

**BIOLOGISCHE GASZUIVERING:
EEN SCHONE ZAAK**

Door prof. dr. A.J.H. Janssen



WAGENINGEN UNIVERSITEIT

WAGENINGEN UR

Inaugurele uitgesproken in de Aula van Wageningen
Universiteit

Biologische Gaszuivering: een schone zaak.

Meneer de Rector Magnificus, geachte dames en heren,

Energie en Toekomst

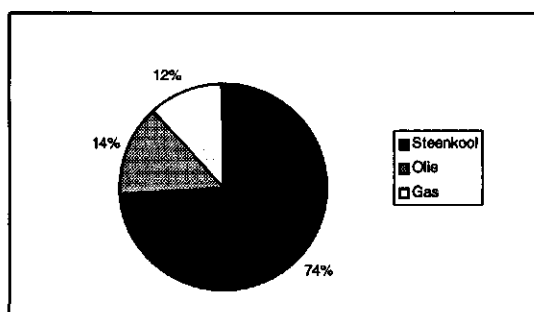
De toename van de wereldbevolking van ruim 6 miljard mensen in 2005 naar een verwacht aantal van 9 miljard in 2050 zal leiden tot een sterke groei van de vraag naar energie en grondstoffen. Dit zal vooral het geval zijn in landen als China en India, die aan de vooravond staan van een exponentiële welvaartsgroei. Het is welhaast ondenkbaar dat deze welvaartsontwikkeling kan plaatsvinden zonder een stijging in de productie van energie uit fossiele brandstoffen. De ontwikkeling van hernieuwbare groene energie verloopt op dit moment namelijk niet snel genoeg en gebruik van kernenergie ligt politiek gevoelig. Prognoses van het International Energy Agency geven aan dat al in 2030 het energieverbruik met 60 procent kan zijn gestegen en dat we in 2050 zelfs drie keer zoveel energie nodig hebben ten opzichte van het huidig niveau. Het schrikbeeld dat dit op korte termijn zal leiden tot uitputting van onze voorraad fossiele brandstoffen is niet terecht.

Maar om in deze groeiende energiebehoefte te kunnen voorzien, zal de vraag ernaar op verschillende wijzen moeten worden ingevuld. Omdat makkelijk winbare bronnen zullen opraken moeten onconventionele fossiele bronnen worden ontwikkeld, zoals bijvoorbeeld zware aardoliefracties en oliezanden.

Ook zullen steeds meer vergassingstechnologieën worden gaan toegepast. De bulk van de energie zal afkomstig zijn uit steenkool zoals blijkt uit de volgende figuur.

Winbare voorraad fossiele brandstoffen

(IPCC Third Assessment Report - Synthesis Report, 2001)



WAGENINGEN UNIVERSITY
Environmental Technology

04-0009

1

De aangetoonde voorraad steenkolen is 3 maal groter als de aangetoonde voorraad gas en olie samen.

Dit is vooral van belang voor China, waarvan het International Energy Agency verwacht dat dit in 2020 zijn verbruik van steenkool zal hebben verdubbeld ten opzichte van het niveau in 1995 (Tabel 1).

Een consequentie van de sterke toename van het gebruik van fossiele brandstoffen is de verhoogde productie van het broeikasgas CO_2 waarvan bekend is dat het bijdraagt aan de wereldwijde klimaatverandering. De wereldwijde emissie van CO_2 bedraagt tegenwoordig 25000 Tg waarvan ca. 4000 Tg door Europa wordt uitgestoten.

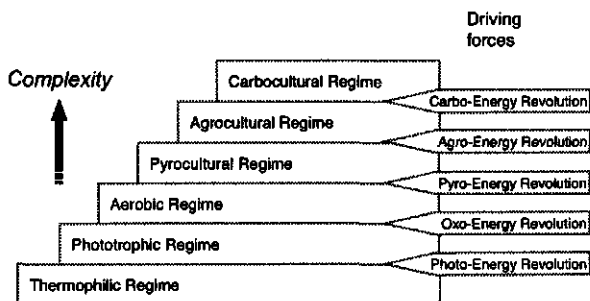
Tabel 1: Miljoen ton aardolie equivalenten (Mtoe)

	1971	1995	2010	2020
Steenkool	190	664	1087	1416
Olie	43	164	355	506
Gas	3	17	57	81
Kernenergie	0	3	19	33
Hydro	3	16	39	62
Renewables	0	0	2	3
Totale energiebehoefte	239	864	1539	2101

(Bron: IAE, China's Worldwide quest for energy security)

Een vraag die mij sterk bezighoudt is hoe het nu verder kan gaan met onze planeet indien alleen maar sprake zal zijn van een groeiend consumptiepatroon en stijgend energieverbruik. Een projectie van deze toekomst wordt wellicht inzichtelijker door eerst eens terug te kijken naar wat de afgelopen 4 miljard jaar op onze planeet heeft plaatsgevonden. Hierbij maak ik dankbaar gebruik van de analyse zoals die door mijn Amsterdamse collega, dr. Frank Niele, recentelijk is weergegeven in zijn boek 'Energy: Engine of Evolution'. Niele geeft aan dat gedurende de afgelopen 4 miljard jaar, zes opeenvolgende energieregimes te onderscheiden zijn. Deze energieregimes zal ik nu kort toelichten.

The Staircase of Energy Regimes



WASINGEN UNIVERSITY
Environmental Technology

Bron: F. Niele, 2005

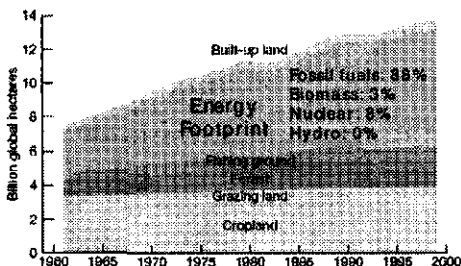
In het eerste, Thermofiele tijdperk, werd leven vertegenwoordigd door uitsluitend thermofiele bacteriën. Enkelen hiervan werden blootgesteld aan zonlicht dat via chemische routes werd benut. Een proces dat we tegenwoordig fotosynthese noemen en dat zo succesvol verliep dat fototrofe organismen tussen ca. 3.8 en 2.1 miljard jaar geleden de overhand kregen. De enorme productie van zuurstof tijdens de omzetting van koolstofdioxide in koolhydraten leidde na verloop van tijd tot een vergiftiging van het milieu, omdat de bewoners van het Fototrofe Regime anaëroben waren. Hierna kwamen nieuwe bacteriën tot ontwikkeling, die de gevormde koolhydraten met zuurstof konden verbranden. Daardoor verbeterde de energiehuishouding revolutionair en werd een reusachtige hoeveelheid organisch materiaal gevormd. Dit proces begon zo'n 2 miljard jaar geleden en het voortgebrachte organisch materiaal vormt nu onze bron van fossiele brandstoffen. Heel veel later, ca. 2.5 miljoen jaar geleden, begonnen de eerste mensen deze aarde te bevolken. Dit waren toen al intelligente wezens die van meet af aan

stenen gereedschappen gebruikten. Maar op een zeker moment bedachten zij slimme manieren om met vuur om te gaan waarmee zij dominant werden ten op zichte van andere dieren; dit Pyroculturele tijdperk deed ca. 500.000 jaar geleden zijn intrede. Aanvankelijk leefde men als nomaden, continu op zoek naar voedsel, maar met het benutten van zonlicht voor het verbouwen van gewassen deed ca. 12 000 jaar geleden het Agro tijdperk zijn intrede. Vervolgens ontdekte de mens dat hij over fossiele brandstoffen kon beschikken om alle mogelijke conversietechnologieën te ontwikkelen. Zo belandde hij, we spreken nu over zo'n 400 jaar geleden, in het Carbocultureel tijdperk. De mogelijkheid om gebruik te maken van oude, opgeslagen zonne-energie was een voorwaarde voor de industriële revolutie.

Natuurlijk zijn ook andere, bijvoorbeeld geologische, tijds-indelingen mogelijk. Maar kenmerkend aan deze indeling is dat elke verandering van tijdperk ook gepaard gaat met een verandering van energiestromen, waardoor zelfs ecologisch dominante soorten veranderen. Verandering van dominant regime geschiedt bijvoorbeeld nadat de ecologische draagkracht voor het tot dan toe dominante type onvoldoende wordt. Aërobe micro-organismen winnen de strijd van fototrofe organismen die op hun beurt weer chemotrofe organismen hebben verslagen. Uiteindelijk domineert de mens in het dierenrijk, omdat hij met vuur gevaarlijke dieren op een afstand kan houden en rond de vuurplaats zijn succesvolle beschaving ontwikkelt. Aan deze dominantie kan echter een eind komen indien door het evolutionair succes de ecologische draagkracht opnieuw overschreden wordt; fototrofe organismen hebben hun eigen habitat vernietigd door te veel zuurstof te produceren.

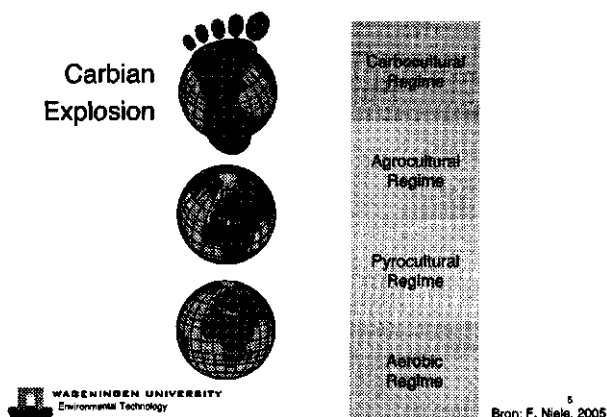
Vanuit historisch perspectief is het dus niet vreemd dat we een nieuw tijdperk zullen betreden indien we er niet in slagen om de ecologische voetafdruk op onze aarde passend te krijgen. Reeds in 1789, toen de wereld nog geen 900 miljoen inwoners telde, voorspelde Thomas Robert Malthus al hongersnoden ten gevolge van de groei van de wereldbevolking. In hedendaagse begrippen zegt hij dat de populatie mensen niet de draagkracht van zijn omgeving kan overschrijden. Het begrip ecologische draagkracht is de sleutel waar alles om draait. Dit is de hoeveelheid productief land en water die we nodig hebben om te voorzien in onze consumptiebehoefte en het verantwoord afzetten van ons afval met de nu beschikbare technologieën. Op basis van data afkomstig van de FAO, IEA en IPPC blijkt dat 11.3 miljard ha productief land en water beschikbaar is. Dit is ongeveer 25% van het totale aardoppervlak. In de volgende figuur staat dat in 2001 13.5 miljard ha grond nodig was voor het instandhouden van de wereldeconomie waarmee de ecologische draagkracht met 20% wordt overschreden. Deze overschreiding neemt bovendien zeer snel plaats. Tussen 1961 en 1999 is volgens het World Wide Fund For Nature onze ecologische voetafdruk met 80% toegenomen.

World Ecological Footprint, 1961-1999



De ecologische draagkracht kan ook worden gesymboliseerd als de menselijke voetafdruk op de aarde. Sinds het Pyrocultureel Tijdperk is onze voetafdruk explosief gegroeid zoals in de volgende figuur zeer treffend wordt geïllustreerd.

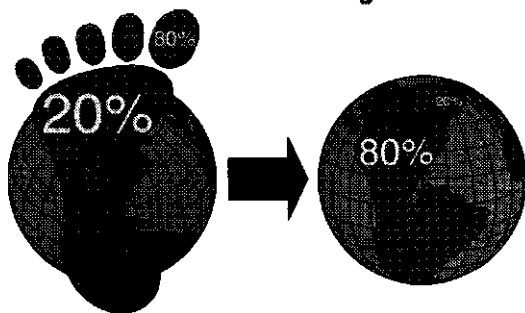
Staircase of Socio-Technological Development



Ecologisch economen beweren dat het gemiddelde energieverbruik slechts 1 KW zou mogen bedragen [Van Klinken, 2003] om onze voetafdruk passend te maken bij een verwachte wereldbevolking van 9 miljard personen in 2050. Ter vergelijking: de gemiddelde Europeaan verbruikt 6 KW en de gemiddelde Amerikaan 12 KW. Het lijkt vrijwel ondenkbaar dat we bereid zijn onze levensstandaard aan te passen om op dit lage energieverbruik uit te komen. Zelfs met alle technische mogelijkheden voor rendementsverbetering zal ons welvaartspeil bij deze 'eis' kunnen dalen tot een vooroorlogs niveau. Een mogelijke oplossing voor het energie- en milieuvraagstuk kan liggen in het gebruik van kernfusie. In principe kan deze technologie voor meer dan

10 miljard jaar aan energie opleveren. Het R&D budget dat in de geïndustrialiseerde wereld beschikbaar wordt gesteld voor onderzoek naar alle vormen van kernenergie samen, is dan ook 6 keer groter dan het budget voor alle vormen van hernieuwbare energie (IAE). Na tientallen jaren van onderzoek is het nog niet gelukt om in laboratoriumexperimenten voor langer dan 1 sec. kernfusie reacties aan de gang te houden. De kans lijkt daarom heel klein dat kernfusie op de korte- en middellange termijn een alternatief is voor het gebruik van fossiele brandstoffen. Om toch op een duurzame manier verder te leven, zullen we naar een nieuw energietijdperk moeten gaan. In dit nieuwe energietijdperk bestaat de huidige lineaire economie, die wordt gekenmerkt door het omzetten van grondstoffen in afval, niet meer. In plaats daarvan komt een circulaire economie, die gericht is op het opwerken van reststoffen tot grondstoffen. De energie die hiervoor nodig is moet worden gehaald uit duurzame bronnen zoals zonne-energie en getijdencentrales. Ook zal een gelijkmatige herverdeling van welvaart moeten plaatsvinden.

The Grand Challenge Contract and Converge



Dit is alleen mogelijk indien keuzes worden gemaakt. Doen we dat niet, dan zal het de aarde zelf zijn die een revolutionaire keuze voor ons maakt, zoals eerder is gebeurd bij overgangen tussen opeenvolgende energieregimes. De keuzes die we moeten maken, zullen zowel op individueel niveau als op industrieel en overheidsniveau moeten plaatsvinden. De overheid zal een sturende rol moeten spelen omdat er, helaas, nog steeds sprake is van een afwezigheid van eigendomsrechten voor deze problematiek. Als gevolg hiervan bestaat een paradoxaal onderscheid tussen enerzijds de burger die zich, misschien, zorgen maakt over de wereld waarin zijn kleinkinderen zullen opgroeien en anderzijds de consument die graag zo goedkoop mogelijk wil kopen. Op dit punt zal een cultuuromslag moeten plaatsvinden die wellicht gepaard gaat met een inperking van onze individuele vrijheden om een eigen levensstijl te ontplooiën (Beekman, 2001). Voor de overheid ligt een belangrijke taak om de huidige lineaire economie om te buigen naar een circulaire economie. Het is hierbij van cruciaal belang dat in schone en duurzame technologieën wordt geïnvesteerd.

Volgens de definitie van de Brundtland commissie (1987) betekent duurzame ontwikkeling:

“Een ontwikkeling die voorziet in de behoeften van de huidige generatie zonder daarmee voor toekomstige generaties die mogelijkheden in gevaar te brengen om ook in hun behoeften te voorzien.”

Effect op luchtkwaliteit

Vooralsnog zal het gebruik van fossiele brandstoffen in de komende decennia sterk gaan toenemen. Nadat de makkelijk winbare voorraden zijn uitgeput zullen de moeilijker winbare en zware bronnen worden benut. Deze zijn vaak verontreinigd met vervuilende componenten zoals zwavel. In het verleden, toen nog geen maatregelen tegen emissie bestonden, heeft de uitstoot van zwavelverbindingen geleid tot een aantal milieurampen. In de winter van 1952 bijvoorbeeld, zijn in Londen tijdens een periode van zware mist 12.000 slachtoffers gevallen ten gevolge van rookgasen die vrijkwamen bij de verbranding van kolen. Een vergelijkbaar incident had zich al eerder in Luik voorgedaan. Langzaam maar zeker groeide het besef dat de uitstoot van vervuilde gassen niet alleen schadelijk is voor de gezondheid, maar ook leidt tot de vorming van zure regen, de aantasting van gebouwen, bossen, ozonlaag en aanleiding geeft tot broeikas effecten. In de jaren 70 en 80 nam de bezorgdheid omtrent luchtverontreiniging zo sterk toe, dat in veel landen wetgeving kwam om de problemen te bestrijden. Helaas is deze scherpe milieuwetgeving nog niet in alle landen van toepassing. Uit berekeningen aan de hand van satellietmetingen blijkt dat in 1997 de hoogste SO_2 emissie plaatsvond in Oost-Europa, de westkust van de Verenigde Staten en Azië (m.n. China).

Met de uitbreiding van de Europese Unie zien we dat de emissie van SO_2 in Oost-Europa snel afneemt. In Azië daarentegen is sprake van een continue toename van SO_2 emissies. In de periode 1990-1998 is een groei van 16 procent gemeten. Indien de bevolkings- en welvaarts-groei doorzet, dan zal de milieusituatie in China sterk verslechteren. Ten gevolge van een exponentiële toename van de in-

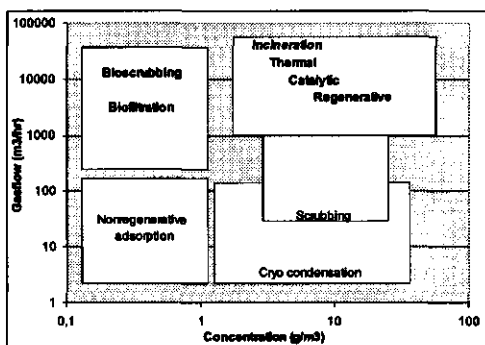
dustriële activiteiten en urbanisatie is in ongeveer de helft van de Chinese steden de concentratie aerosolen al in de orde van $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, terwijl in Europa een norm geldt van $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ die bovendien zal worden verlaagd naar $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Rol van biologische processen voor gas reiniging

De afgelopen jaren zijn een groot aantal processen ontwikkeld voor het reinigen van afgassen. Kenmerkend aan deze processen is dat ze met name geschikt zijn voor grote hoeveelheden gas met hoge concentraties aan verontreinigende verbindingen. Daarnaast zijn sinds de jaren 80 een aantal biologische methoden in opkomst voor het behandelen van verontreinigde luchtstromen.

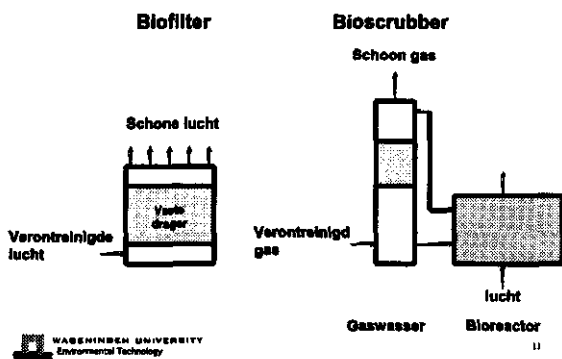
Nu kom ik bij het tweede deel van mijn betoog, waarin ik nader wil ingaan op de technologische aspecten van deze groep van biologische processen. Daarnaast wil ik de uitdagingen schetsen die voor 'Wageningen' in het verschiet liggen. Maar eerst zal ik proberen deze processen in te kaderen.

Van oudsher worden biologische gasreinigingsprocessen ingezet voor stankbestrijding. Belangrijkste voordeel van biologische processen zijn de lagere energiekosten, laag chemicaliënverbruik, er zijn geen speciale veiligheidsvoorzieningen nodig en er worden geen afvalproducten gevormd [van Groenestijn, 2005]. In de volgende figuur wordt een vergelijking gemaakt tussen de verschillende processen die kunnen worden toegepast voor het reinigen van vervuilde gassen [Kaiser, 1992].



In de figuur kan worden gezien dat biologische processen vooral geschikt zijn voor gasstromen met relatief lage concentraties aan verontreinigingen (tot maximaal 1 g/m^3). Uit een recente overzichtspublicatie [van Groenestijn, 2005] blijkt dat wereldwijd meer dan 15.000 biologische luchtzuiveringssystemen in bedrijf zijn, waarvan ongeveer de helft is geïnstalleerd bij waterzuiveringsinstallaties. Dit zijn vooral installaties van het 'biofilter' en 'biotrickling-filter' type, waarnaar in het verleden ook door 'Wageningen' uitgebreid onderzoek is verricht. Het principe berust op de microbiologische omzetting van stankcomponenten op een dragermateriaal. Het grootste biofilter voor luchtzuivering behandelt zo'n 400.000 m^3 lucht per uur.

Belangrijke procesparameters voor biologische omzetting zoals temperatuur en zuurstofconcentratie, hangen sterk af van het te behandelen gas en zijn dus moeilijk te variëren. In biofilters kunnen bijvoorbeeld alleen maar zuurstofhoudende gassen worden behandeld; meestal is dit ventilatielucht.



In tegenstelling tot het biofilter worden in de bioscrubber de te verwijderen componenten eerst opgelost in waswater waarna in de tweede processtap de biologische conversie van de opgeloste componenten plaatsvindt. Hierdoor is het mogelijk om gastromen te reinigen die geen zuurstof bevatten of gassen vervuild met anorganische verbindingen die in een biofilter tot verzuring leiden. De benodigde lucht voor de microbiële oxidatieprocessen wordt op een gecontroleerde wijze aan de bioreactor gedoseerd. Een beperking van bioscrubbers is dat alleen wateroplosbare componenten goed zijn te verwijderen. Sommige slecht oplosbare verbindingen kunnen worden afgevangen door aan het waswater chemicaliën te doseren, zoals EDTA voor het verwijderen van stikstofoxiden uit verbrandingsgassen. Als alternatief kunnen membranen worden ingezet voor het verwijderen van slecht oplosbare componenten uit gastromen. Een bijzondere toepassing van membranen is de reiniging van binnenlucht in ruimtestations. De ESA heeft hiertoe testen verricht in het ruimtestation MIR en de space shuttle Columbia.

De meest spectaculaire toepassing van bioscrubbers betreft het ontzwavelen van aardgas en rookgassen van kolengestookte energiecentrales. In tegenstelling tot de eerder genoemde toepassingen die allemaal gericht zijn op het verwijderen van stankcomponenten is bij de biologische ontzwaveling van aardgas sprake van een eindproduct met een toegenomen economische waarde. Dit illustreert de potentie van milieutechnologie binnen de procestechnologie. Er bestaat een tendens dat ontwikkelingen binnen de procestechnologie gericht zijn op het vergroten van duurzaamheid. Ik denk dat in de toekomst milieutechnologie steeds vaker als exponent hiervan zal worden toegepast.

Ontzwaveling van aardgas houdt in dat waterstofsulfide en soms ook organische zwavelverbindingen uit aardgas worden verwijderd. Dit is vooral noodzakelijk vanwege de giftigheid van deze componenten maar ook de stank van waterstofsulfide naar rotte eieren en corrosiviteit spelen een rol. Traditioneel wordt het Amine-Claus proces toegepast dat elementair zwavel als eindproduct oplevert. Dit proces is met name geschikt voor de verwijdering van zeer grote hoeveelheden waterstofsulfide. Eén van de grootste zwavel-fabrieken is de Shell Caroline Gas Plant in de Canadese provincie Alberta. Dagelijks wordt hier meer dan 6.000 ton zwavel uit aardgas geproduceerd.

'Yellow' mountains



WAGENINGEN UNIVERSITY
Environmental Technology

12

Op de foto ziet u de zg. 'yellow' mountains die worden opgebouwd uit verschillende lagen van gestold zwavel om zo verstuiving in de omgeving te voorkomen. Deze zwavel wordt vervolgens naar Vancouver getransporteerd en over de hele wereld verscheept als grondstof voor kunstmest en zwavelzuur.

Een nadeel van dergelijke grootschalige processen is dat ze uit oogpunt van operationeel beheer niet bijzonder geschikt zijn voor zwavelvrachten kleiner dan 20 ton per dag. Aan het gebruik van kleinschalige alternatieven zoals het Sulferox en LoCat proces kleven ook nogal wat nadelen; de benodigde chemicaliën (ijzerchelaten) zijn duur en de gevormde zwavel leidt vaak tot verstoppingen.

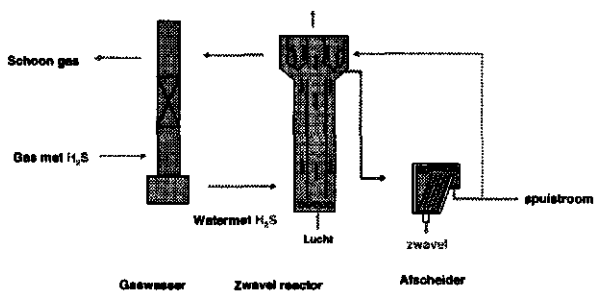
De afgelopen jaren is gelukkig een alternatief ontzwavelingsproces ontwikkeld dat gebruik maakt van zwavelproducerende bacteriën. Reeds in 1887 beschreef de bioloog Winogradsky dat bepaalde bacteriën in staat zijn om waterstofsulfide te oxideren en de gevormde zwavel als bolletjes

op te slaan. De sulfide-oxiderende bacteriën hebben baat bij deze reactie omdat de partiële oxidatie van waterstofsulfide tot elementair zwavel veel sneller verloopt dan de complete oxidatie tot zwavelzuur. Door zwavel te maken kunnen ze dus sneller het giftige sulfide uit hun leefomgeving verwijderen.

Door deze zwavelvorming zijn de bacteriën in staat om veel sneller het giftige waterstofsulfide uit hun leefmilieu te verwijderen. Intermediair gevormde zwavel kan als reservestof worden gebruikt voor tijden van voedselschaarste. Het wordt dan verder geoxideerd tot zwavelzuur, wat energie oplevert voor celgroei.

Het processchema dat is ontwikkeld voor het reinigen van biogas ziet er als volgt uit:

Schema voor biologische gas reiniging



Een economisch voordeel van het biologische proces voor waterstofsulfideverwijdering is dat in tegenstelling tot het

eerder genoemde LoCat en Sulferox proces geen speciale chemicaliën nodig zijn. Nadat indertijd aan de voorloper van de sectie Milieutechnologie door promovendus Cees Buisman (1989) de eerste principes van biologische sulfide oxidatie waren aangetoond, is in 1993 de eerste praktijkinstallatie voor biogasontzwaveling van Paques BV in bedrijf genomen. Samen met Shell is dit proces vervolgens verder ontwikkeld voor het ontzwellen van aardgas. Een belangrijk verschil met biogas is dat de druk van aardgas zeer hoog kan zijn. Het is belangrijk dat het gas op deze hoge druk blijft waardoor de bacteriën die met het waswater worden rondgepompt, continu aan grote drukwisselingen zijn blootgesteld. Wij hebben drukverschillen tot 80 bar getest. Omdat we het proces ook willen toepassen voor het ontzwellen van synthesegassen waarin koolmonoxide voorkomt, was het van belang om ook het effect hiervan op de biomassa te onderzoeken. Uit ons onderzoek is gebleken dat zowel de drukwisselingen als de aanwezigheid van koolmonoxide geen problemen vormen voor de micro-organismen. Inmiddels zijn de eerste praktijkinstallaties in gebruik genomen in de Verenigde Staten en in Canada.

**Eerste biotechnologische aardgas ontzwellingsinstallatie
Canada (1 ton zwavel per dag)**



WAGENINGEN UNIVERSITY
Environmental Technology

Foto: Shell 19

De grootste installatie staat momenteel op een olieraffina-
derij voor de gecombineerde ontzwaveling van drie ver-
schillende gassen (zie foto beneden).

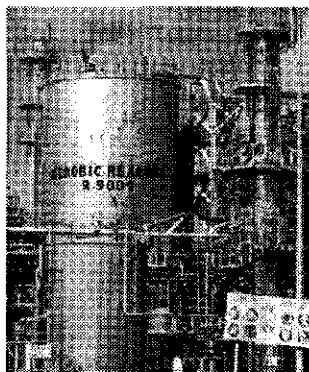


Foto: Paques bv.

 WAGENINGEN UNIVERSITY
Environmental Technology

Ik ben bijzonder geïntrigeerd door de aard van de biolo-
gisch gevormde zwaveldeeltjes. Terwijl van zwavel uit het
Claus-proces bekend is dat dit hydrofoob is, hebben biolo-
gisch gevormde zwaveldeeltjes een hydrofiel karakter
(Kleinjan, 2003). Dit is goed te zien op volgende foto.

Hexadecane-Water

Partition-test.

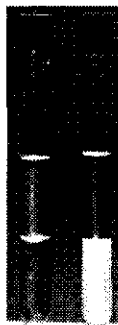


Foto: Jansen, 1996

 WAGENINGEN UNIVERSITY
Environmental Technology

21

Beide reageerbuisjes zijn gevuld met olie dat op water drijft. In het linkerbuisje blijft de hydrofobe Clauszwavel in de bovenste oliefase, terwijl in het rechterbuisje de biozwavel in de onderste waterfase terecht komt. Een technologisch voordeel van de hydrofiele bio-zwavel is dat dit veel minder snel tot verstoppingen leidt dan hydrofoob zwavel. Tenslotte is bio-zwavel zeer geschikt voor hergebruik in de landbouw. Ten gevolge van verminderde zwaveldioxide-uitstoot moeten boeren in een aantal West-Europese landen, waaronder Duitsland en het Verenigd Koninkrijk, naast stikstof en kalium tegenwoordig ook zwavel als meststof aan de bodem toedienen. In veldtesten met koolzaad is aangetoond dat onbehandelde bio-zwavel ten minste net zo effectief is als de commercieel verkrijgbare producten. Gezien de enorme hoeveelheden zwavel die in de landbouw worden verwerkt, betekent dit een potentiële afzetmarkt voor bio-zwavel. Dit kan overigens ook prima als fungicide worden hergebruikt. Uit verkennend onderzoek dat eerder samen met het Instituut 'Praktijkonderzoek Plant en Omgeving' is uitgevoerd, blijkt dat bio-zwavel zelfs beter werkt dan de commercieel verkrijgbare producten.

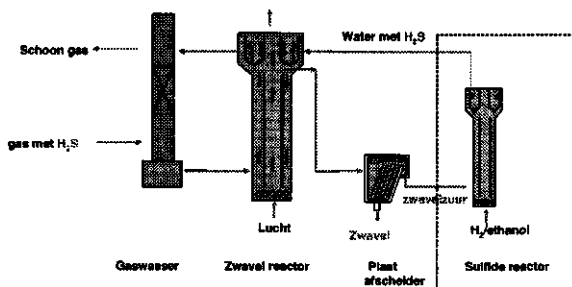
In samenwerking met de leerstoelgroep Fysische Chemie en Kolloïdkunde zullen we de komende jaren verder onderzoek verrichten naar de moleculaire structuur van de bio-zwaveldeeltjes en de betekenis hiervan voor de procesvoering van de bioreactoren. De methoden en technieken die we ontwikkelen, zijn mogelijk ook relevant voor het creëren van nieuwe mogelijkheden voor hergebruik van zwavel uit de grootschalige Claus installaties.

In de komende jaren wil ik me onder meer richten op het verbreden van het toepassingsgebied van het biologische

ontzwavelingsproces. Ten eerste is het van belang om het samenspel tussen de verschillende biologische en abiotische reacties te ontrafelen, zodat het rendement voor zwavelvorming verder wordt verhoogd. De afgelopen jaren is door onze sectie uitvoerig onderzoek verricht naar tal van nevenreacties. Als eindproduct worden naast zwavel vaak polysulfides, thiosulfaat, sulfiet en sulfaat gevormd.

Een tweede manier om het toepassingsgebied te verbreden is door het water- en chemicaliënverbruik van het bestaande proces te verminderen. In het proces wordt namelijk een klein gedeelte van het afgevangen waterstofsulfide tot zwavelzuur geoxideerd. Verzuring van het bioreactormedium wordt voorkomen door toevoeging van sterk verdund natrionloog. Dit is duur en lastig in gebieden waar zoet water schaars is. In een speciale bioreactor kan met behulp van sulfaatreducerende bacteriën het ongewenste zwavelzuur worden teruggevormd tot waterstofsulfide, zodat nauwelijks waterige afvalstromen ontstaan. Het processchema ziet er dan als volgt uit:

Ontwikkeling van nieuwe processchema



In het kader van een STW project wordt inmiddels aan deze nieuwe toepassing gewerkt door onderzoekers van Wageningen Universiteit en de Technische Universiteit Delft. Tenslotte is het mogelijk om de energie- en investeringskosten van het bestaande proces verder te reduceren door de pH waarde van de wasvloeistof te verhogen. Hiertoe maken we gebruik van zogenoemde halo-alkalifiele bacteriën die zowel tegen hoge pH waarden als tegen hoge zoutconcentraties bestand zijn. Dergelijke micro-organismen zijn geïsoleerd uit sodameren in bijvoorbeeld Siberië, Kenia en Egypte.

Een derde toepassingsgebied waar ons onderzoek zich inmiddels op richt is de biologische ontzwaveling van vloeibare koolwaterstoffen, zoals LPG. Het bijzondere van deze toepassing is dat behalve waterstofsulfide vaak ook organische zwavelverbindingen aanwezig zijn zoals mercaptanen en disulfides. Onderzoek heeft aangetoond dat het mogelijk is om mercaptanen biologisch om te zetten in waterstofsulfide dat vervolgens op de eerder besproken manier in elementair zwavel wordt omgezet. Bacteriën die in staat zijn tot de anaërobe omzetting van methylmercaptaan komen voor in natuurlijke zoetwatersystemen zoals in vennen [Lomans, 1999]. Aangezien ontzwaveling van LPG eveneens hoge pH waarden vereist, onderzoeken we of ook voor deze toepassing bacteriën uit zoutmeren geschikt zijn. Een interessante spin-off is een proces dat geschikt is voor de biologische behandeling van sulfide houdende spent caustics, een vervelende afvalstroom gevormd op olieraffinerijen [Sipma et al., 2004]. Deze afvalstromen worden soms geloosd in bestaande zuiveringen waardoor vermenigving van zoet en zout water optreedt, wat hergebruik van het gezuiverde afvalwater belemmert. Het is daarom beter om dergelijke zoete en zoute waterstromen in separate bio-

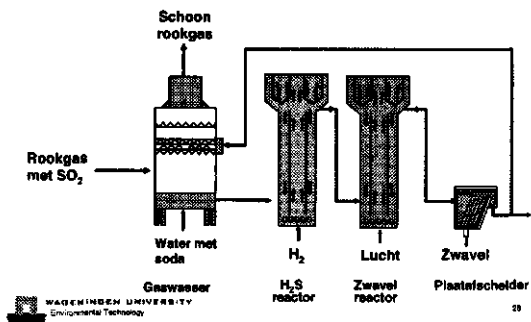
logische zuiveringen te behandelen. Ik hoop dat ons onderzoek een bijdrage levert aan deze ontwikkeling.

Alternatief voor kalksteen-gips proces

Naast H_2S verwijdering is het met behulp van zwavelvormende en sulfaatreducerende bacteriën mogelijk om zwaveldioxide (SO_2) uit rookgassen te verwijderen. Dit is een alternatief voor het kalksteen-gipsproces waarvan het energieverbruik kan oplopen tot 8% van de totale energieproductie van een kolengestookte centrale. Daarnaast worden grote volumes gips gemaakt. Indien zwavel in plaats van gips wordt geproduceerd, zal het volume vaste stof dat vrijkomt met ca. 70% afnemen. Omdat nog geen bacteriën zijn gevonden die direct uit opgelost SO_2 elementair zwavel kunnen maken, wordt dit via een omweg bereikt.

Eerst wordt in een gaswasser het zure SO_2 afgevangen waarna via een anaëroobe stap biologische omzetting in waterstofsulfide plaatsvindt dat vervolgens tot elementair zwavel wordt omgezet.

Biologische SO_2 verwijdering



De eerste installatie is momenteel in aanbouw voor het ontzwaren van heet afgas van een kolencentrale in China. Deze installatie is ontworpen voor de verwijdering van 25 ton zwaveldioxide per dag. De temperatuur van het water in de reactoren kan zonder koeling tussen de 50 en 70°C bedragen zodat gebruik moet worden gemaakt van hyperthermofiele sulfaatreducerende bacteriën, bijvoorbeeld van het geslacht *Archaeoglobus*. Deze hyperthermofiele micro-organismen zijn eerder geïsoleerd uit natuurlijk milieus, zoals bijvoorbeeld smeulende afvalhopen in centraal Zweden [Huber et al., 1998].

Naast de eerder genoemde halofiele en alkalifiele micro-organismen is dit de derde groep van extremofiele bacteriën waar wij in onze processen gebruik van willen maken. Dit toont de enorme potentie van deze organismen aan voor de milieubiotechnologie. Eerder in mijn rede heb ik getracht aan te geven dat kringloopsluiting en dus ook waterhergebruik steeds belangrijker zullen worden in een circulaire economie. Mijn doel is om middels ons onderzoek een bijdrage aan deze ontwikkeling te leveren.

Hiermee nader ik het einde van mijn rede. Ik hoop dat ik u de uitdagingen en potentie van mijn vakgebied heb laten zien. Voor Wageningen Universiteit betekent dit dat de komende jaren een aantal afstudeerders en promovendi interessant onderzoek kunnen verrichten. De noodzakelijke fundamentele onderbouwing geschiedt door samenwerking met disciplineaire onderzoeksgroepen zoals Microbiologie, Fysische Chemie en Kolloïdkunde en Meet- en Regeltechniek.

Dank

Tenslotte rest mij een woord van dank uit te spreken aan iedereen met ik wie de afgelopen jaren aan deze schone zaak heb mogen werken. Op eerste plaats wil ik prof. Cees Buisman noemen. Beste Cees, onze samenwerking voert terug tot 1989. Het was in die tijd dat mijn enthousiasme voor wetenschappelijke onderzoek werd gewekt. Samen met prof. Wim Rulkens heb je bij het College van Bestuur een voorstel ingediend voor het instellen van deze bijzondere leerstoel. Het spreekt voor zich dat ik jullie daar allebei zeer erkentelijk voor ben.

Ik dank het College van Bestuur en het College van Promoties voor het in mij gestelde vertrouwen.

Prof. Lettinga, hooggeleerde Gatze. Wereldberoemd ben je geworden met de ontwikkeling van de UASB reactor, waarvan nu wereldwijd meer dan 1000 exemplaren zijn gebouwd. Wellicht minder bekend is dat je ook de grondlegger bent van het gebruik van de biologische zwavelkringloop voor milieutoepassingen. Door jou is "high-rate" milieubiotechnologie in een stroomversnelling gekomen. Het is de uitdaging van de sectie Milieutechnologie om dit veld verder uit te bouwen. Ik beschouw het als een voorrecht om met jou te hebben samengewerkt.

Mijn wetenschappelijke vorming heb ik voor een deel genoten bij mijn co-promotor dr. Arie de Keizer van de Leerstoelgroep Fysische chemie en kolloïdkunde. Arie, ik vond onze samenwerking altijd bijzonder plezierig en ik waardeer het ten zeerste dat je steeds openstaat voor het meedenken en het geven van fundamentele onderbouwingen bij ons praktisch gericht onderzoek.

Prof. Stams, beste Fons, jou ben ik zeer erkentelijk voor de plezierige samenwerking in de afgelopen jaren. Milieubiotechnologie is niet mogelijk zonder samenwerking met microbiologen.

De biotechnologen en microbiologen van de Technische Universiteit Delft wil ik graag dank zeggen voor de vruchtbare samenwerking van de afgelopen 20 jaar.

In mijn rede heb ik aangegeven dat in ons vakgebied de samenwerking met het bedrijfsleven van groot belang is. De voortdurende wisselwerking tussen wetenschappers en technologen leidt op die manier tot doelgericht onderzoek met toepasbare resultaten.

**Encyclopædia Britannica, 2003:
Technology is the application of scientific knowledge
to the practical aims of human life.**

Met name de samenwerking tussen 'Wageningen' en Paques BV heeft tot een aantal nieuwe biotechnologische oplossingen geleid voor tal van milieuproblemen. Sinds 1997 is ook Shell een belangrijke partner geworden voor de biologische ontzwareling van aardgas en raffinaderij-gas. Ik hoop dat deze samenwerking de komende jaren zal worden gecontinueerd. Wij geven zo nadrukkelijk invulling aan de wens van het innovatieplatform voor een betere kennisuitwisseling tussen universiteiten en bedrijfsleven. Dat deze samenwerking voor beide partijen een duidelijke meerwaarde kan hebben, blijkt uit het volgende citaat van dr. Sorokin [2005]:

"The authors of this review were asked by an industrial partner, dealing with the biological sulfide removal, about the possibility of bacterial sulfide oxidation at pH 10. It sounded like an impossible task. Fortunately, several years ago, the soda lakes became the subject of intensive microbiological investigations and it became clear that the task might still be realistic." [Sorokin, 2005]

Paques BV en Shell dank ik van harte voor de financiële ondersteuning van mijn leerstoel. Met name dr. Ico van den Born en ir. Alex Benschop dank ik voor hun inspanningen.

Op het persoonlijke vlak wil ik mijn ouders danken voor alle steun die ik altijd van hen heb mogen ontvangen. Jullie belangstelling voor mijn studie en werk was voor mij van grote waarde.

Als allerlaatste wil ik mijn vrouw Nicole danken voor de onvoorwaardelijke steun die ik van haar heb, ondanks de vele uurtjes die ze me al heeft moeten missen omdat ik twee banen vervul.

Dames en heren, met deze woorden wil ik mijn rede afsluiten. Ik dank u voor uw aanwezigheid en aandacht en nodig u uit voor een borrel.

Ik heb gezegd.

Referenties

- Beekman V., 2001. Philosophical Reflections on Government Intervention in non-sustainable Lifestyles. Thesis Wageningen University. ISBN 90-5808-360-8.
- Buisman. C.J.N. , Lettinga G., 1989. Biotechnological process for sulphide removal with sulphur reclamation. *Biotechnol. Acta* 9(3), 271-283.
- Groenestijn van J.W., 2005. Biotechniques for air pollution control: past, present and future trends. Proceedings of the International Congress Biotechniques for Air Pollution Control. A Coruna, Spain, October 2005.
- Huber H. and K.O. Stetter. Hyperthermophiles and their possible potential in biotechnology, 1998. *Journal of Biotechnology*, vol. 64, p. 39-52.
- International Energy Agency, China's worldwide quest for energy security. ISBN: 92-64-17648-9. (<http://www.iea.org/Textbase/publications>).
- Janssen, 1996. Formation and colloidal behaviour of elemental sulphur produced from the biological oxidation of hydrogensulphide. Thesis Wageningen University.
- Kleinjan W.E., De Keizer A., Janssen A.J.H., 2003. Biologically produced sulfur. *Top. Curr. Chem.*, vol. 230, p. 167-188.

- Klinken van J., 2003. Energy Constraints with Limited Options, In: Sharing the Planet: Population – Consumption – Species. Editors: B. van der Zwaan and A. Petersen. Eburon Publishers.
- Lomans B.P., Maas R., Luderer R., Op den Camp H.J.M., Pol A., Van der Drift C., Vogels G.D., 1999. Isolation and characterisation of *methanomethylovorans hollandica* gen.nov., sp.nov., isolated from freshwater sediment, a methylogrophic methanogen able to grow on dimethyl sulfide and methanethiol. Appl. Environ. Microbiol. 65, p. 3641-3650.
- Maas van der P., van den Brink P., Utomo S., Klapwijk B., Lens P., 2005. Fe(II)EDTA²⁻ regeneration, biomass growth and EDTA degradation in continuous BioDeNOx reactors. Proceedings of the International Congress Biotechniques for Air Pollution Control. A Coruna, Spain, October 2005.
- Niele F., 2005. Energy, Engine of Evolution. Elsevier, Amsterdam. ISBN-13: 978 0 444 52154 5
- Sipma J., Svitelskaya A., van der Mark B., Hulshoff Pol G., Lettinga G., Buisman B., Janssen A., 2004. Potentials of biological oxidation processes for the treatment of spent sulfidic caustics containing thiols. Wat. Res., vol. 38, p. 4331-4340.
- Sorokin D.Y. and J.G. Kuenen, 2005. Haloalkaliphilic sulfur-oxidizing bacteria in soda lakes. FEMS Microbiology Reviews, vol. 29, p 685- 702.

WCED (World Commission on Environment and Development), our Common Future. Oxford University Press, Oxford, 1987.

Winogradsky, 1887, S. Botanische Zeitung 1887, 31, 490-507.