



Kansrijk beleid voor CCS

Bijdrage aan het programma
Kansrijk Energie- en Klimaatbeleid



CE Delft

Committed to the Environment

Kansrijk beleid voor CCS

Bijdrage aan het programma
Kansrijk Energie- en Klimaatbeleid

Delft, CE Delft, juli 2016

Publicatienummer: 16.3I43.49b

CCS / Industrie / Kooldioxide / Emissies / Reductie / Overheidsbeleid / Maatregelen

Deze notitie is opgesteld door:
Harry Croezen

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 35 jaar werken betrokken en kundige medewerkers bij CE Delft om dit waar te maken.



Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Wat is CCS	3
1.2	CCS in de industrie	4
2	Toekomstbeelden	6
2.1	Het algemene beeld in 2050	6
2.2	CCS en industrie	12
2.3	Regelgeving en beleid anno 2050	17
3	Recente ontwikkelingen en lessen voor beleid	18
3.1	Recente ontwikkelingen buiten de EU	18
3.2	Recente ontwikkelingen in de EU	18
3.3	Lessen	19
4	Beleidsaanbevelingen en mogelijke acties om CCS te versnellen	21
	Bijlage A Literatuur	23
	Bijlage B De directe economische waarde van CCS	25
B.1	Kosten algemeen	25
B.2	Opslag van CO ₂ , groot potentieel in Nederland	27
B.3	CCS relevant vanaf € 50 per ton CO ₂	29
B.4	Realisatietijd van CCS	32
	Bijlage C Warmte	33
C.1	Huidige warmtevraag onderverdeeld	33
C.2	Restgassen en WKC's	35



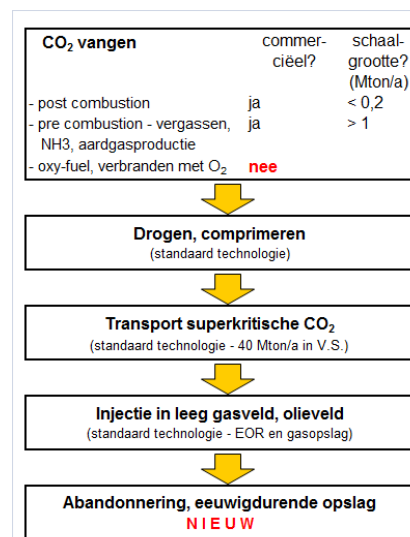
1 Inleiding

Doel van deze notitie is het uitwerken van de systeemoptie CCS in de industrie voor CO₂-emissiereductie. De belangrijkste vraag die daarbij moet worden beantwoord is hoe de ontwikkeling en uitrol van CCS in de industrie kan worden versneld. Welke technische routes en opties zijn er denkbaar en wat zijn de voor- en nadelen van deze routes, welke acties en beleidsmaatregelen moeten de komende jaren worden ingezet, welke beslissingen moeten de komende jaren worden genomen?

1.1 Wat is CCS?

CCS staat voor Carbon Capture and Storage en betreft een combinatie van vijf processtappen:

1. Afvang van CO₂ uit rookgassen en andere gasstromen (synthesegas bij bijvoorbeeld productie van ammoniak/NH₃ en waterstof/H₂, aard-gas, biogas, productgassen bij brouwerijen, gistproductie en distilleerderijen).
2. Geschikt maken van CO₂ voor transport en opslag door zuiveren, drogen en comprimeren (samenpersen) tot een superkritische vloeistof.
3. Transport van opgewerkte CO₂ via pijpleiding of per schip.
4. Injectie van de opgewerkte CO₂ in lege gasvelden en olievelden of in diepliggende waterlagen (aquifers).
5. Abandonnering (verlating) van de opslaglocatie, afsluiting met oog op eeuwigdurende opslag.



Afvang uit rookgassen uit verbranding wordt 'post-combustion' afvang genoemd, afvang uit procesgassen en uit gasvormige brandstoffen voor verbranding wordt 'pre-combustion' afvang genoemd. De derde optie is 'oxyfuel' waarbij zuurstof voor verbranding wordt toepast in plaats van lucht.

Techniek

Meest gangbare techniek in post-combustion en pre-combustion is om de CO₂ met een vloeistof (solvent) uit de betreffende gasstroom te wassen en door regeneratie van de wasvloeistof door toevoer van warmte in geconcentreerde vorm weer vrij te maken. Gebruik van lokaal beschikbare restwarmte werkt heel positief door in het energieverbruik en dus in de kosten.

Afscheiding van de CO₂ met behulp van membranen of door adsorptie aan vaste stoffen (PSA in waterstofproductie) worden ook wel toegepast.

In de oxyfuelroute wordt brandstof met zuivere zuurstof - in plaats van lucht - verbrand zodat alleen CO₂ en waterdamp overblijven. De waterdamp wordt vervolgens door condensatie afgescheiden, de overblijvende CO₂ gecomprimeerd voor transport en opslag.

De keten van CCS is nog niet helemaal uitontwikkeld, al zijn de meeste stappen bekende technieken. Transport van superkritische CO₂ en opslag wordt al op diverse plaatsen in de wereld toegepast en pre-combustion afvang ook. Daar staat tegenover dat afvang uit rookgassen en andere gasstromen op lage druk en met beperkte CO₂-concentraties alleen nog op beperkte schaal beschikbaar is. Abandonnering van opgeslagen CO₂ is nog volledig nieuw.

Er is daarom nog een zekere ontwikkeltijd nodig voordat CCS grootschalig en over een breed palet aan industriële sectoren kan worden uitgerold. Die tijd is met name nodig voor doorontwikkeling van CO₂-afvangtechnologie naar commerciële schaal voor gassen met beperkte drukken en CO₂-concentraties. Verder is tijd nodig om de kosten te verlagen en de benodigde infrastructuur en regelgeving op te bouwen. Deze stappen vergen uiteraard ook de nodige investeringen.

Naast CCS is er ook CCU - Carbon Capture and Utilization. De afgevangen en opgewerkte CO₂ wordt in dat geval nuttig toegepast als grondstof of als hulpstof. Bestaande en bekende voorbeelden zijn:

- gebruik in de glastuinbouw om plantengroei te versnellen;
- toevoeging aan frisdrank (prik);
- hulpstof bij oliewinning (Enhanced Oil Recovery, EOR)¹;
- gebruik als grondstof voor zeer zuivere CaCO₃ - kalksteen - voor bijvoorbeeld gebruik in papier (de witte kleur van papier);
- gebruik van superkritische CO₂ als oplosmiddel;
- grondstof voor kunststof (polycarbonaat en polyolen);
- gebruik als blusmiddel in brandblussers en in automatische blusinstallaties in gebouwen en installaties waar gebruik van water ongewenste schade zou veroorzaken.

Voor CCU hoeft de CO₂ niet altijd als zuiver gas te worden toegepast. OMYA in Moerdijk bijvoorbeeld maakt voor productie van zuivere kalksteen gebruik van de CO₂-rijke rookgassen van de slibverbrandingsinstallatie van SNB Moerdijk. De EOn RoCa III gasgestookte energiecentrale levert CO₂-rijke rookgassen aan tuinders in de zogenaamde B-driehoek (Bleiswijk-Berkel-Bergschenhoek). Bij sommige toepassingen wordt de CO₂ niet vastgelegd, maar wordt wel productie van CO₂ uit fossiele bronnen voorkomen.

1.2 CCS in de industrie

CCS wordt vooral gezien als een oplossing voor procesgerelateerde CO₂-emissies en wordt in dat verband genoemd als belangrijkste maatregel voor reductie van broeikasgasemissies bij:

- ruw ijzerproductie;
- ammoniakproductie;
- waterstofproductie;
- cementklinkerproductie.

¹ EOR staat voor Enhanced Oil Recovery - oftewel gestimuleerde winning van aardolie. De CO₂ wordt hierbij onder hoge druk in het olieveld geperst. Het stimuleert oliewinning deels door de olie uit het veld te duwen. Daarnaast lost het deels in de olie op, die daardoor vloeibaarder wordt en makkelijker opgepompt kan worden.



De betreffende sectoren hebben CCS dan ook prominent in hun nationale en Europese routekaarten opgenomen².

De tijdens het proces gevormde CO₂ komt bij deze bronnen in hoge(re) concentraties (>20 vol%) in de procesgassen vrij en kan daardoor makkelijker en tegen lagere kosten worden afgevangen dan bijvoorbeeld bij een gasgestookte ketel. Het betreft verder qua omvang grotere CO₂-emissiebronnen (meerdere honderden kilotonnen/jaar en groter), waardoor het schaalvoordeel in afvangkosten groot is en de infrastructurele inspanning per eenheid afgevangen CO₂ beperkt blijft.

CO₂ komt daarnaast in hoge concentraties vrij in procesgassen van bijv. de vergisting van natte biomassa en de productie van gist en ethanol (bier, gedestilleerd, transportbrandstof) op basis van suikers en zetmeel. Isolatie en opwerking van CO₂ tot een afzetbaar product is bij deze processen standaard technologie en praktijk.

CCU in combinatie met afvang bij met brandstof gestookte fornuizen en ketels is al decennia gangbaar op kleinere schaal en is in enkele tientallen installaties commercieel toegepast. Een bekend voorbeeld is de Fluor EcoAmine afvanginstallatie bij een gasgestookte energiecentrale bij Bellingham, VS. Deze eenheid produceerde 330 ton CO₂/jaar ($\approx$ 40 MWgas) voor de lokale frisdrankindustrie. Maar de techniek is bij de huidige stand der techniek en vanwege de minder gunstige schaalgrootte nog relatief duur voor brede toepassing. Daarnaast vormt afvang bij kleinere bronnen een logistieke - en economische - uitdaging vanwege de benodigde uitgebreidheid en vertaktheid van het benodigde netwerk of de faciliteiten voor tussenopslag.



Bij dit soort puntbronnen concurreert deze post-combustion afvang met alternatieve maatregelen voor reductie van CO₂-emissies, zoals conventionele energiebesparing, procesinnovatie en inzet van hernieuwbare energie. Vaak zijn deze opties goedkoper, ook vanwege de logistieke uitdagingen van CCS bij dit soort industriële bronnen.

Een overzicht van totale emissies in Nederland per type bron, specifieke jaarvracht, CO₂-concentratie en afvangkosten is gegeven in Tabel 1. In de huidige situatie lijkt het maximum potentieel voor CO₂-afvang bij maximale kosten tot 80 €/ton CO₂ uit te komen op ca. 38-50 Mton CO₂/jaar.

Of afvang en opslag van CO₂ voor deze sectoren in de ontwikkeling richting een duurzame maatschappij in 2050 een maatschappelijk gezien belangrijke maatregel kan zijn, hangt overigens ook sterk af van de ontwikkeling van de omvang van deze sectoren en de mate waarin zij de broeikasgasemissies terug weten te dringen in de komende decennia, door andere, mogelijk kosten-

² Zie o.a.: www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf; www.iea.org/publications/freepublications/publication/Chemical_Roadmap_2013_Final_WEB.pdf; www.nocarbonnation.net/docs/roadmaps/2013-Steel_Roadmap.pdf; www.cefic.org/Documents/PolicyCentre/Reports-and-Brochure/Energy-Roadmap-The%20Report-European-chemistry-for-growth.pdf

effectievere maatregelen als energiebesparing, procesinnovaties en de inzet van hernieuwbare energie en grondstoffen.

Tabel 1 CCS -opties industrie en E-sector³

	Potentieel in NL Mton CO ₂ /a	Emissie per bron Mton CO ₂ /a	Vol% CO ₂	Kosten afvang €/ton CO ₂	Ontwikkelings- stadium
Puur (of vrijwel - EtOH, NH ₃ , PER+)	2-3	0,1-1,0	> 95%	10-20	Gangbaar
H ₂ -productie	1-2	0,5	40-70%	40-50	Demo van 1 Mton/jaar
Hoogovengas	5	2-3	25%		Pilot, techniek op demoschaal beschikbaar ⁴
Kolencentrales, hoog-ovengas gestookte energiecentrale	20-25	4-8	10-15%	40-50	1st of a kind 1 Mton/jaar ⁵
Grootschalige boilers en fornuizen petrochemie, raffinaderijen	10-15	0,2-1,0	10-15%	60-80	Gangbaar voor < 0,2 Mton/jaar, 1 st of a kind 1 Mton/jaar

2 Toekomstbeelden

2.1 Het algemene beeld in 2050

De Nederlandse industrie emitteerde in 1990 en 2014 respectievelijk 68 en 44 Mton CO₂. Ongeveer 85% van de huidige emissies vallen onder het EU ETS. Daarnaast wordt een deel van de restgassen van met name het hoogovenproces verbrand bij de energiesector en vallen ook deze emissies onder het ETS. Zoals aangegeven in Figuur 1 dient de emissie van de industrie met zo'n 85% te zijn gereduceerd ten opzichte van 1990 tot ongeveer 10 Mton/jaar.

Daarnaast zal de vraag naar bepaalde producten in 2050 duidelijk anders zijn dan nu. Om de klimaatdoelstellingen te halen zal het aanbod van fossiele benzine en diesel sterk moeten zijn gedaald, of wellicht zelfs tot nul zijn gereduceerd. Ook het aanbod fossiele scheepsbrandstoffen en kerosine voor de luchtvaart zal zeer sterk moeten dalen. Dit alles zal vergaande consequenties hebben voor sectoren als raffinage en petrochemie⁶.

³ ECN, 2011; IEA, 2013a; IEA, 2013b; SCCS, 2013. Voor H₂-productie: Valero refinery Porth Arthur USA op basis van VSA, https://sequestration.mit.edu/tools/projects/port_arthur.html

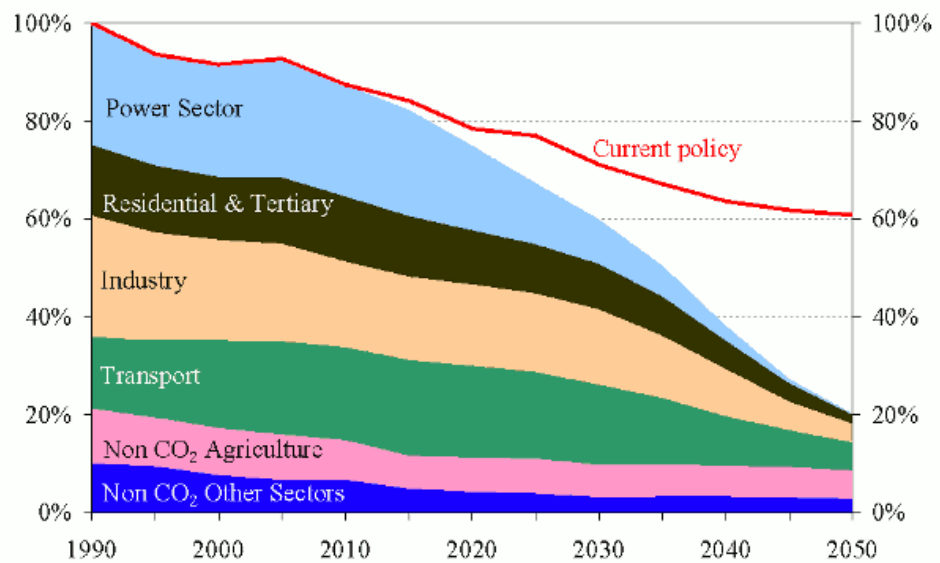
⁴ Voor afvang van CO₂ uit hoogovengas wordt binnen het ULCOS-consortium gedacht aan toepassing van een VPSA - Vacuum Pressure swing adsorption. Deze technologie wordt bij de Valero raffinaderij in Port Arthur in de VS gedemonstreerd.

⁵ Retrofit bij de oudere Boundary Dam kolencentrale in Canada, zie http://sequestration.mit.edu/tools/projects/boundary_dam.html

⁶ De EU heeft de ambitie om CO₂-emissies door scheepvaart met 50% te reduceren ten opzichte van 1990, terwijl wordt verwacht dat energiegebruik en CO₂-emissies van scheepvaart bij



Figuur 1 Possible 80% cut in greenhouse gas emissions in the EU (100% =1990)



Bron: http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050/index_en.htm

CCS (en CCU) zullen in het bereiken van de in de industrie benodigde reductie zeker een rol spelen, maar zullen niet het enige mechanisme zijn waarmee de CO₂-emissies van deze sector zal worden gereduceerd. In welke mate CCS zal worden toegepast hangt dan ook af van de beschikbaarheid en kosten van mogelijke alternatieven.

Voor de toekomst van de industrie is een aantal mogelijke ontwikkelingen te verwachten. Op basis van een ruwe analyse van trends in beleid en in technische ontwikkelingen is in Tabel 2 een inschatting gemaakt van de wijze waarop de verschillende Nederlandse industriële sectoren zich in de periode 2040-2050 zouden kunnen ontwikkelen wanneer zeer serieus wordt ingezet op verduurzaming en een broeikasgas emissiereductie van 80-95% in 2050.

Zoals uiteengezet in Tabel 2 is er voor de periode 2040-2050 een aanzienlijke industriële activiteit in de ferro basismetaalindustrie, chemie, voedingsmiddelenindustrie, papierindustrie en bouwmaterialenindustrie te verwachten. Nederlandse bedrijven in deze sectoren zijn leidend en toonaangevend in zowel technische ontwikkelingen als de kwaliteit van producten, daarnaast kunnen zij aansluiten bij een brede wetenschappelijke basis bij de universiteiten. Hun productieproces laat zich gemakkelijk en op een voor Nederland logische manier verduurzamen en/of koolstofarm maken.

autonome ontwikkelingen verdubbeld - een relatieve reductie van 75% - waardoor aardolieraffinaderijen minstens eenzelfde afname in productie zullen doormaken.

Tabel 2 Inschatting inzet CCS in de Nederlandse industrie in 2050

Nederlandse economie	Mton CO ₂		Nog operationeel in 2050? Waarom wel waarom niet		CCS?	Toegepaste alternatieven		
	In 1990	In 2014				Besparing	Hernieuwbaar direct	Groen gas
Totale Industrie	68,0	48,3						
Voedings-, genotmiddelenindustrie	4,4	4,5	Ja	– Grondstoffenbeschikbaarheid – NL-industrie mondiaal toonaangevende sector	Ja	X	X	X
Papierindustrie	1,6	1,0	Ja	Vanwege oud papier beschikbaarheid		X	X	X
Aardolie-industrie, raffinage	11,1	10,7	Beperkt	– Afnahme vraag brandstoffen wegvervoer – Gewenste reductie van emissies bij brandstofgebruik → over op LNG, biobrandstof				
Chemische industrie	34,5	16,9						
– <i>Petrochemie</i> ⁷		9	Beperkt	grondstofvraag sterk gereduceerd door recycling, grondstoffen deels biobased		X	X	X
– <i>Kunstmestindustrie</i>		2,5	Beperkt	– Aardgas - grondstof voor N-kunstmest -in EU is op – Productie o.b.v. goedkope hernieuwbare elektriciteit is economisch aantrekkelijker				
– <i>Overige chemische industrie</i>		5,4	Ja	NL-industrie mondiaal toonaangevende sector	Ja	X	X	X
Bouwmaterialenindustrie	3,1	1,7	Ja	Afstand tot afnemer		X		X
Basismetaleindustrie	10,2	10,6						
– <i>Ferro</i>		10,5		NL-industrie mondiaal toonaangevende sector Diepzeehaven geeft concurrentievoordeel	Ja	X		
– <i>Non-ferro (ex alu)</i>		0,1		NL-industrie mondiaal toonaangevende sector		X		X
Overige industrie ⁸	1,1	0,9	Ja			X	X	X

⁷ Hier alleen stoomkrakers (Sabic, DOW, Shell) en productie van aromaten bij raffinaderijen (Shell, ExxonMobil).

⁸ Deze groep omvat: Voedings-, genotmiddelenindustrie, Textiel-, kleding-, lederindustrie, Houtindustrie, grafische industrie, farmaceutische industrie, Rubber- en kunststofproductindustrie, Metaalproductenindustrie, Elektrotechnische industrie, Elektrische en elektron. Industrie, Elektrische apparatenindustrie, Machine-industrie, Transportmiddelenindustrie, Overige industrie en reparatie.

Staalproductie

De productiecapaciteit op locatie IJmuiden is anno 2050 op hetzelfde niveau als in 2010-2015⁹. Voor ruw ijzerproductie is overgestapt op het Hisarnaproces, in combinatie met CCS/CCU. Het Hisarnaproces is 20% energiezuiniger dan het klassieke hoogovenproces en levert geconcentreerde CO₂ op die na zuivering, droging en compressie direct kan worden geïmplementeerd of opgeslagen.

Toepassing van biomassa is vanwege het prijsverschil met kolen, de beperkte beschikbaarheid van de benodigde grote hoeveelheden duurzame biomassa¹⁰, de hogere toegevoegde waarden van deze biomassa in andere processen en de voor het proces minder gunstige eigenschappen minder aantrekkelijk.

Chemische industrie

Vanwege de hoge mate van recycling van plastics - de verreweg grootste toepassing van chemische grondstoffen in de huidige economie - is de primaire productie in de chemie sterk gekrompen. Er is des te meer bedrijvigheid op gebied van inzameling, (na)scheiding en recycling.

De chemische industrie is voor primaire productie verder zoveel mogelijk overgestapt op grondstoffen uit biomassa. De gebruikte biomassa omvat een compleet palet aan oliehoudende en vooral suiker- en/of zetmeelhoudende akkerbouwgewassen, hout en reststromen/bijproducten. Productieroutes zijn onder meer fermentatie van suikers en oliën naar chemische grondstoffen zoals ethanol en thermochemische processen als pyrolyse en vergassen.

Innovaties als procesintensivering, kristallisatie in plaats van destillatie, membraandestillaties etc. zijn doorgevoerd. Hierdoor is - bij gelijkblijvende productie - het energiegebruik in de sector gedaald met 35-40% ten opzichte van 2005 (CEFIC, 2013).

Bij een aantal processen - vergassing, fermentatie - wordt CO₂ uit procesgassen afgevangen voor opslag of gebruik als grondstof. Grondstofgebruik in de chemie voor polycarbonaten en polyolen is een vraagteken - de daarin verwerkte CO₂ is niet per se duurzaam vastgelegd zolang de recycling van de eindproducten waarin ze worden verwerkt niet 100% sluitend is.

Bouwmaterialenindustrie

In de bouwmaterialenindustrie is cementklinker vervangen door op CO₂-gebaseerde carbonaten en op krijt - magnesiumverbindingen - gebaseerde producten. Andere deelsectoren, zoals productie van kalkzandsteen, gips, glas en steenwol zijn verduurzaamd door overschakeling op hernieuwbare energie, hetzij rechtstreeks ingezet voor stoomproductie hetzij in de vorm van elektriciteit of groen gas voor hoge temperatuurwarmte.

⁹ Ondanks dat het te verwachten is dat afnemende vraag naar staal in de EU en hogere recyclingpercentages van schroot op EU-niveau zal leiden tot een afbouw van het productiecapaciteit voor primair staal in de EU.

¹⁰ Mondiaal energiegebruik voor ruw ijzer productie bedraagt 20-25 EJ/jaar. Mondiale beschikbaarheid aan houtachtige biomassa bedraagt misschien 100 EJ/jaar. <https://coalactionnetworkaotearoa.wordpress.com/2013/04/24/can-we-make-steel-without-coal/>. Procestemperatuur wordt niet gehaald met onbehandelde of getorreficeerde biomassa.



Verplaatste en sterk ingekrompen sectoren

Naar onze inschatting is NH_3 -productie in 2050 uit Nederland verdwenen vanwege het depleteren van gasvoorraden in de EU. Daarmee verdwijnt ook de grondstof voor deze industrie. De mondiaal leidende route voor ammoniakproductie is productie van waterstof via waterelektrolyse op basis van goedkope hernieuwbare elektriciteit. Dit zal naar verwachting niet in Nederland zijn.

Emissies bij raffinaderijen zijn sterk afgenomen vanwege de sterk gereduceerde vraag naar aardolieproducten.

De traditionele petrochemie is deels vervangen door productieroutes gebaseerd op biomassa, maar is deels ook gekrompen vanwege de sterk verbeterde inzameling en verwerking van plastic afval.

Warmte

Lage temperatuurwarmte ($< 250^\circ\text{C}$) in de voedingsmiddelenindustrie, papierindustrie en chemie wordt geleverd uit verschillende hernieuwbare bronnen - geothermie, elektriciteit, eventueel biomassa of uit biomassa en biomassa-afvalafgeleide brandstoffen (groen gas, pyrolyseolie).

Hoge temperatuurwarmte zoals bijvoorbeeld gevraagd in deelsectoren van de bouwmaterialenindustrie, wordt geproduceerd op basis van groen gas of hernieuwbare elektriciteit (vlamboogoven).

Energievraag naar temperatuurniveau:

Een uiteenzetting van het energiegebruik (PJ/jaar) naar soort warmte en naar temperatuurniveau.

	CBS, 2013		Naar temperatuurniveau $^\circ\text{C}$, volgens CBS, 2006 en naar eigen inschatting				Inzet restgas
	Totaal waarvan	Stoom uit WKC	<100	100-250	250-500	>500	
Chemie	257	88	13	28	69	147	102
Raffinage	140	23	0	0	60	80	112
	397	111	13	28	129	227	215
Basismetale ferro	69	2,7			3	67	51
Basismetale non-ferro	3	0,0				3	
Metaalproducten	12	0,1	6			6	
	84	3	13		3	68	
Papier en karton	17	11		17			
V&G	52	17	26	27			
Textiel	3	0,5	3				
Bouwmaterialen	18,5	0,3		1		17	
Overige industrie	10	0,2			6	4	
	101	28	29	45	6	21	
Totaal	582	142	54	73	138	316	



De warmtevraag > 500°C betreft over het algemeen ondervuring in fornuizen in de procesindustrie of processen in de basismetaalindustrie:

- Hoge temperatuurwarmtevraag in de chemie is voornamelijk gerelateerd aan ondervuring van fornuizen van stoomkraker en reformers voor productie van methanol, ammoniak en waterstof. Zeker bij stoomkrakers wordt de warmtevraag grotendeels gedekt door restgassen uit het proces zelf. Specifieke bedrijven met hoge temperatuurwarmtevraag zijn bijvoorbeeld Nedmag (aardgas) en ESD (elektriciteit).
- Raffinageprocessen als destillatie, ontwaveling, reforming, catcracking en visbreaking vragen hoge temperaturen, opgewekt met restgas of overige aardolieproducten ondervuurd fornuizen. Ondervuring is vaak geïntegreerd met stoomproductie uit restwarmte in de rookgassen van de fornuizen.
- In de basismetaalindustrie is de warmtevraag voornamelijk geconcentreerd bij productie en verwerking van ruw ijzer bij Tata in IJmuiden, zoals nodig voor cokesproductie, verhitten van ijzererts en (zuurstof verrijkte) lucht. Deze vraag wordt grotendeels gedekt met 'restgassen', kooks en steenkool. Door temperatuur en de aard van de processen is gebruik van deze energiedragers onvermijdelijk. Er zijn verder kleinere warmtevragen bij walserijen en andere bewerkingen. Hiervoor wordt naast restgassen ook aardgas gebruikt.
- In de non-ferro-industrie is hoge temperatuurwarmtevraag gekoppeld aan smelten en gieten van metalen.
- In de bouwmaterialenindustrie is hoge temperatuurwarmte nodig in ovens voor productie van glas, glaswol, steenwol, keramische producten en cementklinker. Behalve bij keramische producten gaat het vaak om specifieke bedrijven, zoals ENCI Maastricht voor cementklinker, Rockwool Roermond voor steenwol en Isover glaswol Etten-Leur.

De warmtevraag op temperaturen lager dan 500°C heeft vooral betrekking op drogen (80 PJ/jaar) en destilleren (140 PJ/jaar):

- Droogprocessen worden onder meer toegepast in voedingsmiddelenindustrie (indikken, drogen met warme lucht sproeidrogen), chemie, papierindustrie (stoomdrogen) en bouwmaterialenindustrie. Voor drogen worden zowel stoom als hete lucht van minimaal ongeveer 100 tot maximaal ongeveer 300°C gebruikt.
- Destillatie wordt voor zover bekend enkel toegepast in raffinaderijsector en chemie.
- Overige warmtevrugnende processen zijn bijvoorbeeld wassen, schillen, blancheren, pasteuriseren, koken en steriliseren in de voedingsmiddelenindustrie of wassen, bleken en verven in de textielindustrie.

Een uitgebreidere uiteenzetting over warmte in de industrie is opgenomen in Bijlage C.

Met het - eerder beschreven - verwachte verdwijnen van ammoniakproductie uit aardgas en de sterke afname van CO₂-emissies bij het sterk verminderde aantal raffinaderijen (met bijbehorende afname van waterstofproductie- en stoomkrakers) zal het aantal grote gasgestookte fornuizen sterk afnemen. Mogelijk wordt een deel van de raffinageproductie vervangen door productie van biobrandstoffen of wordt een deel van de raffinagecapaciteit gebruikt voor verwerking van biomassa tot transportbrandstoffen. Een voorbeeld van de laatste mogelijkheid is de verwerking van plantaardige olie in de diesel hydrotreater bij de raffinaderij van PREEM in Göteborg¹¹.

Een groot deel van de warmtevraag in de industrie is in de orde van enkele MW tot enkele tientallen MW. Dit zijn vermogensbereiken waar toepassing van CCS, volgens inschattingen van o.a. Ecofys, ook in 2050 duurder is dan andere opties voor CO₂-reductie - zie ook Bijlage A.

¹¹ Zie bijvoorbeeld:
www.topsoefuelcell.com/business_areas/refining/-/media/PDF%20files/Refining/paper_industrial_scale_prod_of_renewable_diesel.ashx



Vergelijking kosten:

CO₂-afvang bij gasgestookte fornuizen en ketels (zie Bijlage B.3) kost volgens (Ecofys, 2013) anno 2050 tussen € 80/ton voor grote vuurhaarden (0,5 Mton/CO₂) tot €110/ton voor een fornuis van ongeveer 50 MW en € 150-170 per ton CO₂ voor vuurhaarden van ongeveer 10 MW. Kosten voor transport en opslag bedragen minstens € 15/ton CO₂.

De onrendabele top voor stoomproductie met een biomassa gestookte ketel van 5-10 MW bedragen conform de huidige SDE+ uitgangspunten in de orde van grootte van € 115/ton CO₂.

2.2 CCS en industrie

Afgevangen en geconsumeerde CO₂-vrachten

CCS wordt in dit toekomstbeeld afgevangen bij een beperkt aantal specifieke bronnen in de ferro basismetaalindustrie, chemie en voedingsmiddelenindustrie, samen in de orde van grootte van 10-15 Mton/jaar. Afvang vindt mogelijk ook plaats bij bronnen in andere sectoren (bijvoorbeeld bij groen gas productie), maar dat is in deze notitie verder buiten beschouwing gelaten.

Tabel 3 Overzicht indicatieve emissies en gebruiken (cijfers in Mton/jaar)

	CO ₂ - generatie	CO ₂ - afvangst	CO ₂ - inzet	Naar CCS
Voedings-, genotmiddelenindustrie	-	-	-	-
Papierindustrie	-	-	-	-
Raffinaderijen	1-2 (?)	0,3 - 0,7 (?)		0,3 - 0,7
Chemische industrie		Ethanol nu: 0,3-0,5	-0,5	Netto 0?
Basismetaalindustrie				
- Ferro	8	8		8
- Non-ferro (ex alu)				
Bouwmaterialenindustrie			-1,5	-1,5
Overige industrie	-	-	?	
Overige CO ₂ -gebruikers, o.a. glastuinbouw			-0,5 (huidig niveau)	-0,5
Som - netto CO ₂ voor CCS			±2,5	±5 - ±10

Toelichting:

Cijfers voor CO₂-emissies bij raffinaderijen en ferro basismetaalindustrie zijn gebaseerd op huidig emissieniveau. Bij raffinaderijen is verdisconteerd dat scheepsbrandstofproductie alleen al moet 75% worden gereduceerd (voor transportbrandstoffen voor wegvervoer meer), bij ferro metaalindustrie dat het Hisarnaproces 20% zuiniger is. CO₂-afvang bij raffinaderijen is beperkt tot de grotere fornuizen, zoals dat van atmosferische destillatie.

Een deel van deze CO₂ wordt vervolgens nuttig gebruikt: in de chemie en de bouwmaterialenindustrie wordt - uitgaande van huidige productieniveaus - ongeveer 1,5 Mton/jaar aan CO₂ gebruikt als grondstof¹². Daarnaast wordt ongeveer 0,5 Mton/jaar aan CO₂ uit koolstof van biologische oorsprong gebruikt voor glastuinbouw, voedingsmiddelenindustrie en als oplosmiddel.

¹² Zie: <https://www.vnci.nl/Content/Files/file/Downloads/Routekaart%20Chemie%202012-2030.pdf>



Door de sterke reductie van CO₂-generatie door wegvallen van de kunstmest-industrie en raffinaderijen en doordat een deel van de resterende gevormde CO₂ nog kan worden gebruikt als grondstof, blijft er naar schatting uiteindelijk ongeveer 10 Mton/jaar aan CO₂ voor opslag over uit met name de ferro basismetaal industrie en de chemie. Vanuit de chemie is dit deels CO₂ afkomstig uit biomassa.

Afvoer en opslag

De niet nuttig toepasbare afgevangen CO₂ wordt dan middels een netwerk in de regio's rond Rotterdam en IJmuiden/Amsterdam naar één punt bij IJmuiden verzameld en vandaar uit naar gedepleteerde gasvelden en olievelden op de Noordzee getransporteerd voor eeuwigdurende opslag (EBN/Gasunie, 2010). Een aantal velden ligt relatief dicht bij de kust (P- en Q-Blokken), maar de meeste opslagcapaciteit ligt noordelijk in de Noordzee, in de K- en L-blokken. Geschat wordt dat de opslagcapaciteit in de P- en Q-blokken 200 Mton bedraagt en dat de opslagcapaciteit in de K- en L-blokken 1.200 Mton bedraagt. Ruim voldoende capaciteit voor de hierboven ingeschatte 10 Mton/jaar.

Zeker in de demo- en pre-commerciële fase zal opslag zoveel mogelijk in de nabijheid van de kust gedaan moeten worden, om de transportafstanden en daarmee de kosten zo laag mogelijk te houden. Nadat de velden in de nabijheid van de kust gevuld zijn, zal het transportnetwerk uitgebreid moeten worden in de richting van de K- en L-blokken, waar de meeste opslagcapaciteit zich bevindt. De uitbreiding van de infrastructuur richting de K- en L-blokken zal hoe dan ook noodzakelijk zijn om de gehele hoeveelheid afgevangen CO₂ op te slaan (EBN/Gasunie, 2010).

CO₂-producerende chemische bedrijven en consumenten van CO₂ zijn langs dit netwerk geconcentreerd. De centrale pijpleiding loopt eventueel landinwaarts naar het Ruhrgebied voor afvoer van CO₂ uit industriële bronnen uit die regio.

Geconcentreerde bronnen in de Noordelijke provincies zijn aangesloten op een vergelijkbare centrale pijpleiding in Duitsland voor afvoer van CO₂ uit industriële bronnen rond Bremen en Hamburg. Het tracé van Groningen/Drenthe naar Bremen is hemelsbreed iets korter dan de afstand tot IJmuiden, maar loopt door een aanzienlijk dunner bevolkt gebied en is daardoor makkelijker aan te leggen.

CCS bij andere sectoren zoals energiecentrales zijn hier niet beschouwd, maar zouden ook nog forse stromen aan CO₂ kunnen opleveren, zie bijvoorbeeld het recente PBL-rapport 'Vormgeving van de energietransitie'¹³.

Aardgascentrales zijn als pieklasteenheid en reservevermogen niet uitgerust met CO₂-afvanginstallaties¹⁴.

¹³ Te vinden op website: www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2016-vormgeving-van-de-energietransitie-1749.pdf

¹⁴ Volgens de energiesector zelf is het niet waarschijnlijk dat CCS zal worden toegepast bij nieuwe installaties omdat voor afdekken van een toenemende elektriciteitsvraag vooral zal worden ingezet op hernieuwbare bronnen en niet op nieuw thermisch vermogen. De beperkte inpasbaarheid van CO₂-afvang (beperking op- en afschakel vermogen, beperkte mogelijkheden voor deellastbedrijf) en mogelijkheden voor CO₂-reductie door biomassa meestoken als (ook economisch) concurrerende optie zonder beperkingen voor de regelbaarheid maken CCS waarschijnlijk onaantrekkelijk voor deze sector. Zie: www.ce.nl/publicatie/ccs_bittere_noodzaak_bij_stringent_klimaatbeleid/1731



Figuur 2 Nederlandse economische zone op de Noordzee met mogelijke CO₂-opslaglocaties



Bron: EBN_Gasunie, 2010.

Het huidige moratorium op opslag van CO₂ op land is gehandhaafd.

Ontstaan van het netwerk

De opbouw van het CO₂-transportnetwerk is al in 2005 gestart en is in de loop van de jaren verder uitgebreid vanuit de bestaande OCAP-pijpleiding en initiatieven rond Rotterdam en Maasvlakte.

Het huidige OCAP-systeem bestaat uit een pijpleidingsysteem met een hoofdleiding van meer dan 80 km vanaf Botlek naar Schiphol en de Amsterdamse haven. De hoofdleiding heeft een transportcapaciteit van ongeveer 1 Mton/jaar en kan CO₂ onder een druk van ongeveer 20 bar transporteren. De pijpleiding wordt beleverd vanuit de Shell PER+ en Abengoa fabrieken in de Botlek. Beide fabrieken samen kunnen jaarlijks maximaal 1,3 Mton/jaar (1,0 + 0,3 Mton/jaar) aan de pijpleiding leveren. Vanuit de pijpleiding worden een kleine 600 tuinders beleverd met ongeveer 400 kton/jaar aan CO₂. De levering vindt hoofdzakelijk in de zomer - in het groeiseizoen - plaats. Het leidingsysteem wordt geëxploiteerd door Linde Gas en VolkerWessels.

Bij de uitrol van CCS in Nederland is de OCAP-leiding via een 20 km lange pijpleiding aangesloten op bestaande pijpleidingen naar een gasveld en olieveld in vak Q8-A vlak onder de kust bij IJmuiden (opslagcapaciteit 9-10 Mton) en vak Q1 (opslagcapaciteit 90-100 Mton). De capaciteit van deze leidingen is, afhankelijk van het toegestane drukregime, tussen de 2 en

10 Mton per jaar. De betreffende velden waren tussen 2015 en 2020 leeg geproduceerd en beschikbaar voor opslag van CO₂.

Figuur 3 Tracé van OCAP-leiding met bronnen, afnemers en mogelijke koppeling naar offshore eindbergingen



Bron: www.ocap.nl/images/stories/kaart_nl_nov2010_big.jpg

Transport via bestaande gas- en olieleidingen vanaf IJmuiden naar de gas- en olievelden in vakken Q1 en Q8 en de navolgende injectie in deze velden vergen volgens (EBN_Gasunie, 2010) respectievelijk:

- In een tweede fase van de uitrol is bij Tata Steel IJmuiden uitwassen van CO₂ uit hoogovengas geïmplementeerd, zoals dat bij het bedrijf en bij de NUON energiecentrales Velsen 25 en IJmuiden 1 werd geleverd. Dit had als voordeel dat de stookwaarde van het stookgas toenam en thermisch en elektrisch rendement van genoemde eenheden toenam. Tata Steel ligt vrijwel aan het begin van de transportleidingen naar de olievelden en het gasveld in respectievelijk Q1 en Q8.

Vanwege de opslagcapaciteit in de hierboven genoemde Nederlandse offshore gasvelden en olievelden zal zeker tot aan 2050 nog geen aansluiting op de in de gebruikszones van Groot-Brittannië en Noorwegen liggende gas- en olievelden op de Noordzee. Deze velden bleken anders als eerst gesuggereerd geen kansen voor gebruik van CO₂ voor EOR te bieden¹⁵. Bovendien is de



maatschappelijke visie anno 2050 dat EOR minder wenselijk is in een economie waarvan de CO₂-emissies minstens 80% lager moeten liggen dan in 1990.

2.3 Regelgeving en beleid anno 2050

Met de EU CCS Directive en aanvullend beleid van lidstaten zijn indertijd de wettelijke barrières geslecht rondom vergunningprocedures, wettelijke aansprakelijkheid bij lekkage, eisen aan abandonnering en fondsvorming voor eventuele gebreken in de toekomst.

De Nederlandse overheid heeft bij het uitrollen van CCS een actieve rol gespeeld:

- Ze heeft een publiek-private samenwerking geïnitieerd voor het organiseren van CO₂-infrastructuur met voldoende transportcapaciteit en voldoende verbindingsmogelijkheden tegen acceptabele kosten voor alle potentiële gebruikers. Er is een exploitatiemaatschappij voor het transportnetwerk opgericht zoals dat eerder ook is gebeurd voor warmtenetwerken op land. De overheid is aandeelhouder in deze maatschappij, net als de overheid directe aandeelhouder is in NAM en via EBN aandeelhouder is in andere gas- en oliewinningsprojecten.
- Ze heeft samen met andere overheden financiële middelen als investeringssubsidies beschikbaar gesteld voor de aanleg van de benodigde infrastructuur en heeft realisatie van aanleg versneld door het opheffen van wettelijke blokkades en belemmeringen.
- Ze heeft een routekaart opgesteld voor de uitrol van CO₂-afvang, infrastructuur en opslaglocaties met daarin duidelijk vastgelegde doelen voor de rol van CCS in klimaatbeleid.
- Ze heeft een wettelijk kader ontwikkeld dat het beschikbaar houden van geschikte offshore faciliteiten/infrastructuur en velden voor CO₂-opslag verplicht stelde.
- Daarnaast zijn in het kader wettelijke aansprakelijkheden, verplichtingen en randvoorwaarden helder geregeld. Er is bijvoorbeeld duidelijk omschreven welke maatregelen en procedures moeten worden genomen om risico's tijdens exploitatie en na abandonneren te minimaliseren. Ook is er net als bij gas- en oliewinning een fonds voor afdekken van eventuele financiële, materiële en fysieke schades ontstaan tijdens exploitatie, tijdens en na abandonnering.
- Ze heeft financiële instrumenten ontwikkeld voor stimulering van en ondersteuning van investeringen in CO₂-afvang bij bepaalde bronnen - niet te duur, maatschappelijk geaccepteerd, en daar waar geen andere decarbonisatie-opties beschikbaar zijn.
- Conform de aanbevelingen uit de evaluatie van de CCS Directive uit 2009 is een verplichting ingesteld voor CCS-afvang bij relevante industriële bronnen.
- Ze heeft voor maatschappelijk draagvlak gezorgd door:
 - entameren van het maatschappelijk debat over risico's, randvoorwaarden en welke varianten voor CO₂-afvang en -opslag wel en niet aanvaardbaar zijn voor maatschappelijke partijen;
 - heldere keuze voor CCS als CO₂-emissiereductie maatregel bij grootschalige CO₂-puntbronnen die maatschappelijk gezien onverdacht zijn;
 - zich beperken tot CO₂-opslag in offshore olie- en gasvelden.



3 Recente ontwikkelingen en lessen voor beleid

3.1 Recente ontwikkelingen buiten de EU

In Noord-Amerika zijn in de afgelopen jaren drie significante CCS-projecten opgestart:

- afvang van 1 Mton/jaar aan CO₂ bij een geretrofite oudere Boundary Dam kolencentrale in Canada met Cansolv wasvloeistof;
- afvang van 1 Mton/jaar aan CO₂ bij drie waterstoffabrieken bij de Shell Scotford Upgrader voor teerzandolie met geactiveerde amine wasvloeistof ADIP-X¹⁶;
- afvang van 1 Mton/jaar aan CO₂ bij twee H₂-fabrieken van Valero in Port Arthur in de VS met Vacuum Pressure swing adsorption.

Alle projecten leveren CO₂ voor EOR en kunnen door de gegenereerde opbrengsten uit additionele aardolieproductie (tot voor kort?) economisch uit, ondanks afwezigheid van beprijzing van de CO₂.

3.2 Recente ontwikkelingen in de EU

In de afgelopen paar jaren zijn daarentegen in de EU en in Nederland zelf een aantal ver ontwikkelde projecten gestrand:

- Grootschalige demonstratie van CO₂-afvang bij ruw ijzer productie onder het ULCOS programma van de Europese staalindustrie en de EU is door de eigenaar van de aan te passen hoogovens (Archelor Mittal) afgeblazen.
- Demonstratieprojecten voor grootschalige opslag in Barendrecht, DSM Geleen en Jämschwalde in Duitsland zijn door maatschappelijke tegenstand gesneuveld.
- In Groot-Brittannië heeft de Britse overheid zeer recent een subsidie van 1 miljard £ voor de Peterhead en White Rose/Drax CCS-projecten teruggetrokken, vanwege een verandering in beleid. De Britse overheid zet sinds kort in op nucleaire energie als middel om CO₂-emissies te reduceren en bouwt subsidies voor diverse andere maatregelen af¹⁷.
- Het grootschalige ROAD-demonstratieproject bij de E.On MPP3-centrale is vooralsnog door E.On in de mottenballen gedaan vanwege de te lage ETS-prijs in relatie tot de te maken kosten, waardoor het project niet voldoende renderend is.
- Zoals een IEA-rapport uit 2013 aangeeft (IEA, 2013b) zijn meer algemeen de kosten voor CCS-projecten veel hoger gebleken dan is een paar jaar geleden werd gedacht toen veel projecten werden geïnitieerd¹⁸. Niet alleen zijn prijzen van materialen gestegen, maar ook blijkt uit gedetailleerde ontwerp-studies de benodigde investering aanzienlijk hoger te zijn dan werd verondersteld. Met name kosten voor pijpleidingen blijken aanzienlijk hoger uit te vallen vanwege geografische omstandigheden. Infrastructuurkosten kunnen daarnaast fors hoger uitvallen wanneer wordt uitgegaan van een groeiscenario waarin in de loop der tijd meerdere bronnen worden aangesloten.

¹⁶ Zie: www.globalccsinstitute.com/projects/quest

¹⁷ Zie www.theguardian.com/environment/2015/nov/25/uk-cancels-pioneering-1bn-carbon-capture-and-storage-competition;
<https://sequestration.mit.edu/tools/projects/peterhead.html>

¹⁸ Zie: www.iea.org/publications/insights/insightpublications/21stCenturyCoal_FINAL_WEB.pdf



Een herstart van het ROAD-project wordt overwogen met oog op EOR in gasveld Q16-Maas¹⁹. Dit veld zou na depletie kunnen worden gebruikt als opslagbuffer voor levering van CO₂ aan glastuinbouw in de zomermaanden, wanneer de vraag de potentiële CO₂-levering vanuit Abengoa en Shell Pernis overtreft. Er wordt ook gedacht aan verdere uitrol van CO₂-levering vanuit ROAD naar andere gas- en olievelden in de regio voor EOR.

Een aantal maatschappelijke organisaties en politieke partijen heeft inmiddels stelling genomen tegen EOR met CO₂ uit de MPP3-kolencentrale en gebruik van gemeenschapsgeld voor winning van fossiele energie²⁰.

Op gebied van beleid heeft de EU de CCS Directive opgesteld. De Directive geeft gedeeltelijk invulling aan het wetgevend kader voor CCS bij energiecentrales, maar heeft geen betrekking op CCS bij industriële bronnen. De Directive is op nationaal niveau geïmplementeerd en is Europees niveau geëvalueerd. De verwachting is dat de op basis van de evaluatie geformuleerde aanbevelingen zullen worden verwerkt in een aanpassing van de Directive. De aanbevelingen zijn onder andere:

- ontwikkel een systeem voor financiële ondersteuning aan opzetten en exploiteren van infrastructurele netwerken voor transport en opslag van CO₂;
- definieer een doelstelling voor CO₂-reductie middels CCS op Europees niveau en ontwikkel een routekaart op EU- en lidstaatniveau waarin de beoogde rol van CCS in energiesector en industrie duidelijk is verrat.
- de eis dat nieuwe installaties ‘capture ready’ moeten zijn dient te worden versterkt en dient ook van toepassing te worden voor industriële installaties;
- ontwikkel een beleidsverplichting voor toepassen van CCS vanuit het idee deze verplichting te gaan opleggen wanneer CO₂-emissies niet voldoende snel worden gereduceerd;
- ontwikkel een kaart met een overzicht van mogelijke opslaglocaties en hun karakteristieken.

Financiële ondersteuning van infrastructurele initiatieven lijkt een plek te gaan krijgen in de NER400-regeling (<http://ner400.com/>).

3.3 Lessen

Al met al zijn de huidige initiatieven in de EU en Noord-Amerika nog steeds gekoppeld aan CO₂-bronnen en toepassingen die in de EU maatschappelijk als ongewenst worden gezien in relatie tot een toekomstige economie waarvan de CO₂-emissies minstens 80% lager moeten liggen dan in 1990. Het is daarom de vraag in hoeverre deze initiatieven de opmaat kunnen vormen voor een grootschalige uitrol van CCS.

In tegenstelling hiermee bleek tijdens twee presentaties in Nederland²¹ en het Europese Parlement dat CCS bij industriële bronnen door alle opinieleiders en

¹⁹ Zie bijvoorbeeld: www.tuinbouw.nl/sites/default/files/15051.03%20CO2%20voor%20de%20Nederlandse%20glastuinbouw.pdf; www.kasalsenergiebron.nl/nieuws/extra-co2-van-road-project-draagt-bij-aan-verduurzaming-glastuinbouw/; <http://energieia.nl/nieuws/660996-1512/road-in-zee-met-oranje-nassau-voor-aangepast-ccs-project>

²⁰ Zie bijvoorbeeld: <https://rotterdam.partijvoordedieren.nl/vragen/sv-bizarre-wending-road>

²¹ Zie verslag workshop bij Ministerie van Economische Zaken dd. 13 november 2014, www.ce.nl/publicatie/ccs_bittere_noodzaak_bij_stringent_klimaatbeleid/1731



belanghebbenden, inclusief milieuorganisaties, als acceptabel wordt beschouwd.

Tijdens de presentatie van het voor CAN Europe opgestelde rapport *“Technological developments in Europe, a long-term view of CO₂ efficient manufacturing in the European Union”* bij het Europese Parlement werd door milieuorganisaties expliciet aangegeven dat CO₂-opslagcapaciteit gereserveerd dient te worden voor industriële activiteiten die niet op een andere manier tegen aanvaardbare kosten koolstofextensiever kunnen worden gemaakt²².



Een ander belangrijk knelpunt is de lage ETS-prijs waardoor ook in principe goedkope CO₂-afvang bij geconcentreerde puntbronnen als ammoniakproductie economisch niet rendabel te maken is.

De rentabiliteit en praktische implementeerbaarheid worden momenteel nog sterk belemmerd door ontbreken van een transport- en opslagstructuur waarmee afgevangen CO₂ tegen acceptabele kosten kan plaatsvinden. Een industriële initiatiefnemer zal om de CO₂ kwijt te kunnen in de huidige situatie ook moeten investeren in een pijpleiding of schip en in opslagfaciliteiten.

In het kader van verschillende studies is door potentiële leveranciers van CO₂ voor opslag echter diverse malen aangegeven dat zij zich niet verantwoordelijk voelen voor de afvoer en opslag van de afgevangen CO₂.

Over het algemeen worden als randvoorwaarden aangegeven:

- het bedrijf - industrieel bedrijf of energiebedrijf - is bereid CO₂ af te vangen en geschikt te maken voor transport en opslag, maar wil geen verdere bemoeienis na afleveren van de gereede CO₂ aan de poort;
- kosten voor afvang en opwerking dienen te worden gedekt, of door ETS-prijs of door financiële ondersteuning.

De uitspraken maken duidelijk dat zolang er geen infrastructuur is, CCS niet van de grond zal komen.

Volgens woordvoerders van industrie, overheid en kennisinstituten kan CCS aan de andere kant voor de industrie een vestigingsfactor zijn als de ETS-prijs hoger wordt en in Nederland stabiel kan blijven door voldoende opslagvelden en aanwezigheid van infrastructuur voor CO₂-transport.

De bestaande OCAP-leiding en de leidingen richting olievelden in vak Q1 en gasveld in vak Q8 bieden in principe een goed uitgangspunt voor het realiseren van de benodigde infrastructuur.

De toegevoegde waarde van een beschikbare infrastructuur wordt geïllustreerd door het gegeven dat juist de beschikbaarheid van de OCAP-leiding en de mogelijkheden voor CO₂-afzet in de glastuinbouw via deze leiding ertoe heeft geleid dat Abengoa kon worden aangesloten en dat wordt gestudeerd op aansluiten van andere industriële bronnen¹⁹.

²² Zie: www.facebook.com/media/set/?set=a.449228372715.251412.338896932715;www.caneurope.org/docman/archive/1716-steel-paper-and-cement-identifying-breakthrough-technologies-oct-2010/file

4 Beleidsaanbevelingen en mogelijke acties om CCS te versnellen

De recente ontwikkelingen op het gebied van beleid en grootschalige projecten en de aanbevelingen in diverse recente onderzoeken bevatten een duidelijke lijst met mogelijke acties.

Belangrijkste acties zijn:

- Start met het opstellen van een nationale routekaart waarin de rol van CCS duidelijk is omschreven en bouw garantie in dat - voor CCS geformuleerde doelen en ambities - ook op langere termijn gehandhaafd blijven - anders dan in Groot-Brittannië. Onderdeel van de ontwikkeling van de routekaart zijn bijvoorbeeld:
 - onderzoek welke olie- en gasvelden geschikt zijn voor opslag, om tot een realistisch opslagpotentieel te komen;
 - ga na welke faciliteiten op deze locaties en welke pijpleidingen eventueel geschikt zijn of geschikt kunnen worden gemaakt voor CO₂-transport en -opslag;
 - onderzoek mogelijke additionele pijpleidingtracés en ga na welke eventuele barrières er eventueel zijn vanuit ruimtelijke ordening en hoe die eventueel opgelost kunnen worden;
 - breng schattingen van benodigde investeringen voor nieuwe infrastructuur, of voor aanpassen van bestaande infrastructuur, in kaart en ga na - bij bestaande leidingen samen met de exploitant - hoe de benodigde financiële middelen kunnen worden gegenereerd;
 - ontwikkel een beleid waarbij - voor opslag geschikte offshore gasvelden en olievelden- voor CCS beschikbaar blijven;
 - stel financiële middelen beschikbaar om kosten voor beschikbaar houden van deze velden, of ontwikkel beleid waarbij financiële middelen (bijvoorbeeld uit gasopbrengsten) voor overheid en/of exploitant beschikbaar komen;
 - breng de beschikbaarheid van (rest)warmtebronnen en CO₂-bronnen bij kandidaat-industrieën in kaart en duidt aan welke industrieën het meest kansrijk zullen zijn;
 - voer eerste orde technische en financiële haalbaarheidsstudies naar concrete opties bij de industrie uit.
- Focus op CCS bij de industrie en niet op CCS bij energiebedrijven;
- Start na vaststellen van de routekaart, met het opzetten van een publiek-private samenwerking voor het organiseren van CO₂-infrastructuur, met voldoende transportcapaciteit en voldoende verbindingsmogelijkheden, tegen acceptabele kosten voor alle potentiële gebruikers. Richt een exploitatiemaatschappij voor het transportnetwerk op, zoals dat eerder ook is gebeurd voor warmtenetwerken op land. Zorg dat de overheid aandeelhouder is in deze maatschappij, zoals de overheid nu ook directe aandeelhouder is in de NAM, en via EBN aandeelhouder is in andere gas- en oliewinningsprojecten.
- Ontwikkel financiële instrumenten voor ondersteuning van exploitatie van afvang en voor het openhouden van -voor transport en opslag geschikte- pijpleidingen en gasvelden/olievelden.
- Overweeg opties om CCS bij bepaalde industrieën op termijn te verplichten, met financiële compensatie voor het geval de ETS-prijs te laag blijft om het rendabel te maken.



Daarnaast kan introductie van CCS worden versneld met generiek beleid dat leidt tot verhoging van de prijs op CO₂, zoals:

- Op EU-niveau zorgen voor een hogere CO₂-prijs binnen het ETS:
- Nationaal: een (verhoging van de) belasting of heffingen op de uitstoot van CO₂. Introductie van een CO₂-belasting op energie. Dit kan een vast tarief zijn, zoals in Zweden wordt toegepast.

Of een tarief dat varieert met de CO₂-prijs binnen het ETS, om een minimum prijsniveau van CO₂-uitstoot te garanderen. Een dergelijk systeem wordt sinds 2013 toegepast in het Verenigd Koninkrijk (de Climate Change Levy, die bestaat uit een basisbedrag, de main rate, aangevuld met een CO₂-prijs toeslag, de carbon price support rate, voor elektriciteitsproductie uit gas, LPG en kolen²³).

- Introductie van een Carbon Added Tax (CAT). Deze maatregel legt belasting op producten precies op dat onderdeel van het product dat aan CO₂-emissie gelinked zit volgens het principe van ‘de vervuiler betaalt’ en dus niet zoals nu op op arbeid. Deze verschuiving maakt arbeid goedkopen en levert daardoor werkgelegenheid op.

²³ www.gov.uk/guidance/climate-change-levy-application-rates-and-exemptions



CE Delft, 2010

H.J. Croezen, M. Korteland

Technological developments in Europe

A long-term view of CO₂ efficient manufacturing in the European region

Delft : CE Delft, 2010

CE Delft, 2011

Economic impacts of a CCS network in the Rotterdam area

Delft : CE Delft, 2011

CE Delft, 2014

F.J. Rooijers, H.J. Croezen, S. Cherif, H. Schouten

CCS bittere noodzaak bij stringent klimaatbeleid, De economische impact van Carbon Capture Storage

Delft : CE Delft, 2014

EBN/Gasunie, 2010

EBN/Gasunie advies CO₂-transport en opslagstrategie

Ecofys, 2013

Anonymus

European chemistry for growth, Unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future

Utrecht : Ecofys, 2013

ECN, 2011

Optiedocument, factsheets 2011

www.ecn.nl/expertise/policy-studies/optiedocumenten/2011/

Petten : ECN, 2011

ECN, 2013

P. Alderliesten

ECN R & D plan voor 2014 Energiebesparing in de Industrie

Oktober 2013

IEA, 2013a

Technology Roadmap, Carbon capture and storage 2013 edition

Paris : OECD/IEA, 2013

IEA, 2013b

21st Century Coal, Advanced Technology and Global Energy Solution

Paris : OECD/IEA Coal Industry Advisory Board, 2013

KEMA, 2007

P.J. Ploumen et al.

Investigations to CO₂ storage, strategy for CO₂ capture

KEMA : Arnhem, 2007

Koornneef, 2014

Koornneef, Hendriks, Noothout, & Smith

Ecofys, Utrecht, 2014

SBC Energy Institute, 2012

Leading the Energy Transition: Bring carbon capture & storage to market

Den Haag : Stichting Schlumberger Business Consulting Energy Institute, 2012

SCCS, 2013

P. Brownsort

Briefing: CCS for Industrial Sources of CO₂ in Europe, 30th August 2013

Edinburgh : Scottish Carbon Capture & Storage (SCCS), 2013



Bijlage B De directe economische waarde van CCS

De directe economische waarde van CCS wordt bepaald door de kosten in relatie tot de baten, ofwel de prijs van CO₂ voor de energie-intensieve industrie en elektriciteitsproducenten.

B.1 Kosten algemeen

De kosten voor CCS zijn opgebouwd uit kosten voor afvang, transport en opslag. De voornaamste kostencomponent is de afvang.

Belangrijke factoren die de afvang- en opslagkosten bepalen zijn:

- type en grootte van de installatie;
- concentratie van CO₂;
- omvang eigen energiegebruik;
- type afvangtechniek;
- de locatie en afstand tot opslag;
- type opslagreservoir.

Investeringskosten voor implementatie van CO₂-afvang bij bestaande energiecentrales en industriële bronnen zijn naar schatting 40-70% hoger dan investeringen bij nieuwbouw.

Het kostenniveau voor afvang in de periode 2020 - 2030 bedraagt²⁴:

- € 10-20 per ton CO₂ voor industriële CO₂-bronnen met CO₂-concentraties > 90%;
- € 40-50 per ton CO₂ voor industriële CO₂-bronnen met CO₂-concentraties tussen 20-70%;
- € 40-50 per ton CO₂ voor kolencentrales (bij basislast productieprofiel);
- € 60-80 per ton voor grote gasgestookte industriële vuurhaarden.

Beschrijving typen bronnen

– Bronnen met hooggeconcentreerde CO₂-stromen

Onder deze categorie vallen ammoniakfabrieken, methanolfabrieken, ethanolfabrieken, aardgas behandelingsinstallaties, CO₂ geproduceerd bij productie van H₂ uit steenkool of aardolie (in Nederland: PER+) en etheenoxidefabrieken.

Bij deze productieprocessen wordt vrijwel zuivere CO₂ geproduceerd die na drogen en compressie direct kan worden opgeslagen. In de praktijk wordt de geproduceerde CO₂ deels benut als grondstof voor productie van ureum of geleverd aan frisdrankfabrikanten, tuinders of andere CO₂-gebruikers. Afvang en afzet is gangbaar en is al geïmplementeerd.

– Hoogovens, waterstoffabrieken, (cementovens) en vergelijkbare bronnen

Bij deze bronnen komt CO₂ als procesemissie vrij in concentraties van 20-30% voor installaties als hoogovens tot 40-70% voor waterstoffabrieken (SCCS, 2013). De jaarvracht varieert (in Nederland) van 0,5 Mton/jaar voor een waterstoffabriek 25 tot 4-5 Mton/jaar voor een hoogoven.

Om de CO₂ te kunnen opslaan moet deze uit de productgassen worden geïsoleerd met een additionele gasscheidingsproces. Dit is op schaal van 1 Mton/jaar gedemonstreerd voor

²⁴ SCCS, 2013; ECN, 2011; IEA, 2013.

²⁵ Zie bijvoorbeeld www.rotterdamclimateinitiative.nl/documents/CCS_brochure_compleet%20def.versie%20dd%2009-09-2010.pdf, CBS Statline, SCCS, 2013.



waterstoffabrieken en is voor grootschalige toepassing bij hoogovens in ontwikkeling (zie bijvoorbeeld het Europese ULCOS26-programma).

– **Grote gasgestookte vuurhaarden**

Grote aardgas of restgasgestookte vuurhaarden zijn bijvoorbeeld de fornuizen van stoomkrakers en fornuizen van atmosferische destillatie bij aardolieraffinaderijen.

De CO₂-concentratie is 10-15%, de jaarvrucht bedraagt 0,2-1,0 Mton voor atmosferische destillatie tot ruim 1 Mton voor een stoomkraker.

Ook hier is een additioneel gasscheidingsproces nodig voor isolatie van CO₂ geschikt voor opslag. De benodigde technologie is dezelfde als voor afvang uit rookgassen bij kolencentrales, alleen is de schaalgrootte kleiner dan bij kolencentrales.

Bij het toepassen van CSS nemen niet alleen de investeringskosten toe, maar ook de operationele kosten en brandstofkosten.

Kostenposten betreffen met name:

- gebruik van restwarmte, aardgas of (bij energiecentrales) aftapstoom bij post-combustion afvang²⁷;
- elektriciteitsconsumptie van pompen, ventilatoren en compressoren in de afvanginstallatie.

Een overzicht van totale emissies in Nederland per type bron, specifieke jaarvrucht, CO₂-concentratie en afvangkosten zijn gegeven in Tabel 4.

Tabel 4 CCS -opties industrie en E-sector²⁸

	Totale emissie Nederland Mton/a	Emissie per bron Mton/a	Vol% CO ₂	€/ton anno 2020-2030	Ontwikkelingsstadium
Puur (of vrijwel - EtOH, NH ₃ , PER+)	2-3	0,1-1,0	> 95%	10-20	Gangbaar
H ₂ -productie	1-2	0,5	40-70%	40-50	Demo van 1 Mton/jaar ²⁹
Hoogovengas	10	2-3	25%		Pilot, techniek op demoschaal beschikbaar ³⁰
Kolencentrales, hoogovengasgestookte energiecentrale	25-30	4-8	10-15%	40-50	1st of a kind 1 Mton/jaar
Grootschalige boilers en fornuizen	10-15	0,2-1,0	10-15%	60-80	Gangbaar voor < 0,2 Mton/jaar, 1 st of a kind 1 Mton/jaar

²⁶ ULCOS = Ultra-Low Carbon Dioxide Steelmaking.

²⁷ 2,5-4,0 MJ/kg CO₂, afhankelijk van toegepaste absorbens.

²⁸ ECN, 2011; IEA, 2013a; IEA, 2013b; SCCS, 2013.

²⁹ Valero refinery Porth Arthur USA op basis van VSA
https://sequestration.mit.edu/tools/projects/port_arthur.html

³⁰ Voor afvang van CO₂ uit hoogovengas wordt binnen het ULCOS-consortium gedacht aan toepassing van een VPSA. Deze technologie wordt bij de Valero raffinaderij in Port Arthur gedemonstreerd.



Een mogelijk knelpunt voor toepassing van CCS bij energiecentrales is dat een CSS-installatie, in feite een chemische reactor, niet goed afgestemd kan worden op het bij- en afschakelen van capaciteit van de elektriciteitscentrale. Daarnaast is het door de noodzakelijke consumptie van aftapstoom voor regeneratie van het 'afvangmiddel' maar beperkt mogelijk (tot 60-70%) om in deellast te produceren zonder dat onacceptabele afname in netto elektrisch rendement optreedt (KEMA, 2007).

In hoeverre technische of praktische (ruimte) beperkingen spelen bij industriële processen is nog niet duidelijk voor sommige typen bronnen³¹.

De kosten zullen in het algemeen ook afhankelijk zijn van factoren als regelgeving, (duidelijkheid in) beleid, ontwikkeling in het huidige energiesysteem en maatschappelijke randvoorwaarden (bijvoorbeeld uitsluiten van opslaglocaties).

B.2 Opslag van CO₂, groot potentieel in Nederland

Transport van CO₂ naar een geschikte opslaglocatie vindt meestal plaats via pijpleidingen, maar bij kleinere hoeveelheden en/of over grotere afstanden is transport per schip ook een mogelijkheid. Met pijpleidingentransport bestaat al veel ervaring, ook in Nederland. Via de OCAP-leiding wordt zuivere CO₂, afkomstig aan ethanolproductie bij Abengoa en uit de productie van waterstof van de Shell-raffinaderij Pernis, getransporteerd naar het Westland voor toepassing in de tuinbouw.

De grootste CO₂-bronnen bevinden zich in de regio's Amsterdam, Rotterdam en Groningen (Eemshaven, Delfzijl). Geografisch gezien is het het meest kostenefficiënt om CO₂ uit Amsterdam en Rotterdam te koppelen aan opslagcapaciteit op zee en de CO₂ uit Groningen (Eemshaven) te koppelen aan de vele gasvelden op het land in Noord-Nederland. Hiermee worden de transportafstanden zo klein mogelijk gehouden (EBN/Gasunie, 2010). Een aantal velden ligt relatief dicht bij de kust (P- en Q-blokken), maar de meeste opslagcapaciteit ligt noordelijk in de Noordzee, in de K- en L-blokken. In de demo- en pre-commerciële fase zal opslag zoveel mogelijk in de nabijheid van de kust gedaan moeten worden, om de transportafstanden en -kosten zo laag mogelijk te houden. Geschat wordt dat opslagcapaciteit in P- en Q-blokken 200 Mton bedraagt en dat opslagcapaciteit in de K- en L-blokken 1.200 Mton bedraagt

Nadat de velden in de nabijheid van de kust gevuld zijn, zal het transport-netwerk uitgebreid moeten worden in de richting van de K- en L-blokken, waar de meeste opslagcapaciteit zich bevindt. De uitbreiding van de infrastructuur richting de K- en L-blokken zal hoe dan ook noodzakelijk zijn om de gehele hoeveelheid afgevangen CO₂ op te slaan (EBN/Gasunie, 2010).

Het ontwikkelen van een CSS-netwerk met bijbehorende infrastructuur zal er toe leiden dat de marginale kosten van CSS van CO₂-emitters zullen afnemen. CO₂-emitters zullen dan weliswaar nog moeten investeren in CO₂-afvang-techniek, maar de investeringen in transport- en opslagcapaciteit worden geminimaliseerd tot aansluiting aan de dichtstbijzijnde pijpleiding/hoofd-leiding. Nieuwe investeringen in opslagcapaciteit zullen niet nodig zijn voor emitters die zich in een later stadium bij het CSS-netwerk aansluiten. Mogelijk

³¹ Gezien de inzet van CO₂-afvang bij hoogzuivere bronnen spelen praktische beperkingen hier niet.



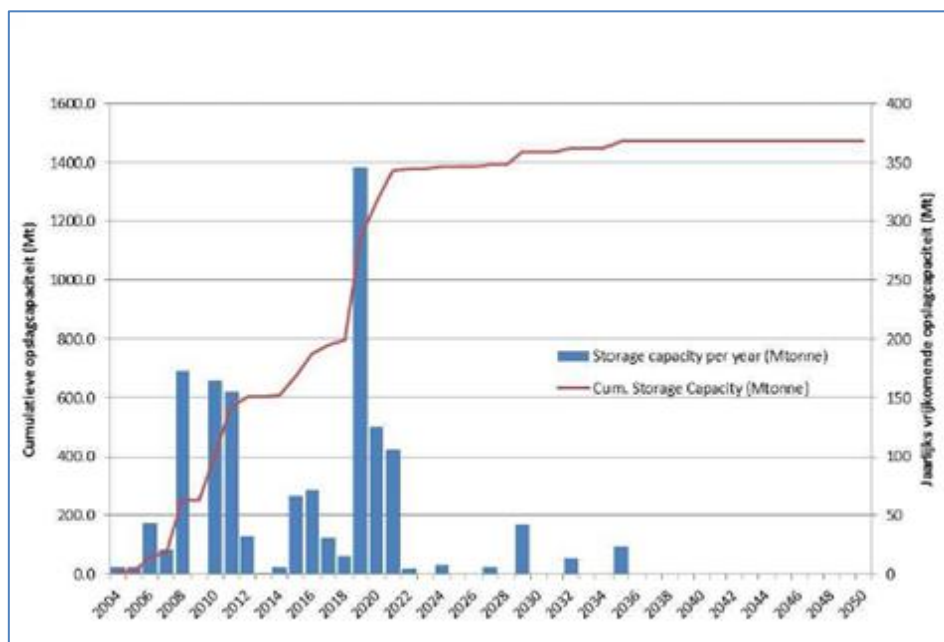
knelpunt is gelegen in de toegang tot en tarifiering van transport- en opslagcapaciteit, op het moment dat nieuwe emitters daarvan gebruik willen maken.

Voor Noord-Nederland (Groningen, Friesland, Drenthe) zijn dertien velden met een geschatte capaciteit van meer dan 40 miljoen ton CO₂ geïdentificeerd, met een totale geschatte capaciteit van circa 1 miljard ton (exclusief het Groningen-gasveld 'Slochteren'). Daarnaast is de capaciteit van kleinere velden geschat op 0,6 miljard ton.

Bij alle genoemde schattingen moet wel de kanttekening worden geplaatst dat nog niet alle informatie nodig voor vaststellen van de werkelijke opslagcapaciteit beschikbaar is. Er is aanvullend onderzoek nodig om vast te stellen welke olie- en gasvelden wel/niet geschikt zijn voor opslag om tot realistisch opslagpotentieel te komen.

Om de opslagcapaciteit in gas- en olievelden te kunnen benutten is het bovendien nodig gedepleteerde velden open te houden. Dit om ontmanteling van infrastructuur te voorkomen en CCS hierdoor niet duurder wordt. De vraag is nog wat de kosten zijn voor het openhouden van gedepleteerde gas- en olievelden en vooral wie zal dit betalen?

Figuur 5 CO₂-opslagcapaciteit onder land en jaar van beschikbaarheid in Noord-Nederland



Bron: Neele, Koornneef, & Hendriks, Specifications for an improved version evaluation tool, 2010.

De kostenvoordelen voor opslag in gebruikte gasvelden zijn:

- CO₂-injectie kost relatief weinig energie;
- er zijn weinig (nieuwe) putten benodigd voor injectie, waardoor de potentiële migratiepaden beperkt blijven (voordeel NL t.o.v. andere landen);
- het grootste deel van de benodigde infrastructuur en mijnbouwinstallaties is meestal al beschikbaar (voordeel NL t.o.v. andere landen).

Vooraf bij offshore in Nederland kunnen de opslagkosten sterk oplopen wanneer meerdere kleinere gasvelden bereikt moeten worden via complexe infrastructuur en dure mijnbouwinstallaties. Daarnaast is er op dit moment

nog veel onzekerheid over het moment waarop gasvelden in de offshore K- en L-blokken voor CO₂-opslag beschikbaar komen.

Velden die beschikbaar zijn kunnen niet onmiddellijk worden gebruikt voor CO₂-injectie. Alvorens met CO₂-injectie kan worden begonnen dient een veld voor opslag ontwikkeld te worden. De gemiddelde periode daarvoor bedraagt naar schatting zes tot acht jaar, afhankelijk van type veld en de lokale situatie. De benodigde termijn om tot een geschikte locatie te komen kan langer worden als opslaglocaties afvallen omdat ze niet aan de (veiligheids) criteria voldoen of als er juridische knelpunten optreden, bijvoorbeeld doordat winningsvergunningen verlengd kunnen worden. Hierdoor kan vertraging of afstel van een CO₂-opslagproject het gevolg zijn.

Bij vrijwel alle potentiële opslaglocaties op zee en in Noord-Nederland wordt nog aardgas gewonnen. Dit kan op twee manieren tot knelpunten leiden: onshore zal er mogelijk niet tijdig voldoende opslagcapaciteit vrijkomen, terwijl er offshore waarschijnlijk een paar jaar ligt tussen het einde van de aardgasproductie en het begin van CO₂-opslag (EBN/Gasunie, 2010). De kosten van opslag bedragen circa € 10 per ton CO₂ maar zijn dus afhankelijk van afstand en soort opslaglocatie.

B.3 CCS relevant vanaf € 50 per ton CO₂

De toepassing van CCS moet worden gezien vanuit de gebruikers van deze techniek. Zij zullen een afweging maken tussen besparingen, procesvernieuwing, hernieuwbare bronnen en CCS om hun CO₂-emissie te reduceren. Uit Tabel 5 blijkt dat energiebesparing veruit het goedkoopste is en dat CCS goedkoper is dan hernieuwbare energie. Het omslagpunt ligt ongeveer bij € 50 per ton CO₂. In Tabel 5 gaat het om zowel de kosten voor afvang als voor opslag.

Tabel 5 CO₂-reductieopties industrie en E-sector. Kosten inclusief kosten voor transport en opslag

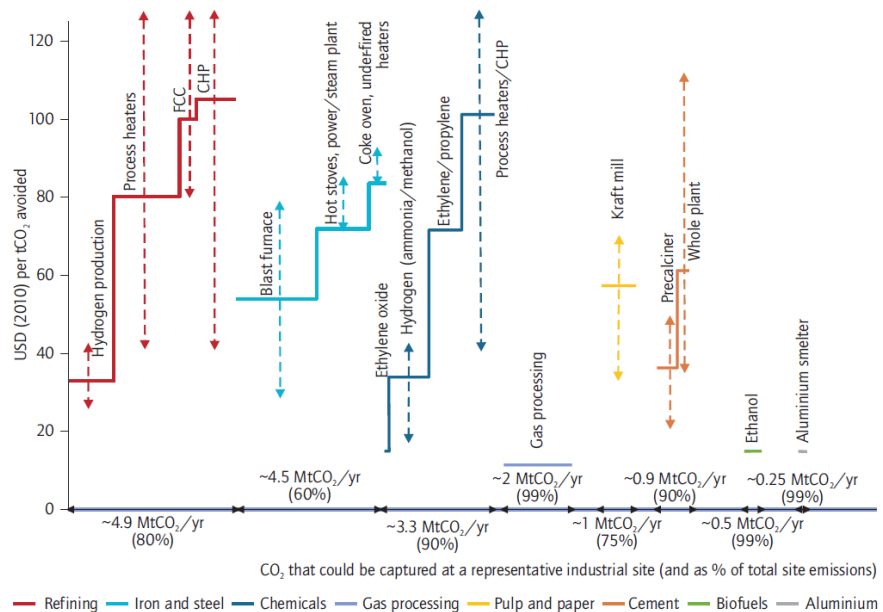
	Nr.		Mton/ jaar	€/ton CO ₂ (bruto)	Vanaf
CCS	1	Hoogzuivere CO ₂ -bronnen Rotterdam	2,5	25	2015
	2	Kolencentrales, H ₂ -fabrieken	38	55	2025
	3	Grootschalige gasgestookte vuurhaarden	12,5	80	2020-2025
Hernieuwbaar en WKK	4	Wind op land	11	20	2020
	5	Wind op zee	10	173	2025
	6	Zon-PV	3	160	2025
	7	Diepe geothermie maximaal	3	118	2025
	8	Biomassa (s) ketel maximaal	9	33	2025
	9	Meestoken	6	62	2020
	10	WKK	9	59	2020-2030
			51		
Besparen en procesinnovatie	11	Procesintensivering chemie	2	0	nu - 2030
	12	Innovatieve destillatie chemie	1	0	nu - 2030
	13	Hisarna staal	3	-45	2025
	14	Optimalisatie metaalproductie	1	0	nu - 2030
	15	Alu recycling	4	-69	nu
	16	Verbeteringen raffinaderijen	1	-30	nu
	17	Verbeteren isolatie	1	-131	nu
	18	Optimalisatie stoomcyclus	1	-98	nu
	19	Efficiëntere elektrisch apparatuur	2	-90	nu
			14		



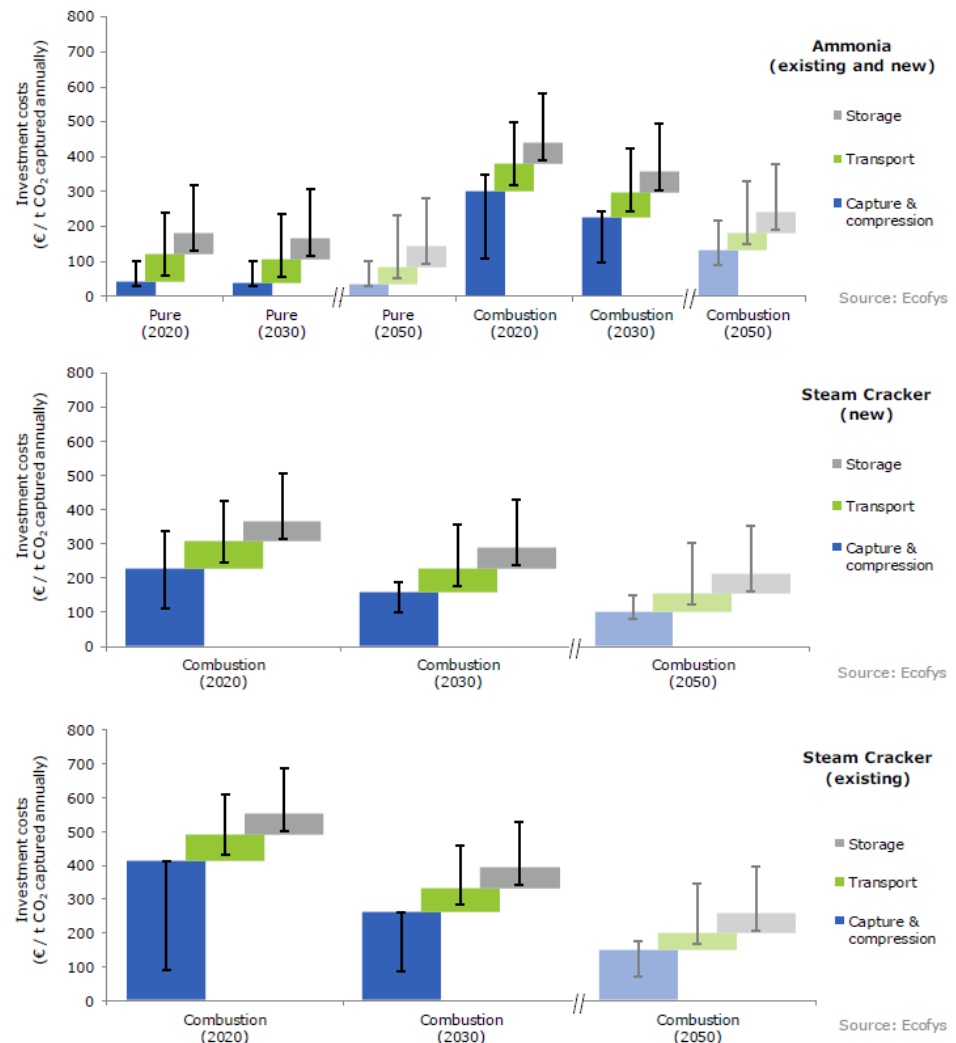
CCS kan gezien vanuit de energiegebruikers de concurrentie aan met hernieuwbare energie, maar niet met energiebesparing en procesvernieuwing. Pas als het klimaatbeleid zover is dat de goedkope besparingsmaatregelen zijn getroffen, ontstaat er een voordeel voor Nederland ten opzichte van andere landen waar die optie niet voorhanden is.

Een indicatie van de huidige kostenniveaus voor CCS voor verschillende typen emissiebronnen is gegeven in Figuur 6. Een indicatie van de ontwikkeling van de investeringskosten en van de afdankkosten per ton CO₂ in 2050 als functie van de schaalgrootte van de afdankinstallatie zijn gegeven in Figuur 7 en Figuur 8.

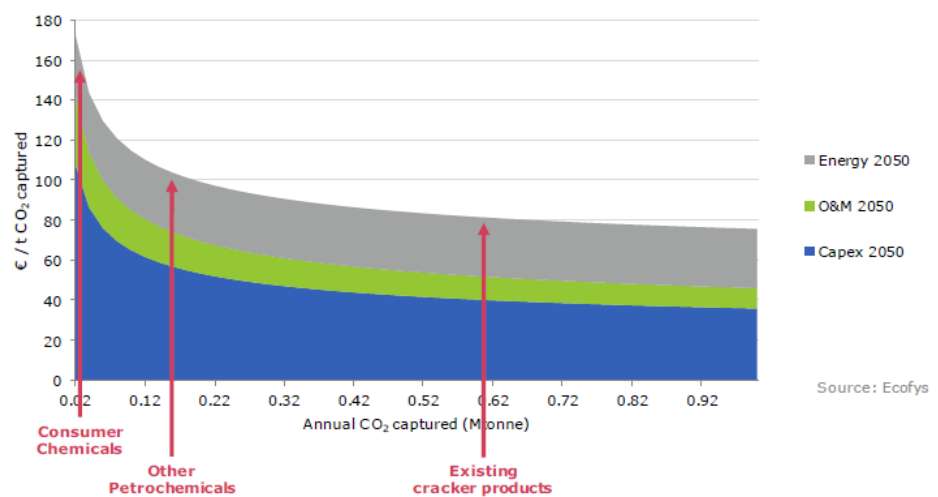
Figuur 6 Indicatie van huidige kosten voor afdank



Figuur 7 Indicatie van ontwikkelingen in investeringskosten



Figuur 8 Afvangkosten anno 2050

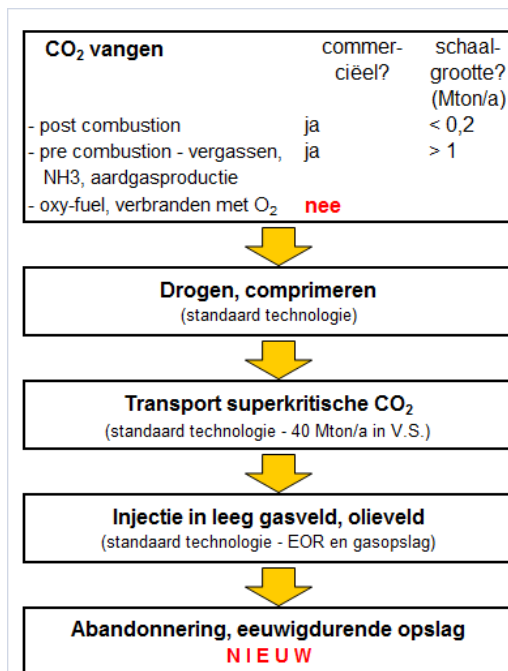


B.4 Realisatietijd van CCS

De keten van CCS is nog niet helemaal uitontwikkeld. De meeste stappen zijn bekende technieken. Transport van superkritische CO₂ en opslag wordt al op diverse plaatsen in de wereld gerealiseerd en afvang in specifieke processen ook. Aan de andere kant is afvang uit rookgassen en andere gaststromen op lage druk en met beperkte CO₂-concentraties alleen nog op beperkte schaal beschikbaar en is abandonnering van opgeslagen CO₂ nog volledig nieuw

Er is daarom nog een zekere ontwikkelingstijd nodig voordat CCS grootschalig en over een breed palet aan industriële sectoren kan worden De

ontwikkelingstijd is met name nodig voor doorontwikkeling van CO₂-afvang-technologie naar commerciële schaal voor gassen met beperkte drukken en CO₂-concentraties, de kosten te verlagen en een infrastructuur op te bouwen. De verwachting is dat het zeker nog 10 jaar vergt om te zorgen voor een capaciteit van minimaal 10 Mton per jaar. Eerst een grootschalige Nederlandse proef (bijvoorbeeld ROAD) met een bouwtijd en proeftijd van vijf jaar, daarna volgt de uitbouw van het netwerk en de bouw van grootschalige commerciële installaties.



C.1 Huidige warmtevraag onderverdeeld

Van het totale finale energetische eindgebruik aan energie in de industrie komt meer dan 80% of ongeveer 580 PJ/jaar voort uit warmtebehoefte in de vorm van stoom op verschillende drukniveaus of voor ondervuring van fornuizen. De industriële warmtevraag betreft bijna 20% van de totale Nederlandse primaire energieconsumptie.

Een onderverdeling naar temperatuurniveau en naar functie is gegeven in Tabel 6. De industriële warmtevraag heeft voor meer dan de helft een temperatuurniveau van meer dan 500°C.

Hoge temperatuurwarmtevraag

De warmtevraag > 500°C betreft over het algemeen ondervuring in fornuizen in de procesindustrie of processen in de basismetaalindustrie:

- Hoge temperatuurwarmtevraag in de chemie is voornamelijk gerelateerd aan ondervuring van fornuizen van stoomkrakers en fornuizen van aardgas reformers voor productie van methanol, ammoniak en waterstof. Zeker bij stoomkrakers wordt de warmtevraag grotendeels gedekt door restgassen uit het proces zelf.
- Daarnaast zijn er specifieke bedrijven met hoge temperatuurwarmtevraag als Nedmag (aardgas) en ESD (elektriciteit).
- Raffinage processen als destillatie, ontzwaveling, reforming, catcracking en visbreaking vragen hoge temperaturen, opgewekt in restgas of overige aardolieproducten ondervuurde fornuizen. Ondervuring is vaak geïntegreerd met stoomproductie uit restwarmte in de rookgassen van de fornuizen.
- In de basismetaalindustrie is de warmtevraag voornamelijk geconcentreerd bij productie en verwerking van ruwe staal bij Tata in IJmuiden. De vraag bestaat voornamelijk uit energie nodig voor cokesproductie en voor verhitten van ijzererts en (zuurstof verrijkte) lucht tot de temperatuur waarop ijzererts kan worden gereduceerd tot ruw ijzer. Deze vraag wordt grotendeels gedekt met 'restgassen'³², kooks en steenkool. Door temperatuur en de aard van de processen is gebruik van deze energiedragers onvermijdelijk.
- Er zijn verder kleinere warmtevragen bij walserijen en andere bewerkingen. Hiervoor wordt naast restgassen ook aardgas gebruikt.
- In de non-ferro-industrie is hoge temperatuurwarmtevraag gekoppeld aan smelten en gieten van metalen.
- In de bouwmaterialenindustrie is hoge temperatuurwarmte nodig in ovens voor productie van glas, glaswol, steenwol, keramische producten en cementklinker. Behalve bij keramische producten gaat het vaak om specifieke bedrijven, zoals ENCI Maastricht voor cementklinker, Rockwool Roermond voor steenwol en Isover glaswol Etten-Leur.

³² Kooksovgas, hoogovengas en oxystaalovengas.

Tabel 6 Overzicht warmtevraag Nederlandse industrie

	CBS, 2013		Naar temperatuurniveau °C ³³			
	Totaal	Stoom uit WKC	<100	100-250	250-500	>500
Chemie	241	88	12	27	65	138
			Destillatie, drogen, ondervuring procesfornuizen			Fornuizen NH ₃ /H ₂ , stoomkraken,
Raffinage	111	18	0	0	48	64
			Destillatie, drogen, ondervuring procesfornuizen			Catcrackers, vergasser
	353	106	12	27	113	202
Basismetaal ferro	30	2,7			3	27
						Hoogoven, cokesoven
Basismetaal non-ferro	3	0,0				3
						Smelten en gieten
Metaalproducten	12	0,1	7			5
						Moffelen, galvaniseren, smeden, etc
	45	3	7		3	35
Papier en karton	18	12		18		
				Papier drogen, pulpen		
V&G	55	17	27	27		
			Koken, indampen, drogen, bakken			
Textiel	3	0,4	3			
Bouwmaterialen	19	0,3		1		18
						Cementoven, glasoven, keramiekovens, glaswol & steenwol
Overige industrie	12	0,2			7	5
	107	30	30	47	7	22
Totaal	504	138	49	73	123	259

³³ Volgens (CBS, 2006); (Davidse, 2011).

Warmtevraag voor temperaturen < 500 °C

De warmtevraag op temperaturen lager dan 500 °C heeft vooral betrekking op drogen en destilleren.

Drogen zou naar schatting 80 PJ/jaar aan warmte vragen (ECN, 2013). Droogprocessen worden onder meer toegepast in voedingsmiddelenindustrie (indikken, drogen met warme lucht sproeidrogen), chemie, papierindustrie (stoomdrogen) en bouwmaterialenindustrie. Voor drogen worden zowel stoom als hete lucht gebruikt - in beide gevallen met een temperatuur van minimaal ongeveer 100 °C tot maximaal ongeveer 300 °C.

De warmtevraag voor destillatie zou 4.500 MW of 140 PJ/jaar bedragen (ECN, 2013). Destillatie wordt voor zover bekend enkel toegepast in raffinaderijsector en chemie.

Overige warmtevrage processen zijn bijvoorbeeld wassen, schillen, blancheren, pasteuriseren, koken en steriliseren in de voedingsmiddelenindustrie of wassen, bleken en verven in de textielindustrie. Bij de bovengenoemde schattingen voor drogen en destillatie blijft ongeveer 45 PJ/jaar aan warmtevraag over voor deze processen.

Observaties uit praktijk

Warmtevragen van verschillend temperatuurniveau worden bij verschillende industrietakken gedekt door cascadering van warmte:

- Bij raffinaderijen worden ruwe olie en halffabrikaten in hoge temperatuur fornuizen verwarmd. De nog hete rookgassen van deze fornuizen worden vervolgens gebruikt voor productie van elders in de raffinaderij benodigde stoom.
- Bij brouwerijen wordt middendruk stoom gebruikt voor opwarmen van de wort. De restwarmte van stoomcondensaat en wort wordt vervolgens benut voor andere warmtevrage processen op de brouwerij, zoals flessen spoelen.

Daarnaast zijn er bij bijvoorbeeld de voedingsmiddelenindustrie diverse warmtevrage batchprocessen. De warmteleverende installatie moet hierop snel kunnen inspelen.

Beide aspecten stellen randvoorwaarden aan eventuele verduurzamingsopties.

C.2 Restgassen en WKC's

Er is verder (zie Tabel 7 en Tabel 8) geprobeerd te analyseren in hoeverre stoom door WKC's wordt geleverd en in hoeverre restgassen uit conversieprocessen³⁴ of uit scheidingsprocessen³⁵ worden toegepast.

³⁴ Bijvoorbeeld cokesproductie, hoogovenproces en oxystaalproces in de basis ferrometaal industrie of restgassen bij stoomkraken van nafta.

³⁵ Bijvoorbeeld raffinaderijgassen bij oliedestillatie.

Restgassen

Voor 'restgassen' als raffinaderijgas en voor andere voor energietoepassingen gebruikte bijproducten is niet te verwachten dat er een andere optie voor CO₂-reductie is dan CCS omdat er geen andere mogelijkheid is om van de restgassen af te komen dan om ze te gebruiken als brandstof.

Tabel 7 Restgassenproductie

	Restgassen + ov aardolieproducten		
	Productie	Eigen gebruik	W.v. in WKC
Chemie	112	104	10
Raffinage	102	89	12
Subtotaal	215	193	22
Basismetale ferro	51	25	3
Basismetale non-ferro			
Metaalproducten			
Subtotaal	51	25	3
Papier en karton			
V&G			
Textiel			
Bouwmaterialen			
Overige industrie			
Subtotaal	0	0	0
Totaal	266	218	24

Bij hoogoven gas kan nog worden gedacht aan gedeeltelijke verduurzaming door substitutie van één van de grondstoffen voor hoogoven gas: injectiekolen. Injectiekolen en cokes worden in het hoogovenproces omgezet in hoogoven gas door reactie met ijzererts en verrijkte lucht. In principe zouden de injectiekolen kunnen worden vervangen door houtskool.

Zoals in de tabel aangegeven bedraagt de totale productie aan restgassen ongeveer 270 PJ/jaar, waarvan ongeveer 220 PJ/jaar in eigen bedrijf wordt ingezet.

Stoom uit WKC's

Voor de warmtevraag op temperatuurniveaus beneden de 500 °C wordt ongeveer de helft (140 PJ/jaar) geleverd in de vorm van stoom uit WKC's, voornamelijk installaties in beheer bij energiebedrijven of samenwerkingsverbanden van energiebedrijven en industriële stoomvragers.

Een deel van deze installaties zal naar verwachting de komende jaren verdwijnen vanwege de slechte concurrentiepositie bij lage elektriciteitsprijs en hoge gasprijs. Vervanging zal vooral zijn in de vorm van gasgestookte stoomketels, maar ook in de vorm van biomassa gestookte ketels en geothermische warmteprojecten.

Tabel 8 Stoom uit eigen en andere WKC's

	Stoom inkoop/externe WKC	Stoom uit eigen WKC
Chemie	64	22
Raffinage	9	14
Subtotaal	73	35
Basismetale ferro	0,0	2,7
Basismetale non-ferro	0,0	0,0
Metaalproducten	0,1	0,0
Subtotaal	0,1	2,7
Papier en karton	3,7	7,0
V&G	3,0	13,9
Textiel	0,1	0,4
Bouwmaterialen	0,0	0,3
Overige industrie	0,2	0,0
Subtotaal	7	22
Totaal	80	60

Aan warmtevraag gerelateerde CO₂-emissies

Zoals aangegeven in Tabel 9 bedraagt de aan warmtevraag gerelateerde CO₂-emissie naar schatting ongeveer 32 Mton/jaar, waarvan het merendeel (bijna 26 Mton/jaar) wordt geproduceerd door directe ondervuring.

Tabel 9 Aan warmtevraag gerelateerde CO₂-emissies

	Directe inzet		Eigen WKC		Ketenemissies	
	Aardgas	Restgas	Aardgas	Restgas	Stoom inkoop	Externe afzet
Chemie	4,2	6,5	0,9	0,4	1,2	0,6
Raffinage	2,2	5,4	0,7	0,6	0,2	0,9
Subtotaal	6,5	11,9	1,6	1,0	1,4	1,4
Basismetale ferro	0,6	2,8	0,0	0,3	0,0	6,1
Basismetale non-ferro	0,2				0,0	
Metaalproducten	0,6				0,0	
Subtotaal	1,4	2,8	0,0	0,3	0,0	6,1
Papier en karton	0,4		0,4		0,1	
V&G	2,0		0,7		0,1	
Textiel	0,1		0,0		0,0	
Bouwmaterialen	0,9	0,2	0,0			
Overige industrie	0,6		0,0		0,0	
Subtotaal	4,0	0,2	1,1		0,1	
Totaal	11,9	14,9	2,7	1,3	1,5	7,5
Direct gerelateerd aan warmtevraag	32,3					

De aan stoomproductie in eigen WKC of 'over-the-fence' WKC toegerekende CO₂-emissie is geschat uitgaande van een bijstookfactor van 0,6 GJ/GJth. Deze waarde is gebaseerd op (Jacobs, 2008) en heeft betrekking op de in deze studie beschouwde grootschalige industriële STEG, waarmee stoom op 10 bar wordt geleverd.



Voor visievorming is ook de emissie geschat gerelateerd aan gebruik van extern afgezette restgassen. Vanwege de aard van deze restgassen is gebruik als brandstof onvermijdelijk.

