

STATUS EN PERSPECTIEVEN VAN BIOLOGISCHE H₂ EN CH₄ PRODUCTIE

Novem contractnummer 249.402-0180

**Inventarisatie van R&D en expertise bij Nederlandse kennisinstellingen,
betekenis voor duurzame ontwikkeling,
R&D issues en ontwikkelingsrichtingen,
mogelijkheden voor stimulering van ontwikkeling en implementatie**

J.H. Reith (red.)¹⁾
S.P.J. Albracht en B. Bleijlevens²⁾
W.R. Hagen³⁾
A.J.M. Stams⁴⁾
J.T. Keltjens⁵⁾
P.A.M. Claassen⁶⁾
I. Akkerman⁷⁾
R.H. Wijffels⁸⁾
G. Zeeman⁹⁾
J.B. van Lier¹⁰⁾
J.W. van Groenestijn¹¹⁾
D. Jansen¹²⁾

- 1) ECN Biomassa
- 2) Swammerdam Institute for Life Sciences, UvA
- 3) Kluijver Laboratorium voor Biotechnologie, TU Delft
- 4) Laboratorium voor Microbiologie, Wageningen Universiteit
- 5) Afdeling Microbiologie, KU Nijmegen
- 6) BU Renewable Resources, ATO B.V.
- 7) Nieuwe Delta vof
- 8) Sectie Bioproceskunde, Wageningen Universiteit
- 9) Sectie Milieutechnologie, Wageningen Universiteit
- 10) Lettinga Associates Foundation
- 11) TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie
- 12) ECN Schoon Fossiel

Revisies		
A		
B		
Opgesteld door:	Goedgekeurd/vrijgegeven door:	ECN Biomassa
J.H. Reith		
Geverifieerd door:		
R. van Ree	H.J. Veringa	

Verantwoording

Deze rapportage is onderdeel van het project “*Status en perspectieven van biologische systemen voor productie van hernieuwbare H₂ en CH₄*: Inventarisatie van R&D in Nederland; evaluatie van de state-of-the-art en perspectieven” met Novem contractnummer 249.402-0180 (ECN projectnummer 7.2249). Dit project omvat drie onderdelen t.w.:

1. een inventarisatie onder Nederlandse kennisinstellingen met lopend onderzoek op het gebied van de biologische H₂ en CH₄ productie;
2. het schrijven van Engelstalige essays over de state of the art en perspectieven van biologische H₂ en CH₄ productie t.b.v. een internationale publicatie;
3. inrichting van het Internet Platform www.biohydrogen.nl.

In dit rapport worden de uitkomsten gepresenteerd van de inventarisatie (1) en de inrichting van het Internetplatform (3). Aan de inventarisatie (najaar 2001-2002) namen de volgende onderzoekers deel:

Dr. S.P.J. Albracht, Drs. B. Bleijlevens	Swammerdam Institute for Life Sciences, UvA
Prof.Dr. W.R. Hagen	Kluijver Laboratorium voor Biotechnologie, TU Delft
Prof.dr.ir. A.J.M. Stams	Laboratorium voor Microbiologie, Wageningen Universiteit
Dr. J. T. Keltjens	Afdeling Microbiologie, KU Nijmegen
Dr.ir. P.A.M. Claassen	BU Renewable Resources, ATO B.V.
Ir. I. Akkerman	Nieuwe Delta vof
Dr.ir. R.H. Wijffels	Sectie Bioproceskunde, Wageningen Universiteit
Dr.ir. G. Zeeman	Sectie Milieutechnologie, Wageningen Univeriteit
Dr.ir. J.B. van Lier	Lettinga Associates Foundation
Dr.ir. J.W. van Groenestijn	TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie
Ir. D. Jansen	ECN Unit Schoon Fossiel

De inrichting en vormgeving van het Internet Platform Biohydrogen (www.biohydrogen.nl) werd verzorgd door Topshare BV in samenwerking met de betrokken onderzoekers en (in opdracht van) hoofdvoerder ECN. De coördinatie en rapportage waren in handen van Drs. J.H. Reith, ECN Unit Biomassa. De begeleiding namens Novem werd verzorgd door Dr. H. Barten en Ir. H.P.E.M. Reijnders.

Abstract

Deze rapportage beschrijft de uitkomsten van een inventarisatie onder onderzoekers verbonden aan Nederlandse kennisinstellingen. Het doel van de inventarisatie is:

1. Het in kaart brengen van lopend onderzoek, expertise en infrastructuur bij Nederlandse kennisinstellingen op het gebied van biologische waterstof- en methaan productie;
2. Identificatie van de visie van de deelnemende onderzoekers ten aanzien van de potentiële betekenis en toepassingen van biologische H₂ en CH₄ productieprocessen voor duurzame ontwikkeling; R&D issues en kansrijk geachte onderzoeksrichtingen, en mogelijkheden voor bevordering van de verdere ontwikkeling en praktijk implementatie.

Onderzoek en expertise op het gebied van biologische waterstof en methaan productie bij Nederlandse kennisinstellingen staan op een hoog peil. Gezien het vóórkomen van zowel gedeelde als complementaire expertise biedt samenwerking tussen de twee werkgebieden een duidelijke toegevoegde waarde. De meerwaarde voor duurzame ontwikkeling betreft met name: hernieuwbare energieproductie (H₂, CH₄) uit biomassa- en reststromen, het sluiten van nutriënt en waterkringlopen, en de ontwikkeling van goedkope waterstofkatalysatoren voor brandstofcellen en voor de vervanging van chemische reacties (hydrogenering, “water-gas-shift”) door biologische alternatieven. Belangrijke onderzoeksrichtingen op het gebied van zowel biologische waterstof als methaan productie worden geïdentificeerd. Tevens worden aanbevelingen gedaan voor de bevordering van de verdere ontwikkeling.

Trefwoorden

waterstof, methaan, biologische waterstofproductie, biologische methaanproductie, anaërobe vergisting, inventarisatie, perspectieven, stimulering ontwikkeling

INHOUD

LIJST VAN TABELLEN	4
LIJST VAN FIGUREN	4
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	7
1.1 Achtergrond	7
1.2 Probleemstelling	7
1.3 Doelstelling	8
1.4 Werkwijze en indeling van dit rapport	8
2. RESULTATEN VAN DE INVENTARISATIE	9
2.1 Inleiding	9
2.2 Hydrogenasen en duurzame H ₂ productie	10
2.3 Biochemie en biotechnologie van hyperthermofielen	15
2.4 Thermofiele biologische waterstofproductie en microbiële omzetting van CO naar H ₂	18
2.5 Vorming en verbruik van biologische waterstof in fermentatieve systemen	21
2.6 Ontwikkeling van bioprocessen voor H ₂ productie uit biomassa	24
2.7 Fotobiologische waterstofproductie	28
2.8 Sanitatie en rioolwaterbehandeling; CH ₄ gisting van slurries (mest e.d.)	31
2.9 Anaërobe behandeling (CH ₄ gisting) van industrieel afvalwater	36
2.10 Bio-waterstof en Bio-methaan productie	41
2.11 Waterstof inzet in brandstofcellen	47
3. ORGANISATIE EN FINANCIERING VAN HET ONDERZOEK	52
4. INTERNETPLATFORM WWW.BIOHYDROGEN.NL	54
5. CONCLUSIES	57
5.1 Onderzoek en expertise	57
5.2 Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassingen en implementatie-termijn	57
5.3 Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen	58
5.4 Stimulering van ontwikkeling en implementatie van biologische waterstof- en methaanproductie	61
6. AANBEVELINGEN	63
BIJLAGE A ADRESSENLIJST NEDERLANDSE CONTACTGROEP BIOLOGISCHE H ₂ PRODUCTIE / DEELNEMERS AAN DE INVENTARISATIE	65
BIJLAGE B FORMAT VRAGEN / ONDERWERPENLIJST	66

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1	<i>Deelnemers aan de inventarisatie en hun belangrijkste expertisegebieden en R&D</i>	9
Tabel 2	<i>Voordelen van anaërobe zuivering</i>	39
Tabel 3	<i>Overzicht van geïnventariseerde R&D projecten</i>	52

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1	<i>A: Actief centrum [NiFe]-hydrogenasen. B: Actief centrum [Fe]-hydrogenasen</i>	11
Figuur 2	<i>Groei van de wereldbevolking.</i>	14
Figuur 3	<i>Transitie scenario naar een duurzame energiehuishouding</i>	50
Figuur 4	<i>Portal platform www.biohydrogen.nl</i>	54
Figuur 5	<i>Public page Netherlands Biohydrogen Network (NL Contactgroep Biologische H₂ productie)</i>	55

SAMENVATTING

Doelstelling

De doelstelling van het project omvat:

1. Het in kaart brengen van lopend onderzoek, expertise en infrastructuur bij Nederlandse kennisinstellingen op het gebied van biologische waterstof- en methaan productie;
2. Identificatie van de visie van de deelnemende onderzoekers ten aanzien van de potentiële betekenis en toepassingen van biologische H₂ en CH₄ productieprocessen voor duurzame ontwikkeling; R&D issues en kansrijk geachte onderzoeksrichtingen,;en mogelijkheden voor bevordering van de verdere ontwikkeling en praktijk implementatie

De belangrijkste uitkomsten, conclusies en aanbevelingen worden hieronder weergegeven.

Onderzoek en expertise

Onderzoek en expertise op het gebied van biologische waterstof en methaan productie bij Nederlandse kennisinstellingen staan op een hoog peil. De belangrijkste expertise gebieden m.b.t. biologische waterstofproductie zijn:

- biochemie van waterstofenzymen;
- biochemie en biotechnologie van hyperthermofielen;
- (hyper)thermofiele H₂ fermentaties;
- regulatie van H₂ en CH₄ metabolisme;
- bioproces- en reactorontwikkeling;
- fotobiologische waterstofproductie.

De expertise in het methaan onderzoeksveld omvat:

- fundamentele en toegepaste microbiologie;
- bioprocesstechnologie;
- reactorontwikkeling: behandeling afvalwater, slurry en vast afvalvergisting;
- conceptontwikkeling; ketenbeheer;
- sluiten van kringlopen; hergebruik & integratie met andere disciplines.

Gezien het vóórkomen van zowel gedeelde als complementaire expertise biedt samenwerking tussen de twee werkgebieden een duidelijke meerwaarde.

Vrijwel alle publiek gefinancierd onderzoek vindt plaats in projecten met een looptijd van 4 jaar of korter. De totale personeelsinzet bedraagt 43 fte waarvan 23 fte voor bio-H₂ gerelateerd onderzoek en 19 fte voor CH₄ onderzoek (H₂ & CH₄ 1 fte) Over de gehele linie is het aandeel van langer lopend fundamenteel onderzoek beperkt. Veel onderzoek vindt plaats in projecten met een looptijd van 4 jaar of korter.

Betekenis voor duurzame ontwikkeling en implementatietermijn

De recente opheldering van de (geheel anorganische) structuur van het katalytische centrum van natuurlijke waterstofenzymen (hydrogenasen) opent de weg naar ontwikkeling van goedkope, synthetische ('biomimetische') waterstofkatalysatoren. Op afzienbare termijn (20 jaar) kunnen deze de kostbare Pt katalysator in het waterstofdeel van elektrolyse- en brandstofcellen vervangen. Het onderzoek naar hydrogenasen en de daarop gebaseerde synthetische katalysatoren is tevens van belang voor verbetering (energiegebruik, emissies) van belangrijke chemische omzettingen w.o. chemische hydrogeneringsreacties en als biologisch alternatief voor de chemische "water-gas shift" reactie.

Verskillende typen processen worden ontwikkeld voor H₂ productie uit (rest)stromen en/of zonlicht. De R&D is o.a. gericht op de ontwikkeling van een 2-staps proces dat zich goed leent voor kleinschalige H₂ productie uit reststromen. De termijn voor verdere ontwikkeling en implementatie van deze technieken is naar verwachting 10 jaar en langer.

Biologische methaanproductie uit afval en afvalwater resulteert in de volgende milieuvoordelen:

- voorkómen van energieverbruik tijdens de zuivering (in vergelijking met aërobe afvalwaterzuivering en aërobe compostering);

- terugwinnen van energie, dat kan worden ingezet als energiebron (“groene” energie);
- reductie van methaanemissies tijdens opslag (met name bij dierlijke mest);
- mogelijkheid tot het sluiten van kringlopen van water en nutriënten.

Anaërobe zuivering van afval(water) wordt momenteel reeds op uitgebreide schaal toegepast. Anaërobe zuivering/vergisting is echter een relatief nieuwe technologie, welke zeker nog niet overal geaccepteerd is. Voorwaarde voor daadwerkelijke technologie implementatie is kosteneffectiviteit en gesubsidieerde marktintroductie aangaande nieuwe toepassingen.

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

De belangrijkste R&D thema's voor het biologisch waterstof onderzoek zijn: onderzoek naar het reactiemechanisme van hydrogenasen en ontwikkeling van hiervan afgeleide waterstofkatalysatoren; ontwikkelen van ontsluitings- en hydrolysetechnologie; optimaliseren van de volumetrische productiviteit van fermentatieve en fotobiologische H₂ productieprocessen; ontwikkelen van technieken voor afvangst van H₂ tot zeer lage H₂ partiaalspanning; fotobioreactorontwikkeling en ontwikkeling van lichtinvangs- en geleidingssystemen.

Voor het biologisch methaan onderzoek zijn de belangrijkste R&D thema's: verbreding van het toepassingsgebied van anaërobe zuivering voor extreme milieucondities; anaërobe afbraak van xenobiotica; hydrolyse van complexe polymere substraten en het sluiten van water en nutriënten kringlopen.

Bevordering van verdere ontwikkeling en implementatie

De noodzaak van multidisciplinaire samenwerking op veel van de hierboven genoemde gebieden wordt algemeen benadrukt. Dit wijst erop dat de beschikbare financierings- en projectvormen hiervoor onvoldoende ruimte bieden. Andere factoren die de ontwikkeling kunnen versnellen zijn:

- het betrekken van bedrijven in de ontwikkeling, met name voor opschaling van processen die op laboratorium schaal beschikbaar zijn;
- een versterking van de integratie van afvalverwerking en energieproductie: deze sectoren zijn op dit moment grotendeels gescheiden;
- stimulering van kennis-/expertisecentra, als organisator, coördinator en (mede)uitvoerder van gespecialiseerde workshops en het ontwikkelen van beleidslijnen

Versterking van het fundamenteel en toepassingsgericht onderzoek op de geïdentificeerde R&D gebieden is gewenst. Van groot belang daarbij is het creëren van continuïteit door langere financieringstermijn en/of verdeling van beschikbare fondsen op basis van expertise en geleverde prestaties ter vervanging van de huidige tenderopzet van programma's. Daarnaast wordt op basis van de inventarisatie aanbevolen:

- De mogelijkheden na te gaan voor de vorming van een Nationaal Programma of Prioriteitsgebied op relevante speerpunten (bijv. 'biologische energiedragers'), met betrokkenheid van NWO, overheden, R&D sector en bedrijfsleven. Zo'n aanpak draagt tevens bij aan de continuïteit in het onderzoek en multidisciplinaire samenwerking.
- Gerichte aandacht te geven aan het versterken en instandhouden van opleidingen. Goede opleidingstrajecten aan (Nederlandse) universiteiten zijn cruciaal voor het leveren van voldoende aantallen biotechnologische onderzoekers van een voldoende niveau. Aankomende studenten dienen te worden gestimuleerd tot het kiezen van meer Bèta en milieugerichte studies.
- Regelgeving en beleid van de overheid op het gebied van milieu en energie vormen een belangrijk element tot stimulering van verdere ontwikkeling. Ontdoeners van reststromen en energiegebruikers moeten een economische of vergunningstechnische drijfveer hebben om mee te werken aan de productie van bio-energie. Via beleidsmaatregelen (waaronder subsidiëring van 'groene' energie) kan de integratie van de afvalverwerkings- en energiesector worden bevorderd.

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

Biologische conversieprocessen maken gebruik van micro-organismen of enzymen, die met hoge specificiteit en bij lage temperatuur en druk vloeibare en gasvormige energiedragers - zoals ethanol, methaan of waterstof en andere producten - kunnen produceren uit biologische grondstoffen en/of zonlicht. De ontwikkeling en implementatie van deze processen voor de productie van hernieuwbare H₂ en CH₄ uit biomassa, reststromen of direct uit zonlicht, kan een belangrijke bijdrage leveren aan de Nederlandse duurzame energiedoelstellingen. Biologische waterstofproductie is in de R&D fase en zal op langere termijn een rol kunnen spelen in een toekomstige waterstofeconomie. Daarnaast is er de mogelijkheid om waterstofproducerende micro-organismen of enzymen in te zetten als biologisch alternatief voor chemische processen zoals de water-gas shift reactie (vergroening van de industriële productie). Anaërobe methaangisting is een op commerciële schaal bewezen en breed toegepaste technologie. Samenwerking en kennisuitwisseling tussen onderzoekers in beide werkgebieden biedt potentiële meerwaarde vanwege:

- De koppeling van het microbieel CH₄ en H₂ metabolisme op fysiologisch en procesniveau: H₂ is een intermediair product in de CH₄ fermentatie.
- Gemeenschappelijke onderzoeksthema's waaronder het optimaliseren van ontsluiting en hydrolyse van grondstoffen, conditionering en opwerking van productgas, en toepassing in brandstofcellen.
- De introductie van bio-H₂ in de (energie)infrastructuur kan mogelijk plaatsvinden langs een transitietraject via CH₄. Op deze wijze kan gebruik worden gemaakt van de technologische voorsprong van CH₄-productieprocessen en (op termijn) de bestaande infrastructuur.

Onderzoekers uit beide werkgebieden nemen deel in de *Contactgroep Biologische H₂ Productie* die dient als platform voor (inter)nationale uitwisseling en samenwerking (in IEA kader). Deze samenwerking draagt bij aan de effectiviteit van het onderzoek, de (internationale) positie van het Nederlandse onderzoeksveld en het beschikbaar maken van expertise aan marktpartijen en overheden ten behoeve van techniekontwikkeling en het oplossen van concrete problemen zoals verwerking en optimale benutting van grondstoffen en reststromen. Als basis hiervoor is inzicht gewenst in de bij betrokken onderzoeksinstellingen lopende R&D, beschikbare expertise en infrastructuur, de technologische perspectieven, R&D issues en ontwikkelingsrichtingen, en de wijze waarop verdere ontwikkeling en implementatie kunnen worden bevorderd.

1.2 Probleemstelling

1. Er bestaat geen dekkend overzicht van in Nederland lopend onderzoek, expertise en infrastructuur, op het gebied van de biologische H₂ en CH₄ productie
2. Er is onvoldoende inzicht in:
 - de potentiële betekenis van biologische H₂ en CH₄ productieprocessen voor duurzame ontwikkeling, technologische toepassingen en voorziene implementatietermijn;
 - belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen;
 - mogelijkheden voor bevordering van de verdere ontwikkeling en praktijk implementatie.
3. Een interactief Internetplatform is een geschikt hulpmiddel ter ondersteuning van kennisuitwisseling en -disseminatie, en (inter)nationale samenwerking. Het is onbekend aan welke eisen (inhoud, functionaliteit) zo'n platform moet voldoen.

1.3 Doelstelling

De doelstelling van het project omvat:

1. Het in kaart brengen van relevant lopend onderzoek, expertise en infrastructuur bij Nederlandse kennisinstellingen
2. Identificatie van de visie van de deelnemende onderzoekers ten aanzien van:
 - de potentiële betekenis en toepassingen van biologische H₂ en CH₄ productieprocessen voor duurzame ontwikkeling;
 - R&D issues en kansrijk geachte onderzoeksrichtingen;
 - mogelijkheden voor bevordering van de verdere ontwikkeling en praktijk implementatie (o.a. wensen t.a.v. samenwerking met andere disciplines en bedrijven).

De resultaten dienen voor het versterken van samenwerking en de R&D infrastructuur, het informeren van beleidsmakers en marktpartijen en voor het faciliteren van strategische keuzes t.a.v. verdere ontwikkeling.

1.4 Werkwijze en indeling van dit rapport

De inventarisatie is schriftelijk uitgevoerd onder 10 R&D instellingen met relevant onderzoek d.m.v. een vragen-/onderwerpen lijst (Bijlage B). In Hoofdstuk 2 zijn de belangrijkste uitkomsten van de inventarisatie weergegeven gegroepeerd naar thema/respondent. In Hoofdstuk 3 wordt de organisatie en financiering van het onderzoek geëvalueerd. In Hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de inrichting van het Internetplatform (operationeel per november 2002). In Hoofdstuk 5 worden conclusies en aanbevelingen geformuleerd n.a.v. de inventarisatie.

2. RESULTATEN VAN DE INVENTARISATIE

2.1 Inleiding

Aan de inventarisatie namen onderzoekers deel van 10 R&D instellingen/groepen (Tabel 1), die allen deelnemen aan de *Contactgroep Biologische H₂ productie*. Voor een adressenlijst zie Bijlage A.

Tabel 1 *Deelnemers aan de inventarisatie en hun belangrijkste expertisegebieden en R&D*

<i>Instituut</i>	<i>Expertise/Lopende R&D</i>
Universiteit van Amsterdam Swammerdam Institute for Life Sciences / Biochemie Dr. S.Albracht	hydrogenase: katalytische site, reactie mechanisme
TU Delft Kluyverlaboratorium voor Biotechnologie / Enzymologie Prof.dr. W.R. Hagen	biochemie en biotechnologie van hyperthermofielen; H ₂ productie en opslag.
Wageningen Universiteit Laboratorium voor Microbiologie Prof. dr. ir. A.J.M. Stams	H ₂ productie door extreem thermofielen; microbiologische water-gas shift reactie; CH ₄ fermentatie
KU Nijmegen Afdeling Microbiologie Dr. J.T. Keltjens	H ₂ en CH ₄ fermentaties; fysiologie en regulatie van het H ₂ en CH ₄ metabolisme
ATO BV Business Unit Renewable Resources Dr. ir. P.A.M. Claassen	biomassa voorbewerking/ontsluiting; thermofiele H ₂ fermentaties / CH ₄ fermentatie / procesontwikkeling
Wageningen Universiteit, Sectie Proceskunde Ir. I. Akkerman ^{*1)} , Dr.ir. R.H. Wijffels	fotoheterotrofe H ₂ productie, fotobioreactor ontwikkeling
Wageningen Universiteit Sectie Milieutechnologie Dr. G. Zeeman	anaërobe (CH ₄) vergisting van afvalwater, slurries, en vast afval / effluent nabehandeling; gas conditionering (o.a. S-verwijdering)
Lettinga Associates Foundation (LeAF) Dr. J. van Lier	anaërobe fermentatie van vast organisch afval en afvalwater
TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie Milieubiotechnologie Dr. J. van Groenestijn	grondstof voorbehandeling / proces- en reactor ontwikkeling; product gasscheiding en – opwerking / effluent behandeling
Energieonderzoek Centrum Nederland Unit Schoon Fossiel Ir. D. Jansen	inpassing H ₂ productiesystemen/ ontwikkeling stationaire en mobiele brandstofcellen

^{*1)} De Nieuwe Delta vof

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste uitkomsten van de inventarisatie weergegeven gegroepeerd naar thema/respondent. Daarin worden per thema belicht:

- lopende R&D, beschikbare expertise en infrastructuur;
- visie op de betekenis voor duurzame ontwikkeling, praktijktoepassingen en implementatietermijn;
- belangrijke R&D issues en kansrijke onderzoeksrichtingen;
- mogelijkheden voor bevordering van ontwikkeling en implementatie via o.m. multidisciplinaire samenwerking en samenwerking met bedrijven.

2.2 Hydrogenasen en duurzame H₂ productie

Dr. S.P.J. Albracht & Drs. B. Bleijlevens,
Swammerdam Institute for Life Sciences / Biochemie,
Universiteit van Amsterdam.

Lopende R&D

Project: Hydrogenasen: activering van H₂ in de natuur

Looptijd: lange termijn. Financiering: UvA, NWO/CW, (EU). Personeelsinzet: ca. 2 fte/jaar.

Doelstelling

Volledige karakterisering van het actieve centrum in hydrogenasen en begrip van het reactiemechanisme. De kennis opgedaan met de biologische katalysatoren kan gebruikt worden om het actieve centrum na te bouwen in een meer stabiele, niet-eiwit omgeving. Zodoende kunnen goedkope en stabiele katalysatoren verkregen worden voor de productie (elektrolyse van water met stroom uit zonne-energie) en het gebruik (brandstofcel) van H₂. Deze manier van productie (energie + 2H₂O • 2H₂ + O₂) en gebruik (2H₂ + O₂ • 2H₂O + energie) van waterstof vormen een perfecte en milieuvriendelijke cyclus voor opslag en gebruik van zonne-energie ter vervanging van de gangbare fossiele en nucleaire energiebronnen.

Resultaten

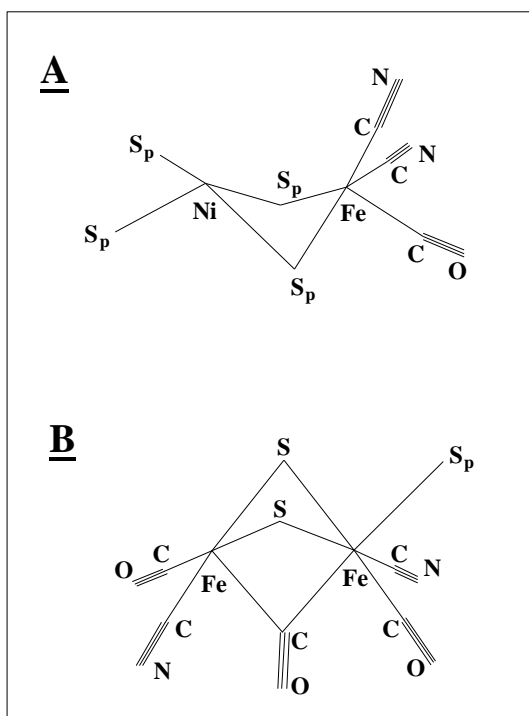
Het onderzoek aan hydrogenasen in Nederland is gestart in 1975 op initiatief van Prof. E.C.Slater. Onze groep heeft gewerkt met hydrogenasen uit talrijke organismen. Hydrogenasen werken in de natuur onder zeer verschillende omstandigheden, die voorgeschreven zijn door de optimale groeicondities van het organisme (anaëroob, aëroob, CO, lage (5-20 °C) of juist hoge (tot 105 °C) temperatuur, lage (pH=1) of juist hoge (pH=10) pH, verschillende zoutsterkte, etc.). Sommige bacteriën hebben slechts heel weinig hydrogenase, terwijl bij andere tot 10% van het celwit uit dit enzym bestaat. Dit betekent dat de hydrogenasen uit die verschillende organismen ook verschillen in eigenschappen en daarvan hebben we vaak gebruik gemaakt om diverse aspecten van hydrogenasen te bestuderen. Een paar voorbeelden: we zijn begonnen met pogingen om het enzym uit *Rhodospirillum rubrum* en *Thiocapsa roseopersicina* te isoleren, maar dat was geen succes. Daarna zijn we op *Chromatium vinosum* overgestapt; dit was wel succesvol en we bestuderen dat enzym nog steeds (en kweken de bacterie op 700-L schaal). Een bewijs voor redox-actief nikkel hebben we voor het eerst kunnen aantonen in het enzym van *Methanobacterium thermoautotrophicum* (via groei op ⁶¹Ni). Dat zwavel een ligand voor nikkel is toonden we aan met enzym uit *Wolinella succinogenes* (via groei op ³³S). Enzym verrijkt in ⁵⁷Fe is met het *C.vinosum* enzym gemakkelijk te doen; ook hebben we zo ¹³C- en ¹⁵N-verrijkt enzym gemaakt, waarmee we bewezen dat CN⁻ en CO liganden waren van het actieve centrum. Dat seleno-Cys een ligand van nikkel is in sommige enzymen toonden we aan met enzym uit *Methanococcus voltae* (groei op ⁷⁷Se). Ofschoon *Escherichia coli* codeert voor vier verschillende hydrogenasen, en dit organisme genetisch het makkelijkst toegankelijk is, is het voor spectroscopische studies aan de hydrogenasen niet geschikt: er zit veel te weinig enzym in en de enzymen zijn niet voldoende stabiel in de gezuiverde toestand. Zo vergt elke studie aan een bepaald aspect van hydrogenasen een gedegen afweging van de keus voor het juiste enzym.

Met name de ontwikkelingen in de laatste zes jaren hebben geleid tot de opheldering van het actieve centrum van hydrogenasen. De combinatie van Fourier Transform Infrarood (FTIR) metingen (onze groep) en de kristalstructuren (buitenlandse groepen) gaf de oplossing. Er zijn twee verschillende typen hydrogenasen:

- **[NiFe]-hydrogenasen** hebben een (SCys)₂Ni-(μ-SCys)₂-Fe(CO)(CN)₂ groep als actief centrum (onderstaand figuur 1-A). De vier thiol groepen zijn van cysteine residuen (SCys; S_p in de figuur) in het eiwit. Daarmee is de NiFe(CN)₂(CO) groep dus verankerd aan het eiwit.

- **[Fe]-hydrogenasen** hebben een $(\text{CO})(\text{CN})\text{Fe}-(\mu\text{-CO})(\mu\text{-SRS})\text{-Fe}(\text{CO})(\text{CN})(\text{SCys})$ (figuur 1-B) centrum. Het bruggende, niet-eiwit ligand (SRS; alleen de S atomen zijn aangegeven in de figuur) is waarschijnlijk een propyl groep ($-\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2-$) of een dimethylamine groep ($-\text{CH}_2\text{-NH}_2\text{-CH}_2-$). De enige binding van dit katalytische centrum met het eiwit bestaat uit één thiolgroep (S_p) van cysteine aan een van de twee Fe atomen.

De CO en CN liganden in hydrogenasen zijn niet uitwisselbaar met externe CO of CN groepen. Het voorkomen van deze twee in het algemeen zeer exotische liganden in het hart van deze enzymen was een zeer verbazingwekkend resultaat. Deze liganden zijn nog in geen enkel ander eiwit of enzym gevonden.



Figuur 1 A: Actief centrum [NiFe]-hydrogenasen. B: Actief centrum [Fe]-hydrogenasen

Naar aanleiding van de structuren in bovenstaand figuur 1, zijn in de laatste drie jaar wereldwijd talloze (chemische) groepen gestart met de synthese van modelcomplexen, om te komen tot katalytisch actieve verbindingen (o.a. S.A. Koch, Stony Brook, USA; M.Y. Darensbourg, Texas, USA; J. Reedijk, Leiden, NL; D.J. Evans, Norwich, UK; T.B. Rauchfuss, Urbana, USA; D. Sellmann, Erlangen). In 2001 heeft Rauchfuss de resultaten gepubliceerd van de eerste *katalytisch actieve*, biomimetische modelverbinding gebaseerd op de structuur B in de figuur. De verbinding $\{(\text{Me}_3\text{P})(\text{CO})_2\text{Fe}-(\bullet\text{-S}_2(\text{CH}_2)_3)\text{-Fe}(\text{CO})_2(\text{CN})\}$ was uren stabiel in zuur en produceerde waterstofbelletjes bij een potentiaal van -1 V. Geïsoleerd hydrogenase kan als een monolaag van moleculen worden gekoppeld aan een elektrode. Bij toevoer van H_2 (en bij een hoge potentiaal) gaat een stroom lopen door oxidatie van H_2 . Bij een lage potentiaal worden elektronen verbruikt en treedt H_2 productie op. Op dit gebied werkt UvA samen met een Britse onderzoeksgroep. Het systeem blijkt uiterst stabiel. Ook is de gemeten 'turnover' van het enzym in deze applicatie vele malen hoger dan gemeten met artificiële acceptoren in het lab. De enzym elektrode is precies zo actief als een standaard Platina elektrode.

Expertise

- onderzoek aan overgangsmetaal-bevattende enzymen met behulp van spectroscopische technieken (EPR, FTIR; zie ook onder infrastructuur).

- kweek van fotosynthetische bacteriën op grote schaal en isolatie en zuivering van enzymen daaruit.

Infrastructuur

In het laboratorium zijn vele faciliteiten voor onderzoek aan metaalenzymen voorhanden, b.v. verschillende preparatieve (ultra)centrifuges voor het werken met grote hoeveelheden extracten, twee koude kamers, UV/VIS spectrofotometers (Zeiss, Hewlet-Packard, Pharmacia), split-beam spectrofotometers (Cary), dual-wavelength spectrophotometer (Aminco), spectrofluorimeter (Hitachi-Perkin-Elmer), a research FTIR spectrometer (Bio-Rad), graphic-furnace atomic absorption (Hitachi), HPLC en FPLC. Tevens zijn er drie EPR spectrometers (Bruker and Varian) werkend met microgolffrequenties van 4 GHz (S-band), 9 GHz (X-band) en 35 GHz (Q-band). Alle EPR instrumenten zijn uitgerust met helium cryostaten hetgeen metingen mogelijk maakt bij temperaturen van 4.2 tot 200 K. Er is eigen software ontwikkeld voor de simulatie, interpretatie, manipulatie en kwantificering van EPR spectra.

Ook een rapid-mixing rapid-freezing apparaat, werkend onder anaërobe condities, is in eigen beheer gebouwd en wordt gebruikt voor studies naar elektronenoverdracht in enzymen. Een apparaat voor redox titraties onder gecontroleerde waterstof/helium gasmengsels is eveneens zelf ontwikkeld.

Voor de groei van fotosynthetische bacteria is een 700-L batch culture gebouwd; het oogsten geschiedt in ca. anderhalf uur met een grote doorstroom centrifuge (Sharples). Een anaërobe tent (glove box) maakt het mogelijk zuurstof gevoelige preparaten aan te maken voor EPR, FTIR, XAS or Mössbauer spectroscopie.

Onze recente karakterisering van FTIR-detecteerbare CN en CO groepen als liganden in de actieve sites in [NiFe]- and [Fe]-hydrogenasen, maakt de combinatie van de EPR en FTIR technieken een zeer krachtige om deze enzymen verder te bestuderen.

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

Nieuwe katalysatoren voor de biologische productie van H₂

In de natuur wordt H₂ op grote schaal gebruikt als een mobiele drager voor de overdracht van energie van het ene organisme naar het andere. De biokatalysatoren om H₂ te produceren en te consumeren in deze organismen zijn enzymen met de naam *hydrogenasen*.

Na de oliecrisis van 1973 is het onderzoek aan hydrogenasen wereldwijd aanzienlijk toegenomen. In 1976 is er in Nederland door NWO/SON een speciaal 'Hydrogenase Project' opgestart waaraan een aantal universitaire groepen (o.a. de UvA groep) deelnamen. *Ofschoon door de geldgevers (NWO) duidelijk werd onderkend dat het hier lange-termijn onderzoek betrof*, is dit speciale project toch in 1985 opgeheven. Slechts een tweetal universitaire groepen (groep Albracht en groep Hagen) heeft het onderzoek aan hydrogenasen tot op heden doorgezet (o.a. met 'normale' NWO steun).

Sinds 1995 hebben er spectaculaire ontwikkelingen plaats gehad in dit onderzoek. Een combinatie van spectroscopische studies (door onze groep) met structurele studies (van buitenlandse groepen) leidde tot de ontdekking dat de katalytische centra in hydrogenasen gemaakt zijn van voornamelijk anorganisch-chemische elementen: *ijzer, koolstof, stikstof, zuurstof, zwavel* en vaak ook *nikkel*.

Een van de twee natuurlijke katalysatoren ([NiFe]-hydrogenase) speelt vooral een rol in de splitsing van H₂ in twee elektronen en twee protonen, *vergelijkbaar met de reactie in (één helft van) een brandstofcel*. Het katalytische centrum bevat Ni en Fe (figuur, A). Deze simpele verbinding is 'verpakt' in een complexe, natuurlijke, organische 'kooi' structuur (een eiwit), die er voor zorgt dat de verbinding niet uit elkaar valt.

De andere natuurlijke katalysator ([Fe]-hydrogenase) is vooral functioneel bij de productie van H₂. Hierbij worden twee protonen gereduceerd met twee elektronen en de gevormde H₂ wordt afgegeven aan de omgeving. Dit is *vergelijkbaar met de functie van een waterstofelektrode gedurende de elektrolyse van water*. In dit geval bevat het katalytische centrum twee Fe atomen (figuur, B). De twee bruggende S atomen zijn *niet* afkomstig van het eiwit. Het derde S ligand (S_p) is de enige directe verbinding van deze katalysator met het omringende eiwit.

Beide katalysatoren reageren zonder overpotentiaal met H₂ en kunnen tenminste 5000 H₂ moleculen per seconde (per metaal-metaal eenheid) verwerken (in water bij normale temperatuur en neutrale pH). Sommige hydrogenasen zijn, door een speciale omgeving van het katalytische centrum, ongevoelig voor koolmonoxide (CO) of zuurstof. Het omringende eiwit (de 'kooi'structuur), wat het contact van het katalytische centrum met de omgeving (het micro-organisme) verzorgt, bepaalt de stabiliteit van het geheel. Hydrogenasen uit zogenaamde *hyperthermofiele* organismen houden het gemakkelijk enkele uren in kokend water uit.

Uitdagende nieuwe mogelijkheden liggen in het verschiet

Proeven met intact enzym geadsorbeerd als monolaag aan een elektrode hebben de zeer hoge katalytische activiteit van de H₂-oxidatie in het actieve centrum al aangetoond: de reactie is gelimiteerd door de diffusie van waterstof uit de oplossing naar het enzym. Als het eiwit rond het katalytische centrum vervangen zou kunnen worden door een andere, synthetische 'kooi'structuur, dan zou een effectieve katalysator ontstaan die mogelijk direct aan een elektrode oppervlak gehecht zou kunnen worden. *Zulke elektroden zouden direct ingezet kunnen worden in brandstofcellen en voor de elektrolyse van water m.b.v. zonne-energie (met stroom van zonnecellen)*. Voordelen boven Pt elektroden zouden zijn de beschikbaarheid van de elementen, de te verwachten lagere prijs en de ongevoeligheid voor CO (wat vaak als verontreiniging in technisch H₂ gas voorkomt). Bij het ontwikkelen van zulke synthetische katalysatoren op basis van de kennis uit de natuur is een samenwerking van (micro)biologen, biochemici en (an)organisch chemici een voor de hand liggende strategie.

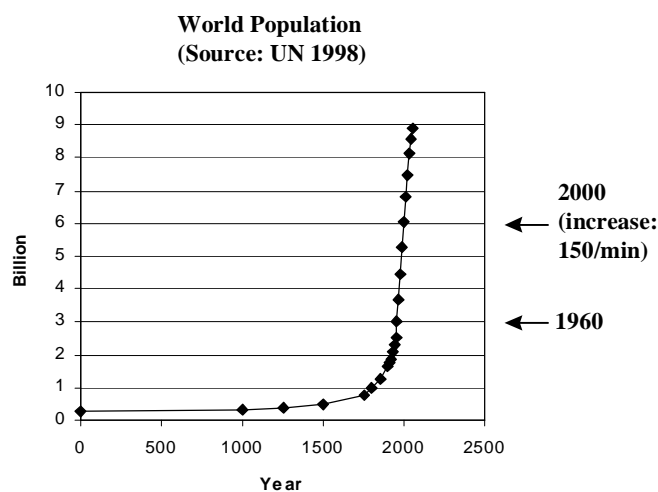
De structuren in figuur 1 zijn slechts onlangs bekend geworden en het precieze werkingsmechanisme van de katalysatoren is nog niet geheel bekend. De natuur heeft deze biokatalysatoren reeds 3.5 miljard jaar in gebruik. Ook de bekende bacterie *Escherichia coli* in onze darmen maakt gebruik van vier verschillende typen [NiFe]-hydrogenasen. Dit suggereert dat het om een bijzonder goede katalysator gaat. Dit project beoogt een maximaal begrip van de biokatalysatoren, waarna de verkregen kennis gebruikt kan worden voor de synthese van stabiele, goedkope, 'biomimetische' H₂ katalysatoren. *De structuur van de eerste stabiele, biomimetische en katalytisch actieve H₂-katalysator is in september 2001 door een Amerikaanse groep gepubliceerd (groep van T. Rauchfuss). In 2002 is aangetoond dat een elektrode voorzien van een monolaag van geïsoleerd hydrogenase precies zo actief is als een platina elektrode*. Deze ontwikkelingen betekenen een enorme stimulans voor dit gebied en **verhoogt de kans op spoedige implementatie van de kennis in elektrolyse en brandstofcellen**.

De toepassing van waterstofkatalysatoren gebaseerd op de structuur van de katalytische centra in hydrogenasen (biomimetische katalysatoren) zal de kostprijs van waterstof productie en gebruik aanzienlijk doen dalen. Het platinum (Pt) gebruikt in de huidige brandstofcellen in automobielen is eenvoudig te duur voor toepassing in massaproductie. Stimulering van het onderzoek naar de biologische metaalkatalysatoren en de daarop gebaseerde synthetische katalysatoren is ook van belang voor verbetering (milieuvriendelijker) van productie/gebruik van diverse andere, eenvoudige, maar hoogst belangrijke chemische omzettingen (b.v. N₂ naar NH₃, mogelijk direct gebruik van CH₄ in brandstofcellen, reductie van CO₂ met H₂ tot CH₄).

Urgentie

Er is een tweetal *zeer dringende* redenen waarom onderzoek naar de schone productie van H₂, waaraan dit project een bijdrage probeert te leveren, uitermate belangrijk is.

A. *De groei van de wereldbevolking is hoogst alarmerend.* Sinds 1960 is de wereldbevolking *verdubbeld* tot 6 miljard mensen! (Figuur 2). Het leeuwendeel daarvan (b.v. China en India, samen tenminste 2.1 miljard mensen) verbruikt nog relatief zeer weinig energie. De te verwachten toename van het energieverbruik is gigantisch.



Figuur 2 *Groei van de wereldbevolking.*

B. *De fossiele energievoorraden raken in hoog temp op.* Zelfs ofschoon er nog voor enige honderden jaren aanwezig is, is de bij de verbranding vrijkomende CO₂ een bedreiging voor het milieu. Een simpele vergelijking demonstreert de urgentie van dit probleem.

Als men de ouderdom van de aarde (4.5 miljard jaar) gelijk stelt aan een dag van 24 uur, dan is het leven op aarde zo'n 20 uur geleden gestart (3.8 miljard jaar). Aangenomen wordt dat de fossiele brandstoffen niet lang daarna zijn ontstaan en opgezameld. In dit beeld is de mensheid pas 1.5 minuut geleden ontstaan (5 miljoen jaar). Aangenomen dat de fossiele brandstoffen nog zo'n 400 jaar te gebruiken zijn, dan heeft de mensheid het gepresteerd om deze brandstofreserve binnen een fractie van een seconde (0.015 seconde) op te maken. Anders gezegd: de fossiele brandstoffen die zich in 3.8 miljard jaar hebben opgezameld worden door ons verbruikt met een snelheid (in zo'n 600 jaar) die zo'n 7 miljoen maal groter is dan de snelheid waarmee de fossiele brandstoffen zijn aangemaakt.

De oppervlakte van onze planeet ontvangt zo'n 10¹⁷ W aan zonnestraling, een paar duizend maal het huidige wereldenergieverbruik. Het probleem is de opslag van deze energie. Opslag in de vorm van H₂, verkregen via elektrolyse van H₂O, is een zeer aantrekkelijke, milieuvriendelijke aanpak; verbranding (direct of via een brandstofcel) van H₂ levert immers weer H₂O op.

R&D issues en kansrijke onderzoeksrichtingen

De hiervoor genoemde ontwikkelingen geven aanleiding om te veronderstellen dat op afzienbare termijn (20 jaar) de kostbare Pt katalysator in het waterstofdeel van elektrolyse en brandstofcellen vervangen kan worden door goedkope waterstofkatalysatoren gebaseerd op de actieve centra uit hydrogenasen. Hoewel de structuur van een aantal katalytische sites in hydrogenasen inmiddels bekend is, zijn de logica erachter en het werkingsmechanisme nog volledig onbegrepen, zowel door biochemici als chemici. Verder is nog veel ontwikkeling nodig op het grensvlak van biochemie, chemie en materiaalkunde. Bijvoorbeeld voor de hechting van de katalysator aan het elektrodeoppervlak en de bescherming van de katalysator door omringing met een stabiele organische verbinding. Deze verbinding kan tevens andere functies krijgen, zoals het tegenhouden van CO uit het toegevoerde gas.

Samenwerking met andere disciplines en stimulering van verdere ontwikkeling

Voor experimenten betreffende de toepassing van hydrogenasen of biomimetische waterstofkatalysatoren is de interesse van en de samenwerking met disciplines als *Anorganische Chemie* en vooral de *Synthetisch-Organische Chemie* in de nabije toekomst van groot belang. Het ontwikkelen van synthetische ligandstructuren (gehecht aan een elektrode oppervlak), die de beschermende eiwitomgeving van de biokatalysatoren nabootsen, ligt niet op het terrein van de Biowetenschappen. Naast een goede financiering vereist dit eveneens slimme, gemotiveerde chemici. De huidige malaise in de belangstelling van nieuwe studenten voor Chemie zou wel eens een belangrijke, hopelijk tijdelijke, rem op de ontwikkeling van dit soort onderzoek kunnen zijn.

Belichting van dit soort onderzoek middels regelmatige, degelijke, populair wetenschappelijke programma's op de televisie en artikelen in de wetenschappelijke bijlagen van kranten kan mogelijk een stimulans vormen voor middelbare scholieren om de exacte richtingen (Life Sciences) te kiezen. Duitsland zowel als Engeland besteden hier aanmerkelijk meer aandacht aan.

Voor wat betreft de invang en de opslag van zonne-energie verdienen alle betrokken gebieden van fundamenteel onderzoek krachtige ondersteuning. In de biologische disciplines verdient het onderzoek aan hydrogenasen verdere ondersteuning. Het onderzoek in Nederland aan de fotosynthetische katalysecentra in groene planten en fotosynthetische organismen verdient extra steun. Een diepgaand begrip van de werking van de biologische opvang en de initiële opslag van zonne-energie in de natuur, een proces waarvan wij dagelijks de vruchten plukken (voedsel, fossiele brandstoffen), zal eveneens kunnen leiden naar de ontwikkeling van verfijnde systemen voor lichtinvang.

2.3 Biochemie en biotechnologie van hyperthermofielen

Prof.dr. W.R. Hagen,
TUDelft, Afdeling Biotechnologie.

De laatste twee decennia is veel biologische kennis beschikbaar gekomen over extremofielen: extreme vormen van microbiel leven op aarde. Dit onderzoek heeft o.a. geleid tot een nieuwe indeling van het leven in drie domeinen: bacteriën, archaea en eukaryoten. Het nieuwe domein van de archaea bevat relatief veel extremofielen. Extremofielen zijn aangepast aan een of meer extreme waarden van de omgevingsparameters temperatuur, druk, zuurgraad. Hyperthermofielen zijn organismen met een optimale groeitemperatuur hoger dan 80 °C. Uit hyperthermofielen gezuiverde enzymen vertonen in het algemeen een ongewoon hoge weerstand tegen thermische inactivatie en ook een ongewoon lange 'shelf life' bij normale omgevingstemperatuur.

Lopende R&D

1. Biochemie van hyperthermofielen (optimale groei)

Looptijd: onbepaald (in ieder geval tot 2006), maar het project is opgebouwd uit deelprojecten van 2-4 jaar (gekoppeld aan een AIO of post-doc). Financiering: eerste geldstroom (TUD), tweede geldstroom (NWO-CW) en speciale projecten (bilaterale, internationale samenwerkingen). De personele inzet (gemiddeld over 2001) is 4.5 fte per jaar.

Dit is een lange termijn project van fundamentele aard met als doel het in kaart brengen van de essentiële biochemie (metabolisme, hoge-temperatuur enzymologie, biofysica) van het modelorganisme *Pyrococcus furiosus*, een strikt anaërobe, hyperthermofiele archaeon. De genomen van *P. furiosus* en van aanverwante *P. horikoshii* en *P. abyssi* zijn volledig bepaald

en beschikbaar. In het onderzoek ligt nadruk op de rol van metalen, e.g., Ni/Fe in de vier hydrogenases van *P. furiosus*.

2. Biotechnologie van hyperthermofielen

Looptijd onbepaald (in ieder geval tot 2006). Financiering is gemengd: eerste geldstroom (TUD), tweede geldstroom (STW), en EU. Personele inzet (2001) ca. 1.7 fte/jaar.

Dit is een lange termijn project van precompetitieve, toepassingsgerichte aard met als doel het exploreren van de mogelijkheden van thermofiele archaea voor biotechnologische toepassingen. Dit project is van meer recente datum en nog bescheiden van omvang maar zal in de nabije toekomst uitgroeien tot een omvang vergelijkbaar met project 1. Het project bestaat uit een aantal bilaterale en multilaterale samenwerkingen. Een samenwerking met WUR (reductieve capaciteit van *P. furiosus* voor fijnchemicaliën) is uitgebreid tot een EU netwerk over *P. furiosus* gerelateerde nieuwe species. Met WUR-microbiologie wordt ook samengewerkt op de “water gas shift reaction” door *Carboxydotherrmus hydrogenoformans*.

Expertise

Research in biochemie, moleculaire biologie en biofysica, in het bijzonder:

- i) eiwitzuivering uit microorganismen;
- ii) metaalenzymen;
- iii) snelle enzymkinetiek;
- iv) enantioselectieve biokatalyse;
- v) modellering van biokatalyse;
- vi) bioelectrochemie;
- vii) spectroscopie, met name EPR.

Infrastructuur

- 1) hoge-temperatuur (tot ~95 °C) 100 liter fermentor
- 2) hoge-temperatuur activiteits- en redox-metingen
- 3) directe bioelectrochemie (analoge en digitale potentiostaten)
- 4) EPR spectroscopie (4Kelvin-RT) X-band (dual mode) en Q-band.
- 5) stopped-flow en rapid-freeze apparatuur voor snelle enzymkinetiek.
- 6) anaërobe enzymzuivering.
- 7) computational chemistry (QM tot MM)

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

Veel strikt anaërobe micro-organismen produceren waterstof als ‘afvalproduct’ t.w. als resultaat van ademhaling en/of als uitlaatklep van overmaat reductie-equivalenten. Dit is een vorm van verspilling van chemische energie. Het reducerend vermogen is te gebruiken voor de productie van fijn- en bulkchemicaliën door natuurlijke reactiepaden om te keren. Dit is niet een nevenfunctie in strikte zin, maar meer een ‘spin-off’, omdat immers energie (reductie-equivalenten) niet gebruikt wordt voor waterstofproductie maar re-routing naar productie van andere stoffen plaats vindt. Echter voor beide onderwerpen (waterstofproductie en bioreductie) kunnen paden van research en ontwikkeling in belangrijke mate parallel lopen of overlappen. Hiervoor is o.m. samenwerking nodig tussen biochemici en synthetisch chemici. Sommige chemische hydrogeneringsreacties zijn ‘moeilijk’; een biotechnologisch alternatief zou - indien eenvoudiger en specifiek - dan ook zeer welkom kunnen zijn.

Lange termijn fundamenteel onderzoek aan hydrogenase-enzymen is in het midden van de jaren 1970 in Nederland gestart oorspronkelijk met het idee dat een combinatie van een fotosynthetiserend systeem (chloroplast) en een hydrogenase een biologisch fabriekje op zou leveren voor de productie van waterstof uit water onder invloed van licht. Toen duidelijk werd

dat geïsoleerde fotosynthese-systemen veel te complex en te fragiel zijn voor technische toepassingen is de belangstelling verschoven naar karakterisering van de biokatalysator voor waterstofactivering (i.e. hydrogenase) in de hoop dat dit werk aanwijzingen zou geven over toepasbaarheid van hydrogenase in hybride systemen (i.e. waarin de lichtinvang door een niet-biologisch systeem, zoals titaanoxide, wordt verzorgd). Dit niet biologische systeem fungeert dan als energie-/ reductie-equivalenten leverancier voor het hydrogenase.

De afgelopen 6 jaar is zeer belangrijke vooruitgang geboekt in het structuuronderzoek (voornamelijk kristallografie) van de verschillende typen hydrogenasen. Nu de complexiteit van hydrogenasen op moleculair/atomair niveau in kaart is gebracht, is het huidige inzicht naar voren gekomen, dat er waarschijnlijk twee, zeer verschillende wegen over blijven voor toepassing van hydrogenase:

1. De eerste weg bestaat eruit dat we proberen de structuur en het werkingsmechanisme van hydrogenase-enzymen tot in zo groot mogelijk detail te begrijpen om vervolgens op basis van het verkregen inzicht een kunstmatige katalysator te construeren die hydrogenase benadert qua activiteit, maar niet de nadelen heeft welke inherent zijn aan biologische systemen wat betreft beperkte operational time en shelf life en hoge productiekosten.
2. De tweede weg stelt voor om hele organismen te gebruiken (vaak stabiel en goedkoper dan gezuiverde enzymen) en deze aan te passen (bijvoorbeeld optimaliserende mutaties, inbrengen van extra genetische informatie) ter aanpassing aan bioprocestechnologische randvoorwaarden.

Een voorbeeld is het kloneren van hydrogenasen in fotosynthetische organismen. Dit soort onderzoek wordt bemoeilijkt door het feit dat kloneren van structurele genen voor hydrogenase in het algemeen geen actief enzym oplevert, omdat de biosynthese van het actieve metaalcentrum co-expressie vereist van een reeks 'helpergenen'. Bijvoorbeeld voor een NiFe-hydrogenase betreft het waarschijnlijk 7 extra genen. Onze huidige kennis van de biosynthese van actief hydrogenase vertoont nog grote hiaten.

Implementatie van praktische systemen is te verwachten op de middellange of lange termijn (i.e. meer dan 10 jaar).

R&D issues en kansrijke onderzoeksrichtingen

1. Er is behoefte aan fundamenteel chemisch onderzoek naar het werkingsmechanisme van hydrogenasen. Er is de afgelopen jaren een indrukwekkende hoeveelheid kennis verzameld over de structuur van hydrogenasen met name over de atomaire structuur van het centrum voor de activering van waterstof. De duiding van deze structuur is nog grotendeels onontgonnen. Hoewel vaak wordt gedacht dat opheldering van de structuur een 'eindpunt' van de ontwikkeling vormt, begint het onderzoek naar de functie en werking pas na het bekend worden van de structuur. Onduidelijk/onbegrepen is: waarom de centra Ni en/of Fe bevatten (en geen andere metalen); waarom de eiwitliganden cysteïnaat-zwavel zijn (genomics research geeft aan dat er ook andere mogelijkheden zijn); waarom de Fe atomen geligandeerd zijn door anorganische liganden CN en CO. Ook het aan de metaalcentra geassocieerde magnetisme (normaliter een hulpmiddel voor het begrijpen van de elektronenstructuur) is onbegrepen. De reactiviteit van de katalysator is grotendeels onbegrepen. Het is niet duidelijk waar en hoe substraat/product (i.e. protonen, hydride anionen en moleculaire waterstof) binden. Alleen een redelijk inzicht in voornoemde problemen zal ons de kans geven op zinvolle wijze de vraag te stellen of de mens ten eigen bate iets kan leren van drie miljard jaar evolutie van waterstof activerende biokatalysatoren.
2. Er is behoefte aan verdiepend onderzoek aan koolmonoxide dehydrogenase (COdh) enzymen. Zeer recent zijn de eerste structurele data van twee COdh's beschikbaar gekomen¹⁾. Het actieve centrum vertoont gelijkenis met dat van hydrogenase maar de betekenis van deze structurele analogie is niet duidelijk. Dit is een interessante vraagstelling voor coördinatie chemie/homogene katalyse specialisten. COdh's zijn metabool gekoppeld aan hydrogenasen en beide enzymen zijn van belang voor het microbiële equivalent van de water gas shift reactie.

De algemene werkwijze bij het ontrafelen van structuur en studie naar de reactiviteit omvat:

1. spectroscopische studies (in belangrijke mate voltooid)
2. structuur nabouwen (deze fase is voor de bekende actieve sites nu bezig);
3. reactiviteit modelleren (moet nog grotendeels plaatsvinden).

Benodigde samenwerking in het kader van het onderzoek en de ontwikkeling van het vakgebied

Zoals eerder genoemd zijn de wegen waarlangs het fundamentele onderzoek zich in de richting van toepassingen kan ontwikkelen ruwweg: 1) hydrogenase actief centrum nabouwen; 2) modificatie van waterstof producerende micro-organismen. Beide onderwerpen zijn complex en vooruitgang vergt internationale samenwerking. Voor weg-1 gaat het vooral om multidisciplinair onderzoek met bijdragen uit de biochemie, de synthetische (coördinatie)chemie, de theoretische chemie. Voor weg-2 is waarschijnlijk behoefte aan screening van een groot aantal nieuwe organismen.

De voor weg-1 relevante coördinatiechemie (ijzer/zwavel/nikkel met liganden C,N,O,S,Se maar niet P) is in Nederland praktisch afwezig; er zijn wel belangrijke activiteiten in USA en Duitsland. Nederlandse universiteiten huisvesten wel een flink aantal secties met expertise in het algemeen op de gebieden coördinatiechemie, homogene katalyse, materiaalkunde.

Er is weinig contact tussen de werelden "bio" en "materialen" (biologen, biochemici enerzijds en materiaalkundigen, elektrochemici, vaste stof fysici anderzijds) hoewel het goed mogelijk is dat zinvolle toepassingen van biologische systemen in de vorm van hybride systemen zullen komen, i.e. gecombineerde systemen van biologische en fysisch/chemische componenten en materialen, zoals bijvoorbeeld combinaties van biomaterialen (hydrogenase) met TiO₂, Graetzelcellen e.d. Bij dit soort ontwikkelingen/projecten is de integratie van biochemische en materialenkennis van essentieel belang.

Stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

De fundamentele research m.b.t. biologische waterstofactivering heeft nog een relatief lange weg te gaan. Voorwaarde voor het afleggen van deze weg is de aanvaarding dat dit onderzoek gefinancierd zal moeten blijven worden hoewel op korte termijn geen schokkende doorbraken zijn te verwachten.

Bedrijven kunnen een belangrijke rol spelen in de ontwikkeling indien zij bereid zijn een lange(re) termijn van ontwikkeling (> 5 jaar) te aanvaarden en zouden deze lange-termijn visie kenbaar dienen te maken aan overheid en/of de EU. Voor de beleidssector is aan te bevelen H₂ programma's te starten en in stand te houden ter stimulering van de R&D.

2.4 Thermofiele biologische waterstofproductie en microbiële omzetting van CO naar H₂

Prof.dr. A.J.M. Stams,
Laboratorium voor Microbiologie, Wageningen Universiteit.

R&D projecten

1. Biological hydrogen production from agroindustrial residues

Looptijd: febr 2000- febr 2002. Financiering: EU. Personeelsinzet 1 fte/jaar.

2. Biologische waterstofproductie (BWP)

Looptijd: sept 2000-mrt 2003. Financiering: EET. 1 fte/jaar.

Het doel van bovenstaande projecten is om waterstofvorming middels microbiële fermentaties uit agro-industriële reststromen te optimaliseren. Het accent van het onderzoek ligt op de thermofiele omzetting van respectievelijk monomere suikers en polysacchariden.

3. Microbiële omzetting van koolmonoxide naar waterstof

Looptijd: sept 2000-sept 2004. Financiering: STW. Personeelsinzet: 1 fte/jaar.

Het totale CO project omvat 2 fte's/ jaar. Het doel van het onderzoek is om thermofiele anaërobe micro-organismen te gebruiken om CO in synthegas om te zetten in waterstof. Dit proces kan een biologisch alternatief bieden voor de chemische water-gas shift reactie.

4. Thermofiele waterstofvorming bij eiwitafbraak

Looptijd: - 2005. Financiering: Wageningen Universiteit. Personeelsinzet: 1 fte/jaar.

Naast polysachariden zijn eiwitten belangrijke bestanddelen van complexe biomassa. Het doel van het onderzoek is om waterstofvorming door aminozuurafbrekende thermofiele bacteriën te bestuderen.

Expertise

Fysiologie en biochemie van waterstofvormende en methaanvormende micro-organismen, fysiologie van sulfaatreducerende, dechlorerende en chloraalreducerende anaërobe bacteriën, hyperthermofielen, isolatie en continue kweek van anaërobe micro-organismen, zuivering van eiwitten uit anaëroben (FPLC), moleculair biologisch onderzoek

Infrastructuur

Anaërobe kweekapparatuur: chemostaten (1 tot 20 liter) voor batch en continue kweek van anaërobe micro-organismen Vijf laboratoriumruimtes voorzien van automatische begassinginstallaties en 3 met anaërobe handschoenkasten. Deze voorzieningen zijn essentieel voor het isoleren en kweken van anaërobe micro-organismen. Voor de zuivering van eiwitten uit anaëroben is een van de anaërobe kasten uitgerust met een complete FPLC opstelling. Het laboratorium heeft een groot aantal GC's en HPLC's en een GC-MS voor chemische analyse. NMR apparatuur (WUR) voor het bestuderen van het metabolisme van anaëroben. Uitstekende infrastructuur voor moleculair biologisch onderzoek aan micro-organismen, o.a. geautomatiseerde sequencers.

De werkgroep Microbiële Fysiologie is gespecialiseerd in de fysiologie en biochemie van waterstofvormende en methaanvormende microorganismen. De metabole interactie tussen deze microorganismen staat centraal. Andere belangrijke onderzoeksthema's zijn de fysiologie van sulfaatreducerende, dechlorerende en chloraat-reducerende anaërobe bacteriën. Dergelijk fundamenteel onderzoek is belangrijk om processen in bioreactoren die gebruikt worden voor milieutechnologische toepassing beter te leren begrijpen, en met die kennis samen met milieutechnologische onderzoeksgroepen en bedrijven nieuwe technologische processen te ontwikkelen. Behalve de werkgroep Microbiële Fysiologie heeft het Laboratorium voor Microbiologie onder leiding van prof. dr. W.M. de Vos, nog de werkgroepen Bacteriële Genetica (Dr. J. van der Oost), Moleculaire Microbiële Ecologie (Dr. H. Smidt) en Fungal Genomics (Prof. dr. J.A. van den Berg). De werkgroep Bacteriële Genetica is gespecialiseerd in hyperthermofiele microorganismen, waaronder waterstofproducerende *Pyrococcus furiosus* en *Thermotoga maritima*.

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en)en verwachte termijn van implementatie

In zijn algemeenheid is te verwachten dat biologische processen in belangrijke mate onderdeel gaan uitmaken in de procesvoering van chemische industrieën. Een voorbeeld is de biologische zuivering van proceswater zodat een bijna gesloten waterkringloop mogelijk wordt. Dit is o.a. van belang bij industrieën die veel water gebruiken, o.a. de papierindustrie. Ook zijn er reeds voorbeelden van het terugwinnen van bruikbare componenten uit afvalwater, o.a. metalen in de metallurgische industrie en het biologische ontzwellen van afgassen (SO₂) en aardgas (H₂S). Met name het bedrijf Paques Biosolutions in Balk heeft in de afgelopen jaren belangrijke biologische processen voor de industrie ontwikkeld.

Op het ogenblik zijn de 'energiewereld' en de 'afvalwereld' grotendeels gescheiden. De potentie van organische afvalstromen als uitgangsstof voor energieproductie wordt nog te weinig onderkend. Middels een groot Nationaal Onderzoeks Programma zouden deze twee werelden dichter bij elkaar gebracht kunnen worden. Er ligt een enorme uitdaging om afvalverwerking middels de vorming van energiedragers, kostendekkend te maken. Als voorbeeld: GFT kan gecomposteerd worden. De gevormde compost is het enige product. Echter door eerst een anaërobe gisting uit te voeren en vervolgens het organische materiaal te stabiliseren zijn zowel biogas als de gevormde compost de producten. Er zijn reeds een aantal proefinstallaties voor de anaërobe verwerking van GFT.

Biomassa is een hernieuwbare energiebron. Immers, zonne-energie wordt in chemische energie (biomassa) vastgelegd en is daardoor onuitputtelijk. De produktie van energiedragers uit organische reststromen kan een belangrijke bijdrage leveren aan het conserveren van fossiele energiebronnen en het terugdringen van het toegenomen broeikaseffect. De grootschalige biologische produktie van methaan, ethanol en aceton-butanol is nu reeds haalbaar. Biologische vorming van waterstof en waterstof/methaan mengsels is nog in ontwikkeling, maar zal in de toekomst aan belang toenemen. Subsidiëring van de produktie van schone en duurzame energiedragers middels microbiële fermentaties zal de komende 10 jaar nodig blijven, ook om verdere ontwikkeling van deze processen te stimuleren.

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Voor wat betreft waterstofvorming middels anaërobe fermentaties wordt met name gekeken naar de omzetting van suikerhoudende verbindingen. Er wordt te weinig onderzoek gedaan naar de omzetting van andere biopolymeren, zoals eiwitten en vetten.

Anaërobe micro-organismen hebben de biochemische potentie om organische verbindingen volledig om te zetten naar waterstof en kooldioxide. Er zijn echter thermodynamische beperkingen ten gevolge van de vorming van waterstof; volledige omzetting naar waterstof is alleen mogelijk bij een zeer efficiënte verwijdering van de gevormde waterstof. Op dit gebied is nog veel onderzoek nodig, o.a. op het gebied van fysische methodieken om waterstof te verwijderen of in te vangen.

Stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

De oprichting van een Nederlands Milieubiotechnologisch Topinstituut is sterk aan te bevelen, waarbinnen de belangrijke spelers van universiteiten, instituten en bedrijven hun expertise bundelen om nieuwe duurzame processen te ontwikkelen, o.a. voor de biologische produktie van energiedragers. Een interessant gegeven is dat er op het ogenblik een Centre of Excellence for Sustainable Water Technology in oprichting is in Friesland. Binnen dit expertisecentrum wordt gebruik gemaakt van de kennis van biologische systemen (Wageningen Universiteit) en van chemisch-fysische scheidingstechnieken (TU Twente) om samen met bedrijven tot nieuwe processen te komen.

Voorwaarde voor verdere ontwikkeling is een aanzienlijke financiële injectie voor onderzoek middels een Nationaal Onderzoeksprogramma op een aantal speerpunten (bijv. biologische energiedragers, duurzame technologie) waarin universiteiten, kennisinstellingen en bedrijven participeren.

Er is nog veel multidisciplinair onderzoek nodig om tot duurzame processen te komen. Echter, de uiteindelijke implementatie ligt naar verwachting niet op technologisch gebied. De politiek en de acceptatie door de consument zullen doorslaggevend zijn. Een goed voorbeeld is 'groene stroom'. Er is een politieke noodzaak (reductie van de CO₂ emissie) en de consument is bereid om voor een beter milieu iets meer te betalen voor stroom die duurzaam opgewekt wordt.

2.5 Vorming en verbruik van biologische waterstof in fermentatieve systemen

Dr. J.T. Keltjens,
Afdeling Microbiologie, KU Nijmegen.

R&D projecten

1. Vorming en verbruik van biologische waterstof in fermentatieve systemen

Looptijd: vanaf 1992 voor onbepaalde tijd. Financiering: KU-Nijmegen, SLW/NWO.
Personele inzet: 3 fte's.

Inhoud en doelstellingen:

Waterstofproductie in anaërobe microbiële systemen is het gevolg van twee typen processen, fermentatie en (obligate) protonreductie. Bij fermentatieprocessen kan waterstof in principe in hoge concentraties gevormd worden. Protonreductie is een vorm van anaërobe ademhaling, waarbij het H⁺ ion fungeert als elektronen acceptor bij de oxidatie van organische verbindingen. Aan deze vorm van waterstofproductie zijn stringente thermodynamische barrières verbonden. Dergelijke reacties verlopen alleen maar als de H₂ concentratie beneden kritisch lage grenzen gehouden wordt. Dit impliceert dat in natuurlijke systemen de waterstofconcentraties dramatisch kunnen verschillen. Methaanbacteriën zijn de waterstofverbruikers in tal van microbiële ecosystemen. Ze gebruiken niet alleen het (potentieel nuttige) H₂ dat afkomstig is van fermentaties, maar ze weten de waterstofconcentraties ook tot extreem lage concentraties terug te brengen, zodat protonreducerende processen mogelijk worden.

Het onderzoek spitst zich toe op de fysiologie van het waterstofgebruik door methaanbacteriën. Zoals gezegd kan de waterstofconcentratie in natuurlijke systemen enorm variëren. De methaanbacteriën worden gedwongen om zich aan deze verschillen aan te passen. Een omschakeling van een situatie van hoog naar laag waterstof (en omgekeerd) vereist een ingrijpende omschakeling van het metabolisme. De doelstelling van het onderzoek is om tot een inzicht te komen in de fysiologische processen die samenhangen met de regeling van het H₂ metabolisme en om dit proces zodanig wiskundig te modelleren dat het gedrag van de methaanbacteriën in natuurlijke systemen begrepen en voorspeld kan worden.

Expertise

Het onderzoek binnen de werkgroep Fysiologische Microbiologie is gericht op de microbiologie, fysiologie, biochemie en moleculaire biologie van methaanvormende archaea. Het onderzoek heeft een fundamenteel en/of toepassingsgericht karakter. Expertisegebieden zijn:

- Het isoleren, kweken en karakteriseren (microbiologisch, fysiologisch, moleculair) van obligaat anaërobe micro-organismen.
- Het zuiveren en biochemisch en enzymologisch karakteriseren van zuurstofgevoelige eiwitten, i.h.b. B₁₂-bevattende eiwitten.
- Adaptatiefysiologie van methaanbacteriën, inclusief de ontwikkeling en toepassing van analysemethoden die voor dergelijk onderzoek nodig zijn.
- Mathematische modelvorming van biochemische en fysiologische processen.
- Expressieanalyses (op DNA en eiwitniveau).
- Gebruik, toepassing en ontwikkeling van computerondersteunde analyses van genomische gegevens.

Infrastructuur

- Algemene faciliteiten voor anaëroob werk (handschoenenkasten, begassingsinstallaties).
- Faciliteiten voor de behandeling en zuivering (FPLC, kolomchromatografie) van (zuurstofgevoelige) eiwitten.
- Faciliteiten voor continue kweken onder gecontroleerde anaërobe omstandigheden (pH, waterstofspanning, redox, temperatuur).
- Fed-batch fermentoren voor kweken op grotere schaal (10-, 30-, 200-l)
- Analyseapparatuur (HPLC, GC's).

- Faciliteiten voor “proteomics”: 2-D gelelectroforese systeem incl. data-analyse, Maldiv massaspectrometer.
- Faciliteiten voor DNA onderzoek: VMT ruimte, PCR apparatuur.
- Binnen de Faculteit NWI bestaat onmiddellijk toegang tot faciliteiten t.b.v. DNA-sequentieanalyses en computerondersteund genoomonderzoek (CMBI, Prof.dr. G. Vriend).

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

De toepassing van methaanvormende ecosystemen kent als grote voordeel dat vaste en vloeibare organische afvalstromen afgebroken kunnen worden tot het energetisch nuttige biogas. Bovendien is de technologie van de toepassing relatief eenvoudig. Zoals hierboven uiteen is gezet is waterstofgas een centraal intermediair. De methaanbacteriën zijn de grote waterstofverbruikers. Ze benutten niet alleen het gas dat in hoge concentraties vrijkomt bij fermentatieve processen, maar ze vangen waterstof ook tot extreem lage concentraties weg, zodat proton reductie- de omzetting van moeilijk oxideerbare verbindingen (m.n. lagere vetzuren) gekoppeld aan H_2 vorming- mogelijk wordt. Dit laatste fenomeen wordt ook wel aangeduid als (obligate) “interspecies hydrogen transfer”. Een fundamenteel inzicht in de wijze waarop de methaanbacteriën hun waterstofmetabolisme regelen zou een meer gerichte toepassing van anaërobe afbraakprocessen mogelijk maken.

Via regulering zijn twee typen waterstofmetabolisme mogelijk:

- “hoog-waterstof” metabolisme. In deze vorm kan het organisme alleen groeien in aanwezigheid van hoge H_2 concentraties, maar niet bij lage concentraties. De groei is langzaam; er wordt relatief veel CH_4 gevormd.
- een “laag-waterstof bacterie” groeit in aanwezigheid van lage H_2 concentraties. De H_2 wordt veel effectiever benut. De groei is sneller er wordt minder CH_4 gevormd.

Het uitschakelen van het “hoog-waterstof” metabolisme bij de methaanbacteriën (feitelijk kweek zonder methaanbacteriën) maakt een accumulatie van H_2 tot hoge concentraties mogelijk uit de fermentatieve deelprocessen. De rol van de micro-organismen zou in dit geval beperkt worden tot “interspecies hydrogen transfer”. Daarnaast zou het wenselijk kunnen zijn ook deze laatste functie uit te schakelen, d.w.z. uitvoeren anaërobe afbraak in afwezigheid van methaanbacteriën of door het wegvangen van de gevormde H_2 . Substraten voor obligaat protonreducerende micro-organismen kunnen immers ook gebruikt worden voor fototrofe H_2 productie.

Opmerkelijk is dat de gescheiden toepassing van fermentatieve H_2 productie en methaanvorming al lang bestaat in de biologische praktijk, nl. in het spijsverteringssysteem van bepaalde insecten, waaronder de kakkerlak. De vertering van plantaardige materialen gebeurt hier in twee gescheiden compartimenten, de “foregut” en de “hindgut”. In de “foregut” vindt hydrolyse en fermentatie plaats die gekenmerkt wordt door een hoge netto H_2 productie. Een verdere vertering geschiedt in de “hindgut”, waarbij met name methaan als bijproduct wordt gevormd. Een bijzondere karakteristiek van de “foregut” is de interne pH (9-11). Hier komen dus blijkbaar tot dusver nooit onderzochte micro-organismen voor die aangepast zijn aan een alkalisch milieu en die hun substraten verteren onder vorming van waterstof. Dit is interessant omdat eenvoudige berekeningen aantonen, dat waterstof vormende fermentatieve processen thermodynamisch aantrekkelijker verlopen onder basische omstandigheden, ook bij de gangbare omgevingstemperatuur. Op korte termijn start in onze werkgroep een project waarbij we op zoek gaan naar de wellicht nieuwe alkalofiele H_2 -producenten. Dit met het oog op het ontwikkelen van een praktische toepassing.

De toepassing van al dan niet methanogene microbiële systemen moge duidelijk zijn: ze worden gevoed met vaste of vloeibare organische afvalstromen, die hierbij gezuiverd worden en waarbij energiedragers als waterstof en methaan als eindproduct gevormd worden. Hierbij moet het mogelijk zijn de afbraak te sturen in de richting van waterstof- dan wel methaanvorming. Zo kunnen methaanbacteriën niet groeien onder alkalische condities. Het insecten voorbeeld leert

dat onder deze omstandigheden fermentatieve H₂ productie de overhand heeft. Het potentieel gebruik van alkalische processen heeft als bijkomend voordeel dat een reiniging van het afvalgas niet nodig is. Het belangrijkste gasvormige bijproduct van bacteriële fermentaties, CO₂, blijft in het systeem gevangen als carbonaat. Ook is er minder of geen H₂S verwijdering uit de gasfase vereist omdat S bij pH > 8 in oplossing blijft als S²⁻ of HS⁻. Bovendien wordt in de alkalische omgeving het risico verkleind van contaminatie met ongewenste micro-organismen, waaronder methaanbacteriën.

R&D issues en kansrijke onderzoeksrichtingen

Een succesvol gebruik van fermentatieve biodegradatie vereist een fundamenteel inzicht in de rol van methaanbacteriën in dergelijke systemen. Het onderzoek in Nijmegen is er op gericht om tot dit inzicht te komen. De toepassing van alkalofiele microbiota uit de 'foregut' van insecten is wellicht zeer aantrekkelijk i.v.m. hogere H₂ opbrengsten. Hier is vrijwel nog geen onderzoek naar gedaan. Insecten kennen een immense biodiversiteit en een enorme diversificatie in voedselgebruik, variërend van alleseters (zoals kakkerlakken) tot organismen die volledig gespecialiseerd zijn in het gebruik van één enkele (vaak giftige) plantensoort. Dit vereist en veronderstelt de aanwezigheid van "taylor-made" spijsverteringssystemen met soorteigen micro-organismen. Van dit principe zou gebruik gemaakt kunnen worden t.b.v. procesontwikkeling voor de verwerking van specifieke afvalstromen.

Samenwerking in het kader van het onderzoek en de ontwikkeling van het vakgebied als geheel

Het onderzoek binnen de afdeling Microbiologie-KUN is fundamenteel en toepassingsgericht van aard (moleculair-biologisch, biochemisch, fysiologisch-microbiologisch). Voor een goede voortgang zelfs op het vlak van het fundamentele onderzoek zijn we aangewezen op onderzoekers met een expertise op deelgebieden als bijvoorbeeld het sleutelenzym hydrogenase. Deze afhankelijkheid geldt nog in sterkere mate voor het traject volgend op het fundamentele onderzoek tot de uiteindelijke toepassing.

Stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

De uiteindelijke toepassing is het resultaat van een samenwerking tussen verschillende disciplines variërend tussen moleculair biologen, biochemici, ecologisch- en fysiologisch-microbiologen tot procestechnologen. Hiervoor zullen de nodige samenwerkingsverbanden moeten ontstaan. De *NL Contactgroep Biologische H₂ productie* vormt een eerste belangrijke aanzet tot het vormen van dergelijke samenwerkingsverbanden. Het is evident dat voor dit onderzoek op de verschillende niveaus (fundamenteel, toegepast) een financiële ruimte gecreëerd wordt. Bijvoorbeeld via een programma of prioriteitsgebied. De ervaring met NWO programma's leert dat zo'n aanpak goed werkt.

Bedrijven (engineers, toepassers, energiesector) kunnen een rol spelen bij de ontwikkeling, indien dit in hun doelstelling(en) past. Het is niet duidelijk wat de bedrijven in dit verband (zouden) willen. Een rol bij de opschaling van processen is zeer wenselijk [zoals in het volgende aangegeven] in het opschalingstraject van labschaal naar pilot/demoschaal.

Schaal/capaciteit	
1 Liter	Veel processen zijn op lab schaal (liter) reeds beschikbaar
Tot 200 liter	Procesontwikkeling op het lab kan worden voortgezet tot een capaciteit van ca. 200 liter. In dit deel van het traject zijn al procestechnologen en/of bedrijven nodig voor ontwikkeling van bijv. vlokvorming, dragers e.d.
> 2000 liter	Voor een factor 10 groter dienen ingenieursbureaus te worden ingeschakeld. Dit wordt per project bekeken. Voor de reactoren wordt doorgaans een keuze gemaakt uit standaardssystemen

2.6 Ontwikkeling van bioprocessen voor H₂ productie uit biomassa

Dr. P.A.M. Claassen,
Business Unit Renewable Resources,
Agro Technologisch Onderzoeksinstituut ATO BV.

Lopende R&D projecten

1. A novel bioprocess for hydrogen production from biomass for fuel cells “Biohydrogen”

Coördinator: ATO; Partners: Nat Techn Univ Athens; Techn Univ Budapest; Wageningen University; Biological Research Centre, Szeged; Air Liquide, Sassenhage. Looptijd: 1 jan. 2000 - 31 december 2002. Financiering: 5th Framework EU project in “Quality of life and management of living resources” programma.

Het onderwerp van dit project is de omzetting van Sweet Sorghum sap of papierslib hydrolysaat in waterstof door middel van een thermofiele fermentatie gevolgd door een fotoheterotrofe fermentatie. De geproduceerde waterstof zal worden opgewerkt tot specificaties die gesteld worden voor gebruik in brandstofcellen. De volgende deelonderwerpen komen aan de orde:

- Optimalisatie van de productie van fermenteerbaar substraat uit de genoemde biomassa; biomassa voorbehandeling en hydrolyse
- Fermentatie met thermofiele bacteriën van het geproduceerde substraat; batch kweek, continu kweek, effect van substraat en inhibitor concentratie, effect van nutriënten
- Fotofermentatie met fotoheterotrofe bacteriën van het effluent uit de thermofiele fermentatie; effect van lichtintensiteit en overige fysiologische parameters zoals hierboven beschreven.
- Optimalisatie van thermofiele, fotosynthetiserende bacteriestammen; karakterisering van thermofiele hydrogenases, mutagenese en regulatie van genexpressie
- Verzamelen en opwerken van waterstof uit het geproduceerde gas; simulatie van scheidingstechnologieën; specificatie en ontwerp van een gasseparator en veiligheidsanalyse
- Kennisuitwisseling van behaalde resultaten op een voor iedereen toegankelijke website.

2. Biologische Waterstof Productie “BWP”

Coördinator: ATO. Partners: WU Microbiologie; WU Food&Bioprocess Engineering/ Proceskunde; TNO-MEP; Techno Invent; ECN; Duynie BV; Shell Hydrogen; Agromiscanthus BV.

Looptijd: 1 okt. 2000 - 31-03-2002. Personeelsinzet: 2 fte/jaar.

Het onderwerp van dit project is min of meer complementair aan het meer fundamentele EU project. Het project is gericht op de productie van waterstof uit hydrolysaat dat geproduceerd uit Miscanthus of aardappelstoomschillen. Het eerste als model van een mogelijk energiegewas dat voornamelijk (hemi)cellulose bevat, het tweede substraat als een zetmeelhoudende restfractie uit de agro-industrie. De procestechnologie, samen met de technisch-economische evaluatie van deeltrajecten figureren sterk in dit project.

De volgende deelonderwerpen worden door de deelnemers in het consortium uitgevoerd:

- Productie en karakterisering van de biomassa, gevolgd door voorbehandeling en hydrolyse.
- Isolatie van cellulose splitsende waterstofproducenten.
- Optimalisatie van de thermofiele fermentatie en reactorontwerp voor de thermofiele fermentatie.
- Optimalisatie van de fotoheterotrofe fermentatie en reactorstudies voor een fototroef proces.
- Opwerken van waterstof uit het fermentatiegas.
- Ontwerp en demonstratie van een geïntegreerd proces.
- Kennisuitwisseling en externe communicatie.

3. Bio-energie uit waterstof en methaan in Wageningen fase 1

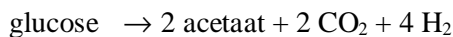
Start datum 1 sept 2001; einddatum van fase 1 is 28 feb 2002.

Gemeente Wageningen en ATO.

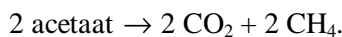
Dit project is gericht op het onderzoeken van de mogelijkheid voor een gecombineerde productie van groene elektriciteit, groene warmte en groen gas uit biomassa in de regio Wageningen. Op het moment gaat veel aandacht uit naar de productie van biogas uit natte biomassa. Door in te grijpen in de biogas productie door een tweetraps fermentatie uit te voeren is het theoretisch mogelijk om zuivere waterstof en methaan afzonderlijk te produceren. De nadruk ligt in dit verband op zuivere waterstof omdat de eerste fermentatie onder (hyper)thermofiele condities wordt uitgevoerd. Door deze selectiedruk zal de productie van contaminanten als H₂S vermoedelijk onderdrukt kunnen worden. In onderstaand kader worden de energetische aspecten van het éénstaps en tweetraps proces met elkaar vergeleken.

Wanneer uitgegaan wordt van glucose als modelsubstraat (voor vergelijking van tweetraps en ééntraps proces) zijn de volgende reactievergelijkingen van toepassing.

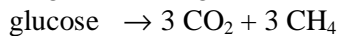
In de waterstof reactor:



In de methaan reactor:



Dit betekent dat de vrije energie winst ($\bullet G'_0$) in de producten waterstof en methaan 2412 kJ per mol glucose bedraagt. Ter vergelijking: in een ééntraps fermentatie waar alleen methaan wordt gevormd volgens:



is de $\bullet G'_0 = 2281$ kJ per mol glucose.

De tweetraps fermentatie levert twee verschillende energiedragers op die ingezet kunnen worden als voeding voor een PEM brandstofcel (waterstof) en ingesluisd kunnen worden in het aardgasnet (methaan). Uiteindelijk wordt biomassa in het voorgestelde systeem geconverteerd tot minstens drie 'groene' producten, te weten: elektriciteit, warmte en methaan. Het exploiteren van het vierde product, zuivere CO₂, behoort eveneens tot de mogelijkheden, gezien de mogelijke afzet in de tuinbouw industrie.

Expertise

Research in de groep Bioconversie vindt plaats op het gebied van de fysiologie, biochemie en moleculaire biologie en genetica van pro- en eukaryote micro-organismen. Een gedeelte van het onderzoek op het gebied van bio-energie is geplaatst in het Thema Biomassa en Bio-energie waarin nauwe samenwerking is met de groep Vezel- en papiertechnologie. In deze groep vindt onderzoek plaats o.a. op het gebied van biochemische en mechanische pulp- en bleekprocessen, karakterisering, verwerking en applicatie van nieuwe vezelgrondstoffen, productie van cellulose etc. Expertise gebieden meer in het bijzonder:

- fermentatietechnologie, aëroob en anaeroob, mesofiel en extremofiel;
- fysisch/chemische en (bio)chemische analyses en assays;
- mechanische, fysisch/chemische en biochemische bewerkingen van biomassa voor ontsluiting of valorisatie.
- bioprocestechnologie tot 1000L fermentaties (onder C1 condities)
- downstream processing: extractie, centrifugatie, filtratie (ultra- en nanofiltratie, chromatografie op pilot schaal
- solid state fermentatie
- bioprocesmodellering en ontwerp

Infrastructuur

- Kweekfaciliteiten in reactoren van 1 L werkvolume tot 1000 L werkvolume (C1).
- On-line waterstofbepaling.
- Analyseapparatuur: PAD (Pulsed Amperometrische Detectie) van Dionex voor oligosaccharide scheiding en detectie tot hexasaccharides;
- UHP (Ultra High Pressure), UHT (Ultra High Temperature) en PEF (Pulsed Field Electroforese) op pilot schaal voor sterilisatie;
- Tracking en tracing modellen voor traceren van bepaalde componenten

- Genomics faciliteiten voor moleculair genetisch werk waaronder High Throughput Screening (in opbouw);
- Extruders en een refiner (van 1 tot 10 Bar, 200 C, voor bewerking van >kilo's biomassa o.a. voor vrijmaken van cellulosevezels voor verder onderzoek of applicatie); mengapparatuur voor fracties met hoge droge gehalte; impregnator en pers voor hoge druk impregnatie; Kip reactor voor voorbereidingen bij hoge temperatuur zonder stoom; opstelling voor ozonbehandeling onder verminderde druk; verschillende soorten molens en een quantum mixer (voor agressievere solvents).
- Superkritische extractie voor biomassa ontsluiting of opwerken waardevolle componenten.

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

Voor zover duurzame ontwikkeling ook gezien wordt als een streven naar het hergebruiken van organische reststromen zal dit proces een belangrijke bijdrage hieraan kunnen leveren en biedt het dus een meerwaarde voor duurzame ontwikkeling. Dit geldt niet alleen voor bestaande reststromen maar ook voor de nieuwe reststromen wanneer de duurzame ontwikkeling geleid zal hebben tot een groter aandeel van bio-based materialen. In deze optiek geldt als nevenfunctie het valoriseren van restfracties. Dit inzicht zou, indien bijvoorbeeld beleidsmatig gesteund, de ontwikkeling en uiteindelijke implementatie kunnen versnellen.

Een tweede spin-off ligt op het vlak van de uitbreiding van ontsluitingstechnologieën. Deze is noodzakelijk voor een succesvolle waterstof productie en tevens voor andere fermentatieve productieprocessen (ethanol productie) maar kan ook een rol spelen bij optimaliseren van andere processen waarin producten voor biomaterialen geproduceerd worden (bio-raffinage).

De processen die door onze groep bestudeerd worden starten met de verzameling en ontsluiting van biomassa. De aard van de te gebruiken biomassa (bijv. de ontsluitbaarheid en productie per oppervlakte eenheid maar ook de eventuele overige toepassingen (landschappelijke!) zullen bij de bepaling van het inzamelingsgebied van belang zijn. Aangezien geldt dat transport van biomassa een negatief effect heeft op de overall energie balans zal het duidelijk zijn dat de door ons voorgestelde H_2 of H_2/CH_4 productiesystemen decentraal gevestigd worden. Deze decentrale toepassing gaat hand in hand met een beperkte schaalgrootte. Dit sluit goed aan bij de verwachting dat juist op kleinere schaal de fermentatieve productie van waterstof, eventueel gecombineerd met de productie van methaan, economisch gezien voordelen biedt ten opzichte van grootschalige productie. De gedachte gaat uit naar processen waarbij ofwel circa $500 \text{ m}^3 H_2/\text{uur}$ of $166 \text{ m}^3 H_2/\text{uur}$ plus $83 \text{ m}^3 CH_4$ geproduceerd worden (deze cijfers gelden voor het geval dat alle fermenteerbare biomassa in de theoretisch maximale hoeveelheden wordt omgezet).

Een volledige omzetting van biomassa naar H_2 middels een fermentatieve en een fotofermentatieve stap zal naar verwachting niet eerder dan na 15 jaar op commerciële schaal plaatsvinden.

Een proces waarin naast H_2 ook methaan als eindproduct geleverd wordt kan wellicht op een termijn van 5 tot 10 jaar operationeel worden. Dit verschil is het gevolg van de benodigde ontwikkeling van de fotobioreactor die nodig is voor het proces waarin alle biomassa in uitsluitend H_2 wordt omgezet.

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Voor wat betreft de door ATO bestudeerde processen, neemt het gebruik van de biomassa een centrale plek in. Belangrijke onderzoeksissues zijn in deze de aard, hoeveelheid, beschikbaarheid in Nederland, import, nevenfuncties etc. van biomassa. Na het logistieke facet volgt de "handling" van de biomassa teneinde voor fermentatie geschikt uitgangsmateriaal te kunnen aanleveren. Hier gaat de aandacht uit naar optimalisatie van de ontsluiting, dat wil zeggen zoveel mogelijk fermenteerbare suikers halen uit de aangewende grondstof, en naar minimalisatie van ontsluitingsagentia, te weten (bio)chemicaliën en/of energie. Dit is ook enerzijds met het oog op het voorkomen van milieubelasting en anderzijds op kosten (bijv. enzymgebruik). Op dit niveau zijn dan minstens twee mogelijkheden te onderscheiden, bijv.

heldere hydrolysaten of slurries, die ook voor de uiteindelijke procesvoering van belang zullen zijn. Dit gehele voortraject vóór de eigenlijke fermentatie is een belangrijk onderzoeks-issuë in elk van onze projecten.

Hierop volgen de aspecten van fermentatie bij hoge temperatuur, fermentatie met licht als partiele energiedonor of een fermentatie naar biogas. Elk van de fermentaties is nu nog het onderwerp van studie en zal dat ook nog wel even blijven. Concrete onderzoeksissues liggen op het vlak van microbiële fysiologie en moleculaire biologie (stammen selectie en optimalisatie, nutriënten, mengsubstraten, mengpopulaties, inhibitors etc.), bioprocesstechnologie (dat wil zeggen bioreactor configuratie zowel van de thermoreactor als van de fotobioreactor), en downstream processing (op welke wijze wordt H₂ verwijderd, verzameld en opgewerkt naar welke specificaties).

De hierboven genoemde onderzoeksissues zijn alle kansrijke nieuwe onderzoeksrichtingen die in de lopende projecten aan de orde komen.

Benodigde samenwerking in het kader van het onderzoek en de ontwikkeling van het vakgebied

Het eerste traject van biologische waterstof productie is de ontsluiting van biomassa op een wijze die technisch en economisch haalbaar is. Hiermee staat of valt het idee van biologische waterstof productie. Het ATO heeft ruime expertise op dit gebied vanwege haar vroegere activiteiten in de pulp- en vezel industrie. Desalniettemin is, vooral vanwege het belang van deze initiële stap, uitbreiding van de samenwerking of inbreng van additionele expertise altijd welkom. Naast de fysische of chemisch/fysische behandelingen van biomassa, volgt er in de huidige methodes een enzymatische stap voor hydrolyse. In de lopende projecten worden de voelhorens uitgestoken naar optimalisatie van deze stap plus naar de “eigen” productie van hydrolytische enzymen teneinde een alternatief te kunnen bieden voor relatief kostbare commerciële enzympreparaten.

Voor zover het de ontwikkeling van het vakgebied betreft de volgende opmerkingen:

1. Ontsluiting van biomassa teneinde fermenteerbaar substraat te genereren zal van doorslaggevende betekenis blijven bij elke fermentatieve productie van producten met relatief lage toegevoegde waarde zoals energiedragers. Deze problematiek dient dus zeker verder uitgediept te worden middels uitgebreidere investeringen.
2. Het vakgebied berust naast de biomassa conversietechnieken op anaërobe bioconversie van de verkregen producten, met als specifiek kenmerk dat het in de onderhavige projecten bioconversies bij hoge temperatuur betreft, waarbij een product gegenereerd wordt dat de verdere productie belemmert. Dit is geen nieuw fenomeen maar treedt in allerlei processen op. Het is van belang dit vakgebied verder te ontwikkelen door een nauwe integratie van deelgebieden zoals fermentatie, bioprocesstechnologie en downstream processing. Ofschoon dit element ook in de huidige ATO projecten duidelijk aanwezig is zou een verdere uitbreiding innovaties zeker kunnen stimuleren. Naast deze kern van het onderzoek naar biologische waterstof productie geldt dat ook een nauwe integratie met andere aanpalende vakgebieden voor een welslagen van belang is. Hierbij wordt gedacht aan kennis op het gebied van productie van biomassa, (bio)procesontwerp, materiaaltechnologie, gastecnologie, apparatenbouw, brandstofcellen en chemie.

Stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

Op korte termijn is de belangrijkste techno-economische voorwaarde voor verdere ontwikkeling de efficiënte ontsluiting van biomassa. Dit wordt direct gevolgd door het vergroten van de H₂ productiesnelheid zowel in de thermofiele fermentatie als in de fotoheterotrofe fermentatie.

Op beleidsniveau is de beste stimulans zowel voor het onderzoek als de praktijktoepassing het verruimen van (de mogelijkheden) voor geldelijke ondersteuning. Een versterking van kennisuitwisseling kan de bekendheid met biologische waterstof productie vergoten, en hieraan bijdragen.

2.7 Fotobiologische waterstofproductie

Ir. I. Akkerman, De Nieuwe Delta v.o.f. ,
Dr.ir. R.H. Wijffels, Wageningen Universiteit - Sectie Proceskunde.

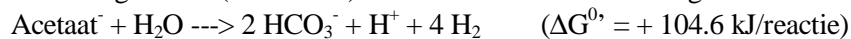
Inleiding: Fotobiologische waterstofvorming

Fototrofe micro-organismen zijn in staat om lichtenergie om te zetten in chemische energie. Dit vormt het natuurlijke mechanisme van fototrofe micro-organismen om metabole energie te maken die nodig is voor groei. Wanneer het energiemetabolisme ontkoppeld wordt van groei zijn deze fototrofe micro-organismen in staat om lichtenergie vast te leggen in de vorm van waterstof. Er zijn twee vormen van fotobiologische waterstofvorming te onderscheiden.

Cyanobacteriën kunnen lichtenergie gebruiken om water te splitsen in waterstof en moleculaire zuurstof, volgens:



Daarnaast zijn er de zogenaamde fotoheterotrofe bacteriën die lichtenergie kunnen gebruiken om eenvoudige zuren (o.a. acetaat) om te zetten in waterstof volgens:



Rhodobacter is een fotoheterotrofe bacterie die in staat is acetaat om te zetten in waterstofgas met behulp van zonne-energie.

Een bijzonder interessant gegeven is dat voor het laatstgenoemde proces veel minder lichtenergie nodig is om dezelfde hoeveelheid waterstof te maken. Met behulp van de toegevoegde lichtenergie kan echter de bovengenoemde reactie zonder problemen verlopen. Dit biedt bijzonder interessante mogelijkheden om een snelle fermentatie van suikers naar acetaat, CO₂ en H₂ te koppelen aan een fototroef proces. Op deze manier wordt eveneens een volledige omzetting van suikers in CO₂ en H₂ verkregen.

Dit 2-staps proces wordt ontwikkeld in Project 1 (zie hieronder).

In de eerste stap worden suikers uit biomassa gefermenteerd naar acetaat, CO₂ en H₂. Voor een hoge yield van suikers naar acetaat is -om thermodynamische redenen- een lage H₂ spanning noodzakelijk: de gevormde H₂ dient te worden weggevangen. In de tweede, fotoheterotrofe stap wordt acetaat m.b.v. lichtenergie omgezet in H₂ en CO₂ volgens de bovenstaande reactie. Deze fotoheterotrofe stap is zeer tolerant voor H₂. Het gevormde gasmengsel bevat > 95% H₂ en verder overwegend CO₂

R&D projecten

1. A novel bioprocess for hydrogen production from biomass for fuel cells

Looptijd: 2000 t/m 2002. Financiering: EU. Personeelsinzet: 1 fte/jaar

Doelstelling is de biologische productie van waterstof met thermofiele micro-organismen in combinatie met fotoheterotrofe micro-organismen. Binnen ons onderzoek staat fotobiologische waterstofproductie centraal. Hierbij worden de volgende onderwerpen bestudeerd:

1. Ontwikkeling en validatie van een kinetisch model voor fotoheterotrofe waterstofproductie uit acetaat.
2. Optimalisatie van het lichtregime voor fotobiologische waterstofproductie
3. Theoretische evaluatie van verschillende fotobioreactoren voor waterstofgasproductie en waterstofopvang.

Resultaten:

Gewerkt is met *Rhodospseudomonas* van de Hawaï culture collection (HCC 22711). Deze stam is in staat acetaat als substraat te gebruiken voor waterstofproductie.

Onderzocht is bij welke verhouding glutamaat en acetaat de hoogste waterstofopbrengst verkregen wordt. Theoretisch is het mogelijk uit 1 mol acetaat 4 mol waterstof te produceren. In onze experimenten blijkt het mogelijk te zijn een yield (= H₂ / acetaat) te bereiken die 80% van dit theoretisch maximum bedraagt. De efficiëntie waarmee lichtenergie wordt omgezet in

waterstof(energie) ligt tussen de 1.5 en 5%. Doelstelling binnen dit project is dit te verhogen tot 10%. De resultaten tot nu toe tonen dat een lage yield (H_2 / acetaat) samengaat met een hoge efficiency van de omzetting van lichtenergie in H_2 energie. De achtergronden hiervan zijn niet bekend en dienen nader te worden onderzocht.

2. Biologische waterstofproductie

Looptijd: 2000 -2003. Financiering: EET. Personeelsinzet: 1,4 fte/jaar

Doelstelling is biologische productie van waterstof waarbij de technologische ontwikkeling gedaan wordt waarin het gehele procesontwerp meegenomen wordt. Binnen ons onderzoek staat fotobiologische waterstofproductie centraal.. Hierbij worden bestudeerd:

1. Optimalisatie van fotoheterotrofe waterstofproductie: toepassing van een vlakke plaat fotobioreactor waarin menging plaats vindt door recirculatie van gas. In de reactorconfiguratie worden verschillende groeimmedia gebruikt waarbij met name aandacht besteed wordt aan de stikstofbron.
2. Fotoheterotrofe waterstofproductie met geïmmobiliseerde bacteriën.
3. Opschaling van de fotobiologische reactor tot een schaal van 10 liter.
4. Integratie van fotoheterotrofe waterstofproductie in het integrale biologische waterstofproductieproces.

Resultaten:

De optimalisering omvat ook de mogelijkheid de bacteriecellen te immobiliseren. Immobilisatie beschermt de bacteriecellen en houdt ze in het systeem. Door gebruik te maken van immobilisatie wordt het mogelijk om experimenten uit te voeren waarbij limiterende substraatconcentraties worden toegepast. Een zo groot mogelijke fractie van het toegevoerde substraat (acetaat, N-bron en licht) dient gebruikt te worden voor waterstofproductie en niet voor groei. Derhalve zou minimalisatie van groei (door het aanleggen van limitaties via bijv. beperking van nutriëntentoevoer of andere methoden) mogelijk een belangrijke bijdrage kunnen leveren aan de optimalisatie van het proces.

We hebben een experiment uitgevoerd met gel-geïmmobiliseerde bacteriecellen. Gedurende een periode van 22 dagen bleef de productiesnelheid van waterstof op een constant niveau. Theoretisch kan 1 mol acetaat 4 mol waterstof opleveren tijdens deze fotoheterotrofe fermentatie. Tijdens ons experiment was de omzettingsefficiëntie slechts 19% van dit theoretische maximum. In eerdere experimenten met vrije cultures werden omzettingsefficiënties van 20 – 80% van het theoretisch maximum gehaald. Het lopend onderzoek is onder meer gericht op een verkenning van de mogelijkheden van immobilisatie ten behoeve van verbetering van de omzettingsefficiëntie.

Expertise

Mariene biotechnologie, ontwerp en opschaling van fotobioreactoren, integratie van stoftransport en kinetiek (zowel modelontwikkeling als experimenteel), meting lichtabsorptie, mediumontwerp, experimental design, procesontwerp.

Infrastructuur

- Kweekfaciliteiten voor fototrofe micro-organismen: verschillende fotobioreactoren variërend in schaal van 100 ml tot 80 liter van de types vlakke plaatreactor en bellenkolommen.
- Lichtabsorptiemetingen waaronder spectrofotometer met integrerende bol met als doel lichtabsorptie, reflectie en –dispersie onafhankelijk van elkaar te meten.
- Lichtintensiteitsmetingen (Photon Flux Density; PFD)
- Procescontrolesysteem voor continue fermentaties waaronder het zgn. A-stat systeem voor dynamische procesvoering
- Immobilisatieapparatuur (voor grootschalig immobiliseren van micro-organismen)

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

Mogelijke toepassingen van het proces liggen op het gebied van relatief makkelijk afbreekbare organische bronnen zoals daar zijn afval en restbiomassa waarin veel water aanwezig is. Door de koppeling van anaërobie vergisting (suikers >> acetaat + H₂ + CO₂) en fotoheterotrofe fermentatie (acetaat >> H₂ + CO₂) kan organische stof vrij volledig omgezet worden in waterstof (en CO₂). De fotoheterotrofe stap heeft altijd acetaat nodig.

Wat het fotoheterotroof proces betreft is het onderzoek nog in de ontwikkelingsfase. Rendementen en productiviteit zijn nog te laag waardoor de kosten van een proces hoog zijn. Veel onderzoek is derhalve noodzakelijk voordat het proces toegepast kan worden. De termijn waarop dit kan schat ik op 10-20 jaar.

Waterstof als brandstof gewonnen op bovenstaande wijze heeft meerwaarde omdat productie duurzaam is. Afvalbiomassa wordt op nuttige wijze aangewend waardoor CO₂ uitstoot beperkt wordt.

Er zijn zeker nevenfuncties aan het proces omdat gebruik gemaakt kan worden van afvalbiomassa-stromen. Emissies van afval worden gereduceerd in combinatie met de productie van een hoogwaardige schone energiebron.

Koppeling met afvalwaterzuivering is economisch minder aantrekkelijk omdat afvalwater doorgaans een beperkt organische stof gehalte heeft, wat leidt tot een lage volumetrische H₂ productie.

Verwerking van meer geconcentreerde organische afvalstromen zoals GFT, residuen uit de VGI e.d. biedt een economisch beter perspectief door een hogere volumetrische H₂ productie.

De ontwikkeling van fotobioreactortechnologie (lichtinvang- en transmissiesystemen, reactor design en -geometrie) kan belangrijke spin-off hebben voor biotechnologische toepassing van fototrofe micro-organismen zoals microalgen of andere gebieden, zoals fotochemische processen.

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Gezien de hierboven geschetste lange ontwikkelingstermijn zijn er nog een aantal bottle necks die opgelost dienen te worden. Relatief weinig systematisch onderzoek is gedaan aan de fotoheterotrofe fermentatie waardoor het lastig is in te schatten hoeveel onderzoek noodzakelijk is om een bedrijfseconomisch efficiënt proces te ontwikkelen. Na afloop van bovengenoemde projecten hebben we daar een beter zicht op.

Belangrijke zaken die in toekomstig onderzoek aandacht dienen te hebben zijn:

- fotochemische efficiëntie: het rendement waarmee lichtenergie omgezet wordt in waterstofgas
- volumetrische productiviteit zodat proces kan plaats vinden in zo compact mogelijke bioreactoren
- stikstofbron: welke stikstofbron en in welke concentratie is nodig?
- invanging en transport van licht naar de reactor toe
- transport van de grondstof en ontsluiting/hydrolyse tot fermenteerbaar substraat (voor de eerste fermentatieve stap)
- H₂ opwerking en opslag

Benodigde samenwerking en stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

Met name interdisciplinaire samenwerking is van belang tussen moleculair biologen, microbiologen, procestechnologen en optisch ingenieurs. Vooral met moleculair biologen en met optisch ingenieurs voor systeemontwikkeling voor invang, geleiding en aanbod van licht aan de cultuur.

Van groot belang zijn mogelijkheden om systematisch onderzoek aan dit onderwerp te doen, waarvoor voldoende financiële middelen noodzakelijk zijn. De technologie dient zich nog verder te ontwikkelen om een goed alternatief te vormen voor fossiele brandstoffen.

Er dient continuïteit in de huidige projecten gecreëerd te worden. Met de resultaten van de huidige projecten dient een proces ontworpen te worden dat opschaalbaar is. Onderzoek op grotere schaal is kostbaar onderzoek welke alleen mogelijk is met stimuleringsfondsen.

Dit kan bijv. worden gerealiseerd via een programmatische aanpak/prioriteitsgebied met deelname door overheid, wetenschaps- en technologieorganisaties, R&D sector en bedrijven, die actief aan de ontwikkeling deelnemen.

Invanging van licht is een problematisch proces. In principe is het mogelijk in een gasdicht systeem licht in te vangen via een lichtinvangend systeem (lenzen of spiegels) en licht te transporteren naar de fotobioreactor middels glasvezels. In Japan en Israël is ervaring opgedaan met deze systemen. In samenwerking met deze landen dient dan ook dit systeem verder geoptimaliseerd te worden.

Ook stimulering van hernieuwbare energieproductie via beleidsmaatregelen is van belang voor het stimuleren van de techniekontwikkeling.

2.8 Sanitatie en rioolwaterbehandeling; CH₄ gisting van slurries (mest e.d.)

Dr.ir. Grietje Zeeman,
Sectie Milieutechnologie, Wageningen Universiteit.

R&D projecten

1. Decentrale Sanitatie en Hergebruik (DeSaH)

Looptijd: mei 2001-jan. 2007; Financiering: EET; Personeelsinzet 1.4 fte/jaar.

Het beoogde resultaat van het project is het verkrijgen van voldoende kennis en ervaring om DESAH op grotere schaal, d.w.z. in een nieuw te bouwen gebouw of nieuwbouwwijk, een bestaande school of vergelijkbare instelling te kunnen toepassen, zodat water en energiegebruik kan worden geminimaliseerd, energie (CH₄) productie gemaximaliseerd en hergebruik van nutriënten, rest organische stoffen en gezuiverd grijswater op een hygiënische en milieuhygiënisch verantwoorde wijze toegepast kan worden. Binnen het project zullen technologieën worden ontwikkeld voor 2 type toepassingen van DESAH, in nieuwbouw- en specifieke bestaande situaties, nl. bij afgelegen woonkernen en in gebouwen (b.v. scholen) met een betrekkelijk geconcentreerd afvalwater als gevolg van de afwezigheid van was-, bad-, douche- en keukenfaciliteiten. Het DESAH concept voor nieuwbouwsituatie impliceert de gescheiden inzameling-, transport en behandeling van geconcentreerde en verdunde afvalwaterstromen. De geconcentreerde afvalwaterstroom bestaat uit toiletafval (toiletafval(water)) en keukenafval. Er worden technieken ingezet om deze afvalwaterstroom zo geconcentreerd mogelijk in te zamelen en te transporteren, zonder dat verstoppingen optreden, en met zomin mogelijk gebruik van energie. Het project wordt uitgevoerd met partners, waaronder 2 universiteiten en meerder takken van het bedrijfsleven.

2. Gescheiden behandeling van feces en urine in decentrale concepten

Looptijd: Juni 2001- jan. 2004; Personele inzet: 1.2 fte; Financiering: STOWA

Binnen decentrale sanitatie concepten kunnen een aantal mogelijkheden van scheiding van huishoudelijk afvalwaterstromen aan de bron worden onderscheiden. Hieronder worden de te onderzoeken opties aangegeven.

- Inzameling van “night soil” (feces plus urine) en grijswater (douche, bad, was en keuken water). De geconcentreerde fysiologische afvalstoffen, feces en urine, worden ingezameld en getransporteerd met een minimum hoeveelheid water, b.v. met behulp van vacuümsystemen, gevolgd door decentrale anaërobe behandeling. Het product van de anaërobe behandeling is een vergiste slurrie en is bedoeld voor hergebruik in de landbouw. De behandeling van grijswater wordt in het voorgestelde onderzoek niet meegenomen.
- Naast de inzameling van feces plus urine bestaat de optie om deze twee stromen, feces en urine, separaat in te zamelen en te behandelen. Er zijn reeds toiletten in de handel, die deze

gescheiden inzameling mogelijk maken. Door afscheiding van deze vloeistofstroom wordt de mogelijkheid gecreëerd om ofwel de urine na een eventuele behandeling direct te gebruiken in de landbouw dan wel de nutriënten terug te winnen in een zodanige vorm dat ze kunnen worden gebruikt als grondstof in b.v. de kunstmestindustrie of de fosfaatindustrie. Afscheiding van de urine van de feces levert als belangrijk bijkomend voordeel op dat het volume van de te vergisten slurrie en daarmee het reactorvolume aanzienlijk afneemt. Binnen het project wordt de vergisting van zowel feces als feces & urine en de terugwinning van nutriënten uit urine onderzocht.

3. Development of COst-effective REclamation TEchnologies for domestic wastewater and the appropriate agricultural use of the treated effluent under (semi-) arid climate conditions (CORETECH)

Looptijd: 1-03-2000 tot 1-10-2003. Financiering: EU. Personeelsinzet: 0.6 fte/jaar.

Domestic wastewater is more and more regarded as an important water resource in particularly arid climate areas. Development of cost-effective reclamation techniques will stimulate the usage of this potential resource. In the current proposal, the project partners are aiming to develop such techniques, making a direct link between wastewater treatment and agricultural production, and in the mean time studying the impact of the water quality on the agricultural production systems (including soil and health risks). The core Technology for BOD removal will consist of an anaerobic treatment step avoiding any energy demand. This will be followed by appropriate post-treatment for meeting reuse criteria. Based on the effluent criteria, the most suitable water distribution/irrigation system will be researched coupled to agricultural production systems. In addition, a bottom-up approach will be followed in which the agricultural demand sets the effluent criteria and, consequently, the specifications for the treatment system. The advantage of the latter approach is that a low-grade application (e.g. cotton production, trees, and animal fodder) will require only a plain, low-cost technique. Objective of the project is to integrate sanitary engineering with environmental and agricultural engineering for a cost-effective optimisation and safe usage of the limited water and nutrient resources in the region, via: Development of the most suitable on-site and community on-site sanitation and treatment systems; Development of appropriate irrigation / fertilisation methodologies coupled to the (community) on-site treatment systems; Selection of the most suitable agricultural crops, including the cropping pattern, to be grown on the treated sewage, taking into consideration the pathogen, salt, and nutrient content of the treated effluent and the crops' economic value; Study the environmental impact of the usage of treated sewage on the soil and underground water reservoirs with regard to the fate of micro pollutants; assess and develop improved methods for the identification and enumeration of various kinds of pathogenic organisms

3. Capacity building on WASTEwater VALorisation for agricultural production in the Middle East area by using cost-effective treatment technologies. (WASTEVAL)

Looptijd: 1 jan.-1999 - juli 2004; Financiering: IOP –SAIL; Personeelsinzet: 3.2fte/jaar.

WASTEVAL heeft ingezet op de ontwikkeling van wetenschappelijk staf, bekwaam op het thema, bij elk van de partner instituten (Birzeit University, Palestina; Water, Environment Research and Training Center, University of Jordan; Water Pollution Control Department, National Research Center, Egypte. Daarbij zijn binnen WASTEVAL I diverse regionale cursussen en workshops gehouden (in alle drie de partner landen), waarvan sommige met steun van WHO, om regionale wetenschappers en beleidsmakers kennis te laten nemen van de huidige stand van zaken en van mogelijke toekomstige ontwikkelingen. Tijdens deze cursussen en workshops kreeg de 'nieuwe' regionale staf de gelegenheid zich te presenteren op het vakgebied ten overstaan van gevestigde specialisten in het veld. Binnen WASTEVAL worden 6 promotieonderzoeken uitgevoerd: 2 op het gebied van anaërobe behandeling van rioolwater; 3 op het gebied van nabehandeling t.b.v. verwijdering van pathogenen en nutriënten; 1 op het gebied van irrigatie.

4. Anaerobic treatment of domestic sewage in developing countries (Universidad Nacional de Salta, Argentina).

Looptijd: 1jan.1998 – 1 jan. 2004; Financiering: WOTRO/WUR; Personeelsinzet:0.75 fte/jaar.

The main objective of this research is the assessment of the feasibility of direct anaerobic treatment of (low strength) domestic sewage under subtropical and temperate climatic conditions by means of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors and the like. The specific aim of the work is the development of proper tools, to operate anaerobic sewage treatment systems in such a way that, in moderate and subtropical climates, a maximum of COD/BOD removal can be accomplished, while at the same time a satisfactory sludge stabilisation can be achieved, either directly (in the reactor) or by means of a supplementary sludge digester. Elucidation of the factors affecting the removal of suspended solids and the sludge activity is essential for an accurate evaluation of anaerobic systems. Therefore, laboratory and pilot-scale experiments will be set-up to study the following aspects: 'The effect of temperature, upflow velocity (V_{up}), and sewage concentration on the removal of suspended solids (SS)'; The role of the sludge retention time (SRT) on the hydrolytic and methanogenic activity of the sludge. The system, including physical and biological processes, will be simulated in a mathematical model.

5. Optimisation of the removal capacity of UASB systems for varying hydraulic and organic loading rates (Experimental Station of the Federal University of Paraiba, Campina Grande, Brasil).

Looptijd: 1 sept. 2000 tot 1 sept. 2004; Financiering: WOTRO/WUR; Personeelsinzet:1.1 fte/jaar.

6. Optimization of an anaerobic treatment for pig wastewater; Biogas Advisory Unit (BAU), Chiang Mai, Thailand.

Looptijd: 1 Sept.1994 – 1 jan.2004; Financiering: BAU-Chiang-Mai & WUR; Personeelsinzet:0.5fte/jaar.

The main objective of this PhD-study is to develop an optimised anaerobic system for the treatment of pig wastewater (diluted pig manure). The research focuses on the anaerobic sludge digestion step in the UASB system. For this purpose, it is necessary to gain a better understanding of the hydrolysis and acidification of the complex material present in the pig wastewater and to study the degradation pattern within the reactor. The selected reactor configuration should be assessed to see to what extent an uncoupling of the SRT from the HRT has been accomplished. The modified reactor should respond to important criteria for low cost environmental technologies, e.g.: low investment costs; ease of construction and operation; low maintenance; less smell.

7. Utilisation of agricultural and food processing wastes for production of energy and valuable products: application to the situation in Egypt.

Looptijd: 1-01-2000 -1-01-2004; Financiering: Egyptische overheid; Personeelsinzet:1.1 fte/jaar.

Agricultural and food processing wastes represent an important source of bio-energy and valuable products. In Egypt, animal wastes are used directly as a fertiliser and only a small portion of the agricultural residues is used as animal food or for heating in small villages and the remainder is burnt directly in the fields, which leads to Environmental pollution. Food processing wastes are used also for animal nourishment but the larger portion is disposed of without further use or treatment. These materials can be used as a source of energy as well as a source of some valuable products. The conversion of these materials into energy consumes fossil fuels, which are non-renewable, or biogas, so the net energy production from the conversion process will be diminished. The aims of this study are: to investigate the utilisation of agricultural wastes (cow manure, rice straw and corn residues) for the production of energy

and compost and also to investigate the possibilities of using solar and wind energy for the processes involved in the conversion of these materials.

Expertise

Technologie van anaërobe zuivering/gisting en hergebruik. Specifieke expertise: Anaërobe hydrolyse; Anaërobe vergisting van dierlijke mest; Anaërobe behandeling van rioolwater en rioolwaterslib; Anaërobe behandeling van vethoudend afvalwater (vis) en slib; Decentrale sanitatie (o.a. anaërobe behandeling night soil, feces en keukenafval).

Infrastructuur

De groep beschikt over een experimentele hal, voor onderzoek op zowel kleine als grote schaal naar de behandeling van huishoudelijk afvalwater. De groep beschikt over anaërobe UASB reactoren met een grootte van 1 liter tot 6 m³ en slurrie vergisters van 5 - 1000 liter (AC- en VGD systemen).

De leerstoelgroep Biologische Kringloop Technologie is gespecialiseerd in ontwikkeling van duurzame technologieën met anaërobe processen als de 'Core' technologie, voor behandeling en hergebruik van afvalwater, slurries en vastafval. Andere belangrijke onderzoeksthema's zijn anaërobe behandeling en hergebruik van industrieel afvalwater; de Zwavel kringloop.

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

Anaërobe vergisting van dierlijke mest is op boerderij schaal toegepast in de jaren tachtig op ca 30 bedrijven. Een aantal factoren heeft er toe geleid dat deze toepassing in Nederland geen succes is geworden. Genoemd kunnen worden: lage energieprijzen, lage gas opbrengst als gevolg van methaanemissies in de vooropslag (met name bij varkensbedrijven) en slechte biogas benutting (met name in de zomer). Op dit moment worden verschillende initiatieven ontplooid om biogas productie uit mest te herintroduceren in Nederland. Een zeer belangrijk aspect bij deze herintroductie zou moeten zijn (en dit is zeker niet altijd het geval) dat gebruik wordt gemaakt van de ervaringen (ook de negatieve) uit het verleden en niet alleen wordt gekeken naar de kennis die is opgebouwd in het verleden. Bij implementatie op boerderijschaal is een combinatie van vergisting en opslag in een fed-batch systeem een aantrekkelijke optie, zeker omdat meerder initiatieven onder meer tot doel hebben om methaanemissies in de opslag te reduceren. 'Conventionele' VGD systemen blijven goed toepasbare systemen, onder voorwaarde dat maatregelen worden genomen dat methaanemissies in na-opslag en vooropslag worden voorkomen. Co vergisting met vethoudende substraten, producten uit de landbouw, bermgras etc. kan een aanzienlijke verbetering geven in de gasopbrengst. Wettelijke restricties moeten worden weggenomen.

Anaërobe behandeling van rioolwater vindt op grote schaal plaats in tropische landen in vnl. UASB systemen. Bij lagere temperaturen, zoals het geval in Nederland, wordt dit proces nog niet toegepast. Anaërobe zuivering van rioolwater moet worden gezien als een voorbehandeling waarbij alleen organische stof wordt omgezet in CH₄ gas. Afhankelijk van de toepassing/lozing zullen nutriënten en pathogenen dienen te worden verwijderd. Als hergebruik in de landbouwwenselijk is zoals b.v. in de Midden Oosten regio, zoals de nabehandeling zich moeten richten op pathogenen. In Nederland zal in de huidige situatie hergebruik zeer moeilijk zijn en is een vergaande verwijdering van nutriënten noodzakelijk. In dat geval zal voldoende organische stof moeten resteren om biologische nutriënten verwijdering te kunnen bewerkstelligen. Bij toepassing van een hoogbelast Anaëroob Filter kan 80% van de gesuspendeerde stof worden verwijderd terwijl opgeloste en colloïdale organische stof beschikbaar blijft voor de daaropvolgende nutriënten verwijdering (Elmitwally, 2000). Het in het AF geproduceerde slib kan worden ingezet voor de productie van CH₄ gas. Een dergelijk systeem kan leiden tot een hogere energie productie t.o.v. de huidige toepassing van voorbezinking in combinatie met slibvergisting.

Decentrale sanitatie (o.a. anaërobe behandeling night soil, feces en keukenafval) (DESAH). Het DESAH-concept biedt grote mogelijkheden voor toepassing, waarbij aanzienlijke milieurendementen kunnen worden gerealiseerd. Teneinde toepassing van het DESAH concept tot een succes te maken is het van groot belang de juiste prioriteiten te stellen en stapsgewijs onderzoek, ontwikkeling en demonstratie op te zetten en zorg te dragen voor medewerking van de noodzakelijke disciplines, overheidsorganisaties en bedrijfsgroepen en – zeer belangrijk – van de bevolking. DESAH impliceert een nieuwe manier van denken, het is gebaseerd op paradigma's 'Laat geconcentreerd afval geconcentreerd', 'Behandel zoveel mogelijk op of nabij de locatie waar het 'afval' wordt gegenereerd' en 'Streef naar een zo optimale herbenutting, ook al is er meer spraken van macro- dan micro-economische schaal'. Om deze omschakeling in paradigma's verantwoord te laten verlopen is aanvullend fundamenteel onderzoek nodig alvorens via kleinschalige demonstratie kan worden overgegaan tot grootschalige toepassing. Binnen de 2 genoemde projecten van EET en STOWA zal deze kennis worden verkregen en zal bovendien in een klein appartementen complex in Wageningen DESAH gedemonstreerd. Als aangetoond is dat een dergelijk systeem technisch mogelijk is in Nederland kan gezocht worden naar een grote locatie waar op economische schaal DESAH kan worden toegepast met gebruik van water, nutriënten en energie.

Toepassing van productie van CH_4 / H_2 uit afval(water) betekent enerzijds een (deel) oplossing van het afval(water) en daarmee vervuiling probleem anderzijds een stimulans tot productie van 'groene' energie. En daarmee een reductie van CO_2 emissie. Reductie van CH_4 emissie kan een belangrijke nevenaspect vormen bij toepassing van mestvergisting (indien op de juiste wijze toegepast).

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Op het gebied van CH_4 emissie uit mest en toepassing van covergisting is reeds veel onderzoek uitgevoerd. Het is van zeer groot belang dat de kennis die op dit gebied bestaat bijeengebracht wordt en toegankelijk gemaakt wordt voor toepassing. Laten we a.u.b. het wiel niet nogmaals proberen uit te vinden. Wat betreft de productie van H_2 . Het is van belang dat ook onderzoek met complexe substraten wordt uitgevoerd gezien het feit dat ook hier de hydrolyse de snelheidsbeperkende stap zal zijn. Tot nu toe is dit type onderzoek nog niet uitgevoerd. Fundamenteel onderzoek op gebied van anaërobe hydrolyse, met speciale aandacht voor vetten is van belang om de vergistingcondities en randvoorwaarden voor vergisting van complexe substraten te kunnen aangeven en daarmee de gasopbrengst te verhogen.

Biologische processen, en met name anaërobe processen kunnen een belangrijke rol spelen bij het sluiten van kringlopen zowel in industrieën maar zeker ook bij de publieke sanitatie. Het is van belang dat de hele ketens in ogenschouw worden genomen en niet alleen gedeelten daarvan. De integratie tussen sanitatie en landbouw is hierbij een zeer belangrijk aspect. Toepassing van anaërobe zuivering en productie van CH_4 uit feces en keukenafval kan een belangrijke rol gaan spelen, als we andere inzameling en transport systemen ontwikkelen, zodat geconcentreerd afval niet wordt verdund tot afvalwater. Binnen het EET-DESAH en STOWA project wordt hiertoe een eerste aanzet gedaan. Eerste toepassingen kunnen gezocht worden in grote hotels, ziekenhuizen, appartementen complexen en nieuwbouwwijken.

Mogelijkheden voor stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

Bestaande kennis moet bijeengebracht worden en beschikbaar komen voor toepassing (zie ook hierboven). Om tot ontwikkeling van werkelijk duurzame concepten te komen zijn multidisciplinaire projecten van onmiskenbaar belang.

2.9 Anaërobe behandeling (CH₄ gisting) van industrieel afvalwater

Dr.ir. Jules B. van Lier,

Sectie Milieutechnologie, Wageningen Universiteit/ Lettinga Associates Foundation (LeAF).

R&D projecten

1. Kosteneffectieve regeneratie van heet proceswater t.b.v. de papier- en celstofproductie.

Looptijd: april 1997 - april 2003; Financiering: EET; Personeelsinzet 2.6 fte/jaar.

Doelstelling: implementeren van een gesloten water kringloop in een karton/inpak-papierfabriek met een interne thermofiele anaërobe - aërobe zuivering. Binnen bovengenoemd EET project is de WU belast met fundamenteel onderzoek naar: Anaërobe voorzuivering: optimalisatie CH₄-productie en gelijktijdige S verwijdering onder thermofiele condities, bij relatief lage pH waarden (pH 6); (Micro)aërobe nazuivering (AIO onderzoek); Ontharding ofwel gecontroleerde calciumverwijdering middels CaCO₃ precipitatie in de kringloop; Fysisch-chemische behandeling t.b.v. "extrapolatie" naar de wit-papiersector. Binnen het project wordt een praktijkschaal anaërobe thermofiele bioreactor ontwikkeld voor de 500 ton papier/dag kartonfabriek van Kappa Packaging in Hoogezand. Het geproduceerde biogas wordt binnen het productieproces gebruikt t.b.v. stoomproductie hetgeen een energiebesparing oplevert van 228 MJ/ton papier. Deze waarde komt overeen met 3-4% van de energie behoefte van een 'open' productie proces. Ontwikkeling van een 'in-line' efficiënt en kosteneffectief zuiveringssysteem moet leiden tot het volledig sluiten van kringlopen waardoor alle energie binnen het productieproces blijft en niet meer wegvloeit met het effluent. Het terugbrengen van de waterconsumptie met 10 m³/ton papier leidt tot een energiewinst van 1045 MJ/ton papier (ofwel 16% van de oorspronkelijke energiebehoefte). Gelijktijdig kan de energieretrouwbaarheid in de droogpartij worden verbeterd waardoor een verdere besparing mogelijk is van zo'n 940-1400 MJ/ton papier (14- 21% van de oorspronkelijke energie behoefte). Hoewel het geproduceerde biogas slechts een relatieve kleine bijdrage in de energiebesparing levert is de ontwikkeling van een kosteneffectief zuiveringssysteem van essentieel belang om te komen tot implementatie van gesloten kringlopen.

2. Thermofiele omzetting van methanol-houdend afval- en proceswater naar CH₄.

Looptijd: Jan. 1999 - april 2003; Personele inzet: 1.1 fte; Financiering: Overheid Brazilië.

Doelstelling: Sturen van de metabole routes van methanolafbraak onder thermofiele condities. M.b.v. thermofiele anaërobe zuivering van methanol houdend afvalwater, o.a. evaporator-condensaat van papier en pulpfabrieken, kan het terugwinnen van energie verder worden geoptimaliseerd. Voorwaarde is dat de metabole omzetting van methanol wordt gestuurd van een vetzuurproductie naar CH₄-vorming. Sporenmetalen blijken een invloed te hebben op deze route alsmede de aanwezigheid van anorganisch koolstof (HCO₃⁻/CO₂). Resultaten tot dusver geven blijk van een 'voorkeurs-afbraakroute' van methanol via H₂/CO₂ onder thermofiele condities. Tot dusver is geen directe methanogenese gevonden. Dit laatste werd wel gevonden onder mesofiele condities waardoor het mogelijk bleek een stabiel methanogeen proces te bedrijven bij pH 4.5. Voorwaarde is dat vetzuren (acetaat) niet als intermediair product wordt gevormd aangezien de niet-gedissocieerde vorm leidt tot ernstige toxiciteit problemen bij lage pH waarden.

3. Anaërobe behandeling van kleurstofhoudend afvalwater uit de textielindustrie.

Looptijd: sept. 2001 – sept. 2005; Financiering: Overheid Brazilië; Personeelsinzet: 1.1 fte/jaar.

Doelstelling: het project achterhaalt de mogelijkheden voor de toepassing van de anaërobe technologie onder hoge temperatuur en pH condities voor de behandeling van textielafvalwater zoals vrijkomend bij Braziliaanse textiel fabrieken.

4. EET-project: Anaërobe behandeling van azo-kleurstoffen.

Looptijd: april 1998 - april 2002; Financiering: EET; Personeelsinzet: 1.5 fte/jaar.

Het project richt zich met name op de ontkleuringstap waarbij de azo-verbinding wordt gereduceerd als a-specifieke reactie in een anaëroob systeem. Verder is er onderzoek verricht naar de versnelling van de ontkleuringstap door toepassing van redox mediators zoals AQDS.

5. Optimalisatie van zware metalen dosering bij anaërobe afvalwaterzuivering .

Looptijd: jan. 2000 – feb. 2004; Financiering: STW; Personeelsinzet 1.3 fte /jaar.

Doelstelling: Inventarisatie van benodigde essentiële sporenelementen voor verschillende micro-organismen (trofische groepen); Hoe worden de zware metalen opgenomen en op welke wijze moeten ze worden toegediend; Hoe kan dit op een (voor de praktijk) economisch en milieuhygiënisch verantwoorde wijze worden gerealiseerd. Een aantal sporenelementen zijn essentieel voor het optimaal functioneren van micro-organismen en daarmee voor de optimale procesvoering van biotechnologische processen. Het is derhalve een eerste vereiste dat de betreffende metaalionen in voldoende alsmede in beschikbare vorm aanwezig zijn. Wanneer wordt voldaan aan deze voorwaarden kunnen bij het proces de gewenste maximale omzettingssnelheden, en in bepaalde gevallen zelfs specifieke omzettingen, worden gerealiseerd. Op dit moment is hierover nog relatief weinig bekend. De doelstellingen van het onderzoek zijn dan ook deze leemtes in de inzichten te elimineren en vast te stellen. De verkregen resultaten kunnen voor de praktijk leiden tot nieuwe doseringsstrategieën voor zware metalen, m.b.t. frequentie van de metalen dosering en dosering in biologisch beschikbare vorm. Het beoogde resultaat is een veel efficiëntere dosering en reductie van metaal gebruik in de praktijk.

Met de inzichten over de metaal behoefte van verschillende micro-organismen en met name de verschillende trofische groepen kan mogelijk de competitie tussen deze groepen van micro-organismen worden gestuurd. Door middel van de doseringstrategie kunnen omzettingen in de gewenste richting worden gestuurd. Wanneer er voldoende activiteit in de reactor is voor omzetting van het substraat is het soms wenselijk dat het substraat niet gedeeltelijk wordt omgezet in slib maar volledig naar methaan. Mogelijk kan ook de slibaanwas worden gecontroleerd door gedurende lange perioden geen metaal cocktail te doseren. Hierdoor zal minder spuislib worden geproduceerd en moeten worden verwerkt. Tevens worden er minder metalen verbruikt

6. Microbiële CO conversie naar waterstof als biologisch alternatief voor de chemische 'shift' reactie.

Looptijd: september 2000 - september 2004; Financiering: STW (STW-WBC) / Paques B.V.; Personeelsinzet:1.1 fte /jaar.

Waterstofrijk gas kan worden geproduceerd uit aardgas of door pyrolyse van complexe organische materialen. De ongewenste CO aanwezig in het gas kan chemisch worden omgezet in waterstof met behulp van een nikkel bevattende katalysator. Echter dergelijke katalysator kunnen gemakkelijk vergiftigd worden door het aanwezige H₂S. Daarom moet dit H₂S eerst worden verwijderd. Bovendien gaat het om een evenwichtsreactie, hetgeen inhoudt dat er meerder reactoren nodig zijn om een hoge efficiëntie te bereiken. Een biotechnologisch alternatief is zeer interessant, omdat het minder gevoelig is voor lage H₂S concentraties, tot lage CO concentraties kan leiden in 1 enkele stap en bovendien bij lage druk en temperatuur bedreven kan. Microbiologisch wordt vooral aandacht besteed aan opheldering van enzym werking en structuur alsmede groei-eigenschappen van de CO omzettende bacteriën. Milieutechnologisch wordt gezocht naar de praktische toepassing van deze bacteriën in een bioreactor.

Expertise

Fundamentele en toegepast-fundamentele kennis van anaërobe gistingprocessen. Voornaamste expertisegebieden: toegepaste microbiologie; bio-procestechnologie; reactorkunde.

Kennis op het gebied van biofilmvorming, vorming en samenstelling van korrelvormige aggregaten, rol van diverse groepen micro-organismen in de anaërobe afbraak van modelsubstraten en afvalwaterstromen. Verder is er kennis opgebouwd op het gebied van 'anaërobe fysiologie', d.w.z. de rol en betekenis van diverse bacteriologische groepen binnen het anaërobe afbraakproces. B.v. de rol van hydrogentrofe methanogenen als waterstof 'sink' tijdens methanogenese alsmede de rol van homo-acetogene bacteriën.

Opstellen kinetische beschrijving afbraakroutes en de vertaalslag naar reactor ontwerp. Effecten van diverse milieucondities op de anaërobe fermentatie en methaanvorming.

Ontwikkeling van reactorsystemen ten behoeve van optimalisatie van het anaërobe afbraakproces bij verschillende milieucondities, een en ander afhankelijk van de samenstelling van het afvalwater. Voorbeelden zijn toepassing van 1-, 2-, of meer-trap systemen voor een verdere stabilisering van het gistingproces.

De groep heeft 30 jaar ervaring op het gebied van de anaërobe zuivering en methaangistingprocessen. Sinds 1980 zijn 34 proefschriften verschenen op dit thema. De groep wordt wereldwijd erkend als anaëroob 'expertise' centrum op het gebied van de vergistingstechnologie

Infrastructuur

Anaërobe continue reactoren op labschaal (0.2 – 6 liter), alsmede semi-technische schaal (tot 225 l). – Batch reactoren op labschaal (0.1 – 10 liter). Batch- en continue reactoren zijn uitgerust met randapparatuur (gas meter, pompen, besturing, pH controle, enz.); Uitgebreide klimaatkamers, 20°, 30°C voor bedrijven van labschaal proefopstellingen; Uitgebreid analytische lab met 5 HPLC's en 9 GC's voor meten vetzuren, alcoholen, gassamenstelling, organische zuren, ionen, PAK's, etc.; Modulair veiligheidslab t.b.v. veilig werken met toxische en explosiegevoelige substraten dan wel producten en/of stoffen die grote mate van stankoverlast bezorgen (sulfiden, mercaptanen, H₂, etc.).

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

Anaërobe zuivering van industrieel afvalwater wordt momenteel reeds op zeer uitgebreide schaal toegepast. Naast het zuiveren van afvalwater worden grote hoeveelheden CH₄ geproduceerd dat in de meeste gevallen als alternatieve energiebron wordt gebruikt in het productieproces. Hoewel substantiële hoeveelheden kunnen worden gewonnen, dekt de vrijkomende energie slechts een gering percentage van de industriële energiebehoefte. Conversie van biogas naar bruikbare energie vindt plaats d.m.v. van directe verbranding, stoom productie, omzetting in elektriciteit. Biogas dat niet op deze wijze kan worden gebruikt wordt normaliter afgefakkeld om ontsnapping van CH₄ naar de atmosfeer te voorkomen. Voor direct hergebruik binnen het industriële productie proces is een omschakeling van CH₄ productie naar H₂ productie niet te verwachten in de nabije toekomst aangezien de investeringen zeer groot zijn en de meerwaarde vrijwel nihil is (zie ook punt 7). Indien H₂ zou kunnen worden afgenomen als product met een hoge marktwaarde zou deze verschuiving wel kunnen gaan plaatsvinden. Door de relatief lage energieprijzen is dit echter eveneens niet te verwachten in de nabije toekomst.

Anaërobe zuivering van industrieel afvalwater is ontwikkeld gedurende de jaren zeventig als kosteneffectief alternatief voor de gangbare aërobe zuiveringsprocessen. Voor rioolwater zuivering zijn kosten reducties berekend van een factor 2-3. Van groot belang zijn echter de lage operationele kosten doordat energieverbruik is geminimaliseerd alsmede de spuislib productie. Voor de aërobe verwijdering van 1 kg chemisch zuurstof verbruik (CZV) uit organisch vervuild afvalwater is ongeveer 1 kWh aan energie vereist. Indien anaërobe methodes worden

aangewend levert diezelfde hoeveelheid vervuiling 2.85 kWh aan potentiële biogas-energie op. De globale voordelen van de anaërobe zuiveringsmethode zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 *Voordelen van anaërobe zuivering*

Voordelen anaërobe zuivering

relatief lage investeringskosten (t.o.v. aërobe actief slib installaties)
geen beluchtingenergie nodig
productie van energierijk biogas
relatief gering ruimtebeslagdoor hoge belastbaarheid van zuiveringssystemen
relatief lage surplus slibproductie
laag nutriëntenverbruik
Discontinue bedrijfsvoering mogelijk (b.v. suiker industrie: slechts 3-4 maanden bedrijfsvoering per jaar
Opslag anaërobe biomassa mogelijk;
Anaëroob slib is gestabiliseerd en hoeft bij gebruik van zogeheten korrelslib niet ontwaterd te worden.

De productie van CH₄ uit organisch vervuild afvalwater kan worden opgevat als een nevenfunctie (reststroom). Echter aangezien op 2 niveaus energiebesparing wordt gerealiseerd (voorkomen van energieverbruik tijdens de zuivering en terugwinnen van energie dat kan worden gebruikt binnen het productieproces) is een verdere stimulatie te verwachten bij het nastreven van verder terugdringen van broeikasgasemissies. Bij een middelgrote papierfabriek met een productie capaciteit van 1000 ton papier/dag en recycle papier als ruwe grondstof kan een energiebesparing worden gerealiseerd van 10.000-50.000 kWh per dag. De potentiële biogas energie opbrengst is 20.000-100.000 kWh per dag uitgaande van een anaëroob zuiveringsrendement van 70%, een en ander afhankelijk van de aard van het recycle papier en de kwaliteit van het eindproduct. De nuttige energiewinst is uiteraard afhankelijk van conversiefactoren en gebruikte apparatuur. Binnen papierfabrieken wordt in het algemeen het biogas omgezet in stoom.

Anaërobe zuivering van industrieel afvalwater heeft een duidelijke meerwaarde voor een duurzame ontwikkeling aangezien het energieverkwisting voorkomt en leidt tot terugwinning van bruikbare componenten uit afvalstromen (zoals energie, nutriënten, gereduceerde tussenproducten, etc.). Indien restcomponenten in voldoende hoge concentraties aanwezig zijn, zijn ze met relatief eenvoudige technologieën terug te winnen voor hergebruik (b.v. strippen van NH₃, en conversie van HS⁻/H₂S in S⁰). Organische componenten worden in principe geheel afgebroken naar CH₄ en CO₂, tenzij ze biologisch inert zijn of het zuiveringssysteem wordt overbelast.

Milieutechnologische investeringen worden in ontwikkelingslanden en landen in transitie nog steeds gezien als een kostenpost. De beschikbaarheid van kosteneffectieve methodes zoals anaërobe zuivering zal de implementatie van zuiveringssystemen voor afval- en proceswater versnellen aangezien het beleidsmakers een middel in handen geeft dat zuiveringssystemen niet louter kostenposten zijn. Juiste toepassing van milieutechnologie is alleen mogelijk indien dit wordt gecombineerd met een verbeterde stofhuishouding binnen het industriële productieproces (sluiten van waterkringlopen, geconcentreerd houden van afvalstromen etc.). Toepassingen van anaërobe systemen leidt vervolgens tot een grote toename in de biogas productie dat een significante bijdrage kan vormen in de energievoorziening. Ter illustratie: in India zijn bij diverse sterk vervuilende industrieën, zoals alcohol destilleerderijen en papierfabrieken, anaërobe zuiveringen gebouwd voor energierugwinning. Het zuiveringsproces zelf staat in die gevallen pas op de tweede plaats.

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Van groot belang is het uitbreiden van fundamenteel en toegepast onderzoek naar de toepasbaarheid onder extreme milieucondities, te weten hoge/lage pH waarden, hoge zoutgehalten, hoge concentraties toxische stoffen, etc. Door verdergaande waterbesparingen en kringloopsluitingen zullen interne zuiveringen onder steeds extreme condities moeten kunnen functioneren. Gezien de vele voordelen van de anaërobe zuiveringstechnologie zal meer kennis moeten worden verworven betreffende het functioneren van het gistingsproces onder suboptimale omstandigheden. Zwaar vervuild proces water (hoge CZV concentraties) met een hoge temperatuur zijn zeer moeilijk te behandelen met de aërobe technologie. Anaërobe zuiveringen kunnen hier uitkomst bieden. Een ander aandachtsveld is de biologische ontsluiting van vaste bestanddelen en/of moeilijk afbreekbare verbindingen. Vaste bestanddelen ondergaan een hydrolytische splitsing alvorens ze kunnen worden vergist. Inzicht in hydrolyse is met name van belang bij de behandeling van vast afval, slurries en rioolwater. Bij industrieel afvalwaterbehandeling worden vaste bestanddelen normaliter afgescheiden waarna een separate vergistingstap wordt toegepast. Inzicht in de hydrolyse leidt tot een verbeterde CH_4 opbrengst van organische afvalstromen.

Naast onderzoek op het gebied van de microbiologische omzetting dient aandacht te worden besteedt aan het scheiden van fermentatiegassen gevolgd door opslag. Het scheiden van gassen kan van belang zijn indien het onttrekken van een specifiek fermentatiegas een meerwaarde voor het proces heeft (b.v. H_2). Mogelijkheden zijn toepassen van selectieve membranen en/of andere drukvalreactoren Tenslotte zullen milieueconomische en milieusociologische studies er toe bijdragen om de energie efficiëntie in zgn. industrie parken te verhogen. Bio- CH_4/H_2 kan hierbij een rol spelen met name indien agro-industrieën deel uitmaken van deze industrieparken.

Mogelijkheden voor stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

Anaërobe gistingsprocessen zullen meer en meer worden ingebed in kringloopssystemen en indien mogelijk, gesloten watercircuits. Dit vereist echter een verdergaande integratie van diverse vakgebieden, zoals microbiologie, fysische en colloïd chemie, bio-proceskunde, kennis van productie processen, bedrijfskunde, economische richtingen sociologie, planning etc. Voor een verdere ontwikkeling van het vakgebied is een nauwe samenwerking tussen de bovengenoemde expertisegebieden onontbeerlijk. Daarnaast dient een inbedding van het Nederlandse onderzoek in een internationaal netwerk verder gestalte te krijgen. Naar het zich laat aanzien zal het zesde EU kader programma gaan bestaan uit het opbouwen van Europese onderzoeksnetwerken. De exacte richtlijnen zijn echter nog niet bekend.

De Lettinga Associates Foundation (LeAF) is opgericht met als belangrijke doelstelling het in stand houden en uitbouwen van het anaërobe kenniscentrum op het gebied van de anaërobe gistingstechnologie voor afvalwater en afvalstoffen. De stichting ontbeert voorsnog enige vorm van subsidie en is afhankelijk van opdrachten voor de continuïteit. Voor het vormen van een platform en het kanaliseren van kennis binnen Nederland zou de stichting (in samenwerking met Wageningen Universiteit) een centrale rol kunnen gaan vervullen. Momenteel beschikt de stichting (inclusief sectie MT-WU) over een zeer uitgebreid nationaal en internationaal anaëroob netwerk. Voorwaarde is dat de stichting voor deze tijdsinvestering wordt gecompenseerd door subsidies uit bedrijfsleven en of Ministeries.

Verdere ontwikkelingen zijn met name te verwachten bij een verdere integratie van de diverse onderzoeksdisciplines en integratie met het toepassingsveld. Erkende expertise of kenniscentra kunnen een stimulerende rol spelen als organisator, coördinator en mede uitvoerder van gespecialiseerde workshops en ontwikkelen van beleidlijnen. Organisatie van deze workshops leiden tot informatieverspreiding, kennisvergaring en formuleren van adviezen richting subsidiegevers en/of technologieafnemers. Bij het hanteren van kenniscentra is het initiatief zelf niet meer afhankelijk van enkele projecten, hetgeen de continuïteit van het initiatief garandeert. Een kenniscentrum spoort m.b.v. het netwerk leemtes op en rapporteert naar subsidiegevers en

onderzoeksinstanties. Wat betreft het onderhavige vakgebied kan het H₂/CH₄ platform of de stichting LeAF een coördinerende rol spelen.

Het kenniscentrum kan zijn/haar bevindingen actief inzetten (middels advisering, bekendmaking inventarisatierapporten) bij de verdeling van gelden door subsidiegevers waarbij objectiviteit van het centrum uiteraard van groot belang is. Alternatief aan de huidige opzet kan worden voorgesteld de beschikbare onderzoeksgelden te verdelen op basis van expertise en geleverde prestaties. De huidige tenderopzet bij diverse programma's leidt tot veel verlies van dure tijd en desinteresse om te tenderen.

Een mogelijke opzet is een "basis" projectfinanciering van 5 jaar op basis van de huidige expertise om het vakgebied verder uit te bouwen. Projectvoorstellen van het expertise centrum dienen te worden beoordeeld door een onafhankelijke commissie. Bij in gebreke blijven van het formuleren van gedegen projectvoorstellen vervalt de basisfinanciering en daarmee de status "kenniscentrum". De onafhankelijke commissie beoordeelt ook de output van het centrum en hanteert hierbij de gangbare standaarden (publicatie in gerenommeerde tijdschriften, succesvolle promoties, technologie afname door toepassers, etc). Bij onvoldoende output vervalt eveneens de status "kenniscentrum".

Voorwaarde voor daadwerkelijke technologie implementatie is kosteneffectiviteit en gesubsidieerde marktintroductie aangaande nieuwe toepassingen. Innovaties worden argwanend bekeken tenzij er de mogelijkheid bestaat de markt te overtuigen met een demonstratie of praktijkschaal project. Het genoemde kenniscentrum kan ook hierbij een belangrijke adviserende rol spelen.

Stimulering middels gesubsidieerde samenwerking tussen bedrijven, producenten en probleembezitters zoals geformuleerd in het EET programma van EZ/VRROM is een belangrijk instrument. In de huidige opzet leidt de verplichte eigenbijdrage, die voor universiteiten kan oplopen tot 50% van het budget, echter tot grote problemen bij met name de universiteiten. Door de forse inkrimpingen van het 'vrije' universitaire onderzoeksbudget zijn universiteiten vrijwel niet meer in staat om te tenderen binnen deze programma's. Een andere aanpak is de vorming van kenniscentra zoals beschreven onder 10. Deze kenniscentra kunnen bruggen slaan tussen de onderzoekswereld en de toepassing waarbij de technologie en/of de eindproducten centraal staan. Zowel voor de direct gefinancierde onderzoeksprojecten alsmede subsidiering van kenniscentra is de rol van de overheid van groot belang. Bedrijven zijn in het algemeen gebaat met korte termijn onderzoek met een overzichtbare periode waarin revenuen terugkeren naar het bedrijf. De overheid is gebaat bij lange termijn onderzoek en ontwikkeling van technologie voor de toekomst. Financiering van dit deel dient daarom ook bij de overheid (en mogelijk ook de grote multinationals) te liggen. Binnen multidisciplinaire onderzoeksprojecten moet het voor alle partijen duidelijk zijn dat het een ontwikkelingstraject betreft met onzekere resultaten. Hooggespannen verwachtingen vanuit de praktijk dienen tot reële proporties te worden teruggebracht.

2.10 Bio-waterstof en Bio-methaan productie

Dr.ir. Johan W. van Groenestijn,
TNO Milieu, Energie en Procesinnovatie (Apeldoorn).

R&D projecten

1. Biologische waterstofproductie

Looptijd: 2000 – 2003;Financiering: EET & TNO; Personeelsinzet: 0,8 fte/jaar.

Het EET project Biologische Waterstofproductie beoogt een proces te ontwikkelen voor de biologische productie van waterstofgas uit biomassa. Het proces bestaat uit een voorbereiding

van biomassa, gevolgd door een reactor waarin suikers fermentatief worden omgezet met extreem thermofiele bacteriën. In deze reactor wordt ook azijnzuur geproduceerd, hetgeen in een tweede reactor met foto-heterotrofe bacteriën verder wordt omgezet tot o.a. waterstofgas. De gewonnen gassen worden gezuiverd om deze geschikt te maken voor een brandstofcel. De rol van TNO is de ontwikkeling van de thermofiele bioreactor, inclusief de gaswinning en zuivering.

2. Promoting environmental technologies in tanneries of Huai river basin

Looptijd: 1998 –2003;Financiering: Ministerie van Buitenlandse Zaken (DGIS);
Personeelsinzet: 1.2 fte/jaar.

Het project beoogt de ontwikkeling en demonstratie van schone productietechnologie en nieuwe afvalwaterzuiveringstechnologie in Chinese leerlooierijen, in het kader van ontwikkelingshulp van Nederland aan China. Het afvalwater wordt anaëroob behandeld waarbij het methaanhoudend biogas wordt geproduceerd uit organische verontreinigingen. Dit biogas wordt gereinigd (verwijdering H₂S) en gebruikt in een elektriciteitsgenerator (dual fuel dieselmotor die gas tweede brandstof kan accepteren) ook op voor de opwekking van elektriciteit. Tevens worden sulfide en sulfaat uit het afvalwater verwijderd en teruggewonnen als NaHS, dat kan worden hergebruikt in leerlooierijen, en als elementair zwavel, dat een grondstof is voor zwavelzuurfabrieken.

3. Anaërobe membraanbioreactoren

Looptijd: 1999 – 2002; fase 2: 2002 – 2004; Financiering: TNO en Grontmij;
Personeelsinzet: 0.6 fte/jaar.

De technisch-economische haalbaarheid van membraanbioreactoren is de laatste 10 jaar sterk verbeterd door de lagere membraanprijzen, R&D en praktijkervaring. Er is vooral veel ervaring met membraanbioreactoren voor aërobe afvalwaterzuivering. TNO voert onderzoek uit naar anaërobe membraanbioreactoren. De voordelen van deze reactoren zijn de goed slibretentie en de afwezigheid van de noodzaak tot granulatie en vlokvorming. Een goede slibretentie is gunstig voor de volumetrische capaciteit en kan leiden tot compacte reactoren. Ook wordt een zeer helder effluent afgeleverd zonder zwevende slibdeeltjes, wat interessant kan zijn voor hergebruik van het water. Het onderzoek van TNO richt zich op het oplossen van het probleem van membraanfouling. De flux door het membraan kan namelijk verminderen door adsorptie en afzetting van slib en anorganische en organische verbindingen. Met een laboratoriumschaal anaërobe membraanbioreactor worden verschillende membraantypen getest, alsmede verschillende preventieve methoden tegen fouling en (curatieve) schoonmaakprocedures.

Expertise

De eigen expertisegebieden zijn microbiologie, biotechnologie en proceskunde, toegepast in de ontwikkeling van biologische reinigingsprocessen voor (afval)water en gasstromen en fermentatieprocessen. Het expertisegebied van de afdeling Milieubiotechnologie is toegepast wetenschappelijk onderzoek naar biologische reinigingsprocessen voor (afval)water, gas en bodem en biotechnologische productie van chemicaliën. Hierbij zijn microbiologie, biochemie, moleculaire biologie en proceskunde belangrijke ondersteunende disciplines. Bovenstaand onderzoek wordt gedeeltelijk uitgevoerd in samenwerking met de afdelingen Procestechologie en Processen & Applicaties van TNO-MEP, waar meer chemisch technologische kennis aanwezig is.

Infrastructuur

Proefhallen waaronder een ex-proof (explosievrije) proefhal; 200 liter anaëroob trickling filter met pompen, compressor, voorraadvaten, buffervat, meetapparatuur (temperatuur, druk, pH, vloeistofdebieten, gasdebieten), data-acquisitie-apparatuur en veiligheidsstructuren, voor de productie van biowaterstofgas. De veiligheidsstructuren zijn regelkringen die informatie van sensoren die indicatoren van calamiteiten kunnen meten (o.a. verlies van gasdruk in de reactor, opgelost zuurstof in het water) koppelen aan explosievoorkomende acties (doorspoelen met stikstofgas, stoppen pompen); 5 liter UASB reactoren; 60 liter anaëroobe membraanbioreactor; Diverse vaten met roerders te gebruiken als bioreactor; Experimentele anaëroobe zuiveringsinstallatie in China met o.a. verzuringreactor van 45 m³, UASB reactor van 120 m³, gashouder, biogas/diesel elektriciteitsgenerator en apparatuur voor de terugwinning van zwavelverbindingen.

Laboratorium met o.a. handschoenenkasten, klimaatkamers, fermentoren, glazen kolommen, GC, GC-MS, HPLC, ionchromatograaf, autoclaven, microscopen, EM en SEM; Moleculaire biologie lab: VMT, gel-elektroforese, PCR apparatuur, etc.

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

Waterstof kan op diverse manieren biologisch uit biomassa worden gevormd. Door algen en fotoheterotrofe bacteriën, maar ook in donkere zuurstofloze fermentaties door mesofiele en thermofiele bacteriën. TNO richt zich op de laatste groep organismen wegens de hogere snelheid en het hoge omzettingsrendement. Dit kan leiden tot compacte bioreactoren. Uit voorstudies is gebleken dat waterstof geproduceerd via deze route goed kan concurreren in de 100 – 1000 m³ H₂/h range. Bij grotere stromen is *steam reforming* van methaan kosteneffectiever. In vergelijking tot fysisch-chemische vergassing is de biologische methode bovendien gunstiger voor natte biomassastromen. Ook de productie van een CO-loze gasstroom is gunstig indien het gaat om toepassing in bepaalde typen brandstofcellen. Biowaterstofgas kan worden gebruikt in fosforzure of polymere brandstofcellen voor de generatie van elektriciteit met een hoog rendement: 55%, tegen 30% bij elektriciteitsgeneratoren (gasmotoren) die met methaan worden gevoed. Biowaterstof kan worden geproduceerd in bepaalde typen bioreactoren, zoals door TNO in ontwikkeling. Deze productie heeft een decentraal karakter: een paar per stad. Naast H₂ wordt er een gasstroom met bijna alleen CO₂ geproduceerd, hetgeen interessant is indien koolstofsequestratie belangrijk wordt. Bijvoorbeeld transport van gecomprimeerd CO₂ en injectie in oude gasvelden. Het is gemakkelijker daarvoor gasstromen met hoge CO₂ concentraties te nemen dan te proberen CO₂ te winnen uit het verdunde afgas van elektriciteitscentrales. Verder wordt een waterstroom met azijnzuur geproduceerd. Deze stroom kan in een fotoheterotrofe reactor verder worden omgezet in waterstofgas of kan in een methaangistingsreactor worden omgezet in biomethaan. De eerste grote schaal demonstratie installatie (500 m³ H₂/h) met brandstofcel zal over 4 jaar gebouwd kunnen worden. De beschikbaarheid van geschikte biomassastromen is nog een punt van zorg. De ontsluiting van lignocellulose houdend materiaal kost wellicht teveel energie en is heden te duur, terwijl de volumestromen van gemakkelijk bewerkbaar en betaalbaar koolhydraathoudend materiaal (zoals aardappelstoomschillen) een geringe omvang heeft. Distributie van waterstof in de woonwijk of het gebruik van hiervan als transportbrandstof kan mogelijk worden op langere termijn (10 jaar).

De distributie van deze koolstofloze brandstof is gunstig t.o.v. alkanen: terwijl de brandstof decentraal en diffuus wordt verbruikt is de CO₂ centraal vrijgekomen in het productiebedrijf, hetgeen beter aansluit bij koolstofsequestratieprogramma's. Ook het produceren van biowaterstof uit afvalwater behoort tot de mogelijkheden die over 4 jaar gerealiseerd zouden kunnen worden. Energiewinning is dan de drijfveer. Het water moet dan nog steeds aëroob nagereinigd worden, zoals dit ook bij methaangisting het geval is. Een dergelijke nazuivering dient de resterende CZV en ammonium te verwijderen. Fosfaat kan zoals gebruikelijk voor een groot deel vooraf door chemische precipitatie worden verwijderd (in de voorbezinktank).

De productie van methaan in de vorm van biogas uit afvalwater en organisch afval is een technologie die veel verder ontwikkeld is dan de biowaterstof productie. Op het gebied van groenafval zullen composteringsinstallaties langzaam worden vervangen door anaërobe vergistingsinstallaties. De ontwikkelingen in de markt zijn te volgen uit keuzen die heden gemaakt worden: voor nieuwe installaties voor GFT verwerking wordt vaak gekozen voor anaërobe processen. Kinderziekten, pech en langlopende contracten met composteerbedrijven hebben deze opmars in Nederland wat vertraagd, maar deze zal doorzetten. Ook in de mestvergisting heeft Nederland tegenslag gehad bij het gebruik van grootschalige installaties, o.a. in de vorm van technische problemen en hoge verwerkingskosten. In het buitenland is men al lang verder, maar dan met kleinschalige installaties op de boerderij en op regionaal niveau (Denemarken). De verwachting is dat dit ook in Nederland weer populair gaat worden. Er zijn recent ook weer nieuwe projecten gestart. Op het gebied van afvalwaterreiniging bestaan in de wereld honderden anaërobe installaties. De methode is vooral geschikt voor geconcentreerd afvalwater uit landbouwproductonderwerkende industrieën en voor huishoudelijk afvalwater in tropische gebieden. Er moet nu vooral worden gewerkt aan moeilijker te verwerken industrieel afvalwater, zoals afvalwater met zwavelverbindingen, eiwitten, zwevende deeltjes, en afwijkende temperatuur, pH en zoutsterkte. Afvalwatersoorten die moeilijk granulerend of flocculerend slib vormen zouden behandeld kunnen worden met anaërobe membraanbioreactoren. Dit kan op korte termijn (3 jaar) worden geïmplementeerd. Wat meer ontwikkelingstijd (7 jaar) zal nodig zijn om in gematigde streken huishoudelijk afvalwater anaëroob te behandelen. De lage temperatuur en hoge verwarmingskosten beletten dat nu, maar het doel is zeer interessant: lagere slibproductie, winnen van energie via biogas, en goede mogelijkheden om ammonium en fosfaat terug te winnen (middels precipitatie met magnesiumoxide in de vorm van struviet, NH₄MgPO₄).

De combinatie van een thermofiel waterstofproducerend fermentatieproces plus een thermofiel biomethaanproces kan interessant zijn. De eerste stap produceert naast waterstofgas ook nog azijnzuur hetgeen in de tweede stap wordt omgezet in methaangas. Water en alkaliniteit worden gerecirculeerd over de twee reactoren, waarbij voortdurende opwarming en afkoeling van de circulerende stromen minder energie zal kosten dan de combinatie van een thermofiel fermentatieproces en mesofiel foto-hetrotroof proces.

Belangrijk bij de concurrentie om aanwending in elektriciteitsproductie zijn de rendementen waarmee elektriciteit kan worden gemaakt. Waterstof scoort nu nog hoger dan methaan, maar indien bij methaan een verbetering wordt gemaakt verslechtert de concurrentiepositie van waterstof. Waterstof heeft als transportbrandstof het voordeel boven methaan dat CO₂ niet diffuus wordt geëmitteerd, maar centraal bij de productiefactor. Dit centraal geproduceerde CO₂ moet dan wel worden opgeslagen of anders aangewend. Het winnen van CO₂ gaat gemakkelijker via biowaterstofproductie plus een brandstofcel dan via biomethaanproductie en verbranding van methaan met lucht. In dit concurrentiespel zijn beslissingen ten aanzien van de noodzaak om aan koolstofsequestratie te doen belangrijk, alsmede ontwikkelingen op het gebied van brandstofcellen. Biowaterstof en biomethaan kunnen een grote rol spelen bij de duurzame energieproductie. Door het gebruik van hernieuwbare plantaardige grondstoffen kunnen grote hoeveelheden CO₂ in een natuurlijke cyclus worden gebracht en zo bijdragen aan de verlaging van CO₂ emissie die in Kyoto is afgesproken. Naast het stoppen van de verhoging van CO₂ concentratie in de atmosfeer kan bij de biologische productie van waterstof nog een bonus

worden verdiend: de CO₂ kan gemakkelijk worden gebruikt voor koolstofsequestratie. Hierdoor kan de CO₂ concentratie in de atmosfeer zelfs worden verlaagd. Nederland heeft een beperkte stroom organisch afval. Indien grotere stromen biomassa nodig zijn ontkomt men niet aan het telen van energiegewassen of algen, desnoods gekweekt in dunbevolkte gebieden in het buitenland of de open zee. Echter, het gebruik van lignocellulose houdend materiaal en algen als grondstof voor biowaterstof en biomethaan behoeft nog veel ontwikkeling en kostenreductie. Het produceren van biomethaan uit afvalwater en vast organisch afval met als doel dit afval te verwerken heeft zich reeds ver ontwikkeld, maar voor een snelle verbreiding is nog een stuk optimalisatie nodig.

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Indien de rol van biowaterstof en biomethaan substantieel moet bijdragen aan een duurzame energieproductie dan zullen zeer grote biomassastromen aangeboord moet worden. Hout is dan een realistische kandidaat. Echter, hout dient eerst te worden omgezet in opneembare koolhydraten voor biologische processen. Onderzoek is vooral nodig naar betaalbare ontsluitingsmethoden voor ligno-cellulose. Op lange termijn zouden algen een tweede grote biomassastroom kunnen worden. Hier is de *bottle neck* de kosten en de ruimte die nodig is voor het kweken van algen. Een alternatief zou kunnen zijn het oogsten van algen uit oppervlaktewateren. De ontwikkeling van biowaterstofreactoren staat nog in de kinderschoenen. Er is nog veel microbiologisch en proceskundig onderzoek nodig voordat een stabiel kostenefficiënt proces beschikbaar is dat kan concurreren met andere waterstofproducerende technieken en tegen methaangisting. Zaken als eindproductremming en energiehuishouding in productiesystemen verdienen nog veel aandacht in donkere thermofiele waterstoffermentatie. Met name de verlaging van de waterstofconcentratie in productiereactoren is belangrijk in verband met eindproductremming. Deze concentratie zou verlaagd kunnen worden door waterstofgas uit de vloeistoffase te strippen, al dan niet in membraanmodules of door absorptie in metalen als palladium en nikkellanthaniden.

Bij biomethaanproductie moet R&D in het teken staan van verbreding van het toepassingsgebied wat betreft de mogelijke afvalwaterstromen en afvalsoorten en het kosteneffectief maken van de processen. Hiervoor is onderzoek nodig naar anaërobe microbiële consortia die onder bijzondere omstandigheden efficiënt zijn (hoge/lage temperatuur, hoge/lage pH, hoge zoutsterkte, hoge gehalten aan sulfide en ammoniak). Ook de omzetting van xenobiotica met anaërobe systemen verdient nog steeds aandacht. Hierbij vormen endocriene disruptors (stoffen met een hormonale werking) een nieuw aandachtsgebied. De anaërobe afbreekbaarheid van (nieuwe) chemicaliën, zelfs van biociden, behoort aandacht te krijgen. Bij het gebruik en lozing door bedrijven wordt nu meestal uitgegaan van afbreekbaarheid in aërobe zuiveringsinstallaties.

De terugwinning van chemicaliën uit afvalwater en afval wordt een nieuwe trend. Reactorconfiguraties die methaangisting combineren met sulfide- en ammoniakterugwinning zijn hierbij interessant. Nieuwe vormen van slibretentie (bijvoorbeeld membraanbioreactoren) kunnen interessant zijn in specifieke gevallen. De benodigde R&D zal meer dan ooit multidisciplinair zijn: kennis van biologische reacties en optimale reactiecondities moet worden gekoppeld aan kennis van chemische technologie.

In aktiefslibprocessen voor de reiniging van huishoudelijk afvalwater veroorzaakt de slibproductie (ook na een slibgisting) een grote kostenpost (30% van de zuiveringskosten). Als reactie daarop is het verbeteren van de slibgisting (anaërobe gisting van primair slib uit afvalwater plus spuislib uit aërobe biologische zuiveringsinstallaties) in de vorm van een hoger omzettingsrendement, en het vervangen van het aktiefslibproces door een anaëroob proces een nuttig onderzoeksgebied.

De biologische productie van waterstof en methaan hangen af van de bruikbaarheid van het substraat. Beide processen hebben moeite met complexe en onoplosbare substraten en

substraten die als zwevend stof (macrodeeltjes) voorkomen. De problematiek rond ligno-cellulose is reeds genoemd. Voor de ontsluiting en hydrolyse van ligno-cellulose zijn kostenefficiëntere methoden nodig. In lopende EET-projecten wordt gewerkt aan enzymatische hydrolyse voorafgegaan door een zwakzure hittebehandeling, een milde basische extractie en extrusie, of aan dekrystallisatie met geconcentreerd zwavelzuur (eventueel door impregnering met SO₃ gas) gevolgd door hydrolyse na toevoegen van water, waarbij sulfaat later in een afvalwaterzuiveringsinstallatie weer wordt teruggewonnen. De ontsluiting van deeltjes, zoals hele cellen (slib uit aërobe zuiveringsinstallaties), behoeft nog verbetering. Te denken valt aan voorbehandeling met hitte, ultrasoon geluid, mechanische krachten, enzymen of oxidatiemiddelen.

Er bestaat nog een reeks van organische verbindingen die niet kunnen worden gebruikt als substraat in anaërobe systemen voor de productie van methaan en waterstof. Voorbeelden zijn lignine, alkanen en complexe verbindingen zoals fragmenten van kleurstoffen. Hier kan wellicht een combinatie met andere afbraakprocessen en nuttige rol spelen, bijvoorbeeld advanced oxidation of aërobe biologische voor/nabehandeling.

Mogelijkheden voor stimulering van verdere ontwikkeling en implementatie

Het onderzoek bij TNO is toepassinggericht, waardoor ondersteuning nodig is van groepen met specifieke fundamentele kennis, vooral op het gebied van de microbiologie van anaërobe systemen. Meer kennis is nodig over mogelijke omzettingen en de condities waaronder deze plaats vinden, kinetische data (groeisnelheden, substraatconstanten) en competitie tussen groepen van micro-organismen. Voor het vakgebied als geheel is samenwerking tussen chemisch technologen en biologen belangrijk. Er moeten condities geschapen en/of in stand gehouden worden waarin deze samenwerking kan gedijen. Multidisciplinaire onderzoekinstellingen met verschillende disciplines op loopafstand zijn hierbij belangrijk, alsmede gesubsidieerde onderzoekprogramma's voor consortia van onderzoekinstellingen, bedrijven en overheidsinstellingen. Verder zijn congressen en andere bijeenkomsten belangrijk voor het leggen van contacten tussen experts met diverse achtergronden en zijn multidisciplinaire opleidingstrajecten nuttig voor de levering van deskundigen die kennis uit verschillende vakgebieden kunnen koppelen (zoals nu bij WUR en TUD).

Er moet een reden zijn voor verdere ontwikkeling en implementatie. Regelgeving van de overheid op het gebied van milieu en energie vormen een belangrijk element hierin. Vervuilers en energiegebruikers moeten een economische of vergunningstechnische drijfveer hebben om mee te werken aan de productie van biowaterstof en biomethaan. Hiernaast kan de overheid subsidies verstrekken.

Indien de overheid bescherming van het milieu wil onttrekken aan het marktmechanisme kunnen subsidies aan gebruikers van biowaterstof en biomethaan worden verstrekt. Dit is relevant indien het gebruik van deze brandstoffen economisch niet kan concurreren tegen het gebruik van fossiele brandstoffen. De ontwikkeling van productieprocessen voor biowaterstof en biomethaan dient met subsidies gefinancierd te worden in een omgeving waarin het gebruik van fossiele brandstoffen economisch nog steeds aantrekkelijk is en de economie van het alternatief nog onzeker is.

Goede opleidingstrajecten aan (Nederlandse) universiteiten zijn cruciaal voor het leveren van voldoende aantallen biotechnologische onderzoekers van een voldoende niveau. Hierbij speelt ook de image-vorming en interessevorming een rol ten aanzien van chemie, biotechnologie en milieu. Indien chemie, biotechnologie en milieu als nuttig en interessant worden gepresenteerd aan de samenleving en in het bijzonder aan aankomende studenten dan kan dat een positief hebben op studentenaanmeldingen (MSc en PhD) voor de betreffende studierichtingen en het niveau van het vakgebied. Samenwerking tussen partijen in het onderzoek – ontwikkeling – toepassingstraject is nodig. Omdat Nederland steeds minder een industrieland wordt en steeds meer een dienstenland dreigt die keten aan het eind zwakker te worden. Internationale oriëntatie is dan belangrijk. Er bestaan echter mechanismen die dit remmen, zoals chauvinisme in diverse

Europese landen, uurtariefverschillen en ontoegankelijkheid van nationale gesubsidieerde ontwikkelingsprogramma's. Voor het betrekken van bedrijven bij de ontwikkeling is in een vroeg stadium een schatting van de technische en economische haalbaarheid nodig. Bedrijven gaan een onderzoekstraject in als er kans is op een verkoopbaar eindproduct. Dit betekent dat er al in het begin aan procesontwerpen gedaan moet worden, maar dan met een reeks aannames. In het ontwikkelingstraject moeten de aannames met de grootste onzekerheid in combinatie met het grootste effect op de haalbaarheid het eerst worden bestudeerd. Bovendien is er beleid nodig dat de duur van financiering voor eenmaal gestarte onderzoeklijnen waarborgt. Immers, consortia gaan geen onderzoekstraject in indien er een grote kans is op afbreuk door politieke beleidsveranderingen bij ministeries en funding organisaties.

Subsidies voor onderzoeksinstituten en innovatieve bedrijven en regelgeving t.a.v. van de stimulering van duurzame energie zijn belangrijke overheidsinstrumenten die onderzoek en praktijktoepassing kunnen stimuleren. Voor biowaterstof en biomethaan is de samenwerking van microbiologen, (bio)processtechnologen en chemici nodig. Daarnaast is de expertise van landbouwkundigen en milieudeskundigen nodig inzake de grondstoffen (energiegewassen en afval).

2.11 Waterstof inzet in brandstofcellen

Ir. D. Jansen,
ECN - Unit Schoon Fossiel.

R&D projecten

1. IEA-H₂ Program Task 13: Design and optimization of integrated systems, tweede deel.

Looptijd: 01-06-1999 - 31-12-2001. Personele inzet: 1 fte per jaar.

Het doel van dit werk is de ontwikkeling en toepassen van een 'tool' als hulpmiddel bij de identificatie en evaluatie van nieuwe waterstofdemonstratie projecten en de optimalisatie van bestaande waterstof-demonstratieprojecten, gericht op de korte en middellange termijn (3-10 jaar). Het werk wordt uitgevoerd in het kader van het IEA H₂ Implementing Agreement, "Task 13, design and optimization of integrated systems", waarin ECN als Nederlandse partner NOVEM vertegenwoordigt.

De werkwijze is in samenwerking met de partners binnen het project (IEA Hydrogen Implementing Agreement, task 13) en vastgelegd in het "Program of work". Binnen IEA-H₂ task 13, met als operating agent de VS (NREL), zijn 4 activiteiten gedefinieerd:

Taak	Activiteitileider:
A1. Component model development and improvement	VS
A2. Cost model development	Canada
B1. Design and optimisation of hydrogen systems	Nederland
B2. Life cycle assessment.	Japan.

Binnen taak B1, waarin ECN een belangrijk rol speelt, worden bestaande en/of nieuw op te zetten systemen geanalyseerd en geëvalueerd. De systeemevaluaties dienen als demonstratie van de integrale tool.

Resultaten

Het internationale project heeft geresulteerd in een assesment tool voor geïntegreerde waterstof systemen. Deze tool wordt als afsluiting van de internationale samenwerking gebruikt in de evaluatie van een drietal systemen.:

- Autonom systeem op een eiland: Wind-waterstof (2 MWe wind turbines met electrolyse cellen voor waterstof productie

- Residential applications: waterstof in een woonwijk; decentrale waterstofproductie met lage temperatuur brandstofcellen voor warmte kracht productie op woning niveau.
- Transport toepassing. Waterstof in verkeer

2. Verkenning alternatieve waterstofproductie methoden”.

Looptijd: 01-06-2001 - 31-12-2001. Personele inzet: 0,8 fte (totaal).

Doel van deze studie is het in kaart brengen van de mogelijkheden om uit fossiele bronnen waterstof te genereren, eventueel onder gelijktijdige afvangst van aanwezig koolstof in de vorm van elementair koolstof dan wel kooldioxide. Op basis van deze inventarisatie zullen de mogelijkheden van een experimenteel programma bij ECN in kaart worden gebracht. Diverse technologieën voor de productie van waterstof zijn inmiddels gekarakteriseerd, waarbij op systematische wijze wordt onderzocht welke opties er zijn om de efficiency te verbeteren.

3. Waterstof productie uit fossiele transport brandstoffen voor vervoerstoepassingen.

In opdracht van grote industriële bedrijven wordt bij ECN R&D werk uit gevoerd voor de inzet van brandstofcellen (die waterstof nodig hebben) voor vervoerstoepassingen. Het betreft hier de ontwikkeling van een geïntegreerde Fuel processor voor de omzetting van fossiele transportbrandstoffen (in het voertuig) naar zuiver waterstof. Potentiële voordelen zijn: hogere efficiency, lagere emissies met name NO_x en CO₂ en lagere emissies van fijn stof (deeltjes < 10 micrometer). De omvang van deze werkzaamheden bedraagt meerder fte's per jaar.

4. Waterstof productie uit fossiele brandstoffen (aardgas) voor micro WKK systemen in de gebouwde omgeving.

In opdracht van grote industriële bedrijven wordt bij ECN R&D werk uitgevoerd voor de inzet van Brandstofcellen die waterstof nodig hebben, voor stationaire toepassingen. Het betreft hier de ontwikkeling van een geïntegreerde Fuel processor voor een 1 kWe brandstofcel.

De onder drie en vier genoemde projecten zijn onderdeel van een tweetal onderzoeksprogramma's van ECN Unit Schoon fossiel, te weten Micro WKK en BC-voertuigen. Beide programma's zijn gericht op de productie en inzet van waterstof uit fossiele brandstoffen waarbij de gevormde CO₂ op termijn kan worden opgeslagen in lege gasvelden of in kolenlagen. De term die hiervoor gebruikt wordt is "Schoon Fossiel". Bij ECN spreken we liever over klimaatneutrale inzet van fossiele brandstoffen.

5. Reversibele Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Energy storage by reversible electrolyser/ fuel cell.

Looptijd: 1/10/98-1/10/2001. Financiering: EU,EZ. Personele inzet; 0,2 fte.

The aim of the project is:

Demonstration of the feasibility of a reversible electrolyser/ fuel cell system with a reversible PEMFC and a hydrogen storage. The specifications of the system are:

- efficiency 40%
- power density in the fuel cell mode: 50-100 mW/cm²
- total stack power: 50-100 W
- endurance 500 hours and 500 cycles
- hydrogen storage capacity of 5 hours at an power of 50 W.

6. Haalbaarheidsonderzoek naar waterstofproductie.

De gemeente Amsterdam participeert in het Europese project Clean Urban Transport for Europe (CUTE) waarbij in 10 steden 30 door Daimler-Chrysler gebouwde stadsbussen worden ingezet die worden aangedreven met een brandstofcel. In kader van dit project zullen in 2003 drie brandstofcelbussen in Amsterdam gaan rijden. Onderzocht moet worden hoe waterstof, de

brandstof voor de brandstofcel, geproduceerd kan worden. Het gaat dan zowel om de waterstofproductie in de demofase (3 bussen) als wanneer (gefaseerd) het gehele wagenpark van het Gemeentelijke Vervoerbedrijf voorzien zal zijn van brandstofcelbussen (275 bussen). Door de Gemeentelijke Dienst Afvalverwerking (GDA) wordt met een afvalverbrandingsinstallatie energie geproduceerd (80 MW elektriciteit en 50 MW warmte) en vanaf 2006 ook biogas uit afvalwater (1.000 m³ gas/dag). In opdracht van GDA heeft ECN een studie uitgevoerd naar de mogelijkheden van waterstofproductie uit afval, c.q. van afval afkomstige energiedragers.

7. Mestvergisting in Combinatie met een Solid Oxide Fuel Cell.

Looptijd: 01.01.01 – 30.06.03. Personele inzet: 1 fte per jaar.

Een mestvergistingsinstallatie produceert methaanhoudend gas. Dit gas wordt nu in een gasmotor omgezet in warmte en elektriciteit. Het is de verwachting dat vervanging van de gasmotor door een SOFC brandstofcel resulteert in een lagere NO_x uitstoot, zonder gebruik te maken van nageschakelde technieken. Daarnaast zal door het verwachte hogere elektrische rendement een lagere CO₂-uitstoot per eenheid opgewekte elektriciteit worden bewerkstelligd. De techno-economische haalbaarheid van een dergelijk systeem is onbekend. Bovendien is niet aangetoond dat een met mestgas gevoede SOFC ook werkelijk een lagere NO_x-uitstoot oplevert.

Doel van het project:

Beoordeling van de technische en economische haalbaarheid van een SOFC-stack gekoppeld aan een mestvergistingsinstallatie (MVI) en beoordeling van de NO_x-emissie. De technische haalbaarheid dient te blijken uit laboratoriumexperimenten op gesimuleerd mestgas en testen op locatie waarbij een SOFC is gekoppeld aan een mestvergistingsinstallatie, met aandacht voor de prestatie, degradatie en milieurelevante emissies. De beoordeling van de economische haalbaarheid van het beoogde systeem en de gevoeligheid voor factoren als kostprijsontwikkeling, elektriciteitsprijs, leveringsvergoeding, investeringssubsidies en levensduur zal worden beschouwd.

Expertise ECN Unit Schoon Fossiel

- Waterstofproductie voor kleinschalige systemen
- Ketenganalyses
- Systeem analyses
- Katalyse
- Waterstofinzet in stationaire en mobiele toepassingen
- Brandstofcellen, systemen
- Procesintegratie
- Chemische analyses
- Reststoffen karakterisering en inzet- en verwerking
- Milieu analyses, integrale assessments

Infrastructuur

De unit beschikt over een groot aantal testinstallaties voor kleinschalige waterstof productie systemen op basis van fossiele brandstoffen (Aardgas benzine, diesel, methanol)

- Testfaciliteiten voor diverse typen brandstofcellen
- Testfaciliteiten voor processen voor de omzetting van fossiele brandstoffen naar waterstof

Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassing(en) en verwachte termijn van implementatie

De meerwaarde van waterstof

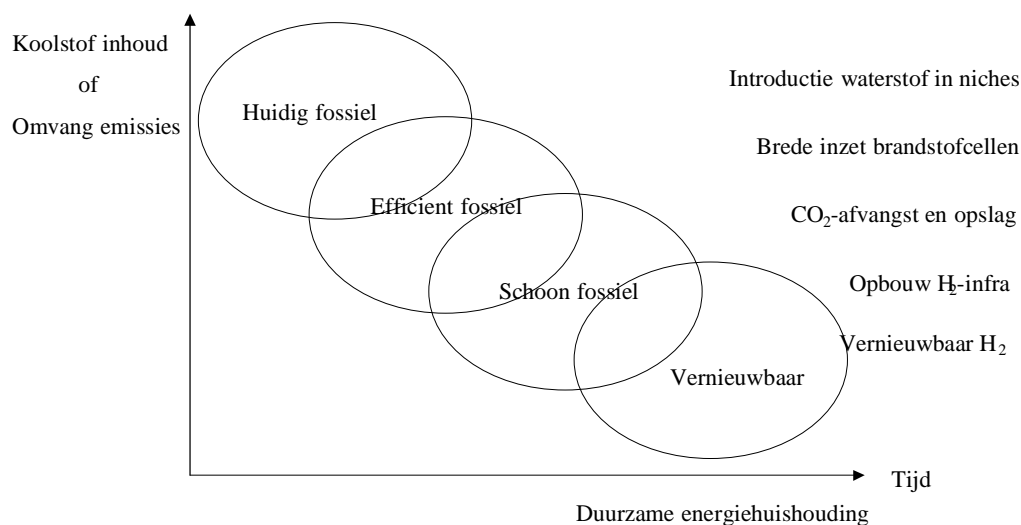
Waterstof als energiedrager heeft gunstige eigenschappen en biedt grote voordelen. Samengevat luiden deze:

- eenvoudig vanuit vernieuwbare bronnen te produceren (vernieuwbaar);

- in een transitieperiode zowel uit fossiele als vernieuwbare bronnen te produceren (transitieperspectief);
- goed te transporteren (voortbouwen op aardgasexpertise en -infrastructuur);
- emissievrij in te zetten bij eindgebruikers (brandstofcellen);
- efficiënt kleinschalig om te zetten in elektriciteit en warmte (brandstofcellen);
- flexibel, breed inzetbaar zowel in huishoudens, industrie als de vervoersector;

Met name vanwege de ongebondenheid aan een primaire energiebron en de universele inzetbaarheid in de verschillende sectoren van eindgebruikers, biedt het gebruik van waterstof als energiedrager de mogelijkheid tot fundamentele herinrichting en verknoping van de energieconversieketens waar onze huidige energievoorziening uit is opgebouwd. In plaats van energieconversieketens is dan sprake van energieconversienetwerken. Gebruik van waterstof biedt daarmee niet alleen uitzicht op innovatie en optimalisatie van schakels (productie, opslag/transport, eindgebruik) in energieconversieketens, of van afzonderlijke ketens, maar biedt ook uitzicht op geheel nieuwe ketens, en innovatie en optimalisatie van de energievoorziening als geheel.

Deze meerwaarde komt boven op de centrale rol die voor waterstof wordt gezien in de transitieperiode (figuur 3) van een energievoorziening die voornamelijk op fossiele bronnen is gebaseerd (tot 2010), naar één die voornamelijk is gebaseerd op vernieuwbare energiebronnen (na 2030). Waterstof vormt een essentieel onderdeel van een dergelijke energievoorziening.



Figuur 3 *Transitie scenario naar een duurzame energiehuishouding*

Vernieuwbaar: Bij winning van vernieuwbare energie, zoals zon, wind, waterkracht en biomassa, wordt in de meeste gevallen de primaire energie direct omgezet in de secundaire energiedrager elektriciteit. Bij grootschalige inzet van deze bronnen leidt dit tot problemen. Het sterk variabele en niet regelbare karakter, en de soms ongunstige geografische beschikbaarheid van deze bronnen, vereist opslag en transport van energie om de ongelijktijdigheid in vraag en aanbod op te kunnen vangen. Waterstof vormt hiervoor het aangewezen medium. Enerzijds vanwege de beperkingen die aan opslag en transport van elektriciteit zijn verbonden, en anderzijds vanwege de gunstige eigenschappen en voordelen die waterstof biedt.

CO₂-vrij fossiel ("Schoon fossiel"): De CO₂-vrije inzet van fossiele energiedragers is alleen mogelijk bij afvangst en vastlegging van CO₂. Afvangst van CO₂ kan na de conversie van de fossiele energiedrager naar elektriciteit plaatsvinden door afvangst uit de rookgassen (end-of-pipe). In meer innovatieve systemen zal de koolstoffractie echter vooraf uit de primaire

energiedrager worden verwijderd. Bij deze “ontkoling” van primaire fossiele energiedragers is waterstof het eindproduct.

Efficiënt Fossiel: Het gebruik van waterstof in combinatie met brandstofceltechnologie levert de mogelijkheid om centraal zowel als lokaal, en stationair zowel als mobiel, efficiënt en emissievrij elektriciteit (en warmte) te produceren voor eindgebruik. Het verzilveren van de kansen die deze technologie biedt, zowel milieutechnisch als economisch, is zeer gebaat bij de beschikbaarheid van waterstof als energiedrager.

Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Belangrijke R&D issues op het gebied van de brandstofceltechnologie zijn:

- verkleinen van fuel cel en opslag systemen voor mobiele toepassingen;
- ontwikkeling van massaproductietechnieken voor brandstofcellen, H₂ opslag systemen en brandstofreformers. Doel daarbij is dat via massaproductie de kosten per eenheid dalen en systemen tegen aanvaardbare prijzen op de markt kunnen worden gebracht.

R&D specifiek gerelateerd aan het gebruik van specifieke H₂ (en CH₄) stromen (zoals biologisch door fermentatie geproduceerde energiedragers) kan zich richten op:

- specificatie van de vereiste zuiverheid voor toepassing in brandstofcellen. Voor H₂ inzet in de huidige, lage temperatuur PEM cellen houdt fabrikant Ballard zeer stringente specificaties aan. Sulfiden < 1 ppm; dit is het meest kritisch vanwege de inactivering van de Pt katalystor door sulfiden; NH₃ < 1-2 ppm. H₂O mag in het gas aanwezig zijn. CO tot ca. 10 ppm.
- technische-economische haalbaarheidsanalyses van specifieke combinaties
- evaluatie van het netto ecologisch effect m.b.t. uitstoot CO₂ (en de potentiële rol van CO₂ sequestratie) NOx en andere milieuaspecten.

M.b.t. de inzet van bio-CH₄ en bio-H₂ in brandstofcellen is van belang dat de European Science Foundation in 2001 een Netwerk heeft opgezet onder de titel: Biomass fermentation towards usage in fuel cells (BFCNet). BFCNet richt zich op het ontwikkelen van een ‘knowledge base’ en (strategieën voor) Europese standaarden voor de combinatie van biomassa fermentatietechnologie en brandstofcellen. Website <http://www.bfcnet.info/> of via <http://www.esf.org>.

3. ORGANISATIE EN FINANCIERING VAN HET ONDERZOEK

De omvang (in fte's per jaar) en de financiering van de geïnventariseerde R&D projecten is weergegeven in Tabel 3. De projecten geven een representatief, dekkend beeld van (geheel of gedeeltelijk) met overheidsfinanciering (of andere publieke gelden) uitgevoerde R&D op het gebied van biologische H₂ en CH₄ productie bij de kennisinstellingen¹. Contractresearch voor bedrijven valt buiten de inventarisatie. De opgegeven capaciteit (fte) heeft uitsluitend betrekking op de eigen personeelsinzet, dus exclusief samenwerkingspartners.

Tabel 3 *Overzicht van geïnventariseerde R&D projecten*

Overzicht van geïnventariseerde R&D projecten op het gebied van Bio-H ₂ en CH ₄ productie									
Respondent	Instituut	Projecttitel	H ₂ /CH ₄	Looptijd	jaren	fte/jaar	financier(s)		
S.P.J. Albracht/B. Bleijlevens	UvA, SILS, Biochemie	Hydrogenasen: activering van H ₂ in de natuur	H ₂	onbepaald	nvt	2	EU		
P.A.M. Claassen	ATO bv	A novel bioprocess for hydrogen production from biomass for fuel cells "Biohydrogen"	H ₂	2000-2002	2	1,5	EU		
		Biologische Waterstof Productie "BWP"	H ₂	2000-2003	3	2	EET		
		Bio-energie uit waterstof en methaan in Wageningen fase 1	H ₂ & CH ₄	2001-2002	1	1	Novem / NECST		
W.R. Hagen	TUD, Biotechnologie	Biochemie van hyperthermofielen (optimale groei)	H ₂	onbepaald	nvt	4,5	TUD / NWO-CW bilaterale projecten, int. samenw.		
		Biotechnologie van hyperthermofielen	H ₂	onbepaald	nvt	1,7	TUD / STW/EU		
J.T. Keltjens	KU Nijmegen, Microbiologie	Vorming en verbruik van biologische waterstof in fermentatieve systemen	H ₂	onbepaald	10	3	KUN / SLW-NWO		
A.J.M. Stams	WU-Microbiologie	Biological hydrogen production from agro-industrial residues	H ₂	2000-2002	2	1	EU		
		Biologische waterstofproductie "BWP"	H ₂	2000-2003	3	1	EET		
		Microbiële omzetting van koolmonoxide naar waterstof	H ₂	2000-2004	4	1	STW		
		Thermofiele waterstofvorming bij eiwitafbraak	H ₂	-2005	4	1	WU		
I. Akkerman R.H. Wijffels	De Nieuwe Delta/ WU-Proceskunde	A novel bioprocess for hydrogen production from biomass for fuel cells "Biohydrogen"	H ₂	2000-2002	3	1	EU		
		Biologische waterstofproductie "BWP"	H ₂	2000-2003	3	1,4	EET		
G. Zeeman	WU - Milieutechnologie	Decentrale Sanitatie	CH ₄	2001-2007	6	1,4	EET		
		Gescheiden behandeling van faeces en urine in decentrale concepten	CH ₄	2001-2004	3	1,2	STOWA		
		CORETECH	CH ₄	2000-2003	3	0,6	EU		
		WASTEVAL	CH ₄	1999-2003	4	3,2	IOP-SAIL		
		Anerobic treatment of domestic sewage in developing countries	CH ₄	1998-2003	5	0,75	WOTRO / WUR		
		Optimisation of the removal capacity of UASB systems for varying hydraulic and organic loading rates	CH ₄	2000-2004	4	1,1	WOTRO/WUR		
		Optimization of an anaerobic treatment for pig wastewater	CH ₄	1994-2003	9	0,5	BAU-Chiang-Mai / WUR		
		Utilisation of agricultural and food processing wastes for production of energy and valuable products: application to the situation in Egypt	CH ₄	2000-2004	4	1,1	Overheid Egypte		
		J.B. van Lier	Lettinga Associates Foundation	Kosteneffectieve regeneratie van heet proceswater t.b.v. de papier- en celstofproductie	CH ₄	1997-2003	6	2,6	EET
				Thermofiele omzetting van methanolhoudend afval- en proceswater naar CH ₄	CH ₄	1999-2003	4	1,1	Overheid Brazilië
Anaerobe behandeling van kleurstofhoudend afvalwater uit de textielindustrie	CH ₄			2001-2005	4	1,1	Overheid Brazilië		
Anaerobe behandeling van azo-kleurstoffen	CH ₄			1998-2002	4	1,5	EET		
Optimalisatie van zware metalen dosering bij anaerobe afvalwaterzuivering	CH ₄			2000-2004	4	1,3	STW		
Microbiële CO conversie naar waterstof als biologisch alternatief voor de chemische 'shift' reactie	H ₂			2000-2004	4	1,1	STW / Paques		
J. van Groenestijn	TNO - MEP	Biologische waterstof productie	H ₂	2000-2003	3	0,8	EET / TNO		
		Promoting environmental technologies in tanneries of Huai river basin	CH ₄	1998-2003	5	1,2	Min. BuZa		
		Anaerobe membraanbioreactoren	CH ₄	1999-2004	5	0,6	TNO / Grontmij		
				Totaal		43,25			
				H ₂		23			
				CH ₄		19,25			
				H ₂ + CH ₄		1			

Uit Tabel 3 blijkt dat vrijwel alle onderzoek plaatsvindt in projecten met een looptijd van 4 jaar of korter. Ook het onderzoek aangemerkt met looptijd 'onbepaald' wordt in de praktijk gefinancierd via korter lopende projecten (AIO's; postdocs) van 2-4 jaar. De totale personeelsinzet bedraagt 43 fte waarvan 23 fte voor bio-H₂ gerelateerd onderzoek en ca. 20 fte voor CH₄ onderzoek. Financiers die meerdere malen voorkomen zijn: EU (3 projecten), EET (3), STW (3), en NWO (2). De omvang van het (gesubsidieerde) CH₄ onderzoek is in fte's ca. 20% lager dan het bio-H₂ onderzoek. Op CH₄ gebied wordt ook contractresearch gedaan (niet opgenomen in de inventarisatie) voor bedrijven die opereren op deze markt (o.a. Paques, Haskoning, Grontmij, Biothane) en die ook hun eigen R&D capaciteit hebben (geraamd op ca. 10 fte).

¹ Volgens de respondenten zijn in de NL Contactgroep Bio-H₂ alle R&D instellingen met relevant onderzoek vertegenwoordigd. Alle Contactgroepeelers (op een na) nemen deel aan de inventarisatie.

De financieringsbronnen voor CH₄-gerelateerd onderzoek zijn zeer divers. Financiers die vaker vóórkomen zijn EET en STW. Relatief veel CH₄ projecten worden uitgevoerd (vaak PhD projecten) in het buitenland, gefinancierd door overheden (Midden-Oosten, Brazilië), ontwikkelingsorganisaties (WOTRO) en het Ministerie van Buitenlandse Zaken. De financiering van het bio-H₂ gerelateerde onderzoek is veel minder divers. De belangrijkste financiers zijn de EU (ca. 6 fte), EET (4 a 5 fte), NWO (ca. 4) en STW (2). Een groot deel van het onderzoek wordt gefinancierd door de EU (1 project, 6 fte) en EET (1 project, 4 a 5). Ongeveer de helft van het bio-H₂ onderzoek vindt derhalve plaats in het kader van deze 2 projecten.

Over de gehele linie is het aandeel van langer lopend fundamenteel onderzoek (eerste geldstroom, NWO financiering) zeer beperkt. In het CH₄ gerelateerde onderzoek is NWO financiering geheel afwezig. Ook uit de inhoud van CH₄ projecten blijkt het sterk toegepaste karakter van het onderzoek.

Betrokkenheid van wetenschap- en technologie-organisaties en marktpartijen

In het kader van deze inventarisatie werd ook informatie verzameld t.a.v. de belangstelling van (met name) wetenschaps- en technologieorganisaties en bedrijven voor de ontwikkeling op bio-H₂ en bio-CH₄ gebied. Hieruit ontstaat het volgende beeld.

De ontwikkeling van waterstoftechnologie en –infrastructuur heeft internationaal hoge prioriteit, o.a. in het EU 6^e Kader Programma. In Nederland wordt de ontwikkeling geïntensiveerd via het NWO ‘Sustainable Hydrogen’ Programma met actieve deelname van de energiesector (Shell, Nuon, Gasunie Kema, ECN, Utrechts Centrum voor Energieonderzoek (UCE), Biomass Technology Group (BTG), EZ). Het programma heeft een lange termijn visie en richt zich op kennislacunes in de keten voor duurzame H₂ inzet, m.n. H₂ opslag. Het programma is bedoeld voor de financiering van H₂ gerelateerd onderzoek aan universiteiten in samenhang met de R&D in de deelnemende bedrijven. Via STW lopen enkele projecten maar vooralsnog is er geen specifiek H₂/CH₄ programma.

De energiesector is nauw betrokken bij de ontwikkelingen op H₂ gebied. Shell Hydrogen is deelnemer in het EET project Biologische waterstofproductie (BWP). In dit project nemen ook partijen deel met het oog op gebruik van biomassa en reststromen als grondstof voor duurzame energieproductie (Agromiscanthus, Duynie).

Voor een partij als Gasunie is op lange(re) termijn methaan/aardgasinzet vooral op grote(re) schaal van belang. Productie van ‘groene’ methaan (SNG) is dan ook zeer wenselijk, bijv. via grootschalige, thermische vergassing en methanisering van biomassa, waarna het ‘groene aardgas’ verder op druk wordt gebracht (70 bar) en in het gasnet kan worden bijgemengd. Gasunie neemt in dit kader deel in het EET Project Hydrovergassing. Bijmengen van (opgewerkt) bio-CH₄ als ‘groen aardgas’ in het hoofdaardgasnet is niet rendabel door de kosten van gasreiniging en het op druk brengen (70 bar). Bijmenging van waterstof in het aardgasnet is vooralsnog om technische en economische redenen niet aan de orde. Er is beperkte belangstelling voor biologische H₂ productie omdat deze zich nog in de R&D sfeer bevindt.

Anaërobe CH₄ vergisting is een gevestigde technologie die in Nederland wordt toegepast voor met name de zuivering van industriële afvalwaterstromen en de stabilisatie van zuiverings-slib. Anaërobe vergisting van vaste afvalstromen zoals GFT (Biocel) en de organische fractie van huisvuil (VAGRON, De Spinder, recent Heerenveen) is in Nederland nog beperkt ontwikkeld door het grote aandeel van compostering voor de verwerking van deze stromen. Het aantal installaties wordt echter gestaag uitgebreid. Anaërobe vergisting van mest is in Nederland recent weer in opkomst (Biorek, De Scharlebelt, maar blijft nog sterk achter vergeleken met andere EU landen (Denemarken, Duitsland).

In Nederland is sprake van een toenemende belangstelling voor en betrokkenheid van energiebedrijven bij vergistingsprojecten (bijv. mestvergisting De Scharlebelt) in het kader van de stimulering van ‘groene energie’ productie.

4. INTERNETPLATFORM WWW.BIOHYDROGEN.NL

De inventarisatie diende tevens voor het verzamelen van de wensen van de onderzoekers t.a.v. inhoud, functionaliteit enz. voor het op te zetten Internet platform, en 'contents' voor de website (o.a. links). Op basis van de geïnventariseerde wensen werd het platform www.biohydrogen.nl vormgegeven in de periode augustus t/m november 2002 door Topshare BV in samenwerking met de betrokken onderzoekers en hoofduitvoerder ECN. Het platform werd opgeleverd per 6 november 2002.

Address: <http://www.biohydrogen.nl/everyone>

BIOHYDROGEN

This is the entrance to several Dutch and European hydrogen projects.
The focus is on biological production of hydrogen from biomass.

Info

This platform offers a dedicated environment for sharing information on biological production of hydrogen from biomass and communication on hydrogen topics. It provides access to various (international) Biohydrogen projects and the activities of *The Netherlands Biohydrogen Network*. It also addresses related developments and hydrogen applications.

News

- US National Hydrogen Roadmap unveiled by Secretary of Energy
- Steps toward a hydrogen society

Biohydrogen Projects

STAIRWAY TO HYDROGEN

The objective of this proposed Integrated Project for FP6 is the cost-effective production of hydrogen from biomass. The focus is on benchmarking of technologies for (Photo)fermentation, anaerobic digestion and thermochemical conversion of biomass to hydrogen.

BIOHYDROGEN

The main objective of this EU project is the production of hydrogen from Sweet Sorghum and paper sludge employing (hyper)thermophilic and photoheterotrophic microorganisms. The focus is on optimizing microbial physiology and genetics.

HYDROGEN FROM BIOMASS

This Dutch project aims at the production of hydrogen from *Miscanthus* hydrolysates and potato steam peels. The focus is on optimizing processtechnology for maximum productivity.

WATERSTOF WAGENINGEN

This Dutch project is a feasibility study addressing the production of biohydrogen and methane from potentially available biomass in the region Wageningen, for the production of 'green' electricity, heat and gas (in Dutch).

Links addressing

- Hydrogen in general
- Fuel cells
- Sustainable energy
- Microbiology
- Dutch websites

Hydrogen Gas
Proton
Electron
Oxygen

Events

- 2003, 2-5 sept European Hydrogen Energy Conference (*Grenoble*)
- 2002, 18-21 Nov. Fuel Cell Seminar (*Palm Springs*)
- 2003, 6 Jun-4 Jul. Fuel Cell 2003 (*Lucerne*)

More events ->>

The Netherlands Biohydrogen Network

NETHERLANDS BIOHYDROGEN NETWORK

Researchers involved in basic and applied aspects of biological H₂ and CH₄ production participate in the Netherlands Biohydrogen Network. The objectives are to promote (international) exchange and R&D co-operation, and to provide expertise for government & the market sector.

WAGENINGEN LR

- Laboratory of Microbiology
- Environmental Technology
- Food & Bioprocess Engineering

Manuscripts

- Energy aspects of biological hydrogen ...
- Pretreatment of *Miscanthus* for hydrogen ...
- Utilisation of biomass for the supply of ...

More manuscripts ->>

Posters

- Photobioreactor development at ECN
- Fermentative hydrogen production under ...
- Hydrogen production from acetic acid with ...

More posters ->>

Figuur 4 Portal platform www.biohydrogen.nl

De biohydrogen 'portal' (Figuur 4) biedt publieke toegang tot:

1. Nieuwsberichten, die betrekking hebben op (bio)hydrogen en meer algemene H₂ onderwerpen. Deze berichten worden regelmatig vernieuwd.

2. 'Public pages' van verschillende biohydrogen georiënteerde projecten t.w. EU Project 'Biohydrogen', EET Project Hydrogen from biomass, 'Waterstof Wageningen' en (sinds kort) het EU Integrated Project initiatief 'Stairway to hydrogen'.
 3. Links. Een groot aantal websites met biohydrogen en H₂ georiënteerde onderwerpen kan worden bereikt.
 4. Events. Een kalender met relevante symposia, congressen etc.
 5. De public page van de Nederlandse Contactgroep Biologische H₂ productie
 6. De websites van de deelnemende R&D-instellingen en NOVEM.
 7. Manuscripten, die door verschillende participanten van de contactgroep zijn gepubliceerd.
 8. Posters, die op verschillende congressen zijn gepresenteerd door verschillende deelnemers van het platform.
- Manuscripten en posters kunnen als pdf file door eenieder worden gedownload.

Figuur 5 Public page Netherlands Biohydrogen Network (NL Contactgroep Biologische H₂ productie)

De public page van de Nederlandse Contactgroep Biologische H₂ productie (Figuur 5) biedt toegang tot

1. Een beschrijving van achtergrond en doelstellingen.
2. De adressen van de verschillende deelnemers, en een beschrijving van hun expertise.
3. Publicaties en verslagen (IEA Expertmeetings, bijeenkomsten, NWV).

4. Websites van de International Energy Agency: Hydrogen Program, Greenhouse Gas R&D program etc.
5. Contactpersonen

Het platform bestaat uit twee verschillende “lagen”. De bovenste “laag” is openbaar toegankelijk zonder dat men zich hoeft te registreren. De public page van de *Nederlandse Contactgroep Biologische Waterstofproductie* is publiek toegankelijk. De tweede laag is publiek toegankelijk na registratie. Deze tweede laag wordt bereikt door in te loggen met een zelf gekozen password. Binnen de tweede laag hebben geregistreerde personen toegang tot kennis, documenten e.d. over biohydrogen, die binnen verschillende projecten is gegenereerd. De hoeveelheid toegankelijke kennis is afhankelijk van de ‘rechten’ van de geregistreerde persoon. Deze ‘rechten’ kunnen worden ingesteld door de beheerder(s) van het platform. Daarnaast is het mogelijk om na inloggen over verschillende onderwerpen met andere geregistreerde personen een discussie te voeren, of relevante documenten up of down te loaden.

De software (TopShare BV) biedt mogelijkheden voor interactieve kennisuitwisseling. Daarnaast kan door deze software de website eenvoudig en permanent, inhoudelijk worden verrijkt en ‘ge-update’ door de gebruikers zelf. De mogelijkheid om kennis uit te wisselen via een interactieve website is aantrekkelijk, waarvoor een voortdurende inspanning nodig is van de gebruikers voor het leveren van (nieuwe) informatie voor de website, updates etc. Er is een kerngroep gevormd (bestaande uit *Contactgroepleden*) om hierin te voorzien. De ingerichte website zal in de toekomst worden gecontinueerd door de *Dutch Biological Hydrogen Foundation*.

5. CONCLUSIES

5.1 Onderzoek en expertise

Onderzoek en expertise op het gebied van biologische waterstof en methaan productie staan op een kwalitatief hoog peil. De belangrijkste expertise gebieden m.b.t. bio-H₂ zijn:

- waterstofenzymen;
- biochemie en biotechnologie van hyperthermofielen;
- (hyper)thermofiele H₂ fermentaties;
- regulatie van H₂ en CH₄ metabolisme;
- bioproces- en reactorontwikkeling;
- fotobiologische waterstofproductie.

De expertise in het CH₄ onderzoeksveld omvat:

- fundamentele en toegepaste microbiologie;
- bioprocestechnologie;
- reactorontwikkeling: behandeling afvalwater, slurrie en vast afvalvergisting;
- conceptontwikkeling; ketenbeheer;
- sluiten van kringlopen; hergebruik & integratie met andere disciplines.

Gezien het vóórkomen van zowel gedeelde als complementaire expertise biedt samenwerking tussen de twee werkgebieden een duidelijke meerwaarde.

Personeelsinzet en financiering

Vrijwel alle publiek gefinancierd onderzoek vindt plaats in projecten met een looptijd van 4 jaar of korter. De totale personeelsinzet bedraagt 43 fte waarvan 23 fte voor bio-H₂ gerelateerd onderzoek en 19 fte voor CH₄ onderzoek (H₂ & CH₄ 1 fte) De financieringsbronnen voor CH₄ onderzoek zijn zeer divers en relatief veel projecten worden uitgevoerd in/met het buitenland. De financiering van het bio-H₂ onderzoek is veel minder divers: de helft van de R&D vindt plaats in twee projecten (EU, EET). Over de gehele linie is het aandeel van langer lopend fundamenteel onderzoek beperkt.

5.2 Betekenis voor duurzame ontwikkeling, toepassingen en implementatietermijn

Biologische Waterstofproductie

- *Ontwikkeling van katalysatoren gebaseerd op de 'active site' van hydrogenasen*

De recente opheldering van de (geheel anorganische) structuur van het katalytische centrum van natuurlijke waterstofenzymen (hydrogenasen) opent de weg naar ontwikkeling van goedkope synthetische ('biomimetische') waterstofkatalysatoren. Op afzienbare termijn (20 jaar) kunnen deze de kostbare Pt katalysator in het waterstofdeel van elektrolyse- en brandstofcellen vervangen. Voordelen boven Pt elektroden zijn de ruime beschikbaarheid van de elementen, de lagere prijs en de ongevoeligheid voor CO, wat vaak als verontreiniging in technisch H₂ gas voorkomt. Daarnaast bestaat de mogelijkheid van ontwikkeling van zg. 'hybride' systemen waarin fysisch/chemische en biologische componenten (zoals hydrogenasen) worden gecombineerd.

Stimulering van het onderzoek naar de biologische metaalkatalysatoren en de daarop gebaseerde synthetische katalysatoren is ook van belang voor verbetering (energiegebruik, emissies) van belangrijke chemische omzettingen (N₂ naar NH₃, mogelijk direct gebruik van CH₄ in lage temperatuur brandstofcellen). Ook is het reducerend vermogen van hydrogenasen te gebruiken voor de productie van fijn- en bulkchemicaliën door natuurlijke reactiepaden om te keren.

Sommige chemische hydrogeneringsreacties zijn ‘moeilijk’; een biotechnologisch alternatief zou - indien eenvoudiger en specifiek - dan ook zeer welkom kunnen zijn. Een alternatieve benadering is om hele organismen te gebruiken (vaak stabiel en goedkoper dan gezuiverde enzymen) en deze te modificeren ter aanpassing aan bioprocestechnologische randvoorwaarden.

- *Hernieuwbare waterstofproductie*

De productie van energiedragers uit biomassa en reststromen kan een belangrijke bijdrage leveren aan het conserveren van fossiele energiebronnen en het terugdringen van het broeikaseffect. Biologische vorming van waterstof is nog in ontwikkeling, maar zal in de toekomst aan belang toenemen. Aangezien transport van biomassa een negatief effect heeft op de overall energie balans zullen H₂ (of H₂/CH₄) productiesystemen decentraal gevestigd worden met een beperkte schaalgrootte. Op kleinere schaal (tot ca 1000 m³/H₂/uur) worden economische voordelen verwacht t.o.v. alternatieve H₂ productie technieken, zoals steam-reforming. Algemene voordelen van waterstof zijn o.a. de emissievrije inzet bij eindgebruikers en de hoge efficiëntie van elektriciteits- en warmteproductie in brandstofcellen, ook op kleine schaal. Biologische waterstofproductie heeft als voordeel dat CO₂ tijdens de productie kan worden opgeslagen. Biowaterstof kan worden geproduceerd in bepaalde typen bioreactoren, zoals in ontwikkeling bij TNO. In dit concept wordt naast H₂ een gasstroom met bijna alleen CO₂ geproduceerd, hetgeen interessant is indien koolstofsequestratie belangrijk wordt. Omdat deze CO₂ uit biomassa afkomstig is kan zo een ‘bonus’ worden verdiend.

Biologische methaanproductie

- *Duurzame ontwikkeling door toepassing van anaërobe zuivering*

Bio-CH₄ productie uit afval en afvalwater resulteert in de volgende milieuvoordelen:

- Voorkómen van energieverbruik tijdens de zuivering (in vergelijking met aërobe afvalwaterzuivering; aërobe compostering).
- Terugwinnen van energie, dat kan worden ingezet als energiebron (“Groene” energie).
- Reductie van methaanemissies tijdens opslag (met name bij dierlijke mest).
- Mogelijkheid tot sluiten van kringlopen van water en nutriënten.

Anaërobe zuivering van afval(water) wordt momenteel reeds op uitgebreide schaal toegepast. Anaërobe zuivering/gisting is echter een relatief nieuwe technologie, welke zeker nog niet overal geaccepteerd is. Voorwaarde voor daadwerkelijke technologie implementatie is kosteneffectiviteit en gesubsidieerde marktintroductie aangaande nieuwe toepassingen. Innovaties worden argwanend bekeken tenzij er de mogelijkheid bestaat de markt te overtuigen met een demonstratie of praktijkschaal project. Kenniscentra kunnen hierbij een belangrijke adviserende rol spelen. Organisatie van gespecialiseerd workshops en ontwikkelen van beleidlijnen kunnen daarnaast een belangrijke bijdrage leveren aan verdere toepassing van anaërobe systemen. Voor de Nederlandse situatie geldt dat vervanging van composteringsinstallaties voor vastafval door anaërobe vergistinginstallaties, het aandeel bio-CH₄ productie aanzienlijk kan verhogen. Als gevolg van toename van de biogasproductie per geïnstalleerd reactor volume, zal toepassing van covergisting van mest met energierijke additieven, de economische haalbaarheid van mestvergisting verhogen. Daarmee zal het potentieel aan bio-CH₄ productie sterk toenemen.

5.3 Belangrijke R&D issues en onderzoeksrichtingen

Biologische waterstofproductie

- *Werkingsmechanisme van hydrogenasen*

Hoewel de structuur van het actieve centrum van hydrogenasen voor de activering van waterstof is opgehelderd, zijn de logica erachter en het werkingsmechanisme nog volledig onbegrepen. Daarvoor is fundamenteel chemisch onderzoek naar het werkingsmechanisme nodig door chemici en biochemici. Voor de ontwikkeling van waterstofkatalysatoren is nog veel ontwikkeling nodig op het grensvlak van biochemie, chemie en materiaalkunde.

- *Microbiologische water-gas shift reactie: verdiepend onderzoek aan koolmonoxide dehydrogenase (COdh) enzymen.*

Recent zijn de eerste structurele data van twee COdh's beschikbaar gekomen. Het actieve centrum vertoont gelijkenis met dat van hydrogenase maar de betekenis van deze structurele analogie is niet duidelijk. Dit is een interessante vraagstelling voor coördinatie chemie/homogene katalyse specialisten. COdh's zijn metabool gekoppeld aan hydrogenasen en beide enzymen zijn van belang voor het microbiële equivalent van de chemische water gas shift reactie.

- *Lichtinvangsystemen*

Een belangrijk thema is fundamenteel onderzoek naar de invang en de opslag van zonne-energie door alle betrokken wetenschapsgebieden. Het onderzoek in Nederland aan de fotosynthetische katalysecentra in groene planten en fotosynthetische organismen verdient extra steun. Een diepgaand begrip van de werking van de biologische opvang en de initiële opslag van zonne-energie in de natuur, zal eveneens kunnen leiden naar de ontwikkeling van verfijnde systemen voor lichtinvang.

- *Optimalisatie van waterstoffermentaties (productiviteit, waterstofafvangst)*

Er is nog veel microbiologisch en proceskundig onderzoek nodig voordat een stabiel kostenefficiënt proces beschikbaar is dat kan concurreren met andere waterstofproducerende technieken. Belangrijke thema's zijn het optimaliseren van de volumetrische productiviteit van fermentatieve H₂ productieprocessen (fysiologie, proces- en bioreactorontwikkeling), eindproductremming en energiehuishouding in productiesystemen. Een cruciaal R&D issue is het realiseren van waterstofafvangst tot zeer lage partiaalspanning. Anaërobe micro-organismen hebben de biochemische potentie om organische verbindingen volledig om te zetten naar waterstof en kooldioxide. Er zijn echter thermodynamische beperkingen ten gevolge van de vorming van waterstof. Volledige omzetting naar waterstof is alleen mogelijk bij een zeer efficiënte verwijdering van de gevormde waterstof, beneden kritisch lage grenzen. Hiertoe is nog veel onderzoek nodig op het gebied van fysische methoden om waterstof te verwijderen of in te vangen. De concentratie zou verlaagd kunnen worden door waterstofgas uit de vloeistoffase te strippen, al dan niet in membraanmodules of door absorptie in metalen als palladium en nikkellanthaniden.

- *Ontsluiting en hydrolyse van grondstoffen en reststromen.*

Een obstakel voor biologische conversieprocessen ligt in de omzetting van complexe biopolymeren in monomeren die door micro-organismen kunnen worden geconverteerd. Dit geldt met name voor ruim beschikbare lignocellulose bevattende grondstoffen. Momenteel zijn hiervoor geen economisch en ecologisch verantwoorde processen beschikbaar. Zowel fysisch/chemische, biochemische (enzymatische hydrolyse) en gecombineerde technologieën komen in aanmerking. De ontwikkeling dient gericht te zijn op een zo hoog mogelijke opbrengst van fermenteerbare monomeren bij een minimaal gebruik van hulpstoffen en energie tegen zo laag mogelijke kosten. Effectieve en milieuvriendelijke ontsluitingstechnologie kan ook een rol spelen bij optimaliseren van processen waarin producten voor biomaterialen geproduceerd worden (bio-raffinage).

Voor wat betreft waterstofvorming middels anaërobe fermentaties wordt met name gekeken naar de omzetting van suikerhoudende polymeren (zetmeel, cellulose). Er wordt te weinig onderzoek gedaan naar de omzetting van andere biopolymeren, zoals eiwitten en vetten.

- *Waterstoffermentaties onder alkalische condities*

Voor de ontkoppeling van H₂ en CH₄ productie is in de natuur een uitgeëvolueerde, robuuste oplossing voorhanden via fermentatie bij hoge(re) pH (10-11). Hierbij zijn micro-organismen betrokken, die o.m. worden aangetroffen in het spijsverteringsstelsel van de kakkerlak. De hoge(re) pH leidt tot een energetisch gunstige snel verlopende reactie, minder besmettingsproblemen en afwezigheid van (H₂-consumerende) methaanbacteriën. Alkalische processen hebben als bijkomend voordeel dat een reiniging van het gas niet nodig is. Het belangrijkste gasvormige bijproduct van bacteriële fermentaties, CO₂, blijft in het systeem

gevangen als carbonaat. Ook is er minder of geen H₂S verwijdering uit de gasfase vereist omdat S bij pH > 8 in oplossing blijft als S²⁻ of HS⁻.

- *Fotoheterotrofe fermentaties / fotobioreactoren / lichtinvang en -geleidingssystemen*

Mogelijke toepassingen van fotoheterotrofe processen (fermentatie m.b.v licht) liggen op het gebied van relatief eenvoudig afbreekbare organische, verdunde stromen. Fotoheterotrofe processen zijn nog in de ontwikkelingsfase. Rendementen en productiviteit zijn nog te laag waardoor de kosten van een proces hoog zijn. Veel onderzoek is derhalve noodzakelijk voordat het proces toegepast kan worden, op een termijn van 10-20 jaar. Aandachtsgebieden zijn:

- fotochemische efficiëntie: het rendement waarmee lichtenergie omgezet wordt in waterstofgas;
- volumetrische productiviteit zodat het proces kan plaats vinden in compacte bioreactoren;
- invanging en transport van licht naar de reactor.

Invanging van licht is een problematisch proces. In principe is het mogelijk in een gasdicht systeem licht in te vangen via een lichtinvangend systeem (lenzen of spiegels) en licht te transporteren naar de fotobioreactor middels glasvezels. De ontwikkeling van fotobioreactortechnologie (lichtinvang- en transmissiesystemen, reactordesign en -geometrie) kan spin-off hebben voor biotechnologische toepassing van fototrofe micro-organismen zoals microalgen of (bijv.) fotochemische processen.

Biologische methaanproductie

- *Extreme milieucondities*

Bij biomethaanproductie moet R&D in het teken staan van verbreding van het toepassingsgebied wat betreft de mogelijke afvalwaterstromen en afvalsoorten. Hiervoor is onderzoek nodig naar anaërobe microbiële consortia die onder bijzondere omstandigheden efficiënt zijn (hoge/lage temperatuur, hoge/lage pH, hoge zoutsterkte, hoge gehalten, hoge concentraties toxische stoffen). Door verdergaande waterbesparingen en kringloopsluitingen zullen interne zuiveringen onder steeds extremere condities moeten kunnen functioneren. Kringloopsluiting zal in toekomst meer en meer worden toegepast hetgeen het belang van onderzoek naar BioCH₄ productie onder extreme condities nogmaals onderstreept.

- *Hydrolyse van complexe polymere substraten*

Een ander aandachtsveld is de biologische ontsluiting van vaste bestanddelen en/of moeilijk afbreekbare verbindingen. Vaste bestanddelen ondergaan een hydrolytische splitsing alvorens ze kunnen worden vergist. Inzicht in hydrolyse is met name van belang bij de behandeling van vast afval, slurries en rioolwater en agrarisch afvalwater met veel gesuspendeerde organische stof (b.v. slachthuisafvalwater, visafvalwater) waar de hydrolyse de snelheidsbeperkende stap vormt binnen het totale proces. Vet vormt een belangrijke component binnen vele afval(waterstromen), kan een belangrijk additief zijn bij covergisting, en heeft bovendien een hoge energiewaarde. Fundamenteel onderzoek op gebied van anaërobe hydrolyse, met speciale aandacht voor vetten is van belang om de vergistingscondities en randvoorwaarden voor vergisting van complexe substraten te kunnen aangeven en daarmee de gasopbrengst te verhogen. Lignine is onder anaërobe condities niet afbreekbaar, en beperkt bovendien de toegankelijkheid tot cellulose. Onderzoek dat leidt tot betaalbare ontsluitingsmethoden voor ligno-cellulose kan resulteren in een aanzienlijke verhoging van het bio-methaan potentieel.

- *Kringlopen*

Biologische processen, en met name anaërobe processen spelen een belangrijke rol bij het sluiten van kringlopen zowel in industrieën maar zeker ook in de publieke sanitatie. Het is van belang dat hele ketens in ogenschouw worden genomen en niet alleen gedeelten daarvan. De integratie tussen sanitatie en landbouw is hierbij een zeer belangrijk aspect en vraagt om verder onderzoek. Om het sluiten van kringlopen mogelijk te maken is integratie met andere disciplines van cruciaal belang (b.v. fysisch chemische processen, irrigatie, microbiologie, agrotechnologie, bio-proceskunde, kennis van productie processen, bedrijfskunde, economische richtingen, sociologie, planning etc).

- *Xenobiotica*

De omzetting van xenobiotica met anaërobe systemen verdient meer aandacht. Hierbij vormen endocriene disruptors (stoffen met een hormonale werking) een nieuw aandachtsgebied. De anaërobe afbreekbaarheid maar ook gecombineerde anaërobe / aërobe afbreekbaarheid van (nieuwe) chemicaliën zelfs van biociden behoort tot de aandachtsgebieden. Bij het gebruik en lozing door bedrijven wordt nu meestal uitgegaan van afbreekbaarheid in aërobe zuiveringsinstallaties.

5.4 Stimulering van ontwikkeling en implementatie van biologische waterstof- en methaanproductie

Multidisciplinaire samenwerking

De wens/noodzaak van multidisciplinaire samenwerking wordt algemeen benadrukt. Dit wijst erop dat de beschikbare financierings- en projectvormen hiervoor onvoldoende ruimte bieden.

Voor het hydrogenase-onderzoek en de ontwikkeling van biomimetische waterstofkatalysatoren is samenwerking met de anorganische chemie en vooral de synthetisch-organische chemie, van groot belang. Er is weinig contact tussen de werelden “bio” en “materialen” (biologen, biochemici enerzijds en materiaalkundigen, elektrochemici, vaste stof fysici anderzijds). Ook voor de ontwikkeling van hybride systemen hoewel het goed mogelijk is dat er zinvolle toepassingen van biologische systemen in de vorm van hybride systemen zullen komen zoals elektroden/hydrogenase combinaties en combinaties van hydrogenase met TiO₂, Graetzellen e.d. Bij dit type ontwikkeling is de integratie van biochemische en materialenkennis van essentieel belang.

Voor de verdere ontwikkeling van H₂ fermentatieprocessen is integratie nodig van deelgebieden zoals fermentatie, bioprocestechnologie en chemische technologie. Dit vraagt kennis op het gebied van productie van biomassa, (bio)procesontwerp, materiaaltechnologie, gastecnologie, apparatenbouw, brandstofcellen en chemie.

Voor de ontwikkeling van fotobiologische waterstofproductie is samenwerking van belang tussen moleculair biologen, microbiologen, procestechnologen en optisch ingenieurs. Vooral met moleculair biologen en met optisch ingenieurs voor systeemontwikkeling voor invang, geleiding en aanbod van licht aan de reactoren.

Anaërobe methaangistingsprocessen zullen meer en meer worden ingebed in kringloopsystemen en indien mogelijk gesloten watercircuits. Dit vereist een verdergaande integratie van diverse vakgebieden. Voor een verdere ontwikkeling van het vakgebied is een nauwe samenwerking tussen verschillende expertisegebieden onontbeerlijk. Daarnaast dient een inbedding van het Nederlandse onderzoek in een internationaal netwerk verder gestalte te krijgen.

- *Rol van bedrijven in de ontwikkeling*

Bedrijven kunnen een rol spelen in de ontwikkeling van biologische waterstofproductie indien zij bereid zijn een veelal lange(re) termijn van ontwikkeling (> 5 jaar) te aanvaarden. Veel biologische processen voor energieconversie, N- en S-recycling e.d. zijn op laboratoriumschaal reeds beschikbaar. Voor opschaling van deze processen is samenwerking nodig met engineering firma's en apparatenbouwers.

- *Integratie van afvalverwerking en energieproductie*

Op het ogenblik zijn de ‘energiewereld’ en de ‘afvalwereld’ grotendeels gescheiden. De potentie van organische afvalstromen als uitgangsstof voor energieproductie wordt nog te weinig onderkend. Middels een Nationaal Onderzoeks Programma zouden deze twee werelden dichter bij elkaar gebracht kunnen worden.

- *Stimulering van kenniscentra*

Erkende expertise of kenniscentra kunnen een stimulerende rol spelen als organisator, coördinator en mede uitvoerder van gespecialiseerde workshops en ontwikkelen van beleidslijnen. Organisatie van workshops leiden tot informatieverspreiding, kennisvergaring en formuleren van adviezen richting subsidiegevers en/of technologieafnemers. Wat betreft het

onderhavige vakgebied kan b.v. het H₂/CH₄ platform of de stichting LeAF een coördinerende rol spelen.

- *Subsidiëring*

Alternatief aan de huidige opzet kan worden voorgesteld de beschikbare onderzoeksgelden te verdelen op basis van expertise en geleverde prestaties. De huidige tenderopzet bij diverse programma's leidt tot veel verlies van dure tijd en desinteresse om te tenderen. Stimulering middels gesubsidieerde samenwerking tussen bedrijven, producenten en probleembezitters zoals geformuleerd in het EET programma van EZ, VROM en OC&W blijft een belangrijk instrument. In de huidige opzet leidt de verplichte eigenbijdrage, echter tot grote problemen bij met name de universiteiten. Zowel voor de direct gefinancierde onderzoeksprojecten alsmede subsidiëring van kenniscentra is de rol van de overheid van groot belang.

- *Regelgeving*

Regelgeving van de overheid op het gebied van milieu en energie vormen een belangrijk element tot stimulering van verdere ontwikkeling. Vervuilers en energiegebruikers moeten een economische of vergunningstechnische drijfveer hebben om mee te werken aan de productie van bio-energie.

- *Opleidingen*

Goede opleidingstrajecten aan (Nederlandse) universiteiten zijn cruciaal voor het leveren van voldoende aantallen biotechnologische onderzoekers van een voldoende niveau. Aan een kant dient zorg gedragen te worden voor het behouden van excellent wetenschappelijk personeel op universiteiten middels overheidsfinanciering (meer 1e geldstroom geld) anderzijds dienen aankomend studenten te worden gestimuleerd tot het kiezen van meer Bèta en milieugerichte studies.

6. AANBEVELINGEN

Versterking is aan te bevelen van het fundamenteel en toepassingsgericht onderzoek op de geïdentificeerde gebieden. De belangrijkste R&D thema's voor het biologisch waterstof onderzoek zijn:

- onderzoek naar het reactiemechanisme van hydrogenasen en ontwikkeling van hiervan afgeleide waterstofkatalysatoren;
- microbiologische water-gas shift reactie; verdiepend onderzoek aan koolmonoxide dehydrogenase (COdh) enzymen;
- ontwikkelen van ontsluitings- en hydrolysetechnologie,
- optimaliseren van de volumetrische productiviteit van fermentatieve en fotobiologische H₂ productieprocessen;
- ontwikkelen van technieken voor afvangst van H₂ tot zeer lage H₂ partiaalspanning,
- fotobioreactorontwikkeling
- ontwikkeling van lichtinvangs- en geleidingssystemen.

Voor het biologisch methaan onderzoek zijn de belangrijkste thema's:

- verbreding van het toepassingsgebied van anaërobe zuivering voor extreme milieucondities;
- anaërobe afbraak van xenobiotica;
- hydrolyse van complexe polymere substraten;
- inzet van de technologie voor het sluiten van kringlopen in de industrie en de publieke sanificatie.

Het aandeel langer lopend, fundamenteel onderzoek is over de gehele linie (zeer) beperkt en veel lopend onderzoek vindt plaats in projecten met een looptijd van 4 jaar en korter. Meer langer lopend onderzoek is aan te bevelen voor de ontwikkeling op specifieke gebieden die lange(re) termijn R&D vereisen (voorbeeld: het hydrogenase onderzoek) en om de bestaande expertise en infrastructuur te behouden en te versterken. Algemeen is van groot belang het creëren van continuïteit in het onderzoek door langere financieringstermijn en/of verdeling van beschikbare fondsen op basis van expertise en geleverde prestaties ter vervanging van de huidige tenderopzet van het merendeel van de subsidieprogramma's.

Het is gewenst de mogelijkheden na te gaan voor de vorming van een Nationaal Programma of Prioriteitsgebied op relevante speerpunten (bijv. 'biologische energiedragers'), met betrokkenheid van NWO, overheden, R&D sector en bedrijfsleven. Zo'n aanpak draagt tevens bij aan de continuïteit in het onderzoek en multidisciplinaire samenwerking. In dit kader kan ook de vorming van een Top Instituut een rol spelen, waarbinnen de belangrijke spelers van universiteiten, R&D instituten en bedrijven hun expertise bundelen om nieuwe duurzame processen te ontwikkelen.

De vorming van expertisecentra is aan te bevelen. Erkende expertise- of kenniscentra kunnen een stimulerende rol spelen als organisator, coördinator en (mede)uitvoerder van gespecialiseerde workshops en het ontwikkelen van beleidslijnen.

Gerichte aandacht is benodigd voor het versterken en in stand houden van opleidingen. Goede opleidingstrajecten aan (Nederlandse) universiteiten zijn cruciaal voor het leveren van voldoende aantallen biotechnologische onderzoekers van een voldoende niveau. Aan een kant dient zorg gedragen te worden voor het behouden van excellent wetenschappelijk personeel op universiteiten middels overheidsfinanciering (meer 1e geldstroom geld) anderzijds dienen aankomende studenten te worden gestimuleerd tot het kiezen van meer Bèta en milieugerichte studies.

Regelgeving en beleid van de overheid op het gebied van milieu en energie vormen een belangrijk element ter stimulering van de verdere ontwikkeling. Ontdoeners van reststromen en energiegebruikers moeten een economische of vergunningstechnische drijfveer hebben om mee te werken aan de productie van bio-energie. Via beleidsmaatregelen (waaronder subsidiëring van 'groene' energie) kan de integratie van de afvalverwerkings- en energiesector worden bevorderd. Subsidiëring van de productie van duurzame energiedragers middels microbiële fermentaties zal de komende 10 jaar nodig blijven, ook om verdere ontwikkeling van deze processen te stimuleren.

BIJLAGE A ADRESSENLIJST NEDERLANDSE CONTACTGROEP BIOLOGISCHE H₂ PRODUCTIE / DEELNEMERS AAN DE INVENTARISATIE

Deelnemers aan de inventarisatie zijn aangegeven met *

Naam	Organisatie	Postadres	Plaats	Telefoon	e-mail
Dr. S.P.J. Albracht*	Swammerdam Institute for Life Sciences/ Biochemistry - Universiteit van Amsterdam	Plantage Muidergracht 12	1018 TV Amsterdam	020 - 525 5130	a311siem@chem.uva.nl
Prof. Dr. A.J.M. Stams*	Laboratorium voor Microbiologie Wageningen Universiteit	H. van Suchtelenweg 4	6703 CT Wageningen	0317 - 483101	fons.stams@wur.nl
Ir. H. Goorissen	Laboratorium voor Microbiologie Wageningen Universiteit	H. van Suchtelenweg 4	6703 CT Wageningen	0317 - 483741	heleen.goorissen@wur.nl
Dr. ir. P.A.M. Claassen*	ATO- Business Unit Renewable Resources Dept. Bioconversion	Postbus 17	6700 AA Wageningen	0317 - 475325	pieternel.claassen@wur.nl
Dr. T. de Vrije	ATO- Business Unit Renewable Resources Dept. Bioconversion	Postbus 17	6700 AA Wageningen	0317 - 475315	truus.devrije@wur.nl
Dr. ir. R.H. Wijffels*	Wageningen Universiteit Agrotechnologie en Voedingwetenschappen/ Sectie Proceskunde	Postbus 8129	6700 EV Wageningen	0317 - 484372	Rene.Wijffels@wur.nl
Dr. ir. M. Janssen	Wageningen Universiteit Agrotechnologie en Voedingwetenschappen/ Sectie Proceskunde	Postbus 8129	6700 EV Wageningen	0317 - 483396	Marcel.Janssen@wur.nl
Ir. A. de Groot Ir. D. Jansen*	Energieonderzoek Centrum Nederland ECN Unit Schoon Fossiel	Postbus 1	1755 ZG Petten	024 - 564106	a.degroot@ecn.nl
Ir. E. van Zessen	Energieonderzoek Centrum Nederland ECN Unit Biomassa	Postbus 1	1755 ZG Petten	0224 - 564954	vanzessen@ecn.nl
Prof. Dr. W. R. Hagen*	Kluyverlaboratorium voor Biotechnologie Technische Universiteit Delft	Julianalaan 67	2628 BC Delft	015 - 2785051	W.R.Hagen@tnw.tudelft.nl
Dr. J.T. Keltjens*	Afdeling Microbiologie/Faculteit NWI Katholieke Universiteit Nijmegen	Tournooiveld 1	6525 ED Nijmegen	024 - 3653437	jankel@sci.kun.nl
Dr. ir. T.A. Hansen	Biomolecular Sciences & Biotechnology Institute Rijks Universiteit Groningen	Postbus 14	9750 AA Haren	050 - 3632163	T.A.Hansen@biol.rug.nl
Prof. Dr. L. Dijkhuizen	Biomolecular Sciences & Biotechnology Institute Rijks Universiteit Groningen	Postbus 14	9750 AA Haren	050 - 3632153	l.dijkhuizen@biol.rug.nl
Dr J. W. van Groenestijn*	TNO Environment, Energy and Process Innovation Department of Environmental Biotechnology	P.O. Box 342	7300 AH Apeldoorn	055 - 5493765	J.W.vangroenestijn@mep.tno.nl
Dr. G. Zeeman*	Wageningen Universiteit- Sectie Milieutechnologie	Postbus 8129	6700 EV Wageningen	0317 - 484241	Grietje.Zeeman@wur.nl
Dr. J. van Lier*	Lettinga Associates Foundation - LeAF	Postbus 500	6700 AM Wageningen	0317 - 483243	jules.vanlier@wur.nl
VOORZITTER: Dr. H. Barten	NECST/NOVEM	Postbus 8242	3503 RE Utrecht	030 - 2393467	h.barten@novem.nl
SECRETARIS: Drs. J.H. Reith	Energieonderzoek Centrum Nederland ECN Unit Biomassa	Postbus 1	1755 ZG Petten	0224 - 564371	reith@ecn.nl

BIJLAGE B FORMAT VRAGEN / ONDERWERPENLIJST

Format vragen-/onderwerpenlijst:

- Lopende R&D projecten
 - Titel + korte beschrijving van de inhoud/doelstelling
 - Projectleider/looptijd/financiering/personele inzet/budget per jaar en over de gehele looptijd
 - Resultaten/status
- Bestaande samenwerkingsverbanden
- Visie op toepassing(en): type proces/systeem, termijn van implementatie
- Meerwaarde voor duurzame ontwikkeling, incl. nevenfuncties + -producten
- R&D issues + kansrijke nieuwe onderzoeksrichtingen
- Voorwaarden/stimulansen voor verdere ontwikkeling en implementatie
- Gewenste samenwerking / expertise
- Andere projecten/ R&D groepen met relevant onderzoek
- Andere relevante contacten: bedrijven, beleid, financieringsbronnen
- Sleutelpublicaties
- Internationale contacten, relevante websites e.d.
- Wensen t.a.v. uitvoering/mogelijkheden voor Internet 'knowledge-sharing platform'