Trattamento Biomasse (I.T.B.) – Degussa proces van Chemviron Carbon 	<ul style="list-style-type: none"> – Suncoal – AVA-CO₂ Schweiz AG – Ingelia³
Mogelijke grondstoffen	<ul style="list-style-type: none"> – Stukkige biomassa – Houtchips of -blokken – schalen van noten en vruchten (kokos, oliepalm, Babassu) 	<ul style="list-style-type: none"> – Hout – Schalen van noten en vruchten (kokos, oliepalm, Babassu) – Stro, organisch afval, slib
Product	<ul style="list-style-type: none"> – Stukzig materiaal met C-fixed gehalte van typisch 85-95% – Geen verlies van as 	<ul style="list-style-type: none"> – Stukzig materiaal, poeder of vlokken met C-fixed gehalte van typisch 20-40% – Oplosbare zouten worden uitgewassen uit as
Mogelijke nabehandelingen	<ul style="list-style-type: none"> – Calcineren bij hogere temperatuur – Behandelen met hoge temperatuur stoom (vgl. Norit) 	<ul style="list-style-type: none"> – Traditionele bio-cokesproductie en evt. nageschakelde processen

Bron: NTNU, 2011, MPI, 2008, Antal and Grønli, 2003, Brownsort, 2009, HS OWL, 2009, University of Helsinki, 2012.

³ Zie: <http://www.expobioenergia.com/en/noticias/first-industrial-scale-biomass-hydrothermal-carbonisation-plant>.



Bio-cokesproductie kan worden gecombineerd met productie van elektriciteit en/of productie van chemicaliën zoals azijnzuur en butaanzuur.

Hydrothermische verkoling nadert het ontwikkelingsstadium waarin de technologie commercieel volwassen en beschikbaar is. Het product bevat echter duidelijk teveel vluchtige componenten voor toepassing in chemische producten. Er is daarom geen uitvoeriger behandeling over deze route opgenomen.

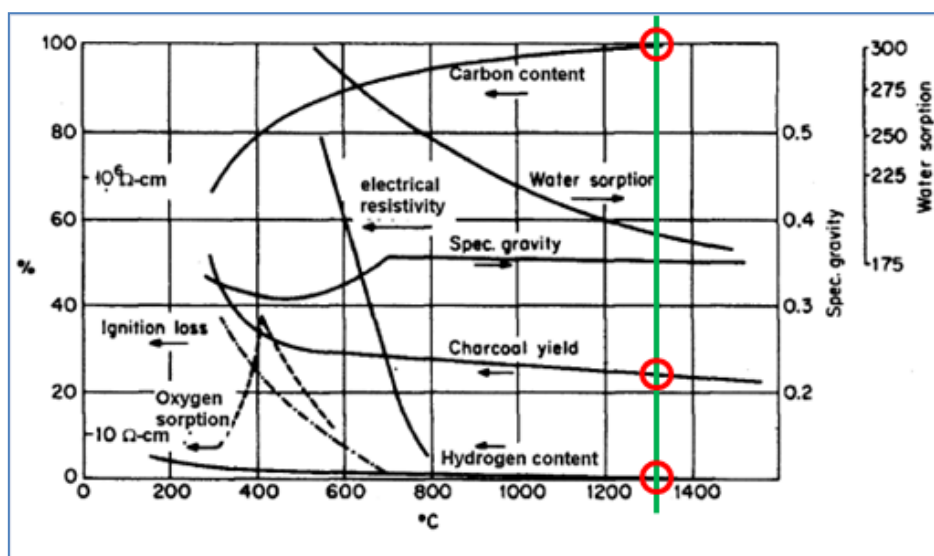
Hydrothermische verkoling is echter wel interessant als mogelijke (toekomstige) voorbewerking voorafgaand aan bio-cokesproductie vanwege het uitwassen van een deel van de assen.

3.2 Bio-cokesproductie en bio-cokesspecificaties

Bio-cokesproductie is een gangbare, commercieel aangeboden technologie. Gangbare industriële bio-cokesproductieprocessen leveren een bio-cokes met 85-95% (Lambiotte, Simcoa) niet-vluchtige koolstof per eenheid droge stof. Het percentage vaste koolstof wordt bepaald door de reactietemperatuur. Verdere verlaging van het gehalte vluchtige stoffen is mogelijk door de bio-cokes verder te verhitten tot bijvoorbeeld 800-1.300 °C of door het te behandelen met stoom bij een temperatuur van 800 °C, zoals bij productie van actieve kool uit biomassa bij bijvoorbeeld Norit.

De groene verticale lijn in Figuur 7 illustreert dat bij een productietemperatuur van 1.300 °C ook het waterstofgehalte en het gehalte aan vluchtige componenten van de bio-cokes, voldoen aan de strengste eisen.

Figuur 7 Effect van reactietemperatuur op bio-cokes eigenschappen



Bron: Antal and Grønli, 2003.

3.2.1 Samenstelling van de bio-cokes en de as

Bio-cokes bevat nauwelijks zwavel, maar wel stikstof. Het asgehalte en de samenstelling van de bio-cokes hangen af van de toegepaste biomassa. Typische asgehaltenes voor schoon hout bedragen 1-3% d.s. en houtas zal voornamelijk bestaan uit:

- K_2O (10-20%);
- P_2O_5 (5-10%);
- CaO (50-60%);
- MgO (\pm 5%).

De as bevat weinig tot geen aluminium, wat bijvoorbeeld wordt genoemd als voordeel voor toepassing als reductiemiddel in siliciumproductie (Lambiotte). Mechanische sterkte en dichtheid van bio-cokes worden eveneens door de toegepaste biomassa bepaald (zie Tabel 4).

3.2.2 Mechanische eigenschappen van bio-cokes

Tabel 4 Indicatie van mechanische en fysische eigenschappen van bio-cokes als functie van de houtsoort

Houtsoort	Dichtheid	Brosheid	Compressie weerstand
Eucalyptus robusta (Madagascar)	0,5-0,6	Hard	Zeer goed
Coula edulea (Gabon)	0,7-0,8	Niet bros	Zeer goed
Tebebenia serratifolia (Brasil)	0,8	Redelijk bros	Goed
Goupia glabra (Suriname)	0,7	Niet bros	Goed
Aucoumea klaineraria (Gabon)	0,5-0,6	Niet bros	Zeer slecht
Astonium fraxinifolium	0,7-0,8	Zeer bros	Zeer slecht

Bron: Lambiotte.

De mechanische sterkte van bio-cokes geproduceerd op basis van hout is kleiner als die van metallurgische cokes, maar is voldoende voor toepassing in een aantal processen in chemie en metaalindustrie (zie volgende paragraaf). Bio-cokes van kokosnootschalen en schalen van Babassu-noten geven een mechanisch sterkere bio-cokes (compressiesterkte 80-100 kg/cm²).

Tabel 5 Voorbeelden van eigenschappen van bio-cokes en cokes zoals gebruikt in de Noorse ferrosilicium en mangaan legeringen industrie

	Braziliaanse bio-cokes	Noorse den	Metallurgische cokes	Petroleum cokes
C-fixed	65-85%	94%	86-88%	85-90%
Vluchtige stoffen	15-35%	4%	<1%	10-15%
Asgehalte	0,4-4%	2,4%	10-12%	<1%
Assamenstelling				
SiO_2	5-25%	23%	25- 55%	
Fe_2O_3	1-13%	5%	5-45%	
Al_2O_3	2-12%	5%	13-30%	
P_2O_5	4-12%	-	0,4-0,8%	
CaO	20-60%	11%		
MgO	5-12%	1-5%		
K_2O	7-35%	1-4%		



	Braziliaanse bio-cokes	Noorse den	Metallurgische cokes	Petroleum cokes
Compressiesterkte (kg/cm ²)	10-80		130-160	
Elektrische weerstand (ohm.m)	5-35		10-20	10-20
CO ₂ -reactiviteit bij 1.060° C (%C/s)	2·10 ⁻²	3·10 ⁻²	0,2-0,5·10 ⁻²	
Thermische cohesie (C.I.(%))	74-84	93-95	93-95	
Thermische weerstand tegen schuren (abrasion): T.I.3 (%)	78-82	84	82-89	

Bron: <http://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXI/031.pdf> en SINTEF et al., 2004.

Tabel 4 en Tabel 5 en Figuur 7 illustreren dat de eigenschappen van bio-cokes sterk afhangen van de toegepaste biomassa en de procescondities waaronder wordt geproduceerd.

3.2.3 Overige eigenschappen

Bio-cokes heeft een hogere reactiviteit dan metallurgische cokes⁴.

3.3 Ervaringen met toepassing van bio-cokes in de metaalindustrie

Bio-cokes wordt nog steeds of weer toegepast als grondstof en reductiemiddel bij een aantal bedrijven en in een aantal landen in de metaalsector. De belangrijkste voorbeelden komen in deze paragraaf aan de orde.

In Brazilië wordt jaarlijks 8 megaton bio-cokes toegepast in industriële processen, waarvan 6 megaton voor productie van ruw ijzer⁵. Bio-cokes wordt bij een aantal hoogovens als enig reductiemiddel ingezet in een daarvoor ontworpen 'mini' hoogoven. Het gemiddeld aandeel bio-cokes in de mix van reductiemiddelen bedraagt ongeveer een derde.

⁴ Zie ook: <http://www.bioenergytrade.org/downloads/sampaionovdec05.pdf>.

⁵ Zie bijvoorbeeld: <http://www.fao.org/docrep/012/i1321e/i1321e04.pdf>.



Figuur 8 Lurgi bio-cokesovens bij Simcoa



Bron: <http://terrapreta.bioenergylists.org/files/Gronli.pdf>.

Simcoa in Perth, Australië gebruikt jaarlijks 30.000 ton bio-cokes voor de productie van hoogzuivere silicium in een vlamboogoven. Bio-cokes vormt ongeveer 50% van de totale inzet aan reductiemiddelen.

Noorse producenten van ferrosilicium gebruiken jaarlijks circa 60.000 ton bio-cokes uit Azië en Latijn-Amerika om de carbon footprint van hun productieproces te verkleinen (SINTEF et al., 2004). Ferrosilicium wordt geproduceerd in vlamboogovens. Thermphos gebruikt een min of meer vergelijkbaar oventype.

Bio-cokes kan maximaal 20% van de als reductiemiddel toegepaste cokes vervangen bij productie van ferrosilicium (SINTEF et al., 2004).

3.4 Technische aspecten aan vervanging van cokes door bio-cokes

Zoals geïllustreerd in voorgaande paragraaf is gebruik van bio-cokes op zich geen vergezocht idee en zijn er diverse bedrijfstakken in met name regio's met grote (en goedkope) biomassa voorraden waar bio-cokes een prominente rol als reductiemiddel heeft.

Deze toepassingen betreffen wel allemaal processen in de metaalindustrie waarin bio-cokes concurreert met metallurgische coke.

In de Nederlandse chemische industrie gebruikt alleen Thermphos metallurgische cokes.

Vergelijking van bekende specificaties van bio-cokes met de eisen die voor Thermphos bekend zijn geven aan dat bio-cokes zonder verdere nabehandeling middels calcineren of blootstellen aan hoge temperatuur stoom een waarschijnlijk te hoog gehalte aan vluchtige componenten zal hebben. Mogelijk beperkt dit de inzetbaarheid tot een bepaald maximum percentage van de totale behoefte aan reductiemiddel. Daarnaast is een mogelijke beperking voor toepassing bij Thermphos de benodigde weerstand tegen samendrukking die de bio-cokes moet hebben.

Vergelijking met de eisen aan cokes voor chemische productieprocessen waarin petroleumcokes wordt toegepast geeft aan dat:

- met name het gewenste lage asgehalte een uitdaging is;
- het gehalte aan vluchtige koolwaterstoffen met name voor toepassing bij Tronox limiterend zal zijn.

De eerste eis beperkt de verschillende typen biomassa waaruit bio-cokes voor deze bedrijven kan worden geproduceerd. Mogelijk kan hydrothermische verkooling in de toekomst het palet aan mogelijke grondstoffen helpen verbreden.

De grenswaarde voor vluchtige componenten bij Tronox maakt nageschakelde behandeling - zoals calcineren en behandelen met stoom - noodzakelijk.



4 Kosten (financieel en milieutechnisch)

4.1 Financiële consequenties van overschakelen op bio-cokes

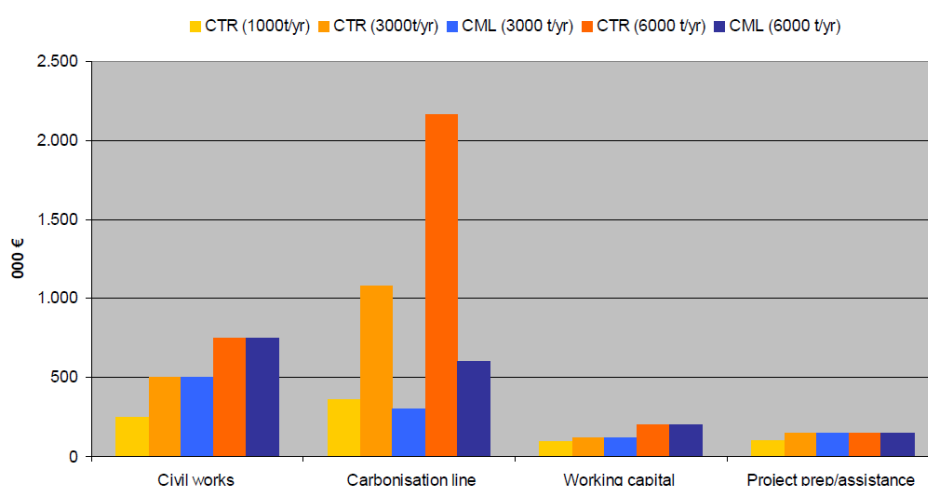
Zoals aangegeven in Paragraaf 2.6 bedragen de marktprijzen van metallurgische cokes en gecalcineerde cokes respectievelijk circa 250 €/ton en 350 €/ton. Ter vergelijking is in deze paragraaf een **schatting** gemaakt van de productiekosten voor bio-cokes.

Investeringskosten

Voor investeringskosten voor bio-cokesovens zijn weinig openbare gegevens beschikbaar, die bovendien onderling sterk verschillend zijn:

- Volgens een presentatie van BTG bedragen specifieke investeringen voor gangbare schaalgroottes van enkele duizenden tonnen bio-cokes per jaar € 200 tot € 400 per ton productiecapaciteit (jaar van prijspeil niet bekend), als vuistregel circa € 300/ton productiecapaciteit.
- Een artikel met betrekking tot de Twin-retort technologie van Carbo Group uit Nederland geeft voor een 800 ton/jaar installatie een investering van in totaal € 500.000 (prijspeil 2002).
- Een bureaustudie voor bio-cokesproductie in Hongarije geeft de in Figuur 9 gepresenteerde opbouw van de investeringskosten voor twee verschillende technologieën en drie verschillende schaalgroottes (prijspeil 2008).
- Een bureaustudie voor de FAO geeft voor een Lambiotte bio-cokesoven met een productiecapaciteit van 1.700 ton bio-cokes/jaar een investering van in totaal € 1.550.000 (prijspeil 2008).

Figuur 9 Opsplitsing investeringskosten

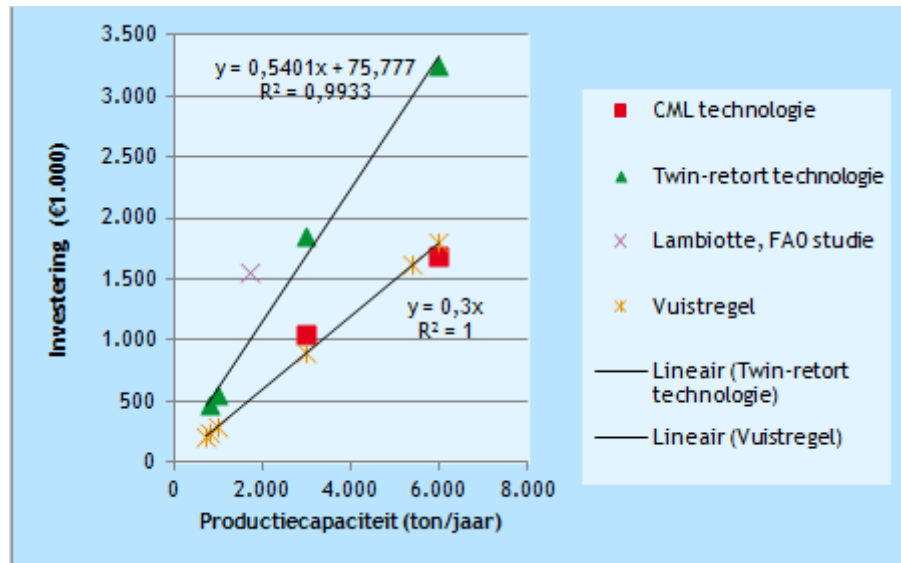


Bron: FAO, 2008a, http://www.drveniugljen.hr/assets/files/pdf/FAO_Economic%20Assessment.pdf.



De indicaties zijn grafisch gegeven in Figuur 10. De investeringskosten variëren tussen specifieke investeringen van ongeveer 300 €/ton productiecapaciteit en ongeveer 550 €/ton productiecapaciteit.

Figuur 10 Investeringskosten als functie van schaalgrootte

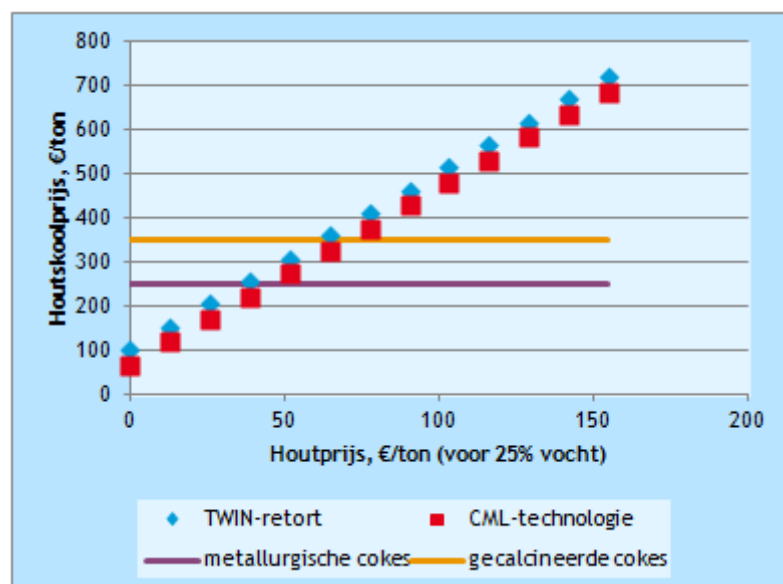


De schaalfactor voor investeringen bedraagt ongeveer 0,8 omdat uitbreiding van de capaciteit bij de beschouwde technologieën vooral neerkomt op het plaatsen van een additioneel aantal ovens en niet op toepassen van grotere ovens.

Productiekosten

De productiekosten als functie van de houtprijs zijn voor een bio-cokesoven met productiecapaciteit van 6.000 ton/jaar aan bio-cokes (85-90% C-fixed) weergegeven in Figuur 11. De huidige houtprijs bedraagt circa € 25-50 per ton.

Figuur 11 Schatting verloop productiekosten voor bio-cokes als functie van de houtprijs



De schatting zoals weergegeven in Figuur 11 is gebaseerd op de volgende aannamen:

- een I.R.R. van 8% zonder heffingen;
- een energetisch rendement van 50% en een massarendement van 25% voor productie van bio-cokes met 85-90% C-fixed;
- operationele kosten voor onderhoud e.d. zoals gegeven in (FAO, 2008a).

Deze cijfers komen overeen met de bij CE Delft bekende productiekosten voor bio-cokes uit Babassu-schalen (ongeveer 250 \$/ton = 200 €/ton). De marktprijs voor bio-cokes in Brazilië ligt op ongeveer hetzelfde niveau.

Zoals geïllustreerd door Figuur 11 is de kostprijs voor hout de belangrijkste kostenpost en wordt bio-cokes duurder dan metallurgische cokes en gecalcineerde petroleumcokes bij respectievelijk 40 €/ton en 70 €/ton hout. Houtprijzen in Canada of Brazilië bedragen 25-50 €/ton.

Wat betekenen de geschatte productiekosten?

Voor een goede kostenvergelijking tussen bio-cokes en cokes zouden eventuele nabehandeling van bio-cokes (bijvoorbeeld calcinatie), verschil in transportkosten voor bio-cokes en cokes en kosten als CO₂-emissieheffingen ook moeten worden verdisconteerd. Bovendien zouden invloeden op operationele kosten bij inzet van cokes/bio-cokes moeten worden meegenomen, zoals verandering in energiegebruik en daaraan gerelateerde kosten voor drogen of malen of eventuele invloeden op emissies naar water en lucht en daaraan gerelateerde kosten.

Figuur 11 illustreert dat bio-cokes economisch gezien niet een uitgesproken voordeel of nadeel heeft ten opzichte van cokes.

4.2 Consequenties qua broeikasgasemissies (en andere milieueffecten)

Volledig overschakelen van petroleumcokes en metallurgische cokes op bio-cokes geeft een aantal reducties qua milieubelasting:

- Het volledig vervangen van cokes door bio-cokes kan een reductie van 1,85 Mton CO₂-eq./jaar opleveren⁶ waarvan ruim 0,5 Mton/jaar in Nederland (zie Tabel 6).
- Afgaand op de samenstelling van cokes en bio-cokes en de concentraties van zwavel, halogenen en zware metalen zoals bijvoorbeeld genoemd in Phyllis⁷ zou overschakelen van cokes op bio-cokes ook een reductie moeten geven van emissies zware metalen en zwavelverbindingen.
- Bij Thermphos en bij ESD-SIC kan ongecalcineerde stroom worden geproduceerd uit brandbare procesgassen. Mogelijk kan hiervoor subsidie worden verkregen (zie SDE+ subsidie voor Norit).

Aan de andere kant is er enige voorzichtigheid nodig qua ongewenste indirecte effecten. Complete vervanging van alle petroleumcokes en metallurgische cokes die in de Nederlandse chemie worden gebruikt vergt circa 2 megaton hout. Dat is weliswaar niet zoveel als nodig is voor een 40% vervanging van alle steenkool die in Nederlandse kolencentrales wordt verbrand, maar nog steeds een zeer significante hoeveelheid.

⁶ Bij de gepresenteerde cijfers zijn emissies voor de productie van gecalcineerde petroleumcokes (37,5 kg CO₂-eq./GJ), metallurgische cokes (10 kg CO₂/GJ) en bio-cokes (10 kg CO₂/GJ) meegenomen.

⁷ Zie: <http://www.ecn.nl/phyllis/>.



Tabel 6 Schatting uitgespaarde broeikasgasemissies

	CO ₂ uitgespaard (kton/jaar)		
	NL chemie	Ketenemissies	
		Toeleveranciers	Afneemers
Tronox	70	17	
ESD-SiC	30	66	
Thermphos	330	26	
AluChemie	110	252	986
	540	361	986

Er is een zeker risico - zoals bijvoorbeeld aangekaart door Greenpeace, maar ook door bijvoorbeeld EU-wood - dat een significante vraagtoename leidt tot onduurzaam bosbeheer of ontbossing. Braziliaanse ijzererts producenten worden er nu al van beschuldigd de regenwouden in de Amazone op te offeren aan bio-cokesproductie voor ruw ijzerexport.

Door ontbossing of intensivering van kapcycli in bestaande productiebossen neemt de in vegetatie vastgelegde hoeveelheid koolstof af en worden broeikasgasemissies veroorzaakt, die uitsparing van broeikasgasemissies door vervanging van fossiele cokes tenietdoen.

Voor realisatie van een duurzame productieketen zal de voor bio-cokes productie te gebruiken biomassa in ieder geval moeten worden gecertificeerd onder één van de door de EU geaccrediteerde certificeringssystemen.

Gezien de maatschappelijke discussies, het risico op onduurzame indirecte effecten en de vraag naar hout voor meestoken lijken met name bijproducten en restproducten die niet of minder geschikt zijn voor meestoken een aantrekkelijke grondstof voor bio-cokesproductie.



5 Organisatie van een eventuele uitrol

5.1 Overwegingen van de bedrijven

Om een gevoel te krijgen voor het animo bij de bedrijven heeft CE Delft een aantal bedrijfsbezoeken afgelegd. Daarbij zijn de technische, economische en organisatorische mogelijkheden, randvoorwaarden en wensen met betrekking tot een eventueel (gedeeltelijk) overschakelen op bio-cokes verkend.

Alle bedrijven vinden de door CE Delft ingebrachte kennis voldoende interessant om in gesprek te blijven over toepassing van bio-cokes en deze optie verder te verkennen, zowel technisch als economisch.

Alle bedrijven geven verder aan dat als bio-cokes technisch en economisch een reëel alternatief blijkt, er duidelijk moet worden gemaakt of bio-cokes ook echt een duurzaam alternatief kan zijn en hoe dit gegarandeerd kan worden.

Technische verkenning

Uit de eerste verkenning blijkt dat bio-cokes waarschijnlijk technisch toepasbaar zijn als alternatief voor petroleumcokes.

De volgende stap is het aanvragen en analyseren van meerdere proefmonsters op basis waarvan de bedrijven voor hun relevante laboratorium tests kunnen doen. Op basis van de uitkomsten kunnen de bedrijven inschatten of bio-cokes inderdaad technisch gezien voldoende perspectief biedt voor het doen van tests op pilotschaal.

Mocht dit zo blijken, dan hebben de vier bedrijven graag de beschikking over grotere partijen van honderden tonnen voor het uitvoeren van pilotschaal testen voor een 'proof-of-principle' analyse en voor fine tuning van procesvoering en bio-cokeskeuze.

Bij geslaagde pilot-proeven zal bio-cokes worden geïntroduceerd binnen het commerciële productieproces, eerst op bescheiden schaal, daarna eventueel in grotere hoeveelheden.

Economische verkenning

Alle bedrijven hebben een sterke behoefte aan een beter inzicht in de bestaande markt voor bio-cokes en de mogelijke ontwikkelingen daarin, zowel qua aanbod als qua prijs.

Het is belangrijk om inzicht te krijgen in de vraag:

- of er inderdaad voldoende - duurzame - biomassa bio-cokes van voldoende kwaliteit vrijkomt;
- of deze biomassa, of de daaruit geproduceerde bio-cokes, beschikbaar kan worden gemaakt en gecontracteerd kan worden voor gebruik door Nederlandse chemische bedrijven;
- hoe contractering en toevoer moeten worden georganiseerd en gegarandeerd.



Alle bedrijven zouden het liefst voor toepassing van grote volumes met meerdere aanbieders samenwerken om niet afhankelijk te worden van één leverancier. Zolang er alleen beperkte percentages bijgemengd worden hoeft het aantal aanbieders geen beperking voor invoering te vormen.

Qua prijs zou men het liefst de beschikking hebben over materiaal dat qua prijs per eenheid C-fixed vergelijkbaar is met de te vervangen cokes - of goedkoper.

Mogelijk is er nog ruimte in deze prijs voor wat betreft bio-cokes, bijvoorbeeld vanwege CO₂-emissierechten of voorbewerkingen die - in vergelijking met cokes - achterwege kunnen blijven.

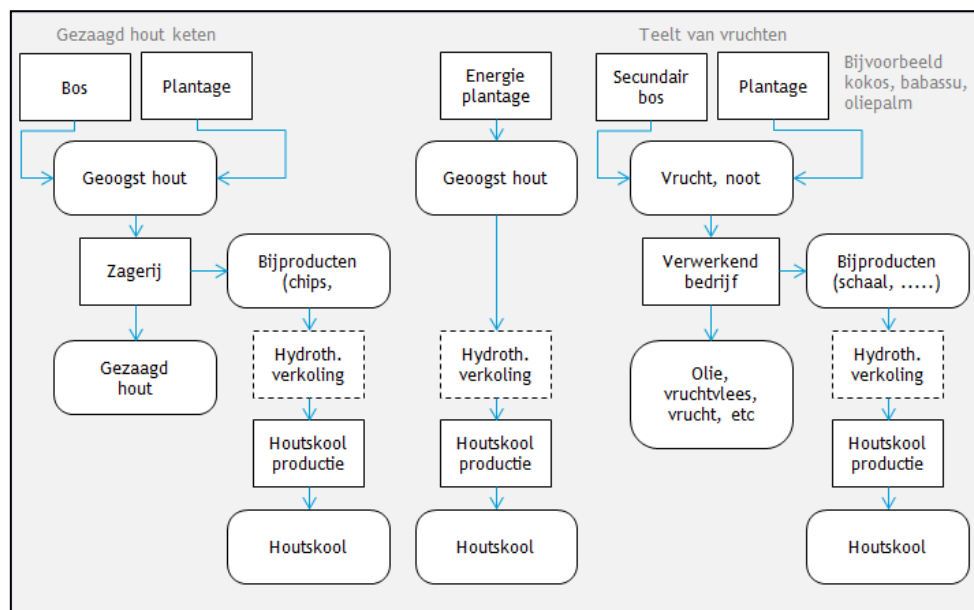
De verschillende bedrijven willen ook participeren in een gezamenlijk overleg om te verkennen hoe ze toelevering van bio-cokes eventueel samen kunnen oppakken en realiseren.

5.2 Mogelijke invulling van uiteindelijke ketens

Om een wat concretere basis te bieden voor het plannen van een verdere verkenning van de inzet van bio-cokes bij Nederlandse chemische bedrijven is in deze paragraaf een schets opgenomen van de mogelijke productieketens.

In principe zijn er een drietal gangbare routes voor de productie en toelevering van bio-cokes aan Nederlandse chemische bedrijven (zie Figuur 12).

Figuur 12 Gangbare productieroutes voor bio-cokes op basis van verschillende biomassa grondstoffen



Alle geschetste ketens zijn bestaande operationele en commerciële productieroutes voor bio-cokes:

- Door zagerijen geproduceerde zaagresten worden bijvoorbeeld in Zuidoost-Azië verwerkt tot bio-cokes⁸.
- Voor bio-cokesproductie voor de Braziliaanse ruw ijzer productie worden plantages van Eucalyptusbomen van tienduizenden hectares geëxploiteerd.
- Er zijn diverse aanbieders van bio-cokes geproduceerd op basis van palmkern schaal en met name kokosnoot op de markt⁹. Schalen van Babassu-noten worden in Brazilië gebruikt voor bio-cokesproductie.

Een bedrijf als Norit koopt volgens eigen opgave bio-cokes op de markt om te verwerken tot geactiveerde kool.

Additionele, maar minder gangbare routes zijn er ook, bijvoorbeeld de productie van bio-cokes uit invasieve vegetatie (zogenaamde invader bush) in Namibië¹⁰.

Stakeholders in deze ketens naast de afnemers zijn:

- de exploitant van de plantage of het houtwinningbedrijf;
- de verwerker van geoogst hout (zagerij) of geoogste vruchten;
- de bio-cokesproducent.

De productieketen kan bestaan uit steeds een aparte stakeholder per ketenschakel, maar een volledig verticaal geïntegreerde keten komt ook voor, bijvoorbeeld in de vorm van de door de staalproducenten opgezette en geëxploiteerde energieplantages voor bio-cokesproductie in Brazilië.

Voor een betere strategiebepaling ten aanzien van een eventuele uitrol van bio-cokes gebruik in de Nederlandse chemische industrie is het volgens ons wenselijk bovenstaande schets verder in te vullen en een beter inzicht te geven in aspecten als:

- de per regio vrijkomende volumes aan restproducten van zagerijen en vruchtverwerkende bedrijven op basis waarvan bio-cokes van voldoende goede kwaliteit zou kunnen worden geproduceerd;
- de producenten van deze reststromen en producenten van bio-cokes in deze regio's;
- opties voor energieteelt van - qua specificaties en qua teeltkosten - relevante houtsoorten.

5.3 Mogelijk plan van aanpak voor verdere verkenning en uiteindelijke implementatie

Op basis van de tot nu toe beschikbare informatie blijkt bio-cokes een interessante innovatie. Maar er kan nog niet worden geconcludeerd of het wel of niet een reëel alternatief is.

Wil implementatie uiteindelijk gaan plaatsvinden, dan is in de eerste plaats nodig een beter inzicht te krijgen in het technische potentieel en in het economische potentieel.

⁸ Zie bijvoorbeeld: <http://stoves.bioenergylists.org/stovesdoc/Koopmans/Kiln.htm>.

⁹ Zie bijvoorbeeld: <http://www.supremecarbon.com/metalbriq.htm>, <http://www.charcoal-indonesia.com/>.

¹⁰ Zie bijvoorbeeld: <http://www.agentschapnl.nl/en/onderwerp/psi-project-fsc-certified-charcoal-invader-bush-namibia>.



Verdere verkenning

Technisch potentieel beter in kaart brengen zou volgens ons moeten bestaan uit het selecteren van een aantal kansrijke biomassa grondstoffen. Op basis van bureaustudie zou moeten geïnventariseerd welke grondstoffen een bio-cokes product kunnen opleveren dat chemisch en fysisch voldoet aan de specificatie-eisen van de mogelijke afnemers of dat daar voldoende dicht in de buurt van komen om beperkte bijmenging/vervanging mogelijk te maken. Dit zal moeten worden ingeschat op basis van bekende samenstellingen van de biomassa grondstoffen of daaruit geproduceerde bio-cokes, zoals opgegeven in literatuurbronnen of door bio-cokesproducenten.

Na deze voorselectie zal met een marktverkenning in kaart moeten worden gebracht waar kansrijke grondstoffen vrijkomen of eventueel zouden kunnen worden geteeld en welke bedrijven de grondstoffen produceren of eventueel al tot bio-cokes verwerken (voor zover niet al bekend uit de eerste fase). De marktstudie zou ook indicaties moeten opleveren van marktprijzen van grondstoffen of bio-cokes en van eventuele concurrentie uit andere sectoren, bijvoorbeeld energiesector of metaalindustrie.

Concrete business case kansen signaleren en verzilveren

Na het in kaart brengen van deze informatie zal actief contact moeten worden gezocht met mogelijke leveranciers van grondstoffen of bio-cokes. Er moet toegang worden verkregen tot voldoende biomassa van voldoende kwaliteit. Er moet worden gezorgd voor het contractueel vastleggen van deze biomassa zodat een continue aanvoer naar bio-cokesproductie voor Nederlandse chemische bedrijven kan worden gegarandeerd.

De tot bio-cokes te verwerken biomassa moet worden gecertificeerd, zodat afdoende zekerheid kan worden gegeven over de duurzaamheid ervan.

Mogelijk moet ook additionele productiecapaciteit worden gegenereerd, die bio-cokes produceert die voldoet aan de specificaties van de cokes toepassende chemische bedrijven.

Dit traject zal in nauw overleg met de bedrijven moeten worden ingevuld.

Benodigde eerste concrete stap

Het is helder welke stappen nodig zullen zijn voor implementatie van bio-cokes als substituut voor petroleumcokes en metallurgische cokes.

Om deze stappen te zetten is het nu zaak om een plan voor uitvoering op te stellen. Daarbij hoort in ieder geval:

- het opstellen van een begrotingsplan voor verkennende onderzoeken naar technische opties, marktperspectief en proeven met bio-cokes bij bedrijven en onderzoeksinstituten (bijvoorbeeld RWTH Aachen voor wat betreft SiC productie);
- een planning voor de verschillende algemene stappen c.q. verkenningen;
- afstemming over de rol die de verschillende belanghebbenden (bedrijven, koepelorganisatie, overheid) op zich nemen, zoals welke partij secretariaat voert.

Mogelijk is het ook interessant te bediscussiëren binnen welke steunprogramma's verdere verkenning en implementatie van inzet van bio-cokes kan worden opgepakt.



5.4 Risico's

Op dit moment is nog veel onduidelijk over praktische implementeerbaarheid, zowel technisch, economisch als organisatorisch. De risico's voor het falen van een eventuele implementatie zijn:

- Er is een kans dat geen biomassa grondstof kan worden gevonden die bio-cokes van voldoende kwaliteit oplevert.
- De prijs voor productie en transport van bio-cokes is in de praktijk te hoog.
- Er is onvoldoende aanbod aan biomassa contracteerbaar.
- Er is onvoldoende productiecapaciteit en geen investeerder die bereid is om in uitbreiding daarvan te investeren.
- Etc.

De risico's zullen waarschijnlijk verschillend zijn voor de vier in deze studie betrokken bedrijven, aangezien ze uiteenlopende soorten cokes met verschillende marktprijzen en verschillende technische specificaties toepassen.

Op dit moment is nog niet goed aan te geven hoe groot de risico's zijn. Dit zal duidelijker worden wanneer een verdere verkenning wordt uitgevoerd.





Literatuur

ACS, 2007

Jun M. Lee, James J. Baker, Jeffrey G. Rolle, Robert Llerena (A.J. Edmond Co)
Characterization of green and calcined coke properties used for aluminum
anode-grade carbon
S.L. : American Chemical Society, Division of Energy & Fuels, 2007
Available at http://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/43_2_DALLAS_03-98_0271.pdf

Akhtar et al., 2012

Anode quality and bake furnace performance of emal
Raja Javed Akhtar (EMAL), Markus W. Meier, Peter O. Sulger, Werner K.
Fischer (R&D Carbon Ltd), Ralph Friedrich, Thomas Janousch (Riedhammer)
In: Light Metals 2012 Edited by: Carlos E. Suarez
S.L. : WILEY; TMS, 2012

Antal and Grønli, 2003

Michael Antal (University of Hawaii), Morten Grønli (SINTEF Energy Research,
Trondheim, Norway))
Industrial Production Of Charcoal
Ind. Eng. Chem. Res. 2003, 42, 1619-1640
S.L. : American Chemical Society, 2003
<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie0207919>

AVA-CO2 Schweiz AG, 2011

AVA HTC-Module
Zug : AVA-CO2 Schweiz AG, 2011
http://www.ava-co2.com/web/media/downloads_EN/datenblaetter/Factsheet_AVA_HTC-Module_EN.pdf

Brownsort, 2009

Peter Alexander Brownsort
Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on
biochar system benefits - A dissertation presented for the degree of Master of
Science
Edinburgh : University of Edinburgh, 2009

BTG, 2010

Module 2a
Carbonisation and Agglomeration
Enschede : Biomass Technology Group BV (BTG), 2010
http://www.casindo.info/fileadmin/casindo/Training/MEMR_training/Carbonisation_and_agglomeration.pdf

CE.R.T.H., 2004

Dr. George Skodras & Mr. Panayiotis S. Amarantos,
Overview of low temperature carbonisation
Present Status - Properties, Yields and Utilisation of LTC chars -
Survey of Various Methods - Pre-treatment Conditions & Effects - Advantages,
Economic & Technological Development
WorkPackage # 4: Promotion of Low-Temperature Carbonisation (LTC)
Technology
S.L. : Centre for Research & Technology Hellas (CE.R.T.H.), 2004



CSIRO, 2011

T. Norgate, N. Haque, M. Somerville and S. Jahanshahi
The greenhouse gas footprint of charcoal production and of some applications
in steelmaking
7th Australian Conference on LCA, Melbourne, 9 March 2011
Available at: <http://www.conference.alcas.asn.au/2011/norgateetalv2.pdf>

Environmental Protection Authority, 2009

Silicon Project, Kemerton and Mine at Moora - Addition of a Fourth Submerged
Arc Furnace at the Kemerton Smelter
Simcoa Operations Pty. Ltd.
Report and recommendations of the Environmental Protection Authority
Perth : Environmental Protection Authority, 2009

FAO, 2008a

Dr Julije Domac, Dr Miguel Trossero (eds.)
Economic aspects of charcoal production in Croatia
TCP/CRO/3101 (A) Development of a sustainable charcoal industry
Zagreb : North-West Croatia Regional Energy Agency, FAO, 2008

FAO, 2008b

Dr Julije Domac, Dr Miguel Trossero (eds.)
Assessment of international charcoal markets
TCP/CRO/3101 (A) Development of a sustainable charcoal industry
Zagreb : North-West Croatia Regional Energy Agency, FAO, 2008

Forestry Commission of NSW, 1980

F.R. Humphreys, G.E. Ironside
Charcoal from New South Wales species of timber
Sydney : Forestry Commission of North South Wales, 1980

Gundersen, 1998

Øyvind Gundersen
Modelling of Structure and Properties of Soft Carbons with Application to
Carbon Anode Baking - Dr. ing. thesis
Trondheim : Norwegian University of Science and Technology Department of
Engineering Cybernetics, 1998

HEP, 2010

Eco-charcoal Project Concept Study
S.L. : Hauser Estratégia & Participação Ltda. (HEP), 2011

HS OWL, 2009

Hydrothermal Carbonization of Organic Waste
Hans-Günter Ramke, Dennis Blöhse, Hans-Joachim Lehmann, Joachim Fettig
Presented at Sardinia 2009: Twelfth International Waste Management
and Landfill Symposium - Cagliari, Sardinia, Italy, 05-09 October 2009
Hoexter (Germany) : Hochschule Ostwestfalen-Lippe, University of Applied
Sciences, 2009
Available at: http://www.hs-owl.de/fb8/fachgebiete/abfallwirtschaft/pdf/Sardinia_2009_HTC_Internet.pdf



ISCA, 2011

Sanger S.H., Mohod A.G., Khandetode Y.P., Shrirame H.Y. and Deshmukh A.S.
Study of Carbonization for Cashew Nut Shell
Dept. of Elec. and other Energy Sources, College of Agri. Eng. and Tech.
DBSKKV, INDIA
In: Research Journal of Chemical Sciences, Vol. 1(2), 43-55, May (2011)
S.L. : International Science Congress Association (ISCA), 2011
Available online at: www.isca.in

JCI, 2010

Consulting Service Report for Improving the Efficiency of Carbonizing Plant for
PKS Charcoal In Malaysia
S.L. : Japan Consulting Institute (JCI); JP Steel Plantech Co., 2010.
Available at: http://www.jci-plant.or.jp/010jci/pdf/H21_PI-1-malaysia-B-Report.pdf

Libra et al., 2011

Judy A Libra, Kyoung S Ro, Claudia Kammann, Axel Funke, Nicole D Berge,
York Neubauer, Maria-Magdalena Titirici, Christoph Fühner, Oliver Bens,
Jürgen Kern and Karl-Heinz Emmerich
Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the
chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis
In: Biofuels (2011) 2(1), 89-124
Available at: <http://www.future-science.com/doi/abs/10.4155/bfs.10.81>

MPI, 2008

Markus Antonietti, Maria Magdalena Titirici
Hydrothermal Carbonization of Biomass: Black Carbons with refined Structure
without Charing
Potsdam : Max Planck Institute of Colloids and Interfaces, 2008

NREL, 1995

Siddhartha Gaur, Thomas B. Reed
An Atlas of Thermal Data For Biomass and Other Fuels
Colorado School of Mines
Golden, CO 80401
Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1995

NTNU, 2011

Morten Grønli
Pyrolysis and charcoal
Trondheim : Norwegian University of Science and Technology (NTNU),
Department of Energy and Process Engineering, 2011
Available at: <http://www.bioforsk.no/ikbViewer/Content/71499/Biokarbonseminar%20C5s%2011-03-2010%20Morten%20Gr%F8nli.pdf>

R&D Carbon, 2008

Ulrich Mannweiler (Mannweiler Consulting), Werner K. Fischer, Raymond C.
Perruchoud (R&D Carbon Ltd.)
Carbon products: a major concern to aluminum smelters
Sierre : R&D Carbon Ltd., 2008

Rio Tinto, 2012

Rio Tinto chartbook 2012
London/Australia : Rio Tinto plc /Rio Tinto Ltd., 2012



Shackley et al., 2011

Simon Shackley, Jim Hammond, John Gaunt and Rodrigo Ibarrola
The feasibility and costs of biochar deployment in the UK
In: Carbon Management (2011) 2(3), 335-356
Available at: <http://www.biochar-international.org/node/2614>

SIMCOA, 2007

J. Brosnan
New Industries: a Case Study of the Silicon Industry
2007 South West Focus Conference, Building on the Boom
Wellesley (Australia) : SIMCOA Operations P/L, 2007

SINTEF et al., 2004

B. Monsen (SINTEF), M. Tangstad (ERAMET) and H. Midtgaard (Tinfos)
Use of charcoal in silicomanganese production
In: INFACON X; Transformation through technology, Cape Town, South Africa,
pg. 392-404
Trondheim : SINTEF, 2004

Syred et al., 2005

C. Syred .J. Griffiths , N. Syred (Cardiff University, D. Beedie (BioEnergy
Devices), D. James (James Engineering Turbines Ltd)
A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP)
Available at <http://frec.vt.edu/charcoal/documents/Syred>

TUB, 2011

Berit Erlach, Benjamin Wirth, George Tsatsaronis
Co-production of electricity, heat and biocoal pellets from biomass: a techno-
economic comparison with wood pelletizing
World Renewable Energy Congress 8-13 May 2011, Linköping, Sweden
Berlin : Technische Universität Berlin, Institute for Energy Engineering, 2011

TU Delft, 2008

E. Scheepers
Fingerprint of a submerged-arc Furnace: Optimising energy consumption
through data mining, dynamic modelling and computational fluid dynamics
Delft : TU Delft, 2008

University of Helsinki, 2012

Baltic Bioenergy and Industrial Charcoal
Mari Rautiainen, Mikko Havimo and Kristaps Gruduls
Biocoal production, properties and uses - The Development of the Bioenergy
and Industrial Charcoal (Biocoal) Production (Report of BalBiC -project cb46)
Report 1/2012 Production and Logistics
Helsinki : University of Helsinki, Faculty of Agriculture and Forestry, 2012

Websites**AluChemie**

<http://www.aluchemie.nl/>

ESD_SIC

http://www.kollosic.nl/esd_nl/esd/index.html

Thermphos

<http://www.thermphos.com/>

Tronox

<http://www.tronox.com/>

