

POLLUTIE IN EEN  
STADSOMGEVING  
EEN KAART VAN  
ANTWERPEN

TECHNOLOGISCHE INNOVATIES VOOR  
LUCHTPOLLUTIE IN EEN STADSOMGEVING OP  
KORTE EN LANGE TERMIJN:  
PLASMATECHNOLOGIE

Masterproef voorgelegd met het oog op het behalen van de graad  
Master in de Milieuwetenschap

Ramses SNOECKX | Promotor: Prof. Dr. A. Bogaerts ; Co-promotor: C. De Bie

Mei 2010

## **Woord vooraf**

Bij deze wil ik nog even de gelegenheid aangrijpen om de mensen te bedanken die deze masterproef mede mogelijk hebben gemaakt.

In de eerste plaats mijn promotor Prof. Dr. A. Bogaerts en mijn co-promotor C. De Bie om mij ondanks de afstand tijdens mijn Erasmusverblijf in Stockholm alle nodige informatie aan te reiken en mij op het goede spoor te houden.

Verder natuurlijk ook mijn vrienden en familie die me wisten te helpen door teksten na te lezen, me weer opnieuw aan het denken en schrijven te zetten, maar voornamelijk door er voor me te zijn.

## Inhoudstafel

Woord vooraf .....	1
Inhoudstafel .....	2
<b>1. Hoofdstuk 1: Inleiding .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Probleemstelling .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Methodologie .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Hoofdstuk 2: Omschrijving problematiek .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Broeikaseffect ('Greenhouse effect') .....</b>	<b>7</b>
2.1.1. Inleiding .....	7
2.1.2. Versterkt broeikaseffect ('Enhanced greenhouse effect') .....	8
2.1.3. Gevolgen stedelijk milieu .....	9
<b>2.2. Broeikasgassen .....</b>	<b>10</b>
2.2.1. Algemeen .....	10
2.2.2. CO <sub>2</sub> .....	11
2.2.3. CH <sub>4</sub> .....	11
2.2.4. N <sub>2</sub> O .....	12
2.2.5. Gehalogeneerde koolwaterstoffen .....	12
<b>2.3. CO<sub>2</sub> emissies in een stedelijke omgeving: een kaart van Antwerpen .....</b>	<b>13</b>
2.3.1. Energiesector .....	13
2.3.2. Huishoudens-landbouw-tertiaire sector .....	13
2.3.3. Industriesector .....	13
2.3.4. Transportsector .....	14
<b>2.4. Verwachtingen .....</b>	<b>14</b>
2.4.1. Korte termijn (2020) .....	15
2.4.2. Lange termijn (2050) .....	15
<b>3. Hoofdstuk 3: Technologische oplossingen .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Inleiding .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2. Huidige technieken .....</b>	<b>16</b>
3.2.1. Stoom 'reforming' van CH <sub>4</sub> ('steam methane reforming'; SMR) .....	16
3.2.2. CO <sub>2</sub> 'reforming' van CH <sub>4</sub> ('dry reforming') .....	17
3.2.3. Hydrogenatie van CO <sub>2</sub> (de Sabatier reactie) .....	17
3.2.4. Productie van chemicaliën en andere toepassingen .....	18
<b>3.3. CCS technieken .....</b>	<b>18</b>
3.3.1. Afvangen en voorbereiden van CO <sub>2</sub> .....	19
3.3.2. Transport .....	20
3.3.3. Vastleggen van CO <sub>2</sub> .....	20
3.3.4. Belang van CCS voor andere technieken .....	21

<b>3.4. Innovatieve technieken</b>	21
3.4.1. Thermochemisch / katalytisch	22
3.4.2. Homogene katalyse of superkritische vloeistofextractie ('super critical fluid extraction')	22
3.4.3. Biochemisch / enzymatisch	22
3.4.4. Elektrochemisch / katalytisch	22
3.4.5. Zonne-thermisch / katalytisch	22
3.4.6. Fotochemisch / katalytisch	23
3.4.7. Plasma-geassisteerde katalyse	23
<b>4. Hoofdstuk 4: Plasmatechnologie</b>	24
<b>4.1. Inleiding</b>	24
<b>4.2. Plasmatechnologie</b>	25
4.2.1. Wat is een plasma	25
4.2.2. Diëlektrische barrière ontlading ('Dielectric Barrier Discharge'; DBD)	26
4.2.3. Plasma-geassisteerde katalyse	27
4.2.4. Belangrijkste parameters bij plasma-geassisteerde katalyse	32
<b>4.3. Belang en interesse naar het stedelijk milieu toe</b>	34
4.3.1. Globaal	34
4.3.2. Antwerpen	35
<b>4.4. Verwachtingen</b>	35
4.4.1. Korte termijn (2020)	35
4.4.2. Lange termijn (2050)	35
<b>5. Hoofdstuk 5: Impact van plasma-geassisteerde katalyse</b>	36
<b>5.1. Emissiescenario's</b>	36
5.1.1. Emissiereductie-scenario's ontwikkelde landen	36
5.1.2. 'Groene energie' scenario's	37
5.1.3. Scenario 1 (S1)	38
5.1.4. Scenario 2 (S2)	38
5.1.5. Scenario 3 (S3)	39
<b>5.2. Plasmatechnologie-scenario's</b>	39
5.2.1. Conversie	39
5.2.2. Energie-efficiëntie	39
5.2.3. Scenario 1 (T1)	40
5.2.4. Scenario 2 (T2)	40
5.2.5. Scenario 3 (T3)	41
<b>5.3. Gekoppelde scenario's</b>	41
5.3.1. Scenario 1 (S1T1)	43
5.3.2. Scenario 2 (S2T1)	44
5.3.3. Scenario 3 (S1T2)	45

5.3.4.	Scenario 4 (S3T1).....	46
5.3.5.	Scenario 6 (S3T2).....	48
5.3.6.	Scenario 7 (S1T3).....	49
5.3.7.	Scenario 8 (S2T3).....	50
5.3.8.	Scenario 9 (S3T3).....	50
<b>5.4.</b>	<b>Bespreking resultaten</b> .....	<b>51</b>
5.4.1.	Korte termijn (2020).....	51
5.4.2.	Lange termijn (2050).....	51
<b>5.5.</b>	<b>Bespreking specifiek voor Antwerpen</b> .....	<b>52</b>
<b>6.</b>	<b>Hoofdstuk 6: Besluit</b> .....	<b>53</b>
<b>7.</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>54</b>
<b>8.</b>	<b>Referenties</b> .....	<b>55</b>
<b>9.</b>	<b>Bijlage</b> .....	<b>I</b>
9.1.	<b>Kaart van het studiegebied</b> <sup>[12]</sup> .....	<b>I</b>
9.2.	<b>De verschillende klimaatdoelstellingen</b> .....	<b>II</b>
9.2.1.	UNFCCC of Klimaatverdrag.....	II
9.2.2.	Kyotoprotocol.....	II
9.2.3.	EU 20-20-20.....	II
9.3.	<b>Berekeningen ‘Groene energie’ scenario’s</b> .....	<b>III</b>
9.4.	<b>Berekeningen broeikasgasreductie voor Antwerpen</b> .....	<b>IV</b>

## 1. Hoofdstuk 1: Inleiding

### 1.1. Probleemstelling

In wetenschappelijke kringen heerst er de laatste jaren een algemene consensus over het thema klimaatverandering, namelijk: *'Het klimaat verandert'*, en niet zomaar: *'er wordt namelijk een globale stijging van de gemiddelde aardtemperatuur geconstateerd'*. Over de jaren heen is men er ook achtergekomen dat deze verandering hoogstwaarschijnlijk—de materie is zo complex dat veel mechanismen nog niet volledig begrepen worden—te wijten is aan de grote hoeveelheden broeikasgassen die de mens de voorbije 100 jaar in de atmosfeer heeft geloosd, door verbranding van fossiele brandstoffen, veeteelt, afvalverwerking en chemische processen in de industrie. Er gaat echter ondertussen ook geen dag voorbij in het dagelijkse stedelijke leven waarin we niet op de één of andere manier worden herinnerd aan deze *'opwarming van de aarde'*: gaande van extreme weersomstandigheden tijdens weerberichten, en hun gevolgen in de voorafgaande nieuwsberichten; tot reclameborden die ons de zuinigste auto's met de laagste CO<sub>2</sub> uitstoot aanprijzen.

Zoals uit de voorgaande delen reeds is gebleken brengen verstedelijking en industrialisering een grote energievraag met zich mee en verschillende daarmee gepaard gaande soorten van vervuiling. Strikt genomen worden broeikasgassen niet als luchtpolluenten beschouwd, aangezien ze ook natuurlijk voorkomen en noodzakelijk zijn voor het leven op aarde. In dit onderzoek zullen we de antropogene broeikasgasemissies echter wel als luchtpolluent omschrijven om zo het probleem beter (h)erkenbaar te maken. Daar waar de vervuiling in de eerste twee delen in de ruimte en tijd beperkt in omvang is gebleven, en luchtpollutie t.g.v. fijn stof in deel 3 zowel in de ruimte en tijd in omvang reeds uitgebreide, gaat de luchtpollutie t.g.v. van broeikasgassen in de ruimte de mondiale toer op en in de tijd overschrijdt het op zijn minst ettelijke generaties.

Veel aandacht ging voorheen uit naar globale trends inzake klimaatverandering, maar hoe zit het nu eigenlijk met de relatie tussen de stedelijke omgeving en het klimaat? Zijn veel van deze antropogene bronnen (verkeer, industrie, enz.) niet te herleiden naar het stedelijk milieu? Wat is de impact daarvan specifiek voor het stedelijk milieu? En misschien het allerbelangrijkste: wat kunnen we er aan doen? Dit zijn veelal recentere vragen waar men zowel in wetenschappelijke- als in beleidskringen ijverig antwoorden op zoekt.

In dit deel zal het probleem luchtpollutie in een stadsomgeving (specifiek Antwerpen) t.g.v. van broeikasgassen worden omschreven en zal onderzoek worden verricht naar de mogelijke impact van technologieën, plasmatechnologie in het bijzonder, om dit probleem aan te pakken.

### 1.2. Methodologie

De centrale onderzoeksvraag voor dit deel luidt als volgt: *'Wat zou de milieu-impact van plasmatechnologie zijn op een stadsomgeving (specifiek Antwerpen) zowel op korte (2020) als op lange (2050) termijn?'*

Een antwoord hierop is gezien het complexe karakter van de klimaatverandering niet snel te formuleren en daarom zal, om deze onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden, eerst het antwoord op

een aantal andere belangrijke onderzoeksvragen achterhaald moeten worden. Deze zijn in volgorde van doorlopen:

- Wat is de huidige toestand en wat zijn de belangrijkste bronnen van broeikasgassen (vnl. CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>) in een stadsomgeving (specifiek Antwerpen);
- Waarop zijn de huidige technieken om broeikasgassen te converteren gebaseerd;
- Waarop zijn de technieken om broeikasgassen d.m.v. plasmatechnologie een tweede leven te schenken gebaseerd;
- Wat zou de haalbaarheid zijn om plasmatechnologie in een stadsomgeving (specifiek Antwerpen) toe te passen.

Om deze vragen te beantwoorden zal er eerst een literatuurstudie worden uitgevoerd om gegevens te verzamelen over de huidige toestand (emissies/immissies van vnl. CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>), over de projecties tegen 2020 en 2050, alsook over de doelstellingen van de internationale gemeenschap (UN, EU, ...) om deze toestand aan te pakken tegen 2020 en 2050. Daarna kan worden overgegaan tot het in kaart brengen van de bronnen van algemene stedelijke emissies en hun bijdrage aan het geheel. Uitgaande van de voorgaande projecties en doelstellingen kan dan een onderbouwde schatting gemaakt worden van de te leveren inspanningen in de stedelijke omgeving. Verder zullen gegevens worden verzameld over de huidige toestand specifiek voor Antwerpen en op analoge wijze kan dan een schatting gemaakt worden van de te leveren inspanningen specifiek voor Antwerpen (waarbij rekening zal moeten worden gehouden met de aanwezigheid van de havenindustrie). De belangrijkste punten van de literatuurstudie voor dit onderzoek zijn terug te vinden in hoofdstuk 2.

Eens al deze gegevens zijn verzameld en verwerkt, worden in hoofdstuk 3 technologische innovaties voor de reductie van broeikasgassen (CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>) aangehaald, zowel reeds bestaande technologieën als nieuwe technologieën. Hierbij zal enkel aandacht worden besteed aan end-of-pipe technologieën (die dus ingrijpen op de 'state'). Van deze technologische innovaties zal 'plasma-gaassisteerde katalyse' in hoofdstuk 4 verder worden uitgewerkt. Specifieke aandacht zal ook moeten gaan naar de verwachtingen omtrent deze technologie: energie-efficiëntie, conversie, neveneffecten, mogelijke implementatie, tijdspanne, enz.

Hierna komen we bij het belangrijkste deel van dit onderzoek, hoofdstuk 5, waarbij de potentiële impact van deze technologie in een stedelijke omgeving op middellange en lange termijn wordt onderzocht en geëvalueerd. Hierbij zullen een aantal scenario's worden uitgewerkt, gaande van optimistisch tot pessimistisch, zowel op het vlak van het behalen van de door de internationale gemeenschap vooropgestelde doelstellingen als op het vlak van de verwachtingen van deze technologie. Deze scenario's worden dan geëxtrapoleerd naar de specifieke omgeving Antwerpen.

Tot slot kunnen we dan de verschillende scenario's ten opzichte van elkaar evalueren om zo een antwoord te formuleren op de centrale onderzoeksvraag *'Wat zou de milieu-impact van plasmatechnologie zijn op een stadsomgeving (specifiek Antwerpen) zowel op korte (2020) als op lange (2050) termijn?'*.

## 2. Hoofdstuk 2: Omschrijving problematiek

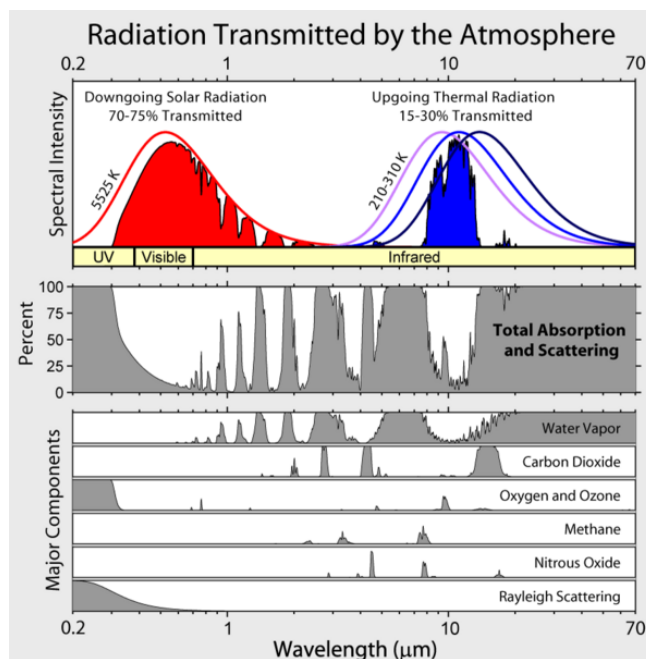
### 2.1. Broeikaseffect ('Greenhouse effect')

#### 2.1.1. Inleiding

Het oppervlak van de aarde en zijn atmosfeer worden bijna uitsluitend warm gehouden door energie van de zon; die energie wordt uitgestraald als een breed gamma aan licht. Van de zonne-energie die wordt ontvangen aan de top van de aardse atmosfeer, is iets meer dan de helft infrarood licht (IR), het overige is grotendeels zichtbaar licht en slechts als een kleine component van het geheel is ultraviolet licht (UV) aanwezig<sup>[1],[2]</sup>.

Van al dit ingestraalde licht op aarde wordt ongeveer 50% geabsorbeerd aan het aardoppervlak door waterlichamen, bodem, vegetatie, gebouwen, enzovoort. Verder wordt ongeveer 20% geabsorbeerd door waterdruppels in de lucht (voornamelijk in de vorm van wolken) en door moleculaire gassen. De UV component wordt voornamelijk door stratosferisch ozon, O<sub>3</sub>, en diatomisch zuurstof, O<sub>2</sub>, geabsorbeerd, terwijl de IR component wordt geabsorbeerd door koolstofdioxide, CO<sub>2</sub>, en voornamelijk waterdamp (zie figuur 1). De overblijvende 30% wordt terug in de ruimte gereflecteerd door wolken, gesuspendeerde deeltjes, ijs, sneeuw, zand, en andere reflecterende lichamen, zonder geabsorbeerd te worden.

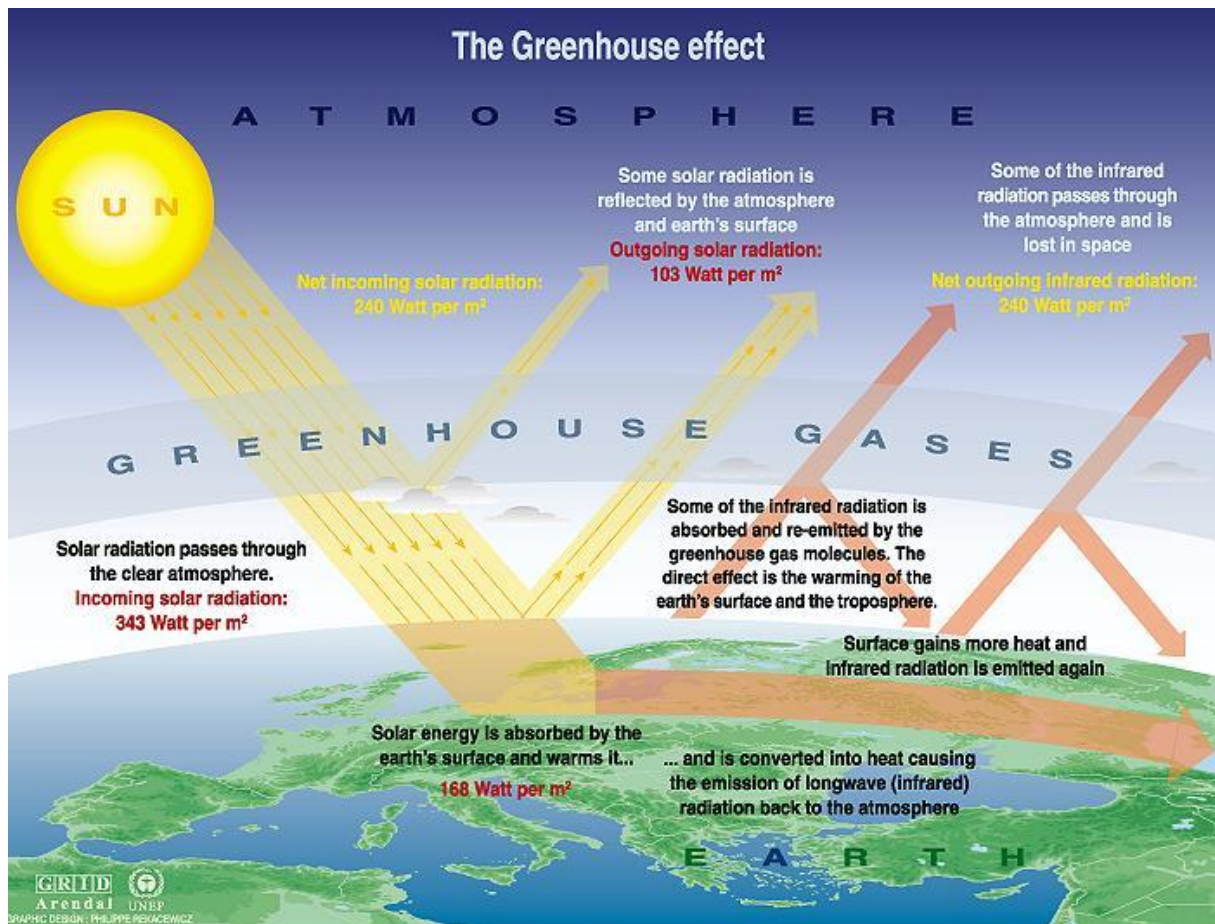
Zoals elk warm lichaam, straalt de aarde energie uit. Deze uitgestraalde energie is, zoals te zien in figuur 1 en 2, noch zichtbaar licht noch UV licht, omdat de aarde hiervoor gewoonweg niet warm genoeg is (Wiens displacement Law). De aarde straalt echter energie uit in het thermisch IR gebied (golflengte 5-100µm); dit gebeurt zowel vanaf het oppervlak van de aarde als vanuit de atmosfeer.



**Figuur 1** De verschillende fracties van het in- en uitgestraalde licht aan de aardse atmosfeer, alsook de verschillende fracties licht geabsorbeerd door de verschillende gascomponenten in de aardse atmosfeer<sup>[52]</sup>.

Bepaalde gassen in de atmosfeer absorberen dit thermisch IR licht—zij het bij specifieke golflengtes—waardoor het door de aarde uitgestraalde IR licht niet allemaal direct ontsnapt naar de ruimte. Zoals te zien in figuur 1 laten deze gassen, broeikasgassen genaamd, het invallende kortgolvlige licht dus vrijwel volledig door, maar absorberen het door de aarde heruitgestraalde thermische IR licht nagenoeg helemaal. Vervolgens zenden deze moleculen zelf IR licht uit in alle richtingen, waardoor ze dus de vrijgave van warmte door de aarde naar de ruimte toe bemoeilijken en de atmosfeer opwarmen, zoals te zien in figuur 2.





Sources: Okanagan university college in Canada, Department of geography, University of Oxford, school of geography; United States Environmental Protection Agency (EPA), Washington; Climate change 1995, The science of climate change, contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge university press, 1996.

**Figuur 2** Het broeikaseffect ('greenhouse effect')

Dit fenomeen, het broeikaseffect genaamd, is verantwoordelijk voor de gemiddelde temperatuur aan het oppervlak van de aarde van ca. +15°C in plaats van ongeveer -18°C. Het oppervlak van de aarde wordt door dit indirect mechanisme zelfs evenveel opgewarmd als door de direct geabsorbeerde zonne-energie. Het feit dat onze planeet dus niet volledig bedekt is door een dikke ijslaag komt door de natuurlijke aanwezigheid van dit effect gedurende miljarden jaren.

#### 2.1.2. Versterkt broeikaseffect ('Enhanced greenhouse effect')

Het fenomeen, waarbij door antropogene emissies de concentraties van de gassen in de lucht, die thermisch IR licht absorberen, toenemen, en de zo goed als zeker<sup>[3]</sup> hiermee gepaard gaande conversie van een grotere fractie van de uitgaande thermische IR energie naar hitte, wordt aangeduid als het 'versterkt broeikaseffect' (of artificiële klimaatopwarming). Op die manier tracht men om deze effecten te onderscheiden van het fenomeen dat zich al millennia lang natuurlijk voordoet. Hierdoor zou de gemiddelde temperatuur op aarde toenemen tot voorbij +15°C<sup>[1],[2],[3]</sup>, met alle gevolgen van dien, zowel positief als negatief.

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) stelt dat de opwarming van de aarde van de laatste 100 jaar buitengewoon is<sup>[3]</sup>. Bovendien acht het IPCC het onwaarschijnlijk dat deze opwarming alleen maar een gevolg is van natuurlijke fenomenen zoals vulkaanuitbarstingen. Sinds het begin van

de twintigste eeuw nam de gemiddelde oppervlaktetemperatuur op aarde met 0,6°C toe, in Europa zelfs met 0,95°C. Deze verandering is ongewoon, zowel in omvang als in snelheid. Ze overtreft ruimschoots de natuurlijke klimaatfluctuaties van de laatste 1000 jaar. De jaren negentig waren het warmste decennium sinds het begin van de waarnemingen in het begin van de negentiende eeuw<sup>[3]</sup>. Verder mat men tijdens de vorige eeuw in heel Europa een stijging van het zeeniveau<sup>[3]</sup>; de opwarming van de aarde in de twintigste eeuw droeg erg waarschijnlijk significant bij tot deze stijging.

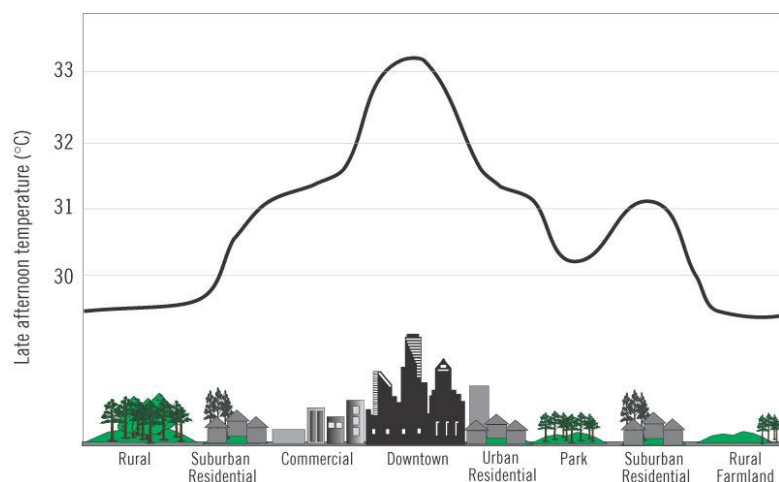
Er is een zeer hoge confidentie (>90%)<sup>[3]</sup> dat de opwarming van de aarde (en de ermee gepaard gaande zeespiegelstijging) in de jongste 50 jaar vooral toe te schrijven is aan menselijke activiteiten, met name de emissie van broeikasgassen ten gevolge van de verbranding van fossiele brandstoffen, alsook door landbouw en veeteelt, ontbossing, afvalverwerking en chemische processen in de industrie.

### 2.1.3. Gevolgen stedelijk milieu

Klimaatverandering leidt echter niet alleen tot mondiale opwarming en zeespiegelstijgingen, maar ook tot verandering van neerslagpatronen en windrichtingen en extremere weersomstandigheden. Deze veranderingen zullen effect hebben op veiligheid, economie, ecologie, maatschappelijke en sociale structuren, gezondheid en de kwaliteit van de leefomgeving in de brede zin<sup>[4],[5],[6],[7]</sup>.

De voorbije 10 jaar heeft een reeks van extreme meteorologische omstandigheden in stedelijke gebieden—overvloedige neerslag in London, extreme hittegolven in Parijs, overstromingen van de steden gelegen aan de Elbe, enzovoort—een alarmerend signaal gegeven over de kwetsbaarheid van steden voor de effecten van de klimaatopwarming. Ook in het stedelijk gebied zijn de klimaatverandering en haar gevolgen abrupt merkbaar geworden. Bovendien zijn de risico's op schade en overlast voor het stedelijk gebied relatief hoog vanwege de hoge bevolkingsdichtheid en de hoge economische waarde (industrie, wonen).

Klimaatverandering in het stedelijk gebied zal echter enigszins afwijken van de globale prognoses. De impact van klimaatverandering in stedelijk gebied is immers anders en er treden specifieke effecten op<sup>[4]</sup>. De belangrijkste daarvan zijn: het hitte-eilandeffect ('urban heat island' figuur 3), vermindering van de luchtkwaliteit, wateroverlast en droogte. De verwachte toename van extreme weersomstandigheden, zowel in de zomer als in de winter, zal belangrijke gevolgen hebben voor de menselijke gezondheid en leefbaarheid in de stedelijke omgeving.



**Figuur 3 Het hitte-eiland effect: het fenomeen dat de temperatuur in een stedelijk gebied gemiddeld hoger is dan in het omliggende landelijk gebied, door absorptie van zonlicht door de in de stad aanwezige donkere materialen. Hierdoor worden problemen tijdens hittegolven verergerd<sup>[9]</sup>.**

Tezelfdertijd echter leveren stedelijke gebieden een significante bijdrage aan de emissie en opbouw van broeikasgassen in de atmosfeer via huisvesting, transport, consumptie, industrie en recreatie. Deze situatie lijkt zich enkel maar uit te breiden als de huidige globale urbanisatietrend zich voortzet. Uit deze dualiteit blijkt des te meer het belang van doelstellingen om broeikasgasemissies in het stedelijke niveau te reduceren en het ontwikkelen van de daarvoor vereiste technologische innovaties.

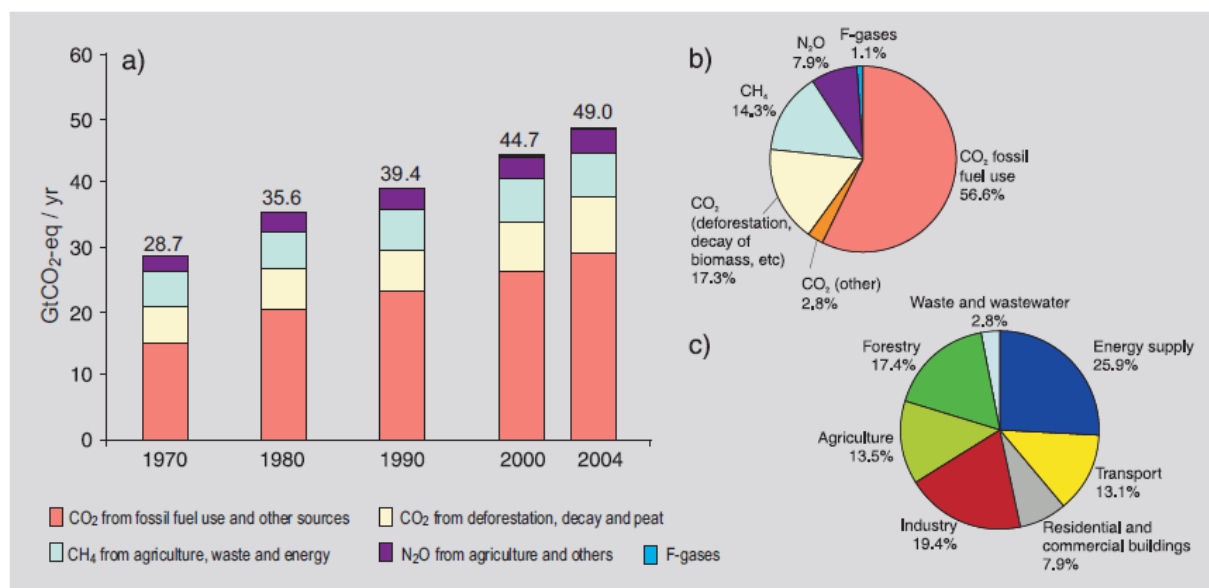
## 2.2. Broeikasgassen

### 2.2.1. Algemeen

Veranderingen in de atmosferische concentraties van broeikasgassen en aerosolen, landbedekking en zonnestraling wijzigen de energiebalans van ons klimaatstelsel en zijn hierdoor 'drivers' van klimaatverandering. Ze beïnvloeden de absorptie, verstrooiing en emissie van straling in de atmosfeer en aan het aardoppervlak<sup>[1],[2],[3]</sup>.

Sinds het pre-industriële tijdperk hebben menselijke activiteiten aanleiding gegeven tot een sterke toename van de broeikasgas- en aerosolconcentraties in de atmosfeer. Concreet resulteren de menselijke activiteiten in de emissie van vier langlevende broeikasgassen: koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>), distikstofoxide of ook wel lachgas genoemd (N<sub>2</sub>O) en gehalogeneerde koolwaterstoffen (zoals CFK's, HCFK's, HFK's, PFK's, SF<sub>6</sub>, ...), alsook in de emissie van ozonprecursoren (NO<sub>x</sub>, CO, NMVOS: niet-methaan vluchtige organische stoffen), die de vorming van troposferische ozon (O<sub>3</sub>), eveneens een belangrijk broeikasgas op deze hoogte, tot gevolg hebben.

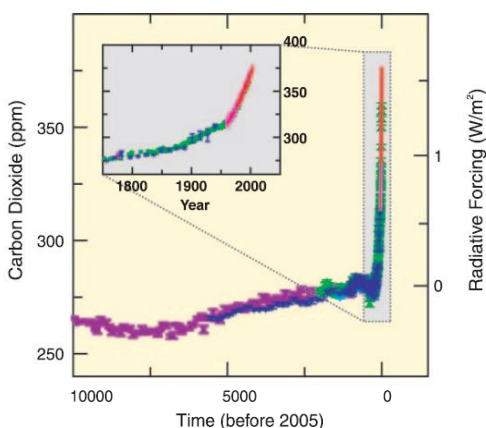
De globale atmosferische concentraties aan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O zijn opmerkelijk toegenomen sinds 1750 en overschrijden nu met verve de pre-industriële waarden—vastgesteld uit ijskernen die ons informatie leveren over de atmosferische concentraties gedurende duizenden jaren<sup>[3],[8]</sup>.



Figuur 4 De globale antropogene broeikasgasemissies in GtCO<sub>2</sub>-eq per jaar en de belangrijkste bronnen<sup>[3]</sup>.

Belangrijk om hierbij op te merken is dat de atmosferische concentraties van broeikasgassen toenemen wanneer de snelheid van emissie hoger is dan de snelheid van de verwijderingsprocessen. Deze verwijderingsprocessen kunnen dus zowel natuurlijk van aard zijn—sedimentatie van CO<sub>2</sub> door micro-organismen, oxidatie van CH<sub>4</sub> door OH in de atmosfeer, decompositie van N<sub>2</sub>O in de stratosfeer door UV licht, ...—als technisch/antropogeen zijn—oxidatie van CH<sub>4</sub>, reductie van CO<sub>2</sub>, gebruik van N<sub>2</sub>O als mild oxidans, ...—een onderwerp waar in de volgende hoofdstukken dieper op ingegaan zal worden. In figuur 4 zijn de globale antropogene broeikasgas emissies en de belangrijkste bronnen te zien, waarvan hieronder de drie belangrijkste broeikasgassen, nl. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O, in meer detail worden besproken.

### 2.2.2. CO<sub>2</sub>



**Figuur 5** Trend van de globale atmosferische CO<sub>2</sub> concentratie tot 10.000 jaar voor 2005<sup>[3]</sup>.

De globale atmosferische concentratie van CO<sub>2</sub> is, zoals te zien in figuur 5, van een pre-industriële waarde van ongeveer 280ppm toegenomen tot 386ppm in 2009, een toename met 38%<sup>[9]</sup>. Bovendien was de jaarlijkse aangroei in de periode 1995-2005 (1,9ppm/jaar) de grootste ooit sinds het begin van de continue metingen, ondanks een jaar-tot-jaar fluctuatie op de metingen. In totaal is bijna 63% van de verandering in de stralingsbalans op aarde door toedoen van antropogene activiteiten sinds de pre-industriële periode toe te schrijven aan CO<sub>2</sub><sup>[2]</sup>.

Die grote bijdrage is vooral te wijten aan de verbranding van fossiele brandstoffen, ontbossing en de productie van cement. In 2009 werd aldus een potentiële koolstofbron van ongeveer 30Gt CO<sub>2</sub> of omgerekend ongeveer 8Gt C geïmitteerd in de atmosfeer.

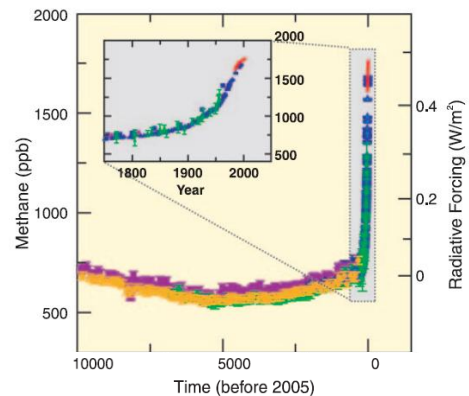
De belangrijkste bronnen van CO<sub>2</sub> in een stedelijk milieu zijn elektriciteitsproductie, transport, industrie en gebouwenverwarming. Men heeft aan CO<sub>2</sub> een 'Global Warming Potential' (GWP) van 1 toegekend. Aan de hand van de GWP is het mogelijk om de bijdrage van broeikasgassen aan het broeikaseffect t.o.v. elkaar af te wegen, waarbij CO<sub>2</sub> het referentiegas is.

### 2.2.3. CH<sub>4</sub>

De globale atmosferische concentratie van CH<sub>4</sub> is, zoals te zien in figuur 6, van een pre-industriële waarde van ongeveer 715ppb toegenomen tot 1788ppb in 2009, een toename met 150%<sup>[9]</sup>. De jaarlijkse aangroei is echter afgenomen sinds het begin van de jaren negentig, consistent met de totale emissies (natuurlijk en antropogeen) die bijna stabiel zijn gebleven tijdens deze periode. In totaal is ruim 18% van de verandering in de stralingsbalans toe te schrijven aan CH<sub>4</sub><sup>[2]</sup>. De emissies zijn vooral te wijten aan de verbranding van fossiele brandstoffen, exploitatie en distributie van aardgas, het storten van afval, de veeteelt en rijstvelden. In 2009 werd aldus een potentiële

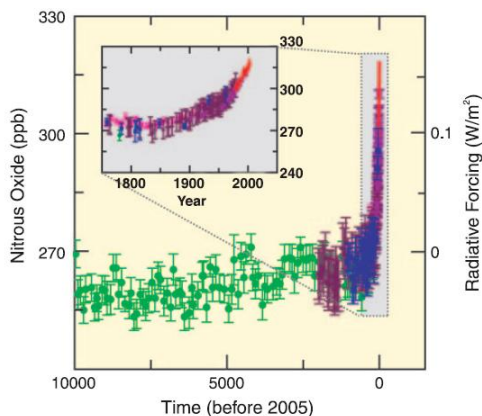
koolstofbron van ongeveer 7,5Gt CH<sub>4</sub> of omgerekend ongeveer 5,5Gt C geëmitteerd in de atmosfeer. Samen met de CO<sub>2</sub> emissies komt dit dus ongeveer neer op 13,5Gt C die mogelijks via technologische innovaties zou kunnen worden afgevangen en geconverteerd naar waardevolle chemicaliën.

De belangrijkste bronnen van CH<sub>4</sub> in een stedelijk milieu zijn afvalverwerking, waterzuivering, veeteelt en distributieverliezen. CH<sub>4</sub> heeft een GWP van 21 op een 100 jaar tijdsbasis, en heeft dus een relatief groter vermogen per molecule om bij te dragen tot het broeikas effect dan CO<sub>2</sub>.



**Figuur 6** Trend van de globale atmosferische CH<sub>4</sub> concentratie tot 10.000 jaar voor 2005<sup>[3]</sup>.

#### 2.2.4. N<sub>2</sub>O



**Figuur 7** Trend van de globale atmosferische N<sub>2</sub>O concentratie tot 10.000 jaar voor 2005<sup>[3]</sup>.

De globale atmosferische concentratie van N<sub>2</sub>O is, zoals te zien in figuur 7, van een pre-industriële waarde van ongeveer 270ppb toegenomen tot 321ppb in 2009, een toename met 19%<sup>[9]</sup>. Belangrijk hierbij is echter wel dat er geen natuurlijk verwijderingsproces actief is voor N<sub>2</sub>O. In totaal is ongeveer 6% van de verandering in de stralingsbalans toe te schrijven aan N<sub>2</sub>O<sup>[2]</sup>. De emissies zijn vooral te wijten aan de verbranding van fossiele brandstoffen, het vrijzetten van aardgas uit diepere aardlagen, het storten van afval, de veeteelt en rijstvelden.

De belangrijkste bronnen van N<sub>2</sub>O in een stedelijk milieu zijn chemische industrie, transport, verbranding van biomassa, veeteelt en mestgebruik. N<sub>2</sub>O heeft een GWP van 310 en heeft dus in vergelijking met de twee voorgaande gassen een groter vermogen per molecule om bij te dragen tot het broeikas effect.

#### 2.2.5. Gehalogeneerde koolwaterstoffen

Daarnaast zijn er ook nog de gehalogeneerde koolwaterstoffen (zoals CFK's, HCFK's, HFK's, PFK's, SF<sub>6</sub>, ...). In totaal is ongeveer 13% van de verandering in de stralingsbalans toe te schrijven aan gehalogeneerde koolwaterstoffen<sup>[2]</sup>. Deze stoffen werden vooral gebruikt als koelvloeistoffen, maar doordat deze de ozonlaag ernstig aantasten zijn het gebruik en de emissies ervan sinds de jaren '90 sterk aan banden gelegd. Aan deze broeikasgassen zal daarom verder in dit onderzoek geen aandacht worden besteed.

### 2.3. CO<sub>2</sub> emissies in een stedelijke omgeving: een kaart van Antwerpen

In Vlaanderen is CO<sub>2</sub> veruit het belangrijkste broeikasgas<sup>[10]</sup>. De emissies van CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en gehalogeneerde koolwaterstoffen zijn immers sinds midden de jaren '90 afgenomen, terwijl de emissie van CO<sub>2</sub> pas sinds 2003 een dalende trend vertoont. Hierdoor is het relatieve aandeel van de CO<sub>2</sub> emissies opgelopen tot 87% van het totaal van de broeikasgasemissies<sup>[2]</sup>. Dit is bijna volledig te wijten aan de verbranding van fossiele brandstoffen. Vlaanderen blijkt voor meer dan 80% afhankelijk van fossiele brandstoffen voor zijn energiegebruik ondanks het hoge aandeel (ca. 40%) van kernenergie in de Vlaamse elektriciteitsproductie<sup>[11]</sup>. In de verdere uiteenzetting zal de focus dan ook voornamelijk liggen op de CO<sub>2</sub> emissies.



Figuur 8 Kaart van het studiegebied (rode kader): stadsomgeving Antwerpen met inbegrip van de haven van Antwerpen<sup>[12]</sup>.

#### 2.3.1. Energiesector

Cijfers over de emissies van de energiesector specifiek voor het studiegebied (zie figuur 8 en bijlage 9.1) zitten vervat in de cijfers van de industrie<sup>[12]</sup> (zie verder (2.3.3), en ook tabel 1). Hierbij dient opgemerkt te worden dat door de aanwezigheid van de kerncentrale van Doel de emissiebijdrage van de energiesector in het studiegebied lager zal liggen dan voor het gemiddelde stedelijk gebied. In de toekomst, als de kernuitstap 2015-2025 zou worden uitgevoerd, zal men hier echter ook rekening mee moeten houden.

#### 2.3.2. Huishoudens-landbouw-tertiaire sector

Voor deze sectoren omvatten de cijfers enkel de verwarmingsemissies voor de huishoudens en de tertiaire sector en de verbrandingsemissies voor de landbouw<sup>[12]</sup>. Samen zijn deze verantwoordelijk voor 11,5% van de CO<sub>2</sub> emissies in het studiegebied (zie tabel 1).

#### 2.3.3. Industriesector

De aanwezigheid van een wereldhaven op het Antwerpse grondgebied zorgt voor een resem aan industriële activiteiten; de belangrijkste hiervan is de (petro)chemische sector. In de haven van Antwerpen is de op één na grootste petrochemische cluster ter wereld gevestigd<sup>[13]</sup>, met als basis 5 raffinaderijen gevolgd door 4 krakers die de nafta afkomstig van de raffinaderijen verder kraken tot de

nodige bouwstenen voor de petrochemische industrie. Bij al deze processen komt heel wat CO<sub>2</sub> vrij. In Vlaanderen vertegenwoordigt de (petro)chemische sector 50% van de emissies van de industrie<sup>[14]</sup>, maar er kan aangenomen worden dat dit percentage in het studiegebied significant hoger zal liggen. Zoals blijkt uit tabel 1 was de industrie (met inbegrip van de energiesector) in 2008 rechtstreeks verantwoordelijk voor 78,5% van de totale CO<sub>2</sub> emissies in het studiegebied<sup>[12]</sup>. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat de aanwezige sectoren zeer energie-intensief zijn en dat cijfers over de broeikasgassen die vrijkomen bij de productie van de nodige energie niet altijd volledig in deze cijfers vervat zitten, wat betekent dat de effectieve bijdrage vermoedelijk nog groter was.

#### 2.3.4. Transportsector

Zoals bijna elk stedelijk gebied, wordt Antwerpen omsloten door een verkeersring. Deze is aangesloten op de belangrijkste Vlaamse hoofdwegen (E17, E19, E313, E34). De combinatie van een aantal factoren zorgt ervoor dat er binnen het studiegebied heel wat transportbewegingen zijn: de aanwezigheid van de Antwerpse haven, de vaststelling dat Vlaanderen vooral een transitgebied<sup>[15]</sup> is en de aansluiting van de Antwerpse ring op de belangrijkste Vlaamse hoofdwegen. In totaal maken deze transportbewegingen 10% van de CO<sub>2</sub> emissies in het studiegebied uit<sup>[12]</sup>.

**Tabel 1 De CO<sub>2</sub> emissies in aantal ton per jaar, in het studiegebied (zie figuur 8) voor het jaar 2008 onderverdeeld in drie verschillende sectoren: transport, industrie (incl. energie) en huishoudens-landbouw-tertiaire sector<sup>[12]</sup>.**

<b>CO<sub>2</sub> emissies in het studiegebied in 2008, in ton/jaar</b>			
<b>Transport</b>	<b>Industrie (incl. Energie)</b>	<b>Huishoudens-landbouw-tertiaire sector</b>	<b>Totaal</b>
1.629.669	12.909.000	1.880.906	16.419.575
10%	78,5%	11,5%	100%
<b>Procentueel aandeel van de Antwerpse emissies in de Vlaamse emissies</b>			
12%	69%	7,5%	33%

## 2.4. Verwachtingen

Zelfs als de emissies vandaag al zouden worden stopgezet, zal de klimaatverandering met grote waarschijnlijkheid<sup>[3]</sup> nog lange tijd doorgaan, vanwege de broeikasgassen die zich in de loop der tijd in de dampkring verzameld hebben. Het is dan ook niet moeilijk om in te beelden dat hoe langer er wordt gewacht met de reductie en uiteindelijke stopzetting van de emissies, hoe langer de klimaatverandering en zijn effecten zullen doorgaan, mogelijk zelfs met abrupte en irreversibele gevolgen als resultaat. Het IPCC heeft daarom verschillende scenario's en emissiestabilisatietrajecten uitgewerkt (waarover in hoofdstuk 5 meer) om de actoren van de internationale gemeenschap te helpen bij het uitstippelen van een doeltreffend en adequaat klimaatbeleid.

#### 2.4.1. Korte termijn (2020)

Het UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) van 1992 en het Kyotoprotocol van 1997 waren belangrijke eerste stappen, met als doel om de geïndustrialiseerde landen hun verantwoordelijkheid te laten opnemen. Nu is het echter vooral belangrijk om te kijken naar wat komt na 2012. Europa heeft hierin een voorname stap gezet om de leidende figuur te worden met zijn 20-20-20 doelstellingen<sup>[16],[17]</sup> (zie Bijlage 9.2). Als globaal doel wordt een maximale opwarming van 2°C boven het pre-industriële tijdperk vooropgesteld (stabilisatiegrens op 450ppm CO<sub>2</sub>-equivalenten). Dit zal echter mondiale inspanningen vragen<sup>[3]</sup>, zowel van geïndustrialiseerde landen (reductie van 30% tegen 2020) als van ontwikkelingslanden (15-30% minder dan het BAU ('business as usual') scenario voor 2020). De hieraan verbonden kosten zouden neerkomen op ongeveer 1% van het mondiaal BBP ('bruto binnenlands product'), terwijl de kosten ten gevolge van de klimaatverandering minstens 5% tot zelfs 20% of meer kunnen bedragen<sup>[2],[3],[16]</sup>. Bovendien zullen de inspanningen ter bestrijding van de klimaatverandering ook de luchtkwaliteit verbeteren en aldus een positief effect hebben op de geschatte kosten voor luchtkwaliteitsmaatregelen alsook op de gezondheidskosten<sup>[18]</sup>.

Om deze doelstellingen te halen, zal het uitbouwen van een adequaat en doeltreffend klimaatbeleid onontbeerlijk zijn, waarbij het oprichten van kenniscentra en mondiale communicatie noodzakelijk zal zijn. Dit geldt zowel voor investeringen in hernieuwbare energie, energie-efficiëntie, innovatieve onderzoeken en mitigatietechnologieën—'carbon capture and storage', biobrandstoffen, brandstofcellen, plasma-geassisteerde katalyse,...—als voor informatieuitwisseling over al deze zaken. Mitigatiemaatregelen (d.i. maatregelen die beogen de emissie van broeikasgassen te reduceren) alleen zullen echter onvoldoende zijn<sup>[3]</sup>, en bijgevolg zullen ook adaptatiemaatregelen (d.i. maatregelen die beogen de negatieve gevolgen van de klimaatverandering te minimaliseren) zowel op korte als lange termijn nodig blijken om de mogelijke impact van de klimaatverandering het hoofd te bieden.

#### 2.4.2. Lange termijn (2050)

Op lange termijn zullen nog drastischere reductiedoelstellingen (globale reductie van ten minste 50% tegen 2050, met een emissiepiek voor 2020) moeten worden opgesteld om van een stabilisatie van de concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer over te gaan tot een werkelijke daling van deze concentraties<sup>[3]</sup>. Om deze uitdagingen aan te gaan, zullen hoogstwaarschijnlijk revolutionaire ideeën en innovaties nodig zijn, zoals bv. de omvorming tot een waterstofeconomie, cradle-to-cradle principes, kernfusie en ideeën en innovaties die nu nog niet eens voor mogelijk worden gehouden. Zoals reeds hiervoor vermeld zullen echter ook op lange termijn het mitigatie- en adaptatiebeleid en de bijhorende maatregelen hand in hand moeten gaan.



### **3. Hoofdstuk 3: Technologische oplossingen**

#### **3.1. Inleiding**

Het heersende 'Dominant Sociaal Paradigma'<sup>[19],[20]</sup> stelt veel vertrouwen in de wetenschap en de technologie om problemen op te lossen die hoog op de sociale agenda staan. Verder beschouwt dit dat alle kennis voor het grijpen ligt en enkel maar ontdekt moet worden. Kort door de bocht gaand ging de huidige Westerse maatschappij er vanuit dat de wetenschap en de technologie alle problemen die zich zouden manifesteren wel zodanig zouden kunnen oplossen dat een aanpassing van levenswijze en visie niet noodzakelijk was (voornamelijk 'end-of-pipe' oplossingen). Kenmerkend voor (milieu)problemen is dat ze zich eerst moeten manifesteren en als dusdanig (h)erkend moeten worden voordat naar oplossingen gezocht kan worden. Het probleem omtrent de opwarming van de aarde ten gevolge van broeikasgassen is hierop geen uitzondering (gezien zijn mondiale karakter), maar ligt volgens sommigen wel mee aan de basis van een verschuiving naar een nieuw (ecologisch) 'Sociaal Paradigma', waarbij limieten worden gesteld aan wetenschap en technologie<sup>[19],[21]</sup>. Getuige daarvan is de noodzaak volgens het IPCC voor het samengaan van mitigatie- en adaptatiebeleid zoals vermeld in het vorige hoofdstuk.

De werkelijkheid bleek hierdoor echter niet minder confronterend en een zoektocht naar mogelijke oplossingen vanuit de wetenschap en de technologie is dan ook al enige tijd bezig<sup>[1],[2],[3],[22]</sup>. Men kan verwachten dat een brede portfolio aan technologieën een rol zal spelen in het behalen van de UNFCCC doelstellingen en in het onder controle houden van het risico van klimaatopwarming. In dit hoofdstuk zullen dan ook een aantal reeds bestaande technieken en een aantal innovatieve technologische oplossingen voor de conversie van broeikasgassen (hoofdzakelijk CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub>) worden besproken, alsook zal aangegeven worden welke unieke rol CCS-technieken ('carbon capture and storage') in dit verhaal kunnen spelen.

Daarenboven is het nog belangrijk te vermelden dat het IPCC voor alle stabilisatiescenario's stelt dat 60-80% van alle reducties binnen de energie- en industriële sector moeten plaatsvinden<sup>[3]</sup>. De industriële sector is specifiek voor Antwerpen verantwoordelijk voor bijna 80% van de emissies (inclusief emissies van de energiesector)<sup>[12]</sup>. Hieruit komt het belang van emissiereducerende technologieën specifiek voor een stedelijke omgeving als Antwerpen naar voor.

#### **3.2. Huidige technieken**

##### **3.2.1. Stoom 'reforming' van CH<sub>4</sub> ('steam methane reforming'; SMR)**

Stoom 'reforming' van aardgas (CH<sub>4</sub>) tot syngas (d.i. een gasmengsel van CO en H<sub>2</sub>) wordt wereldwijd reeds op grote schaal gebruikt in de gasindustrie, voor de productie van commercieel bulk H<sub>2</sub> (48% van de wereldwijde productie<sup>[23]</sup>), en in de kunstmestindustrie, waarbij de H<sub>2</sub> wordt gebruikt voor de productie van ammoniak. Stoom 'reforming' is gebaseerd op het chemisch proces waarbij bij hoge temperaturen (700 – 1100°C) en in de aanwezigheid van een metaalkatalysator (nikkel), stoom

reageert met methaan, en daarbij een mengsel van koolstofmonoxide (CO) en waterstof (H<sub>2</sub>) produceert, ook wel synthese gas of syngas genoemd.

De reactievergelijking van voorgaand proces is:



Voor veel toepassingen is er een andere H<sub>2</sub>/CO verhouding wenselijk dan 3. Dit kan worden opgelost door extra H<sub>2</sub> te recupereren—en alzo de verhouding te veranderen—bij een lagere temperatuur met de water-gas-shift-reactie:



De eerste reactie is sterk endotherm; de tweede reactie is licht exotherm, maar de totale reactie is nog steeds sterk endotherm<sup>[24]</sup>.

Deze techniek (reactie 1) converteert op het eerste zicht succesvol CH<sub>4</sub> naar andere bruikbare chemicaliën (syngas) met een efficiëntie van ongeveer 70%<sup>[23]</sup>. Hierbij dient echter opgemerkt te worden dat dit proces sterk endotherm is en dat achteraf meestal nog nabehandelingen uitgevoerd moeten worden naargelang de uiteindelijke toepassing van het syngas. Daardoor komen uiteindelijk bij de productie van de energie voor alle nodige processen weer een grote hoeveelheid broeikasgassen vrij waardoor het CO<sub>2</sub>-eq mitigatiepotentieel van deze techniek sterk afneemt<sup>[24]</sup>.

### 3.2.2. CO<sub>2</sub> 'reforming' van CH<sub>4</sub> ('dry reforming')

'Dry reforming' is het omvormen van CH<sub>4</sub> naar syngas met CO<sub>2</sub> als reactant. Deze reactie werd voor het eerst bestudeerd door Fischer en Tropsch in 1928 en is sindsdien extensief bestudeerd in de literatuur<sup>[24],[25],[26],[27]</sup>. De reactievergelijking voor CO<sub>2</sub> 'reforming' is:



Dit proces is eveneens endotherm, zelfs 20% meer dan de stoom 'reforming'<sup>[24],[25]</sup>. De reactievergelijking impliceert echter onmiddellijk het mogelijke belang van dit proces, daar het de twee belangrijkste broeikasgassen, CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>, als uitgangsubstanten heeft.

Eén van de grootste problemen echter is dat deze reactie er voor bekend staat om aanleiding te geven tot koolstofdepositie op het katalysatormateriaal. De kans op koolstofdepositie voor de stoichiometrische 'dry reforming' reactie is significant groter dan zijn equivalent bij de SMR (hierboven). Hierdoor is het risico op vergiftiging van het katalysatormateriaal zeer groot, en bijgevolg is er nog steeds veel onderzoek hieromtrent lopende<sup>[24],[25]</sup>. Daarenboven gelden dezelfde opmerkingen als bij de SMR vanwege het sterk endotherm karakter van dit proces.

### 3.2.3. Hydrogenatie van CO<sub>2</sub> (de Sabatier reactie)

Bij de Sabatier reactie reageert CO<sub>2</sub> met H<sub>2</sub> in de aanwezigheid van een metaalkatalysator (nikkel en ruthenium blijken de meest effectieve) met de vorming van CH<sub>4</sub> en H<sub>2</sub>O als reactieproducten:



In tegenstelling tot de twee voorgaande processen is de Sabatier reactie dus sterk exotherm (omgekeerde van de SMR)<sup>[28]</sup>. Dit proces wordt reeds frequent gebruikt voor het scrubben van sporen

CO<sub>2</sub> en CO die in de reactor zijn achtergebleven bij de productie van H<sub>2</sub>, voor de productie van ammoniak en voor het gebruik in brandstofcellen, alsook voor het verwijderen van CO<sub>2</sub> uit afgesloten ruimtes (duikboten, ruimteschepen)<sup>[28]</sup>. Ondanks het feit dat deze techniek op het eerste zicht gewoon het ene broeikasgas in het andere omzet, is deze voornamelijk interessant voor het gebruik in brandstofcellen, waar het geproduceerde CH<sub>4</sub> bijna onmiddellijk terug als brandstof wordt verbruikt voor het opwekken van energie, waarbij dan opnieuw CO<sub>2</sub> wordt gevormd die dan weer in de brandstofcel kan worden omgezet naar CH<sub>4</sub>, enzovoort.

Het probleem van het gebruiken van deze techniek bij het reduceren van grote volumes CO<sub>2</sub> emissies (van bijvoorbeeld energiecentrales) maar ook voor brandstofcellen is de grote hoeveelheid economisch geproduceerde H<sub>2</sub> die hiervoor nodig is. Momenteel focust een belangrijk deel van het onderzoek naar het gebruik van deze techniek als mogelijke CO<sub>2</sub> mitigatietechniek, op het vlak van het produceren van H<sub>2</sub> op een efficiënte en economisch rendabele manier, gebruikmakend van hernieuwbare energiebronnen<sup>[28]</sup>.

#### 3.2.4. Productie van chemicaliën en andere toepassingen

Er bestaan een aantal chemische processen voor de conversie van CO<sub>2</sub> voor gebruik in de chemische industrie. Representatieve voorbeelden hiervan zijn<sup>[26]</sup>:

- De synthese van ureum—dat gebruikt wordt voor de productie van verschillende polymeren en mestproducten—uit NH<sub>3</sub> en CO<sub>2</sub>:



- De synthese van salicylzuur—dat bijvoorbeeld gebruikt wordt voor de productie van aspirine—uit fenolen en CO<sub>2</sub>:

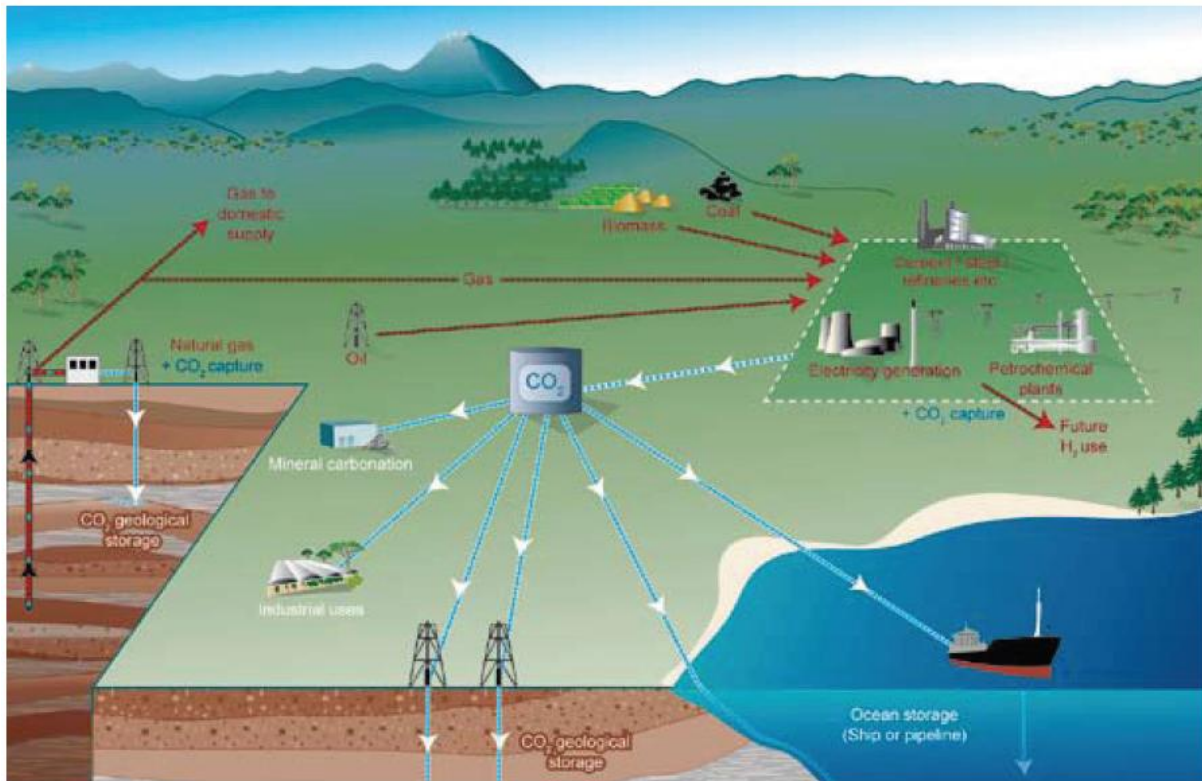


Verder wordt CO<sub>2</sub> wereldwijd reeds gebruikt als koelmiddel voor het conserveren van voedingsmiddelen, bron voor koolzuurgas in dranken, superkritisch oplosmiddel, inert medium (zoals in brandblussers), neutraliserend agens en als gas voor serres in de tuinbouw en om bepaalde pneumatische apparatuur of de inhoud van een cilinder onder druk te zetten.

Het aantal toepassingen hiervan met een grote marktvraag is echter relatief beperkt; één van de enige uitzonderingen hierop is de ureumsynthese, waarvan de wereldwijde productie in 2002 goed was voor het verbruik van 81 miljoen ton CO<sub>2</sub><sup>[26]</sup>.

### 3.3. CCS technieken

'Carbon capture and storage' technieken (CCS), zoals afgebeeld in figuur 9, kwamen pas echt onder de aandacht van de politieke wereld na het verschijnen van de speciale publicatie 'Carbon Dioxide Capture and Storage' van het IPCC in 2005<sup>[29]</sup>. Deze technieken werden verder op COP 11 ('The Eleventh Conference of the Parties to the Convention', dat plaatsvond in 2005) erkend als volwaardig instrument tegen de klimaatopwarming; de redenering hierachter is terug te vinden in datzelfde speciaal rapport alsook in het 3de (2001) en 4de (2007) beoordelingsrapport van het IPCC<sup>[3],[29],[30]</sup>.



**Figuur 9** Mogelijke vormen van 'carbon capture and storage': relevante bronnen, transport- en opslagmogelijkheden<sup>[29]</sup>.

Hierin wordt vermeld dat geen van de momenteel beschikbare technologieën alleen in staat zal zijn om de CO<sub>2</sub> emissies onder controle te houden en de CO<sub>2</sub> concentraties in de atmosfeer te stabiliseren. Verder wordt aangenomen dat eens het stabilisatiepunt bereikt is, negatieve CO<sub>2</sub> emissietechnologieën nodig zullen zijn om de atmosferische concentraties voldoende te laten dalen tot pre-industriële niveaus.

De portfolio van technieken die onder CCS geklasseerd worden, is sinds de introductie ervan enkel maar gestaag blijven toenemen, en hiervoor wordt verwezen naar het desbetreffende IPCC rapport<sup>[29]</sup>. Algemeen genomen bestaat CCS uit drie stappen: 1) het afvangen en voorbereiden van CO<sub>2</sub>, 2) het transport en 3) het vastleggen van CO<sub>2</sub>. Voor een schatting van het potentieel en de huidige kosten voor het afvangen van CO<sub>2</sub> in Vlaanderen wordt verwezen naar een studie van het VITO in het 'Achtergronddocument Klimaatverandering' van het Mira-rapport<sup>[2]</sup>.

### 3.3.1. Afvangen en voorbereiden van CO<sub>2</sub>

De eerste stap is logischerwijs het afvangen van CO<sub>2</sub> daar waar het geëmitteerd wordt. Deze eerste stap is technisch gezien ook ineens de moeilijkste en momenteel enkel nog maar mogelijk bij grote puntbronnen (elektriciteitscentrales, bepaalde petrochemische installaties, ...). Dit komt doordat in de meeste, om niet te zeggen in zo goed als alle, gevallen de CO<sub>2</sub> moet worden afgevangen uit de rookgassen. De enige uitzondering hierop zijn chemische processen waarbij een nevensgasstroom van zuiver CO<sub>2</sub> ontstaat. Vanuit het standpunt van efficiëntie van de vastlegging en het transport is het immers van belang om over relatief zuiver CO<sub>2</sub> te beschikken. Voor het afvangen en zuiveren van CO<sub>2</sub>

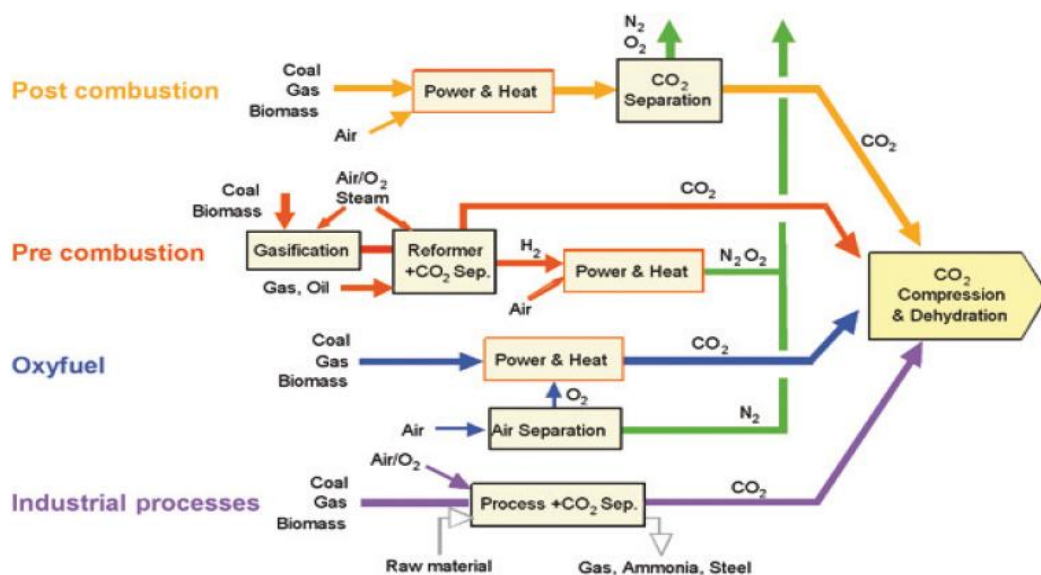
uit rookgassen zijn verschillende technologieën beschikbaar, zoals te zien in figuur 10, die voornamelijk afkomstig zijn uit de chemische industrie. Onderzoek richt zich momenteel op het optimaliseren van deze technieken voor het opzuiveren van CO<sub>2</sub> uit deze rookgassen<sup>[2],[29]</sup>. Ook hier geldt weer dat het afvangen van CO<sub>2</sub> energie kost die momenteel weer hoofdzakelijk wordt gewonnen uit fossiele brandstoffen.

### 3.3.2. Transport

Deze stap lijkt veruit de eenvoudigste in de hele keten: de technologie is volop beschikbaar, de industrie heeft er reeds ervaring mee en er bestaat uitgebreide regelgeving omtrent het transport van chemicaliën. Voor het transport over land komen in aanmerking: pijpleidingen (voor grote volumes), tankwagens of treinen (voor kleine volumes). Voor transport op zee komen in aanmerking: pijpleidingen (voor grote volumes) en schepen (voor kleine volumes). CO<sub>2</sub> wordt uit efficiëntie-overwegingen meestal in vloeibare vorm vervoerd en gedroogd (<10 ppm H<sub>2</sub>O) om corrosie van leidingen tegen te gaan<sup>[2]</sup>.

### 3.3.3. Vastleggen van CO<sub>2</sub>

Voor het vastleggen van CO<sub>2</sub> zijn meerdere oplossingen mogelijk, zowel permanente als tijdelijke, zowel geologische als oceanologische, zowel chemische ('chemical' en 'mineral storage') als biologische ('biological' en 'terrestrial storage'), zowel in vloeibare als gasvormige toestand (zie figuur 9). Voor meer informatie verwijzen we ook hier weer naar het IPCC rapport en het Achtergronddocument 'Klimaatverandering' van het Mira rapport<sup>[2],[29]</sup>.



Figuur 10 Overzicht van de verschillende CO<sub>2</sub> afvangprocessen en technieken<sup>[29]</sup>.

### 3.3.4. Belang van CCS voor andere technieken

Een vaak wederkerend punt van kritiek uit ‘groene’ hoek is dat deze techniek bijna het summum van end-of-pipe technologie is, en dus niet de echte oorzaak van het probleem aanpakt (‘Driving forces’ of ‘Pressure’) maar enkel ingrijpt op de toestand (‘State’). Zonder ons in dit debat te mengen, is het interessant om vanuit een ander perspectief een blik te werpen op de mogelijke impact van deze technologie, met name op de impact voor andere technologieën (zowel deze die hiervoor al besproken werden als diegene die nog moeten volgen).

Een aantal experimentele technieken boeken immers reeds beloftevolle en positieve resultaten op het vlak van de conversie van CO<sub>2</sub> naar andere bruikbare meer waardevolle chemicaliën—chemicaliën die momenteel grotendeels uit fossiele grondstoffen moeten worden gehaald via endotherme reacties, met de verbranding van weer meer fossiele grondstoffen. Deze technieken worden momenteel op kleine schaal en onder optimale omstandigheden verder onderzocht. Eén van de belangrijkste parameters voor de efficiëntie van de conversie en het vermijden van mogelijke nevenreacties is de aanvoer van zuivere gassen of gasmengsels. En net dit is één van de belangrijkste punten bij CCS voor het afvangen van CO<sub>2</sub>: *‘Vanuit het standpunt van efficiëntie van de vastlegging en het transport is het immers van belang om over relatief zuiver CO<sub>2</sub> te beschikken.’*

Het verder ontwikkelen en optimaliseren van CCS technieken zou dus een ‘window of opportunity’ kunnen bieden waarvan technieken die momenteel nog in de experimentele fase zitten, eens geoptimaliseerd en opgeschaald naar industrieel niveau, op meerdere vlakken de vruchten van kunnen plukken. Hierbij dient vooral aandacht te worden besteed aan de aanwezigheid van technologie voor het afvangen en opzuiveren van (rook)gassen tot zuiver CO<sub>2</sub> dat dan dienst kan doen als grondstof. Daarnaast kan er getracht worden de in tussentijd reeds afgevangen CO<sub>2</sub> die in tijdelijke reservoirs is opgeslagen (i.p.v. permanent gefixeerd) zo vlot mogelijk beschikbaar te maken als grondstofbron voor deze technieken.

### **3.4. Innovatieve technieken**

De conversie van broeikasgassen naar meer waardevolle chemicaliën mag dan wel niet de eenvoudigste weg zijn, maar zulk proces biedt wel een economisch interessante en duurzame oplossing, daar bepaalde broeikasgassen (zoals CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>) op die manier een alternatief kunnen vormen voor fossiele grondstoffen die op lange termijn minder aantrekkelijk zullen worden, omwille van beschikbaarheid en daaraan gekoppelde prijs. Daarenboven komt men ook dichterbij in de buurt van het revolutionaire ‘cradle-to-cradle’ concept, daar onze ‘afvalstof’ (broeikasgassen) zou worden omgezet naar nieuwe ‘grondstoffen’ (waardevolle chemicaliën).

Het onderzoek naar CO<sub>2</sub> conversie benadert dus op een proactieve manier het concept duurzame ontwikkeling, waarbij ‘out-of-the-box’ denken, multidisciplinair en geïntegreerd onderzoek met betrekking tot de chemie, materiaalkunde, katalyse, fysica, procestechologie en andere disciplines, aangemoedigd moeten worden. In dit deel volgen enkele, momenteel nog algemene, experimentele technieken opgedeeld volgens hun eigenschappen<sup>[26]</sup>.

#### 3.4.1. Thermochemisch / katalytisch

Hieronder vallen voornamelijk de technieken zoals vandaag de dag reeds gebruikt, zijnde SMR en 'dry reforming', waarbij echter nog uitgebreid onderzoek wordt gedaan naar het gebruik van verschillende katalysatormaterialen en toevoerstromen (zoals ongezuiverde rookgassen) om de efficiëntie en de selectiviteit van de reacties te beïnvloeden<sup>[24],[25],[26],[27]</sup>.

#### 3.4.2. Homogene katalyse of superkritische vloeistofextractie ('super critical fluid extraction')

Superkritisch CO<sub>2</sub> kan worden gebruikt als solvent voor superkritische vloeistofextractie, of als reactiedium of co-reagens voor een groot aantal chemische reacties. In het algemeen zorgt superkritisch CO<sub>2</sub> voor meer milieuvriendelijke en 'groenere' synthetische procedures en uitkomsten, waardoor het dus voornamelijk op een indirecte manier zorgt voor een vermindering van de uitstoot van broeikasgassen<sup>[26]</sup>.

#### 3.4.3. Biochemisch / enzymatisch

Gebruikmakend van de natuurlijk aanwezige biologische en enzymatische processen (algen, bacteriën,...), zorgt deze techniek voor de fixatie van CO<sub>2</sub> in biologisch materiaal, waarna de geproduceerde biomassa als biobrandstof of biodiesel zou kunnen worden gebruikt<sup>[1],[26],[29],[31],[32],[33]</sup>.

#### 3.4.4. Elektrochemisch / katalytisch

Een van de meest interessante resultaten in de elektrochemie is de reductie van CO<sub>2</sub> naar een mengsel van CH<sub>4</sub> en C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (etheen) aan een koperelektrode. Hierachter blijkt echter een complex multistapsmechanisme schuil te gaan, waardoor de Faradeïsche efficiëntie (beschrijft de efficiëntie waarmee ladingen, elektronen in dit geval, worden overgedragen om zo een elektrochemische reactie te vergemakkelijken) van het proces zeer gevoelig is voor de omgevingsparameters. Er wordt dan ook uitgebreid onderzocht hoe de katalytische activiteit en selectiviteit voor de productie van koolwaterstoffen vergroot kan worden<sup>[34]</sup>.

#### 3.4.5. Zonne-thermisch / katalytisch

Hierbij wordt de thermische energie van de zon aangewend als energie-input in experimentele reactoren voor het uitvoeren van SMR en 'dry reforming', waarna eventueel uit het geproduceerde syngas de CO<sub>2</sub> wordt afgevangen voor de productie van een zuivere H<sub>2</sub> gasstroom<sup>[35]</sup>.

Andere experimenten zijn dan weer gebaseerd op het produceren van CO door het onttrekken van een O atoom aan CO<sub>2</sub> met behulp van een composietmateriaal en de thermische energie van de zon. Dezelfde techniek kan ook gebruikt worden voor het onttrekken van een O atoom aan H<sub>2</sub>O voor de productie van H<sub>2</sub>. De combinatie van beide processen levert opnieuw syngas<sup>[36]</sup>.

#### 3.4.6. Fotochemisch / katalytisch

Deze techniek maakt gebruik van de fotonen i.p.v. de thermische energie van de zon. Hierbij wordt licht op een halfgeleider-kathode ingestraald waarna de fotonen worden omgezet in elektriciteit. De als dusdanig geproduceerde elektronen reageren, met behulp van een katalysator, met CO<sub>2</sub>—dat hiervoor in oplossing wordt gebracht—tot CO aan de kathode. Aan de anode reageert H<sub>2</sub>O weg tot O<sub>2</sub>. Het geproduceerde CO zou gerecombineerd kunnen worden met H<sub>2</sub> voor de productie van syngas<sup>[37]</sup>.

#### 3.4.7. Plasma-geassisteerde katalyse

Met uitzondering van de elektrochemische en biochemische conversie is de meerderheid van voorgaande technieken gericht op het produceren van syngas, en sommige technieken zetten zelfs enkel het ene broeikasgas om in het andere (zie bijvoorbeeld 3.2.3. en 3.4.4.). Het zou echter—zowel uit economische als uit ecologische overwegingen—veel interessanter zijn om CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> rechtstreeks te converteren naar methanol, formaldehyde en hogere analogen. Plasma-geassisteerde katalyse benadert de conversie van broeikasgassen vanuit een multidisciplinair standpunt, waarbij het de specifieke selectiviteit van katalysatoren combineert met de eigenschap van plasma's voor het initiëren van thermodynamisch ongunstige reacties<sup>[38],[39]</sup>. Kort samengevat worden inerte moleculen (zoals CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>) door het plasma geactiveerd waarna de katalysator ervoor zorgt dat de reactieve componenten selectief recombineren tot de gewenste uitgangproducten. In het volgende hoofdstuk zal deze techniek, welke nieuwe perspectieven biedt, verder uitgediept worden.



## 4. Hoofdstuk 4: Plasmatechnologie

### 4.1. Inleiding

Uit de voorgaande hoofdstukken blijkt zeer duidelijk dat de katalytische conversie van broeikasgassen (voornamelijk CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub>) naar meer waardevolle chemicaliën (en brandstoffen) één van de uitdagingen is voor de 21ste eeuw. Dit wordt eens te meer onderlijnd door 'The Strategic Research Agenda' van 'The European Technology Platform for Sustainable Chemistry' (SUSCHEM)<sup>[40]</sup>, waarin de toekomstige prioriteiten voor Europees onderzoek binnen de onderzoeksvelden chemie, chemische technologie en industriële biotechnologie worden uitgelijnd volgens de opinie van de verschillende belangengroepen. In dit document wordt de ontwikkeling van nieuwe katalytische processen voor de conversie van broeikasgassen (in het bijzonder CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub>) naar meer waardevolle chemicaliën (en brandstoffen) beschouwd als één van de sleuteltechnologieën voor het creëren van een duurzame, wereldwijd competitieve chemische industrie in Europa. Gezien de relevante aanwezigheid van de chemische industrie in Vlaanderen en meer specifiek in Antwerpen, spreken de voordelen voor deze regio, zowel op economisch vlak als inzake duurzaamheid en milieu voor zich.

CH<sub>4</sub> is, voornamelijk vanwege zijn inertheid, momenteel een sterk onderbenutte bron voor de productie van waardevolle chemicaliën. Een directe (thermische) syntheseroute voor koolwaterstoffen vanuit CH<sub>4</sub> is niet haalbaar en de conventionele indirecte methodes (zie hoofdstuk 3) hebben lage opbrengsten en vereisen een hoge energie-input. Een voorbeeld hiervan is de productie van methanol. Hierbij wordt eerst via het SMR proces syngas gevormd waarna via een tweede katalytisch proces methanol wordt geproduceerd. Zoals reeds vermeld is dit echter een zeer inefficiënt proces: 'state-of-the-art' 'reforming' technologieën, zoals het zgn. ICI proces (d.i. een thermisch proces voor de productie van methanol uit CH<sub>4</sub> bestaande uit een stoom 'reforming' sectie, een methanol synthese sectie en een distillatie sectie), verbruiken meestal zes keer meer energie voor de conversie van CH<sub>4</sub> (via syngas) naar methanol dan nodig volgens de thermodynamica<sup>[41]</sup>. De minimum energie nodig—volgens de thermodynamica—voor de productie van methanol is immers 2,3 GJ per ton, terwijl het thermisch ICI proces 15 GJ per ton verbruikt<sup>[41]</sup>. Het is dus duidelijk dat een direct proces—dat bovendien de dure syngas stap overslaat—een groot voordeel zou bieden. Daarenboven zorgen de enorme wereldwijde aardgasreserves (geschat op 178 triljoen kubieke meter<sup>[42]</sup>)—zelfs vergelijkbaar met die van petroleum (geschat op 207 biljoen liter<sup>[42]</sup>)—ervoor dat aardgas een interessant alternatief kan bieden voor ruwe aardolie als basisgrondstof voor de chemische industrie.

Het doel van plasma-geassisteerde katalyse is dan ook de ontwikkeling van een nieuw economisch rendabel proces voor de selectieve conversie van CH<sub>4</sub> naar chemicaliën die als grondstof dienst kunnen doen voor de chemische industrie. Het verder besproken proces is gebaseerd op atmosferische plasmatechnologie in combinatie met heterogene katalyse, en het proces zal gestuurd worden naar de conversie van CH<sub>4</sub> naar zijn geoxideerde vormen, waarbij gebruik wordt gemaakt van CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O en O<sub>2</sub> als oxidantia. Het gebruik van CO<sub>2</sub> en N<sub>2</sub>O als oxidantia biedt (net zoals bij 'dry

reforming') zelfs de mogelijkheid tot de reductie/conversie van meerdere broeikasgassen in hetzelfde proces.

Samengevat zijn de belangrijkste troeven van het proces: het recycleren van broeikasgassen zoals CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> en N<sub>2</sub>O, welke in de geïndustrialiseerde landen 90% van de totale broeikasgasemissies uitmaken<sup>[3]</sup>; de synthese van enkele belangrijke<sup>[26],[41]</sup> bulkchemicaliën (methanol, formaldehyde, CO en H<sub>2</sub>) op een efficiëntere manier, zowel inzake energie als inzake selectiviteit; en tot slot is er de mogelijkheid dat plasma-geassisteerde katalyse van gassen naar specifieke chemicaliën een algemene synthesesmethode kan worden voor een breed gamma aan producten.

## 4.2. Plasmatechnologie

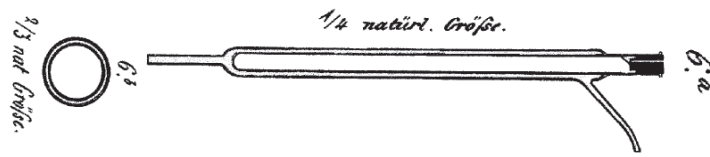
### 4.2.1. Wat is een plasma

Voor er verder kan ingegaan worden op de beschrijving van de technologische kant is het belangrijk om te weten wat een plasma nu werkelijk is. Naast vast, vloeibaar en gasvormig is er nog een vierde aggregatietoestand waarin materie zich kan bevinden, namelijk 'plasma'. Een plasma is een gas dat naast neutrale atomen of moleculen ook geladen deeltjes (ionen en elektronen) bevat. Daarom wordt ook vaak gebruik gemaakt van een andere benaming, namelijk een 'geïoniseerd gas'. Daarnaast bestaat een plasma ook uit reactieve deeltjes (radicalen) en geëxciteerde—licht uitzendende—deeltjes. Dit alles maakt van een plasma een complex maar boeiend geheel dat aanleiding geeft tot een mengeling van deeltjes, die allen met elkaar kunnen botsen en reageren<sup>[43]</sup>.

Er bestaan heel veel verschillende soorten plasma's, met grote variaties in temperatuur, dichtheid en dimensies. In eerste instantie kan men een indeling maken in natuurlijke plasma's en plasma's opgewekt door de mens. Voorbeelden van natuurlijke plasma's zijn de bliksem, de ionosfeer, de corona van de zon en de zonnewinden. Natuurlijke plasma's mogen dan wel niet zo veel voorkomen op aarde, het is echter wel de meest voorkomende aggregatietoestand in het heelal—meer dan 99% van het zichtbare heelal bevindt zich in de plasma-toestand. De plasma's opgewekt door de mens kan men verder onderverdelen in twee grote groepen, namelijk hoge-temperatuur plasma's—gebruikt voor kernfusie experimenten—en lage-temperatuur plasma's of ook wel gasontladingen genoemd. Vooral deze laatste soort kent een hele reeks aan toepassingen waaronder de verder besproken technologie valt. Deze groep kan verder ingedeeld worden in twee subgroepen volgens de temperatuur van de deeltjes in het plasma. Wanneer alle deeltjes in het plasma zich bij dezelfde temperatuur bevinden dan is het plasma in 'lokaal thermisch evenwicht' (LTE). Indien dit niet het geval is, namelijk wanneer de elektronen een veel hogere temperatuur hebben dan de andere plasmadeeltjes, dan spreekt men van een 'niet-LTE' plasma. Het zijn vooral de niet-LTE plasma's die interessante perspectieven bieden voor de plasma-geassisteerde omzetting van broeikasgassen.

De eenvoudigste vorm van een niet-LTE gasontlading kan tot stand worden gebracht door het aanleggen van een elektrisch potentiaalverschil tussen twee evenwijdige platen, waartussen zich een gas bevindt, bij een druk variërend van 10<sup>-3</sup> tot 1 atm. Het gas wordt dan onder invloed van het aangelegde elektrisch veld opgesplitst in elektronen en ionen, hetgeen resulteert in de vorming van

een plasma. Daarenboven worden de elektronen versneld door dit elektrisch veld en het is de hieruit volgende hoge elektronentemperatuur die aan de basis ligt van de hoge reactiviteit van dit soort plasma's. Deze hoogenergetische

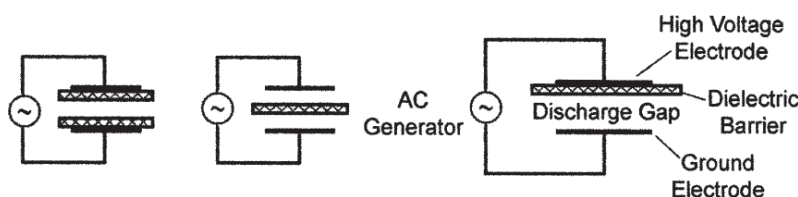


**Figuur 11** Schets van een historische DBD ozongenerator van W. Siemens, 1857<sup>[44]</sup>.

elektronen ondergaan namelijk botsingen met de andere aanwezige deeltjes in het plasma, wat o.a. leidt tot ionisatie, excitatie en dissociatie van het achtergrondgasmengsel en waarbij nieuwe deeltjes in het plasma gevormd worden. Deze nieuwe deeltjes kunnen op hun beurt botsingen ondergaan waarbij dezelfde processen optreden. Dit geheel van botsingen waarbij deeltjes van het achtergrondgasmengsel aanleiding geven tot vorming van nieuwe deeltjes (moleculen, radicalen, ionen) vormt de basis voor het gebruik van een plasmareactor voor gasconversie. Een belangrijk kenmerk is dat deze gasontladingen worden opgewekt met behulp van elektrische energie. Dit zal in dit onderzoek voornamelijk belangrijk zijn voor de berekening van de uiteindelijke 'energie-efficiëntie' van deze technologie (zie verder).

#### 4.2.2. Diëlektrische barrière ontlading ('Dielectric Barrier Discharge'; DBD)

Diëlektrische barrière ontladingen ('dielectric barrier discharges', DBD) zijn al meer dan een eeuw bekend<sup>[44],[45]</sup>. De eerste experimentele onderzoeken dateren van 1857 door Siemens; ter illustratie wordt in figuur 11 een historische ozongenerator afgebeeld. Siemens stelde een elektrische gasontlading voor die ozon (O<sub>3</sub>) kon genereren uit zuurstof of lucht bij atmosferedruk. Deze gasontlading werd opgewekt in een ringvormige opening tussen twee coaxiale glazen buizen, gebruikmakend van twee coaxiale externe elektrodes die voor een radiaal elektrisch veld zorgden. Deze gasontlading heeft zijn naam te danken aan het feit dat de elektrische stroom door de glazen wanden—die dienst doen als diëlektrische barrières—wordt gedwongen. Oorspronkelijk werd het een 'stille ontlading' genoemd, een naam die ook nu nog vaak wordt gebruikt. Rond 1900 werd op basis van deze ontlading op grote industriële schaal gestart met de productie van ozon voor het behandelen van drinkwater.<sup>[44]</sup> In 1943 stelde Manley een methode voor om het gedissipeerde vermogen in DBDs te bepalen.<sup>[44]</sup> Uitgebreid onderzoek gebruikmakend van moderne diagnostische methoden en computermodellering startte rond 1970 met als doel het beter begrijpen van de fysische en chemische processen in ozongeneratoren.<sup>[44]</sup> Deze onderzoeksinspanningen resulteerden echter daarenboven in verschillende nieuwe toepassingen voor DBDs: oppervlaktebehandeling, plasma-geassisteerde

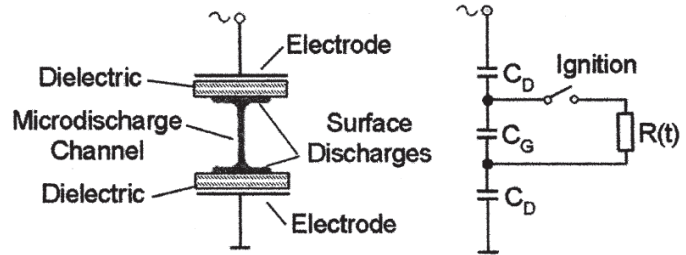


**Figuur 12** Een aantal klassieke DBD configuraties<sup>[44]</sup>.

chemische dampdepositie (PA-CVD), vervuilingencontrole, excitatie van CO<sub>2</sub> lasers en excimeer lampen, plasma displays (voor plasma TVs), en meer recent ook verschillende

medische en milieugerichte toepassingen<sup>[43],[44],[45]</sup>.

DBDs zijn zeer interessant voor industriële toepassingen omdat ze niet-LTE condities leveren bij atmosferedruk en temperaturen variërend van kamertemperatuur (300 K) tot 600 K, wat de kost en complexiteit van de opstelling



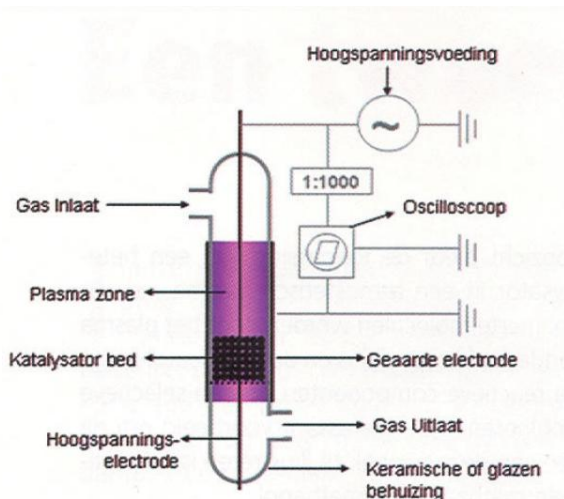
Figuur 13 Schets van een micro-ontlading en een eenvoudig equivalent circuit<sup>[44]</sup>.

aanzienlijk reduceert. Klassieke DBD configuraties (figuur 12) maken gebruik van een planaire of cilindrische opstelling met ten minste één diëlektricum tussen de elektrodes. Typisch gebruikte diëlektrica zijn glas, kwarts, keramische materialen en polymeren. Zulk diëlektricum is nodig om te voorkomen dat bij hoge druk teveel geladen deeltjes zouden ontstaan in het plasma, waardoor boogvorming optreedt, en de temperatuur in het plasma teveel oploopt. De aanwezigheid van een diëlektricum heeft als gevolg dat er een wisselspanning ('alternating current'; ac) ipv een constante ('direct current'; dc) spanning moet worden aangelegd om te voorkomen dat de ontleding zou uitdoven.

In de meeste gassen komt een DBD typisch voor in het zogenaamde filamentaire regime, waarbij een groot aantal onafhankelijke micro-ontladingsfilamenten, zoals geïllustreerd in figuur 13, optreden met een duurtijd van enkele nanoseconden. De stroompulsen van deze micro-ontladingsfilamenten komen in een bepaalde frequentie voor, overeenstemmend met twee maal de drijvende frequentie—welke kan variëren van lijnfrequentie (d.i. de standaard frequentie van de wisselspanning die wordt geleverd door het elektriciteitsnet, meestal 50 Hz) tot ongeveer 10 MHz<sup>[44]</sup>. In deze micro-ontladingsfilamenten kan een grote fractie van de elektronenenergie gebruikt worden voor het exciteren van moleculen of atomen, en aldus zorgen voor de initiatie van de nodige chemische reacties en/of het uitzenden van straling.

#### 4.2.3. Plasma-geassisteerde katalyse

In een DBD reactor blijft de bulk gastemperatuur relatief laag, tussen kamertemperatuur en ongeveer 300°C. Echter, de hoogenergetische elektronen aanwezig in het plasma worden gekenmerkt door een elektronentemperatuur van 5.000 tot 20.000 K bij een elektronendichtheid van ongeveer  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[43],[44]</sup>. In dit niet-LTE plasma worden de gasdeeltjes dus geëxciteerd of gedissocieerd door directe elektron impact, terwijl de temperatuur van de reactieproducten en de temperatuur van het gas relatief laag blijven. Hierdoor krijgen we productdistributies die ver van chemisch evenwicht kunnen liggen. Plasmaprocessen leveren ons zo een unieke manier om door elektronenbotsingen gasfase reacties te induceren die thermodynamisch gezien ongunstig zijn bij deze lage temperaturen. Het is dan ook niet verbazend dat de eerste onderzoeken om reacties uit te voeren op koolwaterstoffen reeds dateren van 1933<sup>[44]</sup> en dat het onderzoek recent ook veel belangstelling krijgt voor het reduceren van broeikasgasemissies<sup>[44]</sup>. Een probleem met de reacties die in een dergelijk plasma plaatsvinden is de lage en slecht controleerbare selectiviteit. Kort samengevat kunnen DBD's inerte moleculen zoals  $\text{CH}_4$



**Figuur 14** De optimale opstelling voor plasma-geassisteerde katalyse bestaat uit twee concentrische elektroden waarvan één bedekt is met een diëlectricum, in dit geval de buitenste elektrode. Het te behandelen gas en eventueel een dragergas worden aan constante doorvoersnelheid tussen de elektroden (de ontladingsruimte) gestuurd<sup>[38]</sup>.

en  $\text{CO}_2$  dus wel 'redelijk gemakkelijk' activeren om reacties te ondergaan, maar de vorming van de reactieproducten 'moeilijk' sturen, wat toch wel belangrijk is daar we een milieuprobleem willen oplossen met deze technologie en er geen nieuw willen creëren.

Een oplossing hiervoor kan gevonden worden door plasmatechnologie te combineren met heterogene katalyse. De omzetting van inerte moleculen—dus moleculen met een hoge activeringsenergie voor chemische reacties—gebeurt doorgaans door gebruik te maken van een katalysator<sup>[26],[38]</sup> die door een tijdelijke en zeer specifieke interactie ervoor zorgt dat de reacties gemakkelijker en selectiever verlopen, door de aanwezigheid van actieve sites met als gevolg een

verlaging van de activeringsenergie. Een probleem hierbij is dat in het geval van de meest inerte moleculen de thermische vereisten van de reactie nog dermate hoog liggen dat selectieve omzetting niet mogelijk is. Kort samengevat kunnen katalysators inerte moleculen zoals  $\text{CH}_4$  en  $\text{CO}_2$  die reeds geactiveerd zijn tot reactieve intermediairen wel selectief omzetten naar de gewenste uitgangsubstanten, maar het probleem ligt bij de hoge activeringsenergie-vereisten.

Plasma-geassisteerde heterogene katalyse combineert dus theoretisch gezien het beste van twee werelden. Inerte moleculen worden door het plasma geactiveerd bij milde omstandigheden waarna de reactieve geactiveerde deeltjes door de heterogene katalysator op een selectieve manier worden gerecombineerd tot de gewenste reactieproducten. Figuur 14 toont een voorbeeld van zulk een opstelling.

a. *Omzetting van  $\text{CH}_4$  naar methanol en formaldehyde m.b.v.  $\text{CO}_2$*

Huidige onderzoeksprojecten focussen op de productie van methanol en formaldehyde via een directe syntheseroute<sup>[41]</sup>. Hiervoor komen twee belangrijke routes in aanmerking: de hydrogenatie van  $\text{CO}_2$ , en de partiële oxidatie van  $\text{CH}_4$ . De hydrogenatie van  $\text{CO}_2$  mag vanuit chemisch standpunt dan wel het meest voor de hand liggende proces lijken, maar zoals reeds eerder vermeld is de prijs voor de productie van  $\text{H}_2$  als co-reagens commercieel onaantrekkelijk. Daarom krijgt de partiële oxidatie van  $\text{CH}_4$  naar methanol en formaldehyde de voorkeur<sup>[41]</sup>. Momenteel handelen de meeste publicaties in het domein van 'plasma-geassisteerde katalyse' over de productie van syngas uit  $\text{CH}_4$ <sup>[41]</sup>. Het onderzoek naar de productie van methanol en formaldehyde heeft echter enkele belangrijke voordelen t.o.v. de productie van syngas. Beide producten zijn immers zowel bulkchemicaliën die wereldwijd en dus ook in de Antwerpse regio in de chemische industrie worden verbruikt, alsook intermediairen voor een groot aantal industriële syntheses<sup>[41]</sup>. Het proces dat we hier meer uitgebreid zullen bespreken, is

de vorming van methanol en formaldehyde (en syngas als bijproduct) uit CH<sub>4</sub> als reagens en CO<sub>2</sub> als co-reagens. Dit proces heeft theoretisch het 'grootste' mitigatiepotentieel aangezien hierbij de twee momenteel belangrijkste broeikasgassen worden verbruikt. Bij dit proces is CH<sub>4</sub> dus het hoofdreagens en doet CO<sub>2</sub> dienst als oxidans. Om een goed resultaat te bekomen, is een inzicht in de reactiemechanismen onontbeerlijk. Echter zoals reeds vermeld is een plasma een complex geheel van reacties en deeltjes, en zijn de inzichten dus nog verre van volledig. De veronderstelde belangrijkste reacties volgen hieronder in tabel 2.

In een plasma heb je volgende deeltjes: elektronen, ionen, radicalen, moleculen en geëxciteerde deeltjes. Voor het gasconversie onderzoek zijn er hier drie soorten van belangrijk voor de directe chemie. Allereerst start de conversie door elektron-impact ionisatie en dissociatie van de achtergrondgas moleculen (CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub>). De radicalen kunnen gaan recombineren met elkaar tot vorming van de belangrijke eindproducten. Waar de ionen het plasma onderhouden. Dit is slechts een summiere opsomming van de reacties die plaatsvinden in het plasma, maar hiermee kan wel al een basisidee worden gevormd van hoe deze technologie werkt.

**Tabel 2 De belangrijkste componenten en reacties in het plasma voor de conversie van CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub><sup>[49]</sup>.**

***Belangrijkste componenten in het plasma***

<b><i>Moleculen</i></b>	
<b><i>Formule</i></b>	<b><i>Naam</i></b>
<b>CH<sub>4</sub> (achtergrondgas)</b>	Methaan
<b>CO<sub>2</sub> (achtergrondgas)</b>	Koolstofdioxide
<b>CO</b>	Koolstofmonoxide = component van syngas
<b>H<sub>2</sub></b>	Waterstofgas = component van syngas
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Water(damp)
<b>O<sub>2</sub></b>	Zuurstofgas
<b>CH<sub>2</sub>O</b>	Formaldehyde
<b>CH<sub>3</sub>OH</b>	Methanol
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	Ethaan
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	Etheen
<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	Acetyleen (= ethyn)
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	Propaan
<b>C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub></b>	Hogere oxygenaten

---

### Radicalen (reactieve deeltjes die instaan voor de conversie)

Formule	Naam
CH <sub>3</sub>	Methyl radicaal
CH <sub>2</sub>	Methyleen radicaal
H	Waterstof radicaal
OH	Hydroxide radicaal
O	Zuurstof radicaal
HO <sub>2</sub>	Hydroperoxyl radicaal
CHO	Formyl radicaal

---

### Initiatiereacties met de startproducten

Reactie	Belangrijkste punten
$e + \text{CH}_4 \rightarrow e + \text{H} + \text{CH}_3$	Vorming van radicalen
$e + \text{CH}_4 \rightarrow e + \text{H}_2 + \text{CH}_2$	Vorming van radicalen en <b>waterstofgas</b>
$e + \text{CH}_4 \rightarrow e + \text{H}_2 + \text{H} + \text{CH}$	Vorming van radicalen en <b>waterstofgas</b>
$e + \text{CH}_4 \rightarrow e + \text{H}_2 + \text{H}_2 + \text{C}$	Vorming van <b>waterstofgas</b> en koolstof
$e + \text{CO}_2 \rightarrow e + \text{CO} + \text{O}$	Vorming van radicalen en <b>koolstofmonoxide</b>
$e + \text{CH}_4 \rightarrow e + e + \text{CH}_4^+$	Vorming van ionen
$e + \text{CO}_2 \rightarrow e + e + \text{CO}_2^+$	Vorming van ionen
$e + \text{H}_2 \rightarrow e + \text{H} + \text{H}$	Vorming van H radicalen
$e + \text{O}_2 \rightarrow e + \text{O} + \text{O}$	Vorming van O radicalen

---

### Verdere verloop van de reacties

Reactie	Belangrijkste punten
$\text{H} + \text{H} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_4$	Vorming van <b>waterstofgas</b>
$\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H}$	Vorming van <b>formaldehyde</b>
$\text{H} + \text{O} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{OH} + \text{CH}_4$	Vorming van OH radicalen
$\text{H} + \text{CO} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CHO} + \text{CH}_4$	Vorming van CHO radicalen
$\text{CH}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{CO}$	Vorming van <b>koolstofmonoxide</b> en <b>formaldehyde</b>
$\text{CH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CHO} + \text{CO}$	Vorming van <b>koolstofmonoxide</b> en CHO radicalen
$\text{H} + \text{CHO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$	Vorming van syngas
$\text{CHO} + \text{CHO} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{CO}$	Vorming van <b>koolstofmonoxide</b> en <b>formaldehyde</b>
$\text{O}_2 + \text{CHO} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{CO}$	Vorming van <b>koolstofmonoxide</b> en HO <sub>2</sub> radicalen
$\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$	Vorming van OH radicalen
$\text{CH}_3 + \text{OH} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{CH}_4$	Vorming van <b>methanol</b>
$\text{CH}_3 + \text{CH}_3 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + \text{CH}_4$	Vorming van <b>hogere koolwaterstoffen</b>
$\text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_5 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_8 + \text{CH}_4$	Vorming van <b>hogere koolwaterstoffen</b>

---

b. *Verskillende co-reagentia en reacties*

Naast CO<sub>2</sub> kunnen ook andere chemicaliën als co-reagens worden gebruikt. Zo wordt er ook onderzoek verricht naar het gebruik van N<sub>2</sub>O als co-reagens<sup>[41]</sup>, wat ook een belangrijk broeikasgas is, alsook naar het gebruik van H<sub>2</sub>O en O<sub>2</sub>, wat beiden milieuvriendelijke oxidantia zijn. Bovendien kunnen de kennis en de inzichten die door de voorgaande onderzoeken worden vergaard als uitgangspunt dienen voor onderzoek naar een brede waaier aan reacties op CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub> (en andere chemicaliën) gebruikmakend van plasma-geassisteerde katalyse (zie tabel 3<sup>[41]</sup>) waardoor het mitigatiepotentieel van deze technologie alleen maar blijft toenemen, zowel direct (verbruik van broeikasgassen in de reacties) als indirect (minder uitstoot van broeikasgassen door energie-efficiëntere productieprocessen).

**Tabel 3 Reacties die mogelijks ook kunnen worden uitgevoerd d.m.v. plasma-geassisteerde katalyse<sup>[41]</sup>.**

Reactie	Gevormd product
<p><i>Azijnzuur synthese</i></p> $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$	<b>Azijnzuur</b>
<p><i>Hydrolyse</i></p> $\text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{O}_2$ $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCOOH} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	<p><b>Methanol</b></p> <p><b>Mierenzuur</b></p>
<p><i>Amine synthese</i></p> $\text{CO}_2 + 3 \text{H}_2 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{CH}_3\text{NH}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$	<b>Methylamines</b>
<p><i>Grafiet synthese</i></p> $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + \text{H}_2$	<b>Grafiet</b>
<p><i>Andere reacties</i></p> $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 \rightarrow 2 \text{CO} + 2 \text{H}_2$ $\text{CO}_2 + \text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow \text{C}_3\text{H}_6 + \text{H}_2 + \text{CO}$	<p><b>Syngas</b></p> <p><b>Propyleen</b></p>



#### 4.2.4. Belangrijkste parameters bij plasma-geassisteerde katalyse

Voordat in het volgende hoofdstuk ingegaan kan worden op de impact van deze technologie is het noodzakelijk om eerst een aantal belangrijke reactieparameters te bespreken. Het zal namelijk daarvan afhangen welke perspectieven deze technologie kan bieden.

##### *a. Selectiviteit*

Zoals reeds vermeld, is de selectiviteit van de gewenste reactieproducten voor plasma-conversie relatief laag. Daarom wordt sinds kort een heterogene katalysator gebruikt om de reactieve geactiveerde deeltjes op een selectieve manier tot de gewenste reactieproducten te laten recombineren<sup>[45]</sup>. Voor de productie van (bulk)chemicaliën is dit een belangrijke parameter. Immers, hoe selectiever een proces is, des te zuiverder is de uitstroom van reactieproducten en ook des te goedkoper is het hele proces. Aangezien de focus in dit werk vooral ligt op de conversie van broeikasgassen, is de selectiviteit hier van ondergeschikt belang, zolang de broeikasgassen maar worden omgezet naar milieuvriendelijke producten.

##### *b. Conversie*

De conversie geeft aan hoeveel er van een bepaald reagens is omgezet. Elke broeikasgasmolecule die door het plasma wordt geactiveerd en gerecombineerd tot een niet-broeikasgasmolecule is een broeikasgasmolecule minder, m.a.w. conversie is een maat voor de hoeveelheid weggereageerd broeikasgas. Dit is dan ook één van de belangrijkste parameters in dit onderzoek als we het mitigatiepotentieel van deze technologie willen bepalen. Hierbij geldt dat hoe hoger de conversie is, des te beter zal de technologie geschikt zijn voor de afbraak van broeikasgassen. Theoretisch gezien zal bij een goede (zuivere) gasmengselverhouding en voldoende lange residentietijd (d.i. verblijftijd in de plasmareactor) de conversie in de limiet naar 100% gaan. Uit de eerste modelleringen blijkt dit ook het geval te zijn<sup>[49]</sup>. Voor de uitwerking van de scenario's zal er dan ook van uitgegaan worden dat de conversie 100% bedraagt (zie volgend hoofdstuk).

##### *c. Rendement*

Het rendement van de technologie is het product van de selectiviteit met de conversie. Het geeft dus weer hoeveel van de reagentia selectief is geconverteerd naar het gewenste reactieproduct. Voor de productie van (bulk)chemicaliën is dit dus zeker ook een belangrijke parameter, maar in dit onderzoek is deze ook van ondergeschikt belang.

d. *Energie-efficiëntie*

De energie-efficiëntie is hoogstwaarschijnlijk de factor die het meest zal doorwegen in de eindbalans van dit onderzoek. Zoals de naam reeds laat uitschijnen is de energie-efficiëntie een maat voor hoe efficiënt er wordt omgesprongen met de aangewende energie, of anders gezegd, hoeveel vermogen er nodig is voor de omzetting. In dit geval moet dus gekeken worden naar hoeveel eV er nodig is om één broeikasgasmolecule om te zetten naar een ander product.

De berekening van de energie-efficiëntie kan als volgt gebeuren:

$$\text{Debiet} = \text{L/min} = \text{dm}^3/\text{min} = \text{m}^3/\text{s}$$

$$\text{Volume} = \text{m}^3$$

$$\text{Volume/Debiet} = \text{m}^3/(\text{m}^3/\text{s}) = \text{s} = \text{residentietijd}$$

$$\text{Debiet} = \text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{Ideale gaswet} \rightarrow \text{mol/s} \rightarrow \text{cte van Avogadro} \rightarrow \text{molecule/s}$$

$$\text{Vermogen} = W = \text{J/s} = \text{eV/s}$$

$$\text{Vermogen/Debiet} = (\text{eV/s}) / (\text{molecule/s}) = \text{eV/molecule} = \text{energie-input per molecule}$$

Hieruit blijkt dat de energie-efficiëntie afhankelijk is van het vermogen en van het debiet—en dus ook van de residentietijd. In de uitwerking van de scenario's (zie volgend hoofdstuk) zal de energie-efficiëntie gedefinieerd worden als de totale hoeveelheid energie die nodig is voor het proces. Dit omvat dus zowel de energie die daadwerkelijk in het plasma wordt gestoken als alle mogelijke energieverliezen—m.a.w. niet enkel de energie die wordt overgedragen naar de moleculen. De energie-efficiëntie is dus zeer belangrijk aangezien deze voor een groot deel zal bepalen hoeveel energie—elektriciteit in dit geval—er wordt verbruikt en dus ook hoeveel CO<sub>2</sub> er terug vrijkomt bij het opwekken van de nodige elektriciteit. Dit is van belang omdat het doel is om broeikasgassen te converteren en er niet meer te genereren. Om als mitigatietechnologie te kunnen dienen, moet er dus meer CO<sub>2</sub> worden geconverteerd dan dat er wordt gevormd bij de productie van de nodige energie voor het proces. Het mitigatiepotentieel is dus sterk afhankelijk van de energie-efficiëntie. Hierbij geldt dan ook dat hoe hoger de energie-efficiëntie is, hoe groter het mitigatiepotentieel zal zijn. Als voorbeeld: indien de energie-efficiëntie 16,6% bedraagt, betekent dit dat er zes keer meer elektriciteit wordt verbruikt dan theoretisch nodig; indien de energie-efficiëntie 33,3% bedraagt, betekent dit dat er drie keer meer elektriciteit wordt verbruikt dan theoretisch nodig; indien de energie-efficiëntie 50% bedraagt, betekent dit dat er twee keer meer elektriciteit wordt verbruikt dan theoretisch nodig, enz.

### 4.3. Belang en interesse naar het stedelijk milieu toe

Tabel 4 Overzicht van de belangrijkste bedrijven in het studiegebied en hun goedgekeurde CO<sub>2</sub> emissies voor 2008. De cijfers inzake CO<sub>2</sub>-emissies betreffen enkel de CO<sub>2</sub>-emissies van installaties die onder de Europese emissiehandel vallen<sup>[50]</sup>.

Bedrijfsvestiging	Goedgekeurde CO <sub>2</sub> -emissies 2008 (ton)
Lanxess Rubber	118.794
Lanxess - Lillo (rechteroever)	97.150
Lanxess - Kallo (linkeroever)	82.833
Borealis - Kallo	188.203
Total Petrochemicals Antwerpen	33.281
Evonik Degussa Antwerpen	357.233
BASF Antwerpen	2.111.038
Antwerp Polymers Plant	22.623
Fina Antwerp Olefins	1.056.457
Ineos	93.162
Ineos Phenol Belgium	158.388
Haltermann	44.167
Belgian Refining Corporation	525.496
Total Raffinaderij Antwerpen	4.021.016
Esso Raffinaderij	1.666.099
Petroplus Refining Antwerp	37.196
Petroplus Refining Antwerp Bitumen	56.029
Electrabel-Kallo	278.932
Electrabel-Lanxess	182.709
Zandvliet-Power	1.044.042
Essent (WKK Inesco)	418.247
<b>Totaal</b>	<b>12.593.095</b>

#### 4.3.1. Globaal

In eerste instantie zouden twee grote sectoren, zijnde de (chemische) industriële sector en de energiesector, hun emissies kunnen reduceren met behulp van deze technologie daar beiden over grote en gemakkelijk aanwendbare, al dan niet zuivere, broeikasgasstromen beschikken. Wereldwijd zijn deze twee sectoren verantwoordelijk voor 45,3% van de antropogene broeikasgasemissies[3]. Beide sectoren zijn ook in grote mate geconcentreerd aanwezig in het stedelijk milieu, waardoor broeikasgasemissies in het stedelijk milieu wereldwijd aanzienlijk zouden gereduceerd kunnen worden. Daarnaast kunnen ook kleinere installaties, zoals industriële en huishoudelijke afvalverbrandingsovens en biogasinstallaties, hun emissies converteren. Vooral bij de (chemische)

industrie, die vaak te kampen heeft met een imago probleem bij de bevolking, spreekt de interesse voor 'green chemistry' en 'cradle-to-cradle' technologieën voor zich, al is het maar uit economische overwegingen (bijvoorbeeld om minder heffingen te moeten betalen).

#### 4.3.2. Antwerpen

Zoals reeds vermeld, is in Antwerpen de op één na grootste petrochemische cluster ter wereld gevestigd. Ongeveer 200km<sup>2</sup> wordt ingenomen door (petro)chemische sites en raffinaderijen, en van de top 20 van chemische producenten wereldwijd heeft de helft Antwerpen als productiecentrum gekozen. In tabel 4 volgt een overzicht van de belangrijkste bedrijven in het studiegebied en hun emissies. Het spreekt dan ook voor zich dat deze techniek in Antwerpen een groter mitigatiepotentieel heeft dan het globale gemiddelde.

### **4.4. Verwachtingen**

#### 4.4.1. Korte termijn (2020)

Als uit onderzoek blijkt dat plasma-geassisteerde katalyse een economisch rendabele en milieuvriendelijke (m.a.w. geen vorming van schadelijke(re) nevenproducten) technologie is, dan zal men op korte termijn het proces moeten opschalen naar industrieel niveau en beginnen met enkele pilotprojecten op (relatief) zuivere gasstromen met haalbare debieten. Vervolgens kan men onderzoeken opstarten op sites waar de gasstromen afwijken van de optimale condities. Tot slot kan ook het onderzoek naar bijkomende plasma-geassisteerde katalyse reacties de vruchten plukken van de opgedane 'know-how' en expertise uit deze pilotprojecten. Op korte termijn zal deze technologie echter nog eerst door zijn ontwikkelingsstadium moeten passeren en zal het mitigatiepotentieel dus beperkt blijven.

#### 4.4.2. Lange termijn (2050)

Indien de voorgaande stappen succesvol doorlopen kunnen worden, zou het mitigatiepotentieel van deze technologie op langere termijn daarentegen aanzienlijk kunnen zijn, voornamelijk wanneer de vereiste energie voor het opwekken en onderhouden van het plasma wordt geleverd door hernieuwbare energiebronnen. Dan zouden bijvoorbeeld ook kleinere (en bijgevolg vermoedelijk minder efficiënte) opstellingen ontwikkeld kunnen worden voor kleinere emissiebronnen. Een schatting van de impact van deze technologie zal in het volgend hoofdstuk verder worden uitgewerkt.

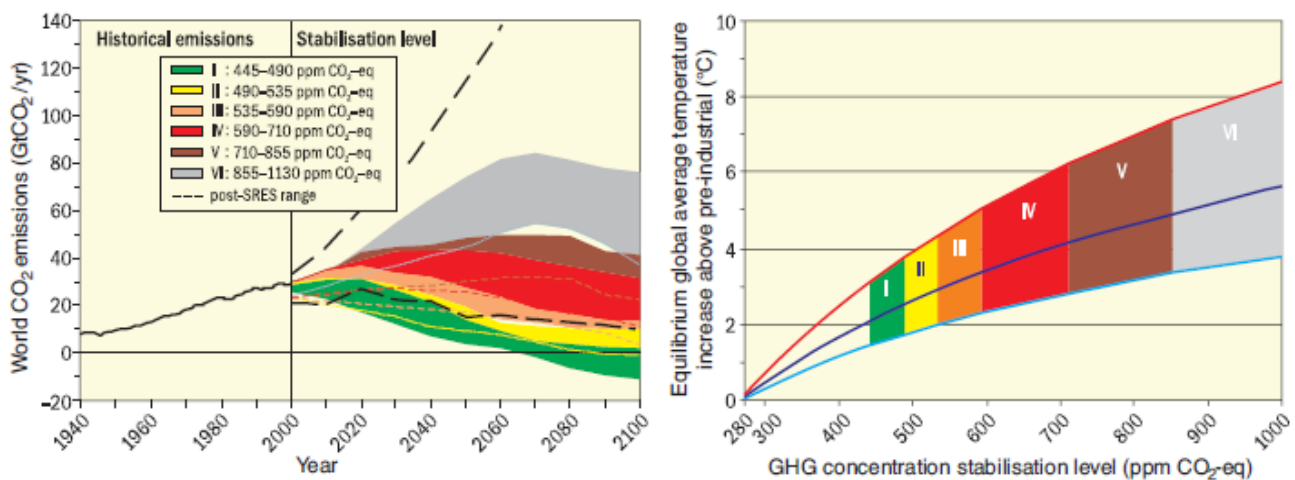
## 5. Hoofdstuk 5: Impact van plasma-geassisteerde katalyse

In dit deel zal de impact van plasma-geassisteerde katalyse voor de conversie van broeikasgassen worden besproken, gebaseerd op een combinatie van enerzijds drie emissiescenario's en anderzijds drie plasmatechnologische-verwachting-scenario's. Op deze manier wordt getracht het mogelijk mitigatiepotentieel van deze techniek in een stedelijk milieu—en meer specifiek voor Antwerpen—te beschrijven aan de hand van negen gecombineerde scenario's.

### 5.1. Emissiescenario's

#### 5.1.1. Emissiereductie-scenario's ontwikkelde landen

Bij de 'omschrijving van de problematiek' werd reeds aangehaald dat het probleem van klimaatverandering op een globale manier moet worden aangepakt. De eerste stappen in de goede richting werden gezet door het opstellen van het UNFCCC en het Kyoto-protocol, maar nu is het belangrijk om te zien wat hierop volgen zal. Voor de uitwerking van de emissiereductie-scenario's zal alleen worden uitgegaan van reducties door de ontwikkelde landen. Er wordt immers algemeen aangenomen dat het voornamelijk de ontwikkelde landen zijn die hun emissies drastisch moeten reduceren, zodat de landen in volle industriële ontwikkeling, in het begin, een marge hebben voor een toename van hun emissies, die onvermijdelijk gepaard zal gaan met hun verdere ontwikkeling. De gehanteerde scenario's zijn gebaseerd op de emissietrajecten voor stabilisatie van werkgroep III uit het IPCC report<sup>[3]</sup> (zie figuur 15). Hierin worden de opgelegde emissiereductiedoelstellingen voor de 'Annex-1 landen' gevonden<sup>[46]</sup> (zie tabel 5), dit zijn de landen—waaronder België—die kwantitatieve verplichtingen zijn aangegaan onder het Klimaatverdrag. De verdere uitwerking van het onderzoek zal zich beperken tot scenario's I, II en IV uit figuur 15, welke overeenkomen met respectievelijk scenario A, B en C uit tabel 5. Deze verwoorden respectievelijk de trajecten voor stabilisatie van de atmosferische broeikasgasconcentraties op 450 ppm CO<sub>2</sub>-eq, 550 ppm CO<sub>2</sub>-eq en 650 ppm CO<sub>2</sub>-eq.



Figuur 15 Globale CO<sub>2</sub> emissies van 1940 tot 2000 en emissietrajecten voor stabilisatiescenario's van 2000 tot 2100 (linkse grafiek); en de corresponderende relatie tussen het CO<sub>2</sub> stabilisatiedoel en de verwachte gemiddelde temperatuurstoename t.o.v. de pre-industriële revolutie(rechte grafiek)<sup>[3]</sup>. In dit onderzoek gebruiken we scenario's I, II en IV die respectievelijk overeenkomen met scenario's A, B en C uit tabel 5. Deze scenario's zullen we gebruiken respectievelijk voor de eigen scenario's S1, S2 en S3.

Tabel 5 Emissiereductiedoelstellingen voor de 'Annex-1 landen' op korte (2020) en lange termijn (2050). De scenario's A, B en C komen respectievelijk overeen met scenario's I, II en IV uit figuur 15<sup>[46]</sup>.

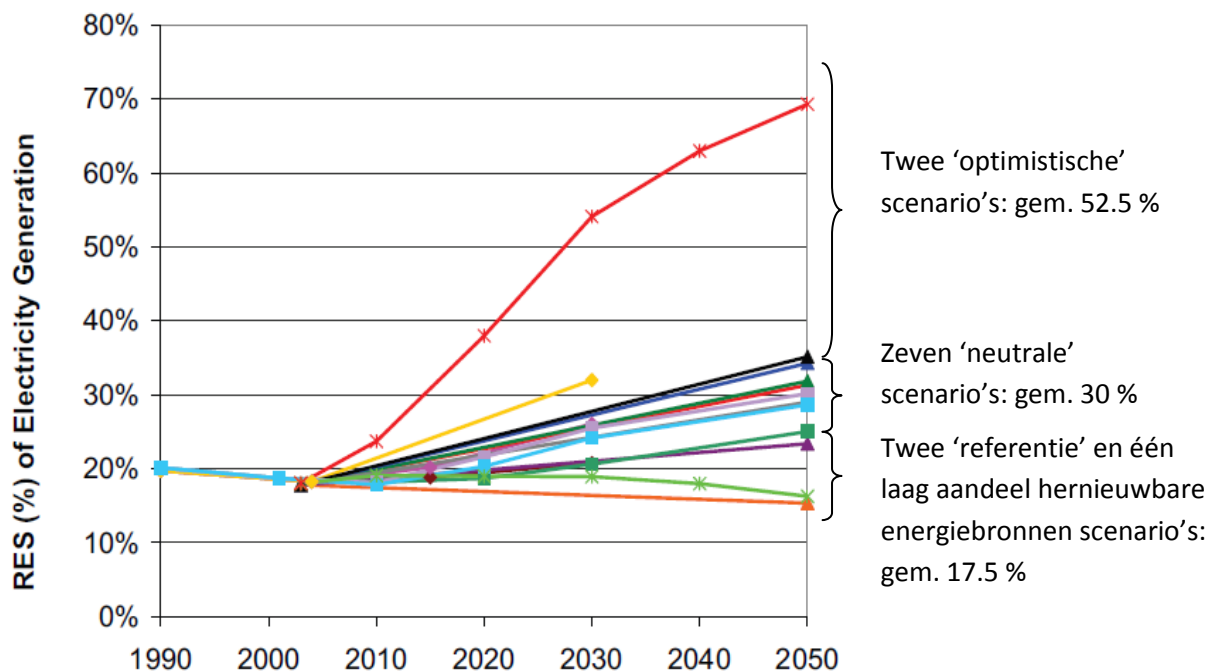
Scenario category	Region	2020	2050
A—450 ppm CO <sub>2</sub> -eq <sup>a</sup>	Annex I	–25% to –40%	–80% to –95%
	Non-Annex I	Substantial deviation from baseline in Latin America, Middle East, East Asia and Centrally-Planned Asia	Substantial deviation from baseline in all regions
B—550 ppm CO <sub>2</sub> -eq	Annex I	–10% to –30%	–40% to –90%
	Non-Annex I	Deviation from baseline in Latin America and Middle East, East Asia	Deviation from baseline in most regions, especially in Latin America and Middle East
C—650 ppm CO <sub>2</sub> -eq	Annex I	0% to –25%	–30% to –80%
	Non-Annex I	Baseline	Deviation from baseline in Latin America, Middle East, and East Asia

Source: Gupta et al. (2007, Section 13.3.3.3). The aggregate range is based on multiple approaches to apportion emissions between regions (contraction and convergence, Multi-Stage, Triptych and intensity targets, among others). Each approach makes different assumptions about the pathway, specific national efforts and other variables. Additional extreme cases—in which Annex I or non-Annex I undertake all reductions—are not included. The ranges presented here do not imply political feasibility, nor do the results reflect cost variances.

<sup>a</sup>Only the studies aiming at stabilisation at 450 ppm CO<sub>2</sub>-eq assume a (temporary) overshoot of about 50 ppm (see den Elzen and Meinshausen 2006b).

### 5.1.2. 'Groene energie' scenario's

Aan deze emissiereductie-scenario's zullen nu specifieke 'groene energie' scenario's gekoppeld worden. Dit is vooral interessant omdat bij de plasmatechnologie-scenario's de energie-efficiëntie in rekening zal gebracht worden. Hierdoor wordt voor de uitwerking van de gecombineerde scenario's bijkomende informatie verkregen om zich op te baseren voor het trekken van de nodige conclusies



Figuur 16 Het aandeel aan hernieuwbare energie voor de productie van elektriciteit, voor verschillende scenario's. Hiervan werd het gemiddelde genomen van de twee 'optimistische' scenario's, van de zeven 'neutrale' scenario's en van de twee referentie en één laag aandeel hernieuwbare energie scenario's. Voor bijkomende informatie wordt verwezen naar het betreffende 'energie rapport'<sup>[47]</sup>.

(zie verder). De gebruikte data handelen over 'het aandeel aan hernieuwbare energiebronnen voor de elektriciteitsproductie'<sup>[47]</sup> (weergegeven in figuur 16). De dataset bestaat uit twee 'optimistische' scenario's, zeven 'neutrale' scenario's, twee referentie scenario's alsook één scenario met een laag aandeel hernieuwbare energiebronnen. Voor deze drie groepen werd het gemiddelde berekend (berekeningen zie Bijlage 9.3). Vervolgens wordt nu het AM (arithmetisch gemiddelde) van de optimistische scenario's gekoppeld aan emissiereductie-scenario 1, het GM (geometrisch gemiddelde) van de neutrale scenario's aan emissiereductie-scenario 2 en tot slot wordt het GM van de referentie scenario's en het laag aandeel hernieuwbare energiebronnen scenario gekoppeld aan emissiereductie-scenario 3. Deze gedachtegang is gebaseerd op de veronderstelling dat om hogere (ambitieuze) emissiereductiedoelstellingen te halen het aandeel hernieuwbare energiebronnen procentueel meer zal moeten toenemen dan bij lagere emissiereductiedoelstellingen.

### 5.1.3. Scenario 1 (S1)

Het eerste scenario is het 'sociaal optimistisch scenario'. Dit gaat er van uit dat men er op mondiaal niveau in slaagt om zeer strikte doelstellingen voorop te stellen om de emissie van broeikasgassen aan banden te leggen. Dit is ook het scenario waarin men terecht komt als wordt gekozen om de aanvaardbare grens voor de opwarming van de aarde op 2°C te leggen<sup>[3]</sup>. Hierbij zullen de Annex-1 landen tegen 2050 hun emissie van broeikasgassen moeten reduceren met 80 tot 95 % t.o.v. het jaar 1990<sup>[46]</sup> (zie scenario A uit tabel 5). Zoals hierboven vermeld, wordt hierbij aangenomen dat er grote inspanningen worden geleverd binnen de energiesector op het vlak van 'groene' energie en dat het aandeel hernieuwbare energiebronnen voor de productie van elektriciteit 35 tot 70 % bedraagt (zie figuur 16). Het gemiddelde van deze twee curven brengt ons dus op een aandeel hernieuwbare energiebronnen van 52.5 %; dit getal zal verder in de gecombineerde scenario's gebruikt worden; zie verder. Verder wordt aangenomen dat om dit scenario te volgen men vooral in het begin op een groot aandeel van CCS technieken zal moeten terugvallen.

### 5.1.4. Scenario 2 (S2)

Het tweede scenario is het 'sociaal neutraal scenario'. Dit gaat er ook van uit dat men er op mondiaal niveau in slaagt om doelstellingen voorop te stellen, zij het over een langere tijdshorizon. Hierbij zullen de Annex-1 landen tegen 2050 hun emissie van broeikasgassen slechts moeten reduceren met 40 tot 90 % t.o.v. het jaar 1990<sup>[46]</sup> (zie scenario B uit Tabel 5). Hier wordt aangenomen, zoals hierboven vermeld, dat er inspanningen worden geleverd binnen de energiesector op het vlak van 'groene' energie, maar minder snel dan volgens het vorige scenario (S1), waardoor het aandeel hernieuwbare energiebronnen voor de productie van elektriciteit slechts 25 tot 35 % bedraagt (zie Figuur 16). Het gemiddelde van deze curven brengt ons op 30 %, en dit getal zal dan ook verder gebruikt worden bij de gecombineerde scenario's (zie verder).

### 5.1.5. Scenario 3 (S3)

Het derde scenario tot slot is het 'sociaal pessimistisch scenario'. Dit gaat er van uit dat men er op mondiaal niveau niet of te laat in slaagt om doelstellingen voorop te stellen en dat het dus eerder een ieder-voor-zich spel wordt. Men gaat er echter wel van uit dat bepaalde landen, waaronder de EU (20-20-20 doelstellingen), zelf het initiatief nemen, al is het maar uit socio-economische overwegingen. Hierdoor wordt verwacht dat de Annex-1 landen tegen 2050 hun emissies van broeikasgassen zullen reduceren met 30 tot 80 %<sup>[46]</sup> (zie scenario C uit Tabel 5). Hierdoor zal ook het aandeel hernieuwbare energiebronnen voor de productie van elektriciteit slechts 10 tot 25 % bedragen (zie Figuur 16). Het gemiddelde van deze curven brengt ons op 17,5 %, en dit getal zal dan ook verder gebruikt worden bij de gecombineerde scenario's (zie verder).

## **5.2. Plasmatechnologie-scenario's**

### 5.2.1. Conversie

Bij de uitwerking van de plasmatechnologie-scenario's zal heel veel afhangen van de economische rendabiliteit van het proces. Hierbij spelen twee belangrijke parameters een rol. De eerste parameter die belangrijk is voor het uitwerken van de plasmatechnologie-scenario's is de conversie. In hoofdstuk 4 ('Beschrijving plasmatechnologie') werd reeds vermeld dat de conversie aangeeft hoeveel er van een bepaald reagens is omgezet. Voor de verdere uitwerking wordt ervoor gekozen om te werken met een conversie van 100 %. Hierbij gaan we er dus van uit dat 100 % van de aangevoerde broeikasgassen wordt omgezet na een niet nader bepaalde residentietijd. Deze waarde werd gekozen omdat uit de eerste onderzoeksresultaten blijkt dat alle aangevoerde broeikasgassen kunnen worden geconverteerd binnen een redelijke residentietijd<sup>[49]</sup>. Puur vanuit het mitigatiestandpunt is dit dus al zeer veelbelovend. De industrie daarentegen beschouwt plasma-geassisteerde katalyse als economisch rendabel wanneer een selectieve conversie van ongeveer 60 % wordt gehaald bij een energie-efficiëntie van 33,3 % (uitgaande van een huidige energie-efficiëntie voor het opwekken van de aangewende elektriciteit van ongeveer 60 %)<sup>[41]</sup>. In dit onderzoek zijn we in de eerste plaats nog altijd geïnteresseerd in de 'pure' conversie (omzetten van broeikasgassen), maar als de industriële vereisten worden gehaald dan zou dit vanzelfsprekend een extra boost kunnen geven voor de verdere ontwikkeling en implementatie van deze technologie.

### 5.2.2. Energie-efficiëntie

De tweede parameter is mogelijk nog belangrijker dan de conversie en geeft aan hoe efficiënt er in het proces met de aangewende energie wordt omgesprongen. Deze parameter zal waarschijnlijk bepalend zijn voor het staan of vallen van deze techniek<sup>[41]</sup>. Vooral het mitigatiepotentieel is hier de grote 'afhankelijke' zoals vermeld in hoofdstuk 4. In tegenstelling tot bij de emissiescenario's wordt er hier niet één energie-efficiëntie waarde rechtstreeks aan één conversie waarde gekoppeld, maar



zullen voor één conversiewaarde (nl. 100%) drie energie-efficiëntiewaarden worden uitgewerkt, waarvan volgens de literatuur de eerste als hoog, de tweede als aanvaardbaar en de derde als laag wordt beschouwd. Deze waarden zijn respectievelijk 50 %, 33,3 % en 16,6 %<sup>[49]</sup>. Hierbij geldt: hoe hoger de energie-efficiëntie, hoe beter (zie hoofdstuk 4).

Er werd voor deze werkwijze gekozen om zo de gekoppelde scenario's op een eenduidige en overzichtelijke manier te kunnen construeren en interpreteren. Zo ligt het bijvoorbeeld voor de hand dat bij een hoog aandeel hernieuwbare energiebronnen de conversie van broeikasgassen met deze technologie economisch en vooral ecologisch interessanter wordt. Dit zal in de gekoppelde scenario's verder worden uitgewerkt (zie verder).

### 5.2.3. Scenario 1 (T1)

Het eerste scenario is het 'technologisch optimistisch scenario'. Dit gaat ervan uit dat men er in slaagt om met plasma-geassisteerde katalyse een conversie van 100 % te bereiken met een hoge energie-efficiëntie, namelijk 50 %. Hierbij levert plasma-geassisteerde katalyse een enorme verbetering inzake conversie en energievereisten ten opzichte van de huidige thermische technieken, waarbij slechts een energie-efficiëntie van ongeveer 15 % (ICI proces) wordt gehaald en de procescyclus meerdere malen moet worden doorlopen om een voldoende hoge conversie te bekomen, en bijgevolg is plasma-geassisteerde katalyse een aanzienlijk interessantere keuze. Daarenboven is het mitigatiepotentieel in dit scenario het grootst en kunnen dus synergetische effecten met de emissiescenario's optreden. Tot slot is hierbij de kans dat de voor de industrie vereiste selectieve conversie gehaald wordt groter. Verdere ontwikkeling en implementatie van deze technologie kan bij dit scenario dan ook een hoge vlucht nemen.

### 5.2.4. Scenario 2 (T2)

Het tweede scenario is het 'technologisch neutraal scenario'. Dit gaat er van uit dat men er in slaagt om met plasma-geassisteerde katalyse een conversie van 100 % te bereiken met een aanvaardbare energie-efficiëntie, namelijk 33,3 %. Hierbij levert plasma-geassisteerde katalyse een verbetering inzake conversie en energievereisten ten opzichte van de huidige thermische technieken en is hierdoor nog steeds een interessante keuze. In dit scenario gaan we er ook van uit dat de kans om de voor de industrie vereiste selectieve conversie te bereiken reëel is. Dit scenario wordt daardoor als de economisch rendabele grens gezien wanneer men kijkt naar de productie van bulkchemicaliën<sup>[41]</sup>. Hoewel de focus in dit onderzoek voornamelijk ligt op het mitigatiepotentieel, wordt dit bijkomend voordeel echter ook als een belangrijke vereiste beschouwd aangezien we hierbij in een win-win situatie met synergetische effecten terecht kunnen komen.

### 5.2.5. Scenario 3 (T3)

Het derde scenario tot slot is het 'technologisch pessimistisch scenario'. Dit gaat er van uit dat men er slechts in slaagt om met plasma-geassisteerde katalyse een conversie van 100 % te bereiken bij een energie-efficiëntie van 16,6 %. Bij deze energie-efficiëntie levert plasma-geassisteerde katalyse weinig tot geen verbetering inzake conversie en energievereisten ten opzichte van de huidige thermische technieken. Daarenboven is het mitigatiepotentieel en de kans op een hoge selectieve conversie in dit scenario het kleinst en is een snelle globale implementatie dan ook zeer twijfelachtig.

### 5.3. Gekoppelde scenario's

Om de impact van de verschillende scenario's te bepalen, werd als volgt te werk gegaan (zie Tabel 6). Bij de productie van de elektriciteit nodig om het plasma in stand te houden komt CO<sub>2</sub> vrij. In de eerste kolom in Tabel 6 wordt de gemiddelde hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de productie van één GJ geleverde energie voor de huidige Belgische energiemarkt weergegeven<sup>[51]</sup>. Dit cijfer wordt gekoppeld aan de 'groene energie scenario's', besproken in punt 5.1 hierboven (2de kolom), en vervolgens wordt de gemiddelde hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt (per GJ elektriciteit geproduceerd) berekend afhankelijk van het 'groene energie scenario' (3de kolom,  $gem\ CO_2, \text{groene energie scenario's} = gem\ CO_2 \cdot (100 - \% \text{ groene energie})/100$ ). In de 4de kolom wordt aangegeven hoeveel energie het proces (d.i. de plasma-conversie van CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> naar methanol) theoretisch gezien zou verbruiken (d.w.z. bij een energie-efficiëntie van 100 %). Deze waarde is gebaseerd op de thermodynamica, nl. de minimum energie die nodig is om de volgende reactie te laten doorgaan (per ton methanol gevormd)<sup>[41]</sup>:



Deze waarde van 2,3 GJ wordt gekoppeld aan de 'plasmatechnologie-scenario's' door ze te delen door de werkelijke energie-efficiëntie (gegeven in de 5de kolom). Hierdoor wordt de werkelijk verbruikte energie verkregen en deze is weergegeven in de 6de kolom. Als nu het product genomen wordt van de gemiddelde hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt per GJ elektriciteit geproduceerd, afhankelijk van het 'groene energie scenario' (3de kolom) met de werkelijk verbruikte energie (6de kolom) dan wordt de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de productie van de elektrische energie nodig voor het plasmaproces (nl. voor de productie van één ton CH<sub>3</sub>OH) bekomen. Deze waarde wordt weergegeven in kolom 7. In kolom 8 wordt het aantal kg CO<sub>2</sub> vermeld dat er in het plasmaproces wordt geconverteerd naar één ton CH<sub>3</sub>OH, volgens de stoichiometrie in volgende reactievergelijking:

Vervolgens wordt het verschil bepaald tussen de hoeveelheid geconverteerde CO<sub>2</sub> in het proces (8ste kolom) en de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de productie van de nodige energie voor het proces (7de kolom) en de bekomen waarde, welke aangeeft hoeveel CO<sub>2</sub> er door plasma-geassisteerde katalyse effectief wordt gereduceerd, is weergegeven in kolom 9 van de tabel. Tot slot kan deze effectieve reductie ook als een percentage uitgedrukt worden door de hoeveelheid werkelijk geconverteerde CO<sub>2</sub> in het proces (9de kolom) te delen door de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt bij de productie van de nodige energie voor het proces (7de kolom) en het resultaat hiervan te

Tabel 6 Berekening om de impact van de verschillende scenario's na te kunnen gaan. Voor de bepaling van de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die er wordt uitgestoten per GJ opgewekte energie is er uitgegaan van de elektriciteitsmix op de Belgische markt, nl. 12% steenkool, 32% aardgas en 50% nucleaire energie<sup>[51]</sup>.

	kg CO <sub>2</sub> / GJ	Groene E	aangepe emissie (kg CO <sub>2</sub> /GJ)	E (GJ)	eff plasma	aanp E (GJ)	kg CO <sub>2</sub> / t CH <sub>3</sub> OH	Geconv CO <sub>2</sub> (kg)	Vershil	verschil/CO <sub>2</sub> gevormd
S1T1	70	52,5%	33,25	2,3	50,00%	4,6	152,95	688	535,05	349,82%
S2T1	70	30,0%	49	2,3	50,00%	4,6	225,4	688	462,6	205,24%
S3T1	70	17,5%	57,75	2,3	50,00%	4,6	265,65	688	422,35	158,99%
S1T2	70	52,5%	33,25	2,3	33,33%	6,9	229,44	688	458,552	199,85%
S2T2	70	30,0%	49	2,3	33,33%	6,9	338,13	688	349,866	103,47%
S3T2	70	17,5%	57,75	2,3	33,33%	6,9	398,51	688	289,485	72,64%
S1T3	70	52,5%	33,25	2,3	16,66%	13,8	459,03	688	228,966	49,88%
S2T3	70	30,0%	49	2,3	16,66%	13,8	676,47	688	11,5294	1,70%
S3T3	70	17,5%	57,75	2,3	16,66%	13,8	797,26	688	-109,269	-13,71%

vermenigvuldigen met honderd. Dit is dan een maat voor hoeveel keer meer (of minder) CO<sub>2</sub> emissies er worden gereduceerd door het gebruik van plasma-geassisteerde katalyse dan dat er worden uitgestoten bij de productie van de nodige energie voor het proces.

Hierbij dienen echter een aantal beperkingen van de gehanteerde methode opgemerkt te worden, nl. de gehanteerde 2,3 GJ in kolom 4 is de minimale hoeveelheid energie die thermodynamisch nodig is voor de reactie (7): de werkelijk vereiste energie kan hier dus van afwijken mede doordat er ook andere reacties in het plasma optreden met andere energievereisten. Daarnaast moet ook in het achterhoofd worden gehouden dat in dit betoog van een conversie van 100 % wordt uitgegaan, maar dit wil niet zeggen dat alle broeikasgassen daarom ook werkelijk worden omgezet naar nuttige chemicaliën, al wordt er wel verondersteld dat hoe hoger de behaalde energie-efficiëntie is, hoe groter de kans is dat er wel waardevolle chemicaliën worden gevormd.

Hieronder worden de verschillende gecombineerde scenario's in meer detail besproken, in volgorde van dalend mitigatiepotentieel.

### 5.3.1. Scenario 1 (S1T1)

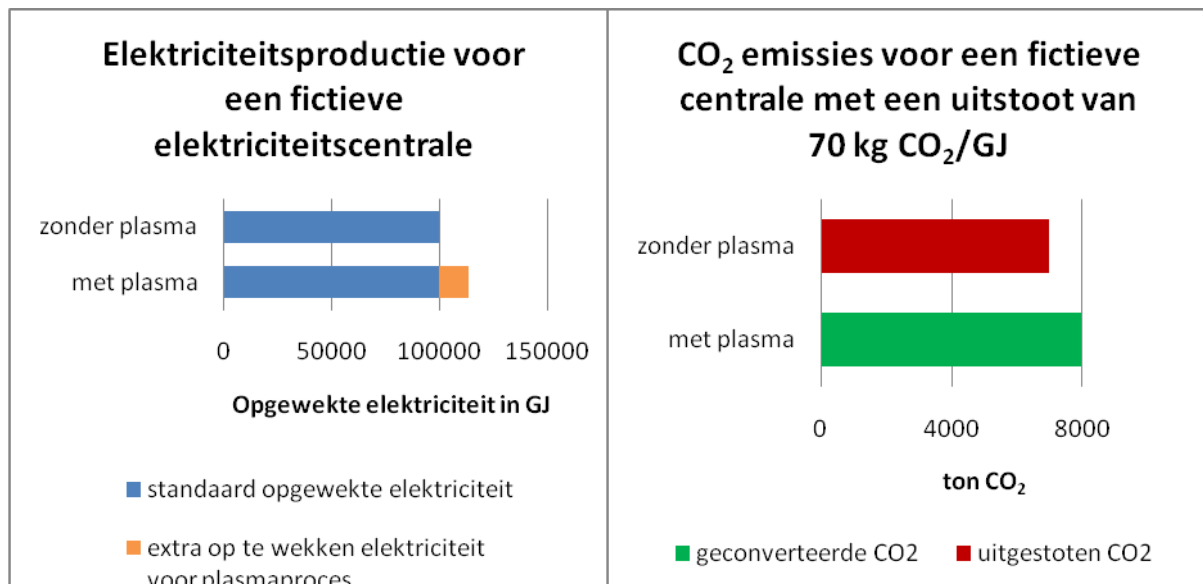
Dit scenario combineert het 'sociaal en technologisch optimistisch scenario'. Hierbij treden een aantal synergetische effecten op. Door de hoge energie-efficiëntie is het proces economisch rendabel en daarenboven wordt er ook gebruik gemaakt van een groot aandeel hernieuwbare energie binnen de elektriciteitsproductie, zoals blijkt uit tabel 5. Het proces converteert 350 % meer CO<sub>2</sub> dan er wordt geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit voor het proces. Hierdoor kan het ook interessant worden om deze technologie niet alleen toe te passen op grote zuivere industriële gasstromen, maar ook op kleinere of onzuivere gasstromen (waar dan eerst de CO<sub>2</sub> en de CH<sub>4</sub> uit moeten worden afgevangen) zoals bijvoorbeeld van elektriciteitscentrales, verbrandingsovens, biogasinstallaties, ... Daarnaast is de kans zeer groot dat het proces een enorme verbetering inzake conversie en energie-efficiëntie levert ten opzichte van de huidige thermische technieken voor de productie van bulkchemicaliën uit broeikasgassen.

Het mitigatiepotentieel voor dit scenario kan als volgt worden samengevat: conversie van een grote hoeveelheid extra broeikasgassen naast diegene die ontstaan bij het opwekken van de benodigde elektriciteit voor het plasmaproces, enerzijds vanwege het grote aandeel hernieuwbare energiebronnen, en anderzijds vanwege net mogelijks nieuw, efficiënter industrieel proces voor de productie van bulkchemicaliën indien de conversie selectief genoeg is.

Vanwege dit groot mitigatiepotentieel kan deze technologie het bereiken van de emissiedoelstellingen vergemakkelijken en dus een belangrijke technologie worden in de toekomstige portfolio van mitigatietechnologieën. Bij dit scenario kan dus gesproken worden van een uitgesproken win-win situatie voor het milieu en de industrie.

Ter illustratie, theoretisch gezien zou voor de conversie van al de CO<sub>2</sub> emissies van de elektriciteitssector specifiek voor België slechts ongeveer 14 % meer elektriciteit moeten worden opgewekt. Dit kan worden afgeleid uit figuur 17. Deze figuur bestaat uit twee delen. Het linkse deel geeft de geproduceerde energie weer: de blauwe balken geven aan hoeveel energie er normaal

opgewekt wordt, bestemd voor eindgebruikers (huishoudens, industrie, enz.); het onderste oranje balkje geeft weer hoeveel energie er extra moet worden opgewekt indien men al de emissies van de elektriciteitssector (in het geval van België) wil converteren met behulp van plasma-geassisteerde katalyse. Het rechtse deel geeft de overeenkomstig geproduceerde broeikasgassen weer, de bovenste rode balk geeft weer hoeveel CO<sub>2</sub> er wordt geproduceerd en geëmitteerd bij de productie van de energie, wanneer deze CO<sub>2</sub> niet wordt geconverteerd; de onderste groene balk geeft weer hoeveel CO<sub>2</sub> er wordt geproduceerd indien men al de emissies van de elektriciteitssector (in het geval van België) wil converteren met behulp van plasma-geassisteerde katalyse. Echter, deze emissies worden dan natuurlijk niet echt geëmitteerd maar wel geconverteerd. Er dient wel opgemerkt te worden dat hierbij geen rekening gehouden wordt met de benodigde energie voor het afvangen van de broeikasgassen. Indien dit mee in rekening zou gebracht worden, wordt met de huidige stand van zaken een toename verwacht van 10 - 40 % extra op te wekken energie. Het is echter moeilijk om hiervan een kwantitatieve afschatting te maken tegen 2050.



**Figuur 17** Het linkse deel geeft de elektriciteitsproductie voor een fictieve elektriciteitscentrale, en het rechtse deel de overeenkomstige CO<sub>2</sub> uitstoot, nodig indien men de CO<sub>2</sub> wil converteren m.b.v. plasma voor scenario 1, t.o.v. de situatie zonder plasma.

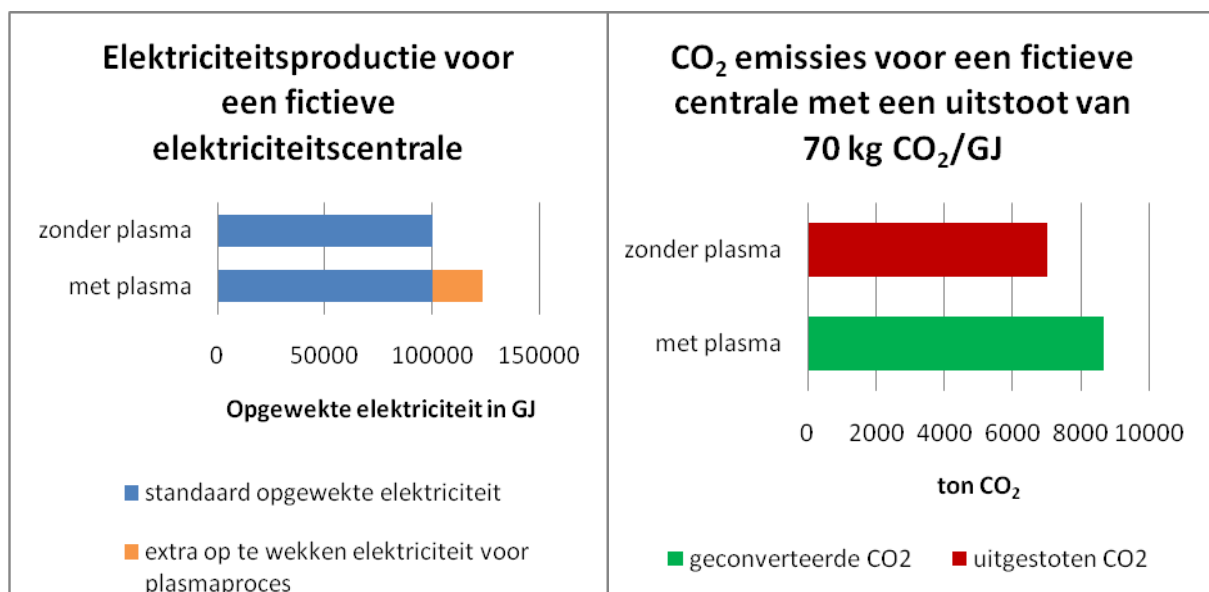
### 5.3.2. Scenario 2 (S2T1)

Dit scenario combineert het 'sociaal neutraal en technologisch optimistisch scenario' en is samen met het volgende scenario (S1T2) te vergelijken met het eerste scenario (S1T1). In dat opzicht treden ook hier synergetische effecten op, zij het minder sterke. Ondanks het kleiner aandeel aan hernieuwbare energiebronnen converteert het proces 205 % meer CO<sub>2</sub> dan er wordt geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit (zie Tabel 6). Hierdoor kan het ook bij dit scenario interessant worden om deze technologie niet alleen toe te passen op grote zuivere industriële gasstromen, maar ook op kleinere of onzuivere gasstromen. Daarnaast is de kans zeer groot dat het proces een enorme verbetering inzake conversie en energie-efficiëntie levert ten opzichte van de huidige thermische technieken voor de productie van bulkchemicaliën uit broeikasgassen.

Het mitigatiepotentieel voor dit scenario kan als volgt worden samengevat: conversie van een aanzienlijke hoeveelheid extra broeikasgassen naast diegene die ontstaan bij het opwekken van de benodigde elektriciteit voor het plasmaproces, voornamelijk vanwege het mogelijks nieuw, efficiënter industrieel proces voor de productie van bulkchemicaliën indien de conversie selectief genoeg is.

Vanwege dit aanzienlijk mitigatiepotentieel kan deze technologie ook hier weer het bereiken van de emissiedoelstellingen vergemakkelijken en dus een belangrijke technologie worden in de toekomstige portfolio van mitigatietechnologieën. Er kan dus weer gesproken worden van een win-win situatie voor het milieu en de industrie.

Ter illustratie, theoretisch gezien zou voor de conversie van al de CO<sub>2</sub> emissies van de elektriciteitssector ongeveer 24 % meer elektriciteit moeten worden opgewekt, zoals blijkt uit figuur 18. Hierbij wordt echter opnieuw geen rekening gehouden met de benodigde energie voor het afvangen van de broeikasgassen (zie hierboven).



**Figuur 18** Het linkse deel geeft de elektriciteitsproductie voor een fictieve elektriciteitscentrale, en het rechtse deel de overeenkomstige CO<sub>2</sub> uitstoot, nodig indien men de CO<sub>2</sub> wil converteren m.b.v. plasma voor scenario 2, t.o.v. de situatie zonder plasma.

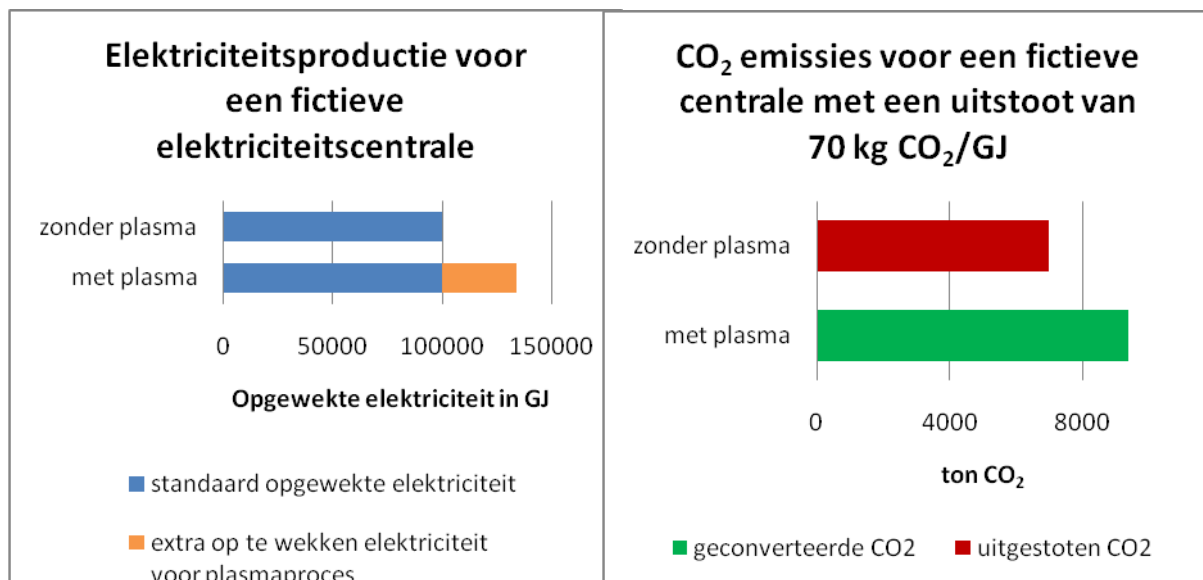
### 5.3.3. Scenario 3 (S1T2)

Dit scenario combineert het 'sociaal optimistisch en technologisch neutraal scenario' en is zoals gezegd zeer sterk vergelijkbaar met het voorgaande scenario (S2T1), met dat verschil dat het proces hier vooral interessant is door zijn groot aandeel aan hernieuwbare energiebronnen binnen de elektriciteitsproductie en iets minder vanuit economisch standpunt. Desondanks wordt ook hier nog bijna 200 % meer CO<sub>2</sub> geconverteerd dan er wordt geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit, vooral vanwege het grote aandeel hernieuwbare energiebronnen binnen de productie van elektriciteit. Ook hier kan het interessant worden om deze technologie niet alleen toe te passen op grote zuivere industriële gasstromen, maar ook op kleinere of onzuivere gasstromen. Verder is de kans reëel dat het proces economisch rendabel is vanwege zijn energie-efficiëntie, maar de

verbeteringen inzake conversie en energie-efficiëntie ten opzichte van de huidige thermische technieken zijn minder uitgesproken dan bij de twee voorgaande scenario's (S1T1 en S2T1).

Het mitigatiepotentieel voor dit scenario kan als volgt worden samengevat: conversie van een aanzienlijke hoeveelheid extra broeikasgassen naast diegene die ontstaan bij het opwekken van de benodigde elektriciteit voor het plasmaproces, voornamelijk vanwege het grote aandeel hernieuwbare energiebronnen.

Vanwege dit aanzienlijk mitigatiepotentieel kan deze technologie ook hier weer het bereiken van de emissiedoelstellingen vergemakkelijken en dus een belangrijke technologie worden in de toekomstige portfolio van mitigatietechnologieën. Ter illustratie, theoretisch gezien zou voor de conversie van al de CO<sub>2</sub> emissies van de elektriciteitssector ongeveer 35 % meer elektriciteit moeten worden opgewekt; zoals blijkt uit figuur 19 (hierbij wordt opnieuw geen rekening gehouden met de benodigde energie voor het afvangen van de broeikasgassen).



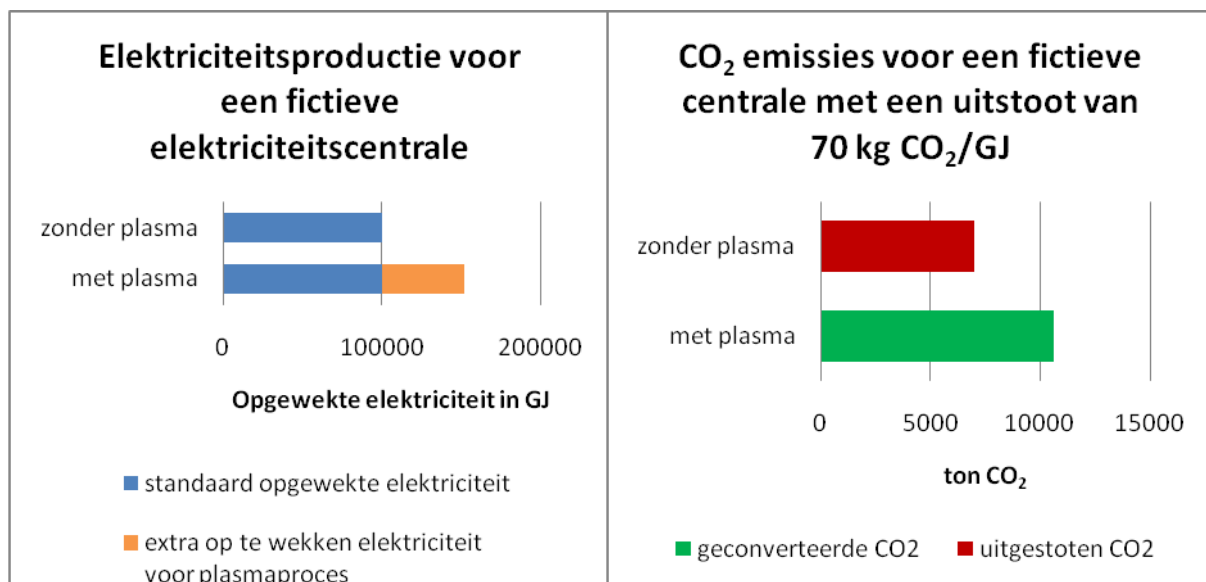
**Figuur 19** Het linkse deel geeft de elektriciteitsproductie voor een fictieve elektriciteitscentrale, en het rechtse deel de overeenkomstige CO<sub>2</sub> uitstoot, nodig indien men de CO<sub>2</sub> wil converteren m.b.v. plasma voor scenario 3, t.o.v. de situatie zonder plasma.

#### 5.3.4. Scenario 4 (S3T1)

Dit scenario combineert het 'sociaal pessimistisch en technologisch optimistisch scenario'. Hierbij is het proces economisch interessant vanwege zijn hoge energie-efficiëntie—zoals bij scenario's 1 (S1T1) en 2 (S2T1)—maar neemt het mitigatiepotentieel verder af in vergelijking met dezelfde scenario's, door het lage aandeel aan hernieuwbare energiebronnen binnen de productie van elektriciteit. Ondanks het kleine aandeel aan hernieuwbare energiebronnen converteert het proces nog 160 % meer CO<sub>2</sub> dan er wordt geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit. Daarnaast is de kans zeer groot dat het proces een enorme verbetering inzake conversie en energie-efficiëntie levert ten opzichte van de huidige thermische technieken voor de productie van bulkchemicaliën uit broeikasgassen.

Het mitigatiepotentieel voor dit scenario kan als volgt worden samengevat: conversie van extra broeikasgassen naast diegene die ontstaan bij het opwekken van de benodigde elektriciteit voor het plasmaproces, uitsluitend vanwege het mogelijks nieuw, efficiënter industrieel proces voor de productie van bulkchemicaliën indien de conversie selectief genoeg is.

Er kan bij dit scenario dus nog steeds gesproken worden van een win-win situatie voor het milieu en de industrie. Het proces is voornamelijk economisch interessant vanwege de hoge energie-efficiëntie, maar ook het mitigatiepotentieel is nog redelijk ondanks het kleine aandeel aan hernieuwbare energiebronnen binnen de elektriciteitsproductie. Vanwege dit mitigatiepotentieel kan deze technologie ook hier weer het bereiken van de emissiedoelstellingen vergemakkelijken en dus een belangrijke technologie worden in de toekomstige portfolio van mitigatietechnologieën, zij het wel in mindere mate. Ter illustratie, theoretisch gezien zou voor de conversie van al de CO<sub>2</sub> emissies van de elektriciteitssector al ongeveer 52 % (dus ongeveer de helft) meer elektriciteit moeten worden opgewekt; cf. Figuur 20 (hierbij wordt opnieuw geen rekening gehouden met de benodigde energie voor het afvangen van de broeikasgassen).



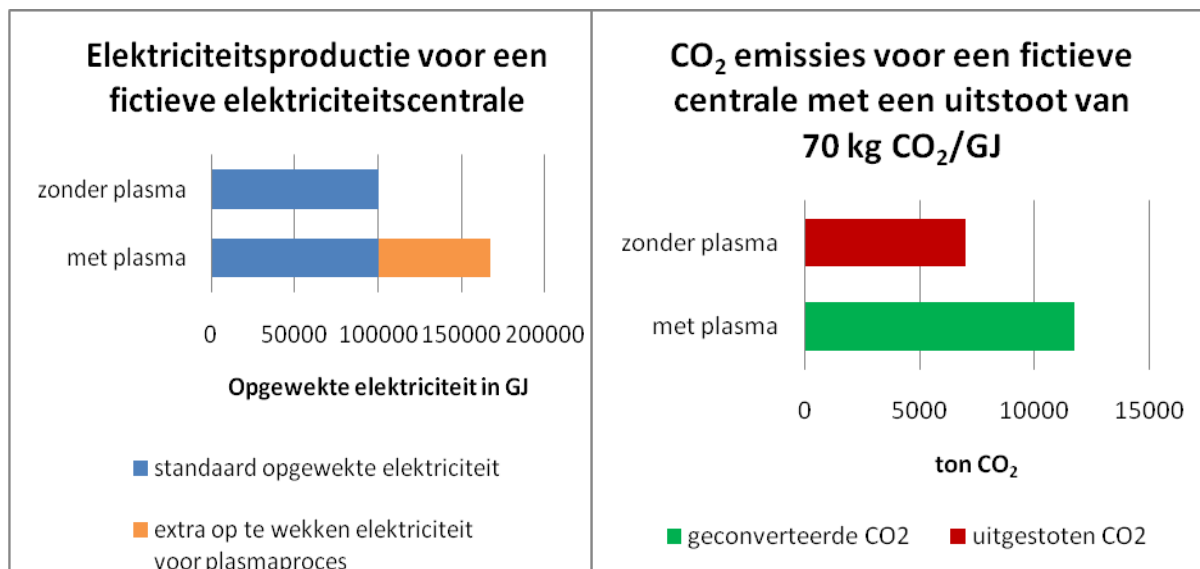
**Figuur 20** Het linkse deel geeft de elektriciteitsproductie voor een fictieve elektriciteitscentrale, en het rechtse deel de overeenkomstige CO<sub>2</sub> uitstoot, nodig indien men de CO<sub>2</sub> wil converteren m.b.v. plasma voor scenario 4, t.o.v. de situatie zonder plasma.

### Scenario 5 (S2T2)

Dit scenario combineert het 'sociaal en technologisch neutraal scenario'. Volgens de uitgevoerde berekeningen komt dit scenario ook mooi in het midden te liggen. Op het vlak van mitigatie presteert dit scenario echter zwakker: er wordt nog wel 100 % meer (d.w.z. 2x meer) CO<sub>2</sub> geconverteerd dan dat er wordt geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit, maar rekening houdend met de in het begin vermelde beperkingen, ivm de minimaal gehanteerde energie van 2.3 GJ en de onzekerheid over de werkelijke conversie naar nuttige chemicaliën, zou dit wel eens als te min kunnen uitvallen. Door de gehaalde energie-efficiëntie is echter de kans dat het proces economisch gezien rendabel is en dat het een verbetering levert ten aanzien van de huidige toegepaste technologie voor de productie van bepaalde bulkchemicaliën reëel.



Het mitigatiepotentieel voor dit scenario situeert zich daardoor voornamelijk in het volgende aspect: conversie van extra broeikasgassen naast diegene die ontstaan bij het opwekken van de benodigde elektriciteit voor het plasmaproces, vanwege het mogelijks nieuw, efficiënter industrieel proces voor de productie van bulkchemicaliën indien de conversie selectief genoeg is.



**Figuur 21** Het linkse deel geeft de elektriciteitsproductie voor een fictieve elektriciteitscentrale, en het rechtse deel de overeenkomstige CO<sub>2</sub> uitstoot, nodig indien men de CO<sub>2</sub> wil converteren m.b.v. plasma voor scenario 5, t.o.v. de situatie zonder plasma.

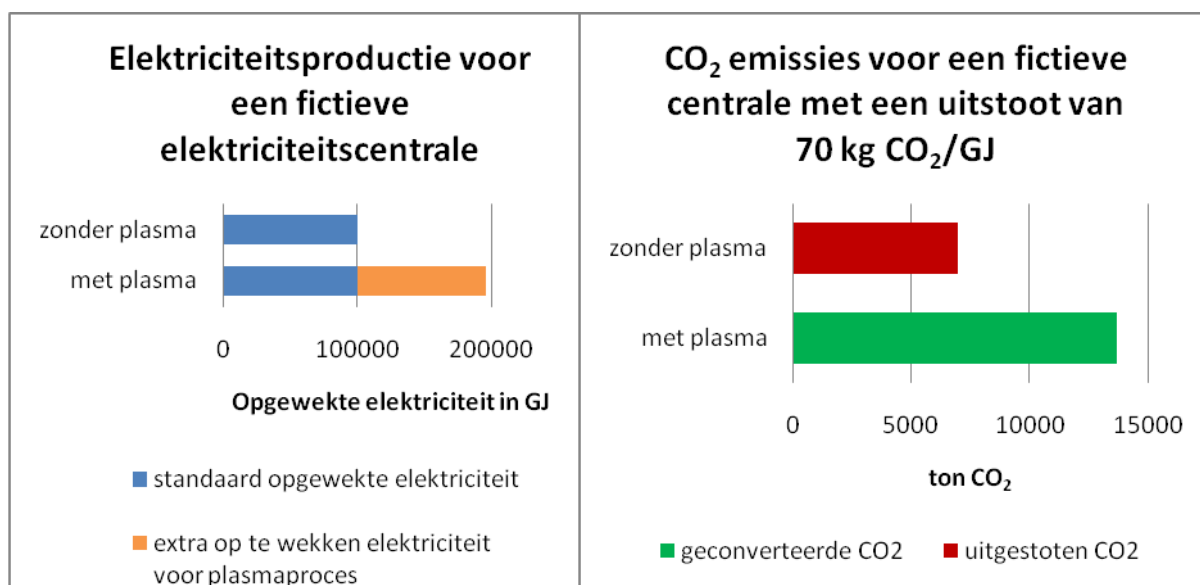
Voor dit scenario geldt dat het eerder interessant is om deze technologie toe te passen op zuivere gasstromen en dan voornamelijk vanuit economisch standpunt, waarbij het milieu hier in kleine mate mee van profiteert. Ter illustratie, theoretisch gezien zou voor de conversie van al de CO<sub>2</sub> emissies van de elektriciteitssector al ongeveer 68 % meer elektriciteit moeten worden opgewekt; cf. Figuur 21 (hierbij wordt opnieuw geen rekening gehouden met de benodigde energie voor het afvangen van de broeikasgassen).

### 5.3.5. Scenario 6 (S3T2)

Dit scenario combineert het 'sociaal pessimistisch en technologisch neutraal scenario' en is sterk vergelijkbaar met het voorgaande scenario (S2T2). Op het vlak van mitigatie presteert dit scenario nog zwakker, er wordt 70% meer CO<sub>2</sub> geconverteerd dan er wordt geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit, maar indien ook hier rekening wordt gehouden met de in het begin vermelde beperkingen zou dit wel eens als een nuloperatie kunnen uitvallen. Door de gehaalde energie-efficiëntie is echter de kans dat het proces economisch gezien rendabel is en dat het een verbetering levert ten aanzien van de huidige toegepaste technologie voor de productie van bepaalde bulkchemicaliën reëel.

De eigenschappen voor dit scenario kunnen als volgt worden samengevat: mogelijks een nuloperatie voor de conversie van broeikasgassen, er worden dus geen extra broeikasgassen geëmitteerd; emissiereductie kan wel plaatsvinden vanwege het mogelijks nieuw, efficiënter industrieel proces voor de productie van bulkchemicaliën indien de conversie selectief genoeg is.

Bij dit scenario is deze technologie alleen interessant om toe te passen op zuivere gasstromen en dan puur vanuit economisch standpunt. Ter illustratie, theoretisch gezien zou voor de conversie van al de CO<sub>2</sub> emissies van de elektriciteitssector ongeveer 95 % (dus bijna dubbel zoveel) meer elektriciteit moeten worden opgewekt, zoals blijkt uit figuur 22 (hierbij wordt opnieuw geen rekening gehouden met de benodigde energie voor het afvangen van de broeikasgassen).



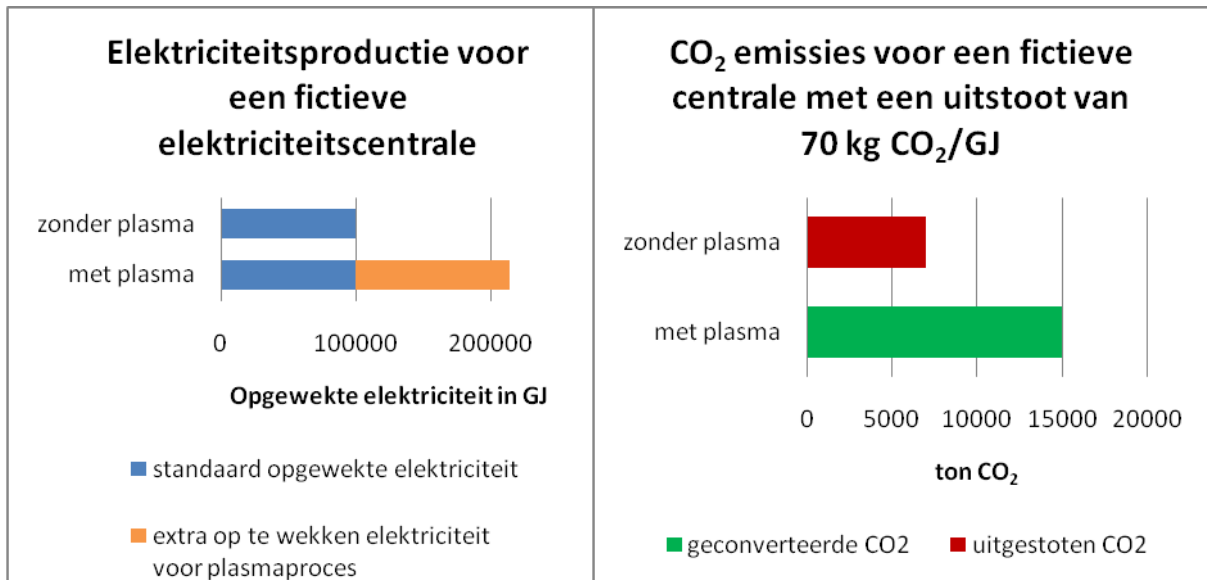
**Figuur 22** Het linkse deel geeft de elektriciteitsproductie voor een fictieve elektriciteitscentrale, en het rechtse deel de overeenkomstige CO<sub>2</sub> uitstoot, nodig indien men de CO<sub>2</sub> wil converteren m.b.v. plasma voor scenario 6, t.o.v. de situatie zonder plasma.

### 5.3.6. Scenario 7 (S1T3)

Dit scenario combineert het 'sociaal optimistisch en technologisch pessimistisch scenario' en is het eerste in de rij van de 'technologisch pessimistische scenario's' die alle drie sterk op elkaar gelijken. Het proces is hierbij niet alleen economisch oninteressant vanwege de lage energie-efficiëntie, maar daarenboven wordt er slechts 50% meer CO<sub>2</sub> geconverteerd dan dat er wordt geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit; en indien ook hier rekening wordt gehouden met de in het begin vermelde beperkingen zou dit wel eens als een nuloperatie of negatief kunnen uitvallen. Hierdoor heeft het proces dan ook geen mitigatiepotentieel meer inzake de conversie van CO<sub>2</sub>.

Het probleem voor dit scenario kan als volgt worden samengevat: er wordt mogelijks meer CO<sub>2</sub> geëmitteerd bij het opwekken van de benodigde elektriciteit dan dat er wordt geconverteerd tijdens het proces, daarenboven is het proces economisch oninteressant aangezien het geen efficiënter alternatief biedt voor de industriële productie van bulkchemicaliën.

Een wijd verspreide implementatie lijkt zeer twijfelachtig vanwege het oninteressante economisch aspect. Dit scenario is dus zowel vanuit industrieel standpunt als vanuit milieustandpunt oninteressant. Ter illustratie, theoretisch gezien zou voor de conversie van al de CO<sub>2</sub> emissies van de elektriciteitssector ongeveer 114 % meer elektriciteit moeten worden opgewekt, zoals blijkt uit figuur 23 (hierbij wordt geen rekening gehouden met de benodigde energie voor het afvangen van de broeikasgassen).



**Figuur 23** Het linkse deel geeft de elektriciteitsproductie voor een fictieve elektriciteitscentrale, en het rechtse deel de overeenkomstige CO<sub>2</sub> uitstoot, nodig indien men de CO<sub>2</sub> wil converteren m.b.v. plasma voor scenario 7, t.o.v. de situatie zonder plasma.

### 5.3.7. Scenario 8 (S2T3)

Dit scenario combineert het 'sociaal neutraal en technologisch pessimistisch scenario' en is zoals vermeld zeer sterk vergelijkbaar met voorgaand scenario (S1T3), met dat verschil dat hierbij maximaal een nuloperatie mogelijk is maar dat er mogelijks nog meer CO<sub>2</sub> vrijkomt dan dat er wordt geconverteerd. Ook dit scenario is dus zowel vanuit industrieel standpunt als vanuit milieustandpunt oninteressant.

### 5.3.8. Scenario 9 (S3T3)

Dit scenario combineert het 'sociaal en technologisch pessimistisch scenario' en volgt de trend van de 2 voorgaande scenario's (S1T3 en S2T3). Er komt hierbij zelfs zeker meer CO<sub>2</sub> vrij dan dat er wordt geconverteerd en het is dus zowel vanuit industrieel standpunt als vanuit milieustandpunt oninteressant.

## 5.4. Bespreking resultaten

De verschillende scenario's staan hierboven reeds gerangschikt volgens hun 'positieve' effecten; zo geeft scenario 1 (S1T1) het beste en scenario 9 (S3T3) het slechtste resultaat. Als de verschillende gecombineerde scenario's in meer detail bekeken worden, valt op dat het gekozen technologisch aspect, zijnde de energie-efficiëntie, zwaarder doorweegt op het resultaat dan het sociale aspect, zijnde het aandeel aan hernieuwbare energie. Er kan zelfs geconcludeerd worden dat alle 'technologisch pessimistische scenario's' (T3) een slecht resultaat geven en dat alle 'technologisch optimistische scenario's' (T1) een goed resultaat geven ongeacht het aandeel aan hernieuwbare energie. Bij de 'technologisch neutrale scenario's' (T2) daarentegen is heel veel afhankelijk van het aandeel aan hernieuwbare energie. Zo is bij een laag aandeel de technologie wel rendabel, maar wordt deze pas echt interessant bij een hoog aandeel aan hernieuwbare energie. Hieruit kan besloten worden dat plasma-geassisteerde katalyse voor scenario's 1 t.e.m. 6 geïmplementeerd zou kunnen worden, maar dat de technologie pas echt interessant wordt voor scenario's 1 t.e.m. 4.

### 5.4.1. Korte termijn (2020)

Op korte termijn moet vermoedelijk nog niet teveel verwacht worden van plasma-geassisteerde katalyse, het zal namelijk nog heel belangrijk zijn om te investeren in verder onderzoek en ontwikkeling van deze technologie voordat deze op grote schaal kan worden toegepast.

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 3 kan er op korte termijn wel heel wat vooruitgang worden geboekt met CCS technieken. Deze techniek zou dan in een later stadium een grote meerwaarde kunnen leveren aan verschillende mitigatietechnologieën, door het beschikbaar maken van de technologie om op grote schaal broeikasgassen uit gasstromen af te vangen, zodat deze vervolgens geconverteerd kunnen worden.

Daarnaast kunnen investeringen in hernieuwbare energie op korte termijn er later voor zorgen dat de nu nog in ontwikkeling zijnde mitigatietechnologieën toegang hebben tot een hernieuwbare energiebron waardoor het mitigatiepotentieel van deze technologieën aanzienlijk toeneemt (zoals blijkt uit tabel 5).

### 5.4.2. Lange termijn (2050)

Op lange termijn zal veel afhangen van twee zaken, nl (i) welke beslissingen worden er op korte termijn genomen i.v.m. investeringen voor onderzoek naar nieuwe mitigatietechnologieën en naar hernieuwbare energiebronnen (zie hierboven) en (ii) welke resultaten levert de technologie op grootschalig industrieel niveau (scenario T1, T2 of T3). In het geval van het 'technologisch pessimistisch scenario' (T3) is het CO<sub>2</sub> mitigatiepotentieel minimaal tot onbestaande en lijkt het zeer onwaarschijnlijk dat deze technologie op grote schaal zal worden toegepast. De andere technologische scenario's bieden echter wel beloftevolle perspectieven (T1 meer dan T2) dankzij een hoog CO<sub>2</sub> mitigatiepotentieel en mogelijks gebruik als nieuwe technologie voor de productie van

bepaalde bulkchemicaliën (in de eerste plaats methanol en formaldehyde). In de eerste plaats zal deze technologie voornamelijk bij de grote emissiebronnen kunnen worden toegepast, zijnde de industriële sector en de energiesector (verantwoordelijk voor 45,3% van de antropogene broeikasgasemissies<sup>[3]</sup>; zie hoofdstuk 2). Hierbij kan nog opgemerkt worden dat indien de transportsector zou overschakelen op 100 % elektrisch rijden of rijden op waterstof, de benodigde elektriciteit hiervoor van de energiesector zal komen. Dit houdt in dat de emissies van de transportsector plots ook op een centrale plaats (i.p.v. groot aantal diffuse bronnetjes) worden geëmitteerd, maar ook dat deze emissies kunnen worden geconverteerd met behulp van mitigatietechnologieën zoals plasma-geassisteerde katalyse, wat resulteert in een bijkomende reductie van 13,1% van de globale broeikasgasemissies<sup>[3]</sup>.

Uit het voorgaande blijkt dat het mitigatiepotentieel van plasma-geassisteerde katalyse zeer grote proporties zou kunnen aannemen en dat veel natuurlijk zal afhangen van de technologie zelf, maar daarnaast ook van toekomstgerichte beslissingen genomen op het beleidsniveau.

## **5.5. Bespreking specifiek voor Antwerpen**

Door de grote aanwezigheid van (petro)chemische industrie in Antwerpen is het mitigatiepotentieel van plasma-geassisteerde katalyse specifiek voor Antwerpen zeer groot. Indien aangenomen wordt dat al de in tabel 4 vermelde emissies kunnen worden geconverteerd met behulp van plasma-geassisteerde katalyse zou dit neerkomen op een broeikasgasreductie voor de Antwerpse industrie van 98% en een algemene broeikasgasreductie in Antwerpen van 77% wat eveneens een reductie van 36 % voor Vlaanderen impliceert. (zie Bijlage 9.4)

Dit is niet alleen positief vanuit ecologisch standpunt maar ook vanuit economisch standpunt aangezien de industrie in Antwerpen hierdoor ongeveer 12.600.000 ton verkregen CO<sub>2</sub> emissierechten zou overhouden, die aan een geschatte prijs van € 22 / ton CO<sub>2</sub><sup>[48]</sup> een directe winst van 277 miljoen euro zouden opleveren. Indien plasma-geassisteerde katalyse daarenboven selectief genoeg blijkt te verlopen voor de productie van bulkchemicaliën dan kan de aanwezige (petro)chemische industrie deze 'nieuwe' bron van grondstoffen ineens aanwenden. Plasma-geassisteerde katalyse kan zo een waaier van voordelen bieden voor de Antwerpse regio, zowel op ecologisch als op economisch vlak.

## 6. Hoofdstuk 6: Besluit

De centrale onderzoeksvraag waarop we aan het begin van dit onderzoek een antwoord wilden formuleren, luidde als volgt: *‘Wat zou de milieu-impact van plasmatechnologie zijn op een stadsomgeving (specifiek Antwerpen) zowel op korte (2020) als op lange (2050) termijn?’.*

Hiervoor werd eerst het antwoord gezocht op een aantal andere vragen, waarbij in eerste instantie het duale karakter van de stedelijke omgeving met betrekking tot het broeikasgasprobleem naar voor kwam: de stedelijke omgeving is namelijk in grote mate verantwoordelijk voor de emissie van broeikasgassen (vanwege industrie, verkeer, wonen, enz.), maar tegelijkertijd ook zeer gevoelig voor de gevolgen van de hiermee gepaard gaande klimaatverandering.

Verder bleek de aanpak voor het broeikasgasprobleem zowel een sociaal als een technologisch karakter te hebben, waarbij beleidsmakers ondersteund door wetenschappelijke documenten en experts doelstellingen moeten opleggen en waarbij wetenschappers en technici ijverig op zoek gaan naar technologieën om het halen van deze doelstellingen te vergemakkelijken.

Valorisatie van twee van de voornaamste broeikasgassen, CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>, is hierbij zowel vanuit economisch als ecologisch standpunt een zeer interessante piste. Ondanks het feit dat de zoektocht hiervoor reeds een tijd aan de gang is, blijken de bestaande thermische technieken op alle vlakken verre van optimaal. Plasma-geassisteerde katalyse aan de andere kant lijkt hiervoor op het eerste zicht een zeer beloftevolle technologie.

Uit de uitgewerkte scenario's komt duidelijk naar voor dat op korte termijn deze technologie nog verschillende onderzoeksstadia zal moeten doorlopen. Indien dit echter succesvol gebeurt, dan kan op lange termijn de impact van deze technologie aanzienlijke proporties aannemen, met daarbij belangrijke win-win situaties voor zowel economie als ecologie. Hierdoor kan deze technologie een belangrijk instrument worden voor klimaatmitigatie, zeker wanneer het aandeel aan hernieuwbare energiebronnen over die tijdspanne sterk toeneemt.

In het voorgaande geval blijkt plasma-geassisteerde katalyse ook uiterst interessant voor de stadsomgeving Antwerpen, vanwege de geconcentreerde aanwezigheid van de (petro)chemische industrie die met zeer veel emissies te kampen heeft en tegelijkertijd ook veel fossiele brandstoffen verbruikt. Valorisatie van broeikasgassen tot waardevolle chemicaliën zou hier dus een oplossing kunnen bieden voor zowel het emissieprobleem als voor de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.

Tot slot kunnen we concluderen dat zeer veel zal afhangen van de technologische ontwikkelingen en innovaties, maar ook van de verdere ontwikkelingen in het beleidsveld.

## 7. Abstract

Climate change is a hot topic these days, as well in the scientific world as in the political world as in the everyday life of citizens around the world. There is not only more and more scientific understanding in this complex issue, but also more and more need to make choices and act on the political level, considering the effects of global climate change are now starting to threaten the quality and safety of the urban environment.

The aim of this research is to map the current greenhouse gas emissions (esp. CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) in an urban environment (specifically Antwerp), and then to extrapolate this to 2020 and 2050 under current climate targets and related environmental policies. Subsequently a number of technological developments which may offer a solution to this problem will be cited. From these solutions plasma technology will be further explored. This technology will be critically evaluated especially whether the use of this technology does not create new environmental problems since we want to solve an environmental problem and avoid creating a new one. Concretely, this means that a literature study will be carried out which will focus both on the environmental issues of greenhouse gases and on technological solutions. Relevant data will also be collected and processed to improve the necessary insights.

In the end the central question, i.e. 'What would be the environmental impact of plasma technology on an urban environment (specifically Antwerp), both on short (2020) and long term (2050)?' will be explored by nine different scenarios based on different technological and political expectations. This study reveals that the mitigation potential of this technology could be very high, but that a lot will depend on both technological and political developments.

## 8. Referenties

- [1] BAIRD, C. & CANN, M. 2008. *Environmental Chemistry fourth edition*. Freeman, New York, 776p.
- [2] MIRA (2008) Milieurapport Vlaanderen, *Achtergronddocument Klimaatverandering 2007*. Brouwers J., De Nocker L., Schoeters K., Moorkens I., Jespers K., Klimaatverandering Achtergronddocument 4 april 2008 Aernouts K., Beheydt D., Vanneuville W.. Vlaamse Milieumaatschappij, april 2008.  
[www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be)
- [3] IPCC (2007) Fourth Assessment Report: *Climate Change 2007 Synthesis Report*
- [4] DÖP, S. P., ALBERS, R.A.W., 2008. *Klimaatverandering in Nederland : uitdagingen voor een leefbare stad*. TNO, 15p.
- [5] ALBERS, R. A. W., 2008. *Dossier klimaatverandering*. TNO, 9p.
- [6] PAINE, C., SOLECKI, W., ROSENZWEIG, C. 2000. *Climate change and a global city: An assessment of the metropolitan East Coast region*.
- [7] Workshop: *Climate Change and urban areas*, University College London 2005.
- [8] RAEYMAKERS, P. 2004. *Belgisch global change onderzoek 1990-2002: Synthese van het assessment- en integratierapport*. Van In, Lier, 96p.
- [9] EART SYSTEM RESEARCH LABORATORY, Global Monitoring Division  
[http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#global\\_growth](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#global_growth)
- [10] MIRA (2008) Milieurapport Vlaanderen, VAN STEERTEGHEM, M. 2008. *Indicatorrapport*. VMM, 164p.
- [11] MIRA (2007) Milieurapport Vlaanderen, *Achtergronddocument 2007, Energie*, Couder J., Wustenberghs H., Defrijn S., Brouwers J. en Verbruggen A., Vlaamse Milieumaatschappij,  
[www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be)
- [12] VERBEECK, L., VERSIEREN, J., BROECKX, S. 18.08.2008. *Plan-mer over het strategisch plan voor en de afbakening van e haven van Antwerpen in haar omgeving, Technisch deelrapport lucht*. Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Afdeling Haven- en Waterbeleid, 190p.
- [13] PORT OF ANTWERP, <http://www.havenvanantwerpen.be>
- [14] MIRA (2007) Milieurapport Vlaanderen, *Achtergronddocument 2007, Industrie*, Van Caneghem J., Vandecasteele C., Block C. , Van Hooste H., Vlaamse Milieumaatschappij, [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be)
- [15] MIRA (2007) Milieurapport Vlaanderen, *Achtergronddocument 2007, Transport*, Ina De Vliieger, Erwin Cornelis, Luc Int Panis, Liesbeth Schrooten, Leen Govaerts, Luc Pelkmans, Steven Logghe, Filip Vanhove, Kris Vanherle, Griet De Ceuster, Cathy Macharis, Ethem Pekin, Laurence Turcksin, Kelly van Bladel, Marjolein de Jong, Joeri Van Mierlo, Jean-Marc Timmermans, Julien Matheys, Caroline De Geest en Els van Walsum, Vlaamse Milieumaatschappij, [www.milieurapport.be](http://www.milieurapport.be)
- [16] EU COMMUNITIES 2009. *EU action against climate change, leading global action to 2020 and beyond*. Office for Official Publications of the European Communities;
- [17] DEPARTEMENT LNE 2006. *Het Vlaams Klimaatbeleidsplan 2006–2012, het klimaat verandert, u ook?*. Vlaamse overheid, departement LNE. Schultz Grafiks, Denemarken, 40p.



- [18] EUROPEES MILIEU AGENTSCHAP 2009. *EMA signalen 2009 belangrijke milieuvraagstukken voor europa*.
- [19] JIMMERSON, R. M., What values will guide extension's future?, *Journal of Extension* **27** (3), (1989)
- [20] KILBOURNE, W. E., BECKMANN, S. C., THELEN, E., The role of the dominant social paradigm in environmental attitudes A multinational examination, *Journal of Bussiness Research* **55**, 193-204 (2002).
- [21] WEBER, E. U., What shapes perception of climate change, *WIREs Climate change*, John Wiley & Sons (2010).
- [22] IPCC (2007) WGIII, *Climate change 2007: mitigation of climate change*.
- [23] NYSERDA 2006. *Hydrogen fact sheet: Hydrogen production – SMR*. US department of energy, New York.
- [24] ROSS, R. H., Natural gas reforming and CO<sub>2</sub> mitigation. *Catalysis Today* **100**, 151-158 (2005).
- [25] TREACY, D., ROSS, R. H., The potential of the CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub> as a method of CO<sub>2</sub> mitigation. A thermodynamic study. *Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.* **49** (1), 127 (2004).
- [26] SONG, C., Global Challenges and strategies for control conversion and utilization of CO<sub>2</sub> for sustainable development involving energy, catalysis, adsorption and chemical processing. *Catalysis Today* **115**, 2-32 (2006).
- [27] O'CONNOR, A. M., SCHUURMAN, Y., ROSS, R. H., MIRODATOS, C., Transient studies of carbon dioxide reforming of methane over Pt/ZrO<sub>2</sub> and Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Catalysis Today* **115**, 191-198 (2006).
- [28] HOEKMAN, S. K., BROCH, A., ROBBINS, C., PURCELL, R., CO<sub>2</sub> recycling by reaction with renewably-generated hydrogen. *Int. J. of Greenhouse Gas Control* **4**, 44-50 (2010).
- [29] IPCC (2005) *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.
- [30] IPCC (2001) *Climate change 2001. Third assessment report*, WMO/UNEP/IPCC.
- [31] DE MORAIS, M. G., COSTA, J. A. V., Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina sp.* and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor, *Journal of Biotechnology* **129**, 439-445 (2007).
- [32] WANG, B., WU, N., LAN, C. Q., CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **79**, 707-718 (2008).
- [33] PACKER, M., Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy, *Energy Policy* **37**, 3428-3437 (2009).
- [34] GONCALVES, M. R., GOMES, A., CONDECO, J., FERNANDES, R., PARDAL, T., SEQUIRA, C. A. C., BRANCO, J. B., Selective electrochemical conversion of CO<sub>2</sub> to C<sub>2</sub> hydrocarbons, *Energy Conversion and Management* **51**, 30-32 (2010).
- [35] CSIRO <http://www.det.csiro.au/solar-dish/index.html>

- [36] HAMILTON, T., Demonstrating a CO<sub>2</sub> recycler, *Technology review published by MIT* (23 november 2009)
- [37] CENTI, G., PERATHONER, S., Opportunities and prospects in the chemical recycling of carbon dioxide to fuels, *Catalysis Today* **148**, 191-205 (2009).
- [38] PAULUSSEN, S., SELS, B., BOGAERTS, A., PAUL, J., Een tweede leven voor broeikasgassen?, *Het Ingenieursblad* **3**, 16-20 (2008).
- [39] KRAUSS, M., ELIASSON, B., KOGELSCHATZ, U., WOKAUN, A., CO<sub>2</sub> reforming of methane by the combination of dielectric-barrier discharges and catalysis, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **3**, 294-300 (2001).
- [40] SUSCHEM <http://www.suschem.org>
- [41] SBO-project aanvraag 2007, *Plasma-assisted conversion of greenhouse gasses to value-added chemicals*. KUL, VITO, UA, Flamac.
- [42] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION  
<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/reserves.html>
- [43] BOGAERTS, A. 2009, *Cursus 3de Bachelor Chemie: Plasmatechnologie*, UA
- [44] KOGELSCHATZ U., Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **23**, 1 (2003).
- [45] KIM, H-H., Nonthermal Plasma Processing for Air-Pollution Control: A historical review, current issues, and future prospects, *Plasma Processes and Polymers* **1**, 91-110 (2004).
- [46] IPCC (2007), Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [47] HAMRIN, J., HUMMEL, H., CANAPA, R. 2007, *Review of renewable energy in global scenarios*. The International Energy Agency.
- [48] CCC <http://www.theccc.org.uk/reports/progress-reports>
- [49] DE BIE, C., Persoonlijke communicatie.
- [50] DEPARTEMENT LNE (gebruikte cijfers jaar 2008)  
<http://www.lne.be/themas/klimaatverandering/co2-emissiehandel/vaste-installaties/cijfers>
- [51] AERNOUTS, K., JESPERS, K. 2009, *Energiebalans Vlaanderen 2007*. EMIS VITO.
- [52] GLOBAL WARMING ART  
[http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric\\_Transmission\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric_Transmission_png)

## 9. Bijlage

### 9.1. Kaart van het studiegebied<sup>[12]</sup>



## **9.2. De verschillende klimaatdoelstellingen**

### 9.2.1. UNFCCC of Klimaatverdrag

Het Klimaatverdrag (UNFCCC; United Nations Framework Convention on Climate Change) is een zogenaamd raamverdrag dat in 1992 onder verantwoordelijkheid van de Verenigde Naties werd afgesloten en ondertekend tijdens de "Earth Summit" in Rio de Janeiro. Doel van het verdrag is om de emissies van broeikasgassen te reduceren en daarmee ongewenste gevolgen van klimaatverandering te voorkomen. Het Klimaatverdrag definieert een internationaal raamwerk waarbinnen regeringen gezamenlijk acties kunnen ondernemen om de uitdagingen van het veranderend klimaat op aarde te kunnen pareren. Het verdrag erkent de internationale verantwoordelijkheid voor het klimaat en tracht ongewenste beïnvloeding door menselijk handelen te voorkomen. De concrete doelstelling van het verdrag is: "het stabiliseren van de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer op een zodanig niveau, dat een gevaarlijke menselijke invloed op het klimaat wordt voorkomen".

Het Klimaatverdrag trad in werking op 21 maart 1994. Sinds die tijd hebben bijna alle lidstaten van de Verenigde Naties het verdrag ondertekend en bekrachtigd. Op dit moment hebben 192 landen, waaronder België, het klimaatverdrag geratificeerd. Binnen het kader van het Klimaatverdrag is in 1997 het Kyoto-protocol overeengekomen.

### 9.2.2. Kyotoprotocol

Het Kyoto-protocol of Verdrag van Kyoto werd in 1997 opgesteld in de Japanse stad Kioto en regelt de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen. Het is een protocol onder het Klimaatverdrag. Met het verdrag zijn industrielanden overeengekomen om de uitstoot van broeikasgassen in de periode 2008-2012 met gemiddeld 5,2% te verminderen ten opzichte van het niveau in 1990. De reductiepercentages verschillen van land tot land, naarmate economische kracht en huidige uitstoot.

Op 16 februari 2005 is het Kyoto-protocol officieel in werking getreden. Op de dag van inwerkingtreding waren wetenschappers al van mening dat de doelstelling onvoldoende is, en wordt er gesproken over het Post-Kyoto-protocol. De Verenigde Naties hebben een forum van internationale wetenschappers ingesteld, het IPCC, om de stand van de huidige wetenschap en de risico's inzake klimaatverandering te evalueren. Het IPCC doet zelf geen onderzoek, maar evalueert onderzoek dat is gepubliceerd in gereviewde wetenschappelijke tijdschriften.

### 9.2.3. EU 20-20-20

De Europese regeringsleiders hebben in maart 2007 afgesproken dat de uitstoot van het broeikasgas CO<sub>2</sub> in 2020 met 20 procent moet zijn verminderd. Tijdens de Europese Raad van december 2008 hebben zij een uitgebreid pakket van maatregelen (het 'klimaatpakket') vastgelegd om de doelstellingen te kunnen behalen. De volgende drie doelstellingen voor 2020 (vergeleken met 1990) waren al in maart 2007 overeengekomen:

- 20 % vermindering van de uitstoot van broeikasgassen (dit kan oplopen tot 30% wanneer er een internationaal klimaatakkoord wordt gesloten)
- 20 % minder energieverbruik
- 20 % van het totale energiegebruik moet afkomstig zijn uit hernieuwbare energie, zoals wind- en zonne-energie

Bovendien moet in 2020 10 % van de totale behoefte aan brandstoffen in de vervoerssector gedekt worden door biobrandstof. Het doel van deze afspraken is de gemiddelde, wereldwijde temperatuurstijging te beperken tot minder dan 2°C. Die 20 % maatregelen zijn een Europees gemiddelde en de inspanningen worden dan ook nationaal verdeeld.

### 9.3. Berekeningen 'Groene energie' scenario's

Van de optimistische energiescenario's werd het Arithmetisch gemiddelde (AM) berekend omdat er maar twee scenario's waren. Van de andere 2 groepen werd het geometrisch gemiddelde (GM) berekend om zo de invloed van mogelijke uitschieters te verminderen.

Scenario	Eigenschap	Percentage Hernieuwbare E (%)	AM (%)	GM (%)
1	Optimistisch	69,5	<b>52,5</b>	
2	Optimistisch	35		
3	Neutraal	34	<b>30,0</b>	
4	Neutraal	32		
5	Neutraal	31,5		
6	Neutraal	31		
7	Neutraal	29		
8	Neutraal	28,5		
9	Neutraal	25		
10	Laag aandeel hernieuwbare E	23	<b>17,5</b>	
11	Referentie	15,5		
12	Referentie	15		

#### 9.4. Berekeningen broeikasgasreductie voor Antwerpen

Bedrijfsvestiging	Goedgekeurde CO <sub>2</sub> -emissies 2008	Kostprijs emissierechten aan 22 € / ton CO <sub>2</sub>
Lanxess Rubber	118.794	2.613.468,00 €
Lanxess - Lillo (rechteroever)	97.150	2.137.300,00 €
Lanxess - Kallo (linkeroever)	82.833	1.822.326,00 €
Borealis - Kallo	188.203	4.140.466,00 €
Total Petrochemicals Antwerpen	33.281	732.182,00 €
Evonik Degussa Antwerpen	357.233	7.859.126,00 €
BASF Antwerpen	2.111.038	46.442.836,00 €
Antwerp Polymers Plant	22.623	497.706,00 €
Fina Antwerp Olefins	1.056.457	23.242.054,00 €
Ineos	93.162	2.049.564,00 €
Ineos Phenol Belgium	158.388	3.484.536,00 €
Haltermann	44.167	971.674,00 €
Belgian Refining Corporation	525.496	11.560.912,00 €
Total Raffinaderij Antwerpen	4.021.016	88.462.352,00 €
Esso Raffinaderij	1.666.099	36.654.178,00 €
Petroplus Refining Antwerp	37.196	818.312,00 €
Petroplus Refining Antwerp Bitumen	56.029	1.232.638,00 €
Electrabel-Kallo	278.932	6.136.504,00 €
Electrabel-Lanxess	182.709	4.019.598,00 €
Zandvliet-Power	1.044.042	22.968.924,00 €
Essent (WKK Inesco)	418.247	9.201.434,00 €
<i>Totaal</i>	<i>12.593.095</i>	<i>277.048.090,00 €</i>
<i>Totaal Antwerpen</i>	<i>16.419.575</i>	
<i>% Totaal t.o.v. Totaal Antwerpen</i>	<i>77 %</i>	
<i>Totaal Vlaanderen</i>	<i>35.002.869</i>	
<i>% Totaal t.o.v. Totaal Vlaanderen</i>	<i>36 %</i>	