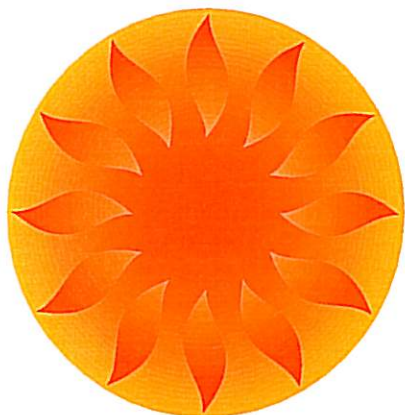


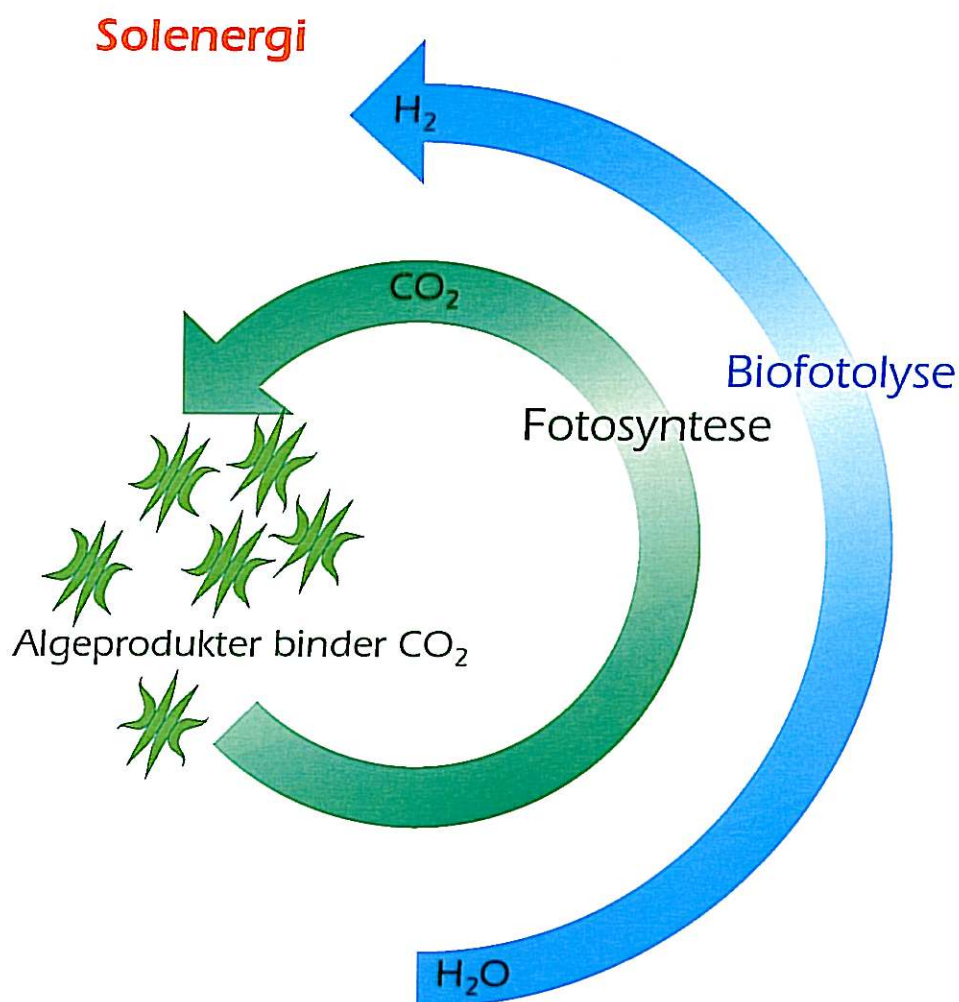
AKT

Algekulturateknologi

Eksperiment- og
produksjonsanlegg for
mikroalger i Vestfold



Delrapport **1**:
CO₂-binding og
H₂-produksjon



Norges forskningsråd (NFR):
FoU-programmet KLIMATEK.
Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp

Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 1
4890 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

Tittel Algekulturteknologi. Eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold. Delrapport I: CO ₂ -binding og H ₂ -produksjon.	Løpenr. (for bestilling) 3989-99	Dato 1999.01.04
	Prosjektnr. Undernr. 98001 01	Sider Pris 56
Forfatter(e) Olav Skulberg Torsten Källqvist	Fagområde Algekulturteknologi	Distribusjon
	Geografisk område Norge	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Norges forskningsråd – FoU-programmet KLIMATEK	Oppdragsreferanse 125117/230
--	---------------------------------

<p>Sammendrag</p> <p>Norges forskningsråd tilrettelegger en virksomhet i FoU-programmet KLIMATEK (Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp) for forskning og utprøving av aktuelle teknologier som kan gi praktisk betydningsfull reduksjon av CO₂-utslipp og andre klimagasser. I forbindelse med problemstillingene til KLIMATEK innebærer Algekulturteknologi (AKT) to hovedstrategier: Massedyrking av mikroalger for konvertering av CO₂ til bioenergi og/eller råvarer for produkter fremstilt via fossilt brensel, og massedyrking av mikroalger for produksjon av hydrogengass som energibærere. Ved tilrettelagt produksjon og høsting av mikroalger i spesielle anlegg kan CO₂ fra forbrenning av fossile karbonkilder omsettes til verdifull algebiomasse og samtidig bidra til å redusere utslipp av klimagasser. Det beregnede produksjonspotensialet for mikroalger i Sør-Norge tilsvarer et CO₂ opptak på ca 40-60 tonn ha⁻¹år⁻¹. Det er i 1998 utført forsøk med to industrielle CO₂-kilder i Vestfold; Ezzo Norge AS på Slagentangen og FORESTIA Agnes AS i Larvik. Resultatene indikerer at avgass fra begge kildene er egnet for produksjon av mikroalger.</p> <p>Den teknologiske anvendelse av biofotolyse til hydrogengassproduksjon omfatter i forsøkssammenheng bruk av blågrønnalger (cyanobakterier) eller grønnalger i aktive kulturer med vann som hydrogenkilde, eller fotosyntetiserende bakterier med organisk stoff eller hydrogensulfid som hydrogenkilde. Det praktiske siktepunktet er å oppnå en energieffektivitet på ca 10%.</p> <p>Med realisering av et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold vil det kunne bli skaffet praktisk grunnlag for positiv og betydningsfull forskningsinnsats i Norge når det gjelder biofotolyse/hydrogengassproduksjon. Konvertering av CO₂ fra røygasser via mikroalger med hydrogengassproduksjon bør inngå som et viktig element for utvikling av algekulturteknologi i norsk sammenheng.</p>
--

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mikroalger 2. CO₂-konvertering 3. Biofotolyse 4. H₂-produksjon 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Microalgae 2. CO₂-converting 3. Biophotolysis 4. H₂-production
---	---


Prosjektleder

ISBN 82-577-3586-8


Forskningssjef

O-98001

Algekulturteknologi

Eksperiment- og produksjonsanlegg
for mikroalger i Vestfold

Delrapport 1

CO₂-binding og H₂-produksjon

Oslo, 04.01.1999

Olav Skulberg
Torsten Källqvist

"To supply man's current power demands would require an area of the Earth's surface only one thirtieth of that already under cultivation. Even to supply projected future energy needs of the increased population with a "developed" standard of living would need less land than we already use for agriculture. It is possible that desert or arid land could be used; the amount of water needed stoichiometrically for photosynthesis is far less than a plant normally demands."

- om solenergi og fotosyntese

Sir George Porter (1989)

Forord

I mikroalgenes egenskaper og sammensetning ligger realisérbare muligheter for kommersiell og samfunnsmessig nytte. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) har gjennom sin funksjonstid bygget opp en kultursamling av mikroalger med potensiale for slik utnyttelse. Gjennom målrettet forskning og utvikling ønsker NIVA å danne faglig forutsetning for en norsk næringsvirksomhet basert på forretningsmessig utnyttelse av mikroalger.

Mikroalgene, som tilhører planteriket, utnytter solenergi til sin vekst via fotosyntesen. I dette ligger en praktisk mulighet til å utnytte CO₂-innholdet i avgasser fra prosessindustri som vekstgrunnlag i dyrkingsanlegg for mikroalger. Dette var bakgrunnen for etableringen av forprosjektet "Algekulturateknologi" (AKT); *Ekspériment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold*. Prosessindustri i Vestfold er vurdert som CO₂-kilder.

Forprosjektet er 50% finansiert av Norges forskningsråd, under Klimatek-programmet. Program-koordinator har vært Asle Lygre (fram til 01.06.98) og Hans-Roar Sørheim, begge fra Christian Michelsen Research AS. Øvrige finansører: Esso Norge AS, Vestfold Energitjenester, Larvik kommune, Vestfold fylkeskommune, samt de faglige prosjektdeltagerne NIVA, Næringsssenteret i Vestfold (NIV), Stiftelsen Østfoldforskning (STØ) og Avløpsambandet Nordre Øyeren (ANØ).

Nøkkelpersoner i forprosjektet har vært:

Gunnar Fr. Aasgaard (prosjektleder), ANØ

Gunnar Strømmen (assisterende prosjektleder), NIV

Torsten Källqvist (faglig leder), NIVA

Haakon Thaulow (adm. prosjektansvarlig og leder av referansegruppen), NIVA

Resultatene av forprosjektet presenteres i 5 delrapporter og en sammendragsrapport.

NIVA har vært ansvarlig for Delrapport 1: *CO₂-binding og H₂-produksjon*. Prosjektmedarbeidere hos NIVA har vært Olav Skulberg og Torsten Källqvist.

Oslo, 04.01.99

Gunnar Fr. Aasgaard
(prosjektleder)

Torsten Källqvist
(faglig leder)

Innhold

Sammendrag	8
Abstract	11
1. Innledning	12
2. Problemstilling og faglig tilknytning	12
3. Bakgrunn og naturgitte prinsipper	14
4. CO₂-binding i alger	16
4.1. Grunnleggende forutsetninger for kontrollert produksjon av mikroalger	16
4.2. Produksjonspotensiale	21
4.3. Omfang av CO ₂ -binding	23
4.4. Anlegg for produksjon av mikroalger	24
4.4.1. Åpne dagslysreaktorer	25
4.4.2. Lukkede reaktorer basert på dagslys	27
4.4.3. Lukkede kunstlys-reaktorer	29
4.4.4. Reaktorer for immobiliserte alger	30
4.5. Systemer for CO ₂ - tilførsel	30
4.6. Utprøving av aktuelle CO ₂ -kilder i Vestfold	31
4.6.1. Esso Slagentangen	32
4.6.2. FORESTIA Agnes, Larvik	34
5. Algekulturteknologi og H₂-produksjon	36
5.1. Teoretisk grunnlag	36
5.2. Konvertering av CO ₂ via mikroalger med hydrogengassproduksjon	38
5.3. Organismer og prosesser	38
5.3.1. Hydrogengassproduksjon med grunnlag i grønnalger og hydrogenase	39
5.3.2. Hydrogengassproduksjon med grunnlag i blågrønnalger og nitrogenase	40
5.4. Teknologiske løsninger	41
5.4.1. Oversikt	41
5.4.2. Eksempel på dyrkingssystem med immobiliserte celler av blågrønnalger	42
5.4.3. Eksempel på dyrkingssystem med cellekultur av grønnalger	42
5.4.4. Utviklingsperspektiv	43
5.5. Norsk forskning med biofotolyse for hydrogengassproduksjon	45
5.6. Internasjonalt forskningssamarbeid om biofotolytisk hydrogengassproduksjon	46
5.6.1. Annex 10 of the IEA Hydrogen Implementing Agreement	46

5.6.2. Fortsatt forskningsvirksomhet om hydrogengassproduksjon/biofotolyse	47
6. Sammenfattende vurdering	49
7. Referanser	51

Figuroversikt

Figur 1.	Algekulturteknologi som virksomhetsområde i et overordnet samfunnsperspektiv.	13
Figur 2.	Massedyrking av mikroalger. Vekst- og produksjonsforhold.	17
Figur 3	Biomassetetthet og produksjon ved kontinuerlig drift av en algereaktor i ca. to måneder.	18
Figur 4.	Innvirkning av lysinnstråling på veksthastighet hos en alge.	18
Figur 5.	Lysinnstråling og veksthastighet av alger som funksjon av dyp i en algekultur som belyses gjennom overflaten.	20
Figur 6.	Modellsimulering av algevekst i en algereaktor.	20
Figur 7.	Modellsimulering av produksjon av alger som funksjon av dybde og biomassetetthet	21
Figur 8.	Beregnet potensiell maksimumsproduksjon gjennom året i en 25 cm dyp algereaktor med ulike biomassetetthet.	22
Figur 9.	Beregnet potensiell produksjon av mikroalger i Sør-Norge basert på målt lysinnstråling på Blindern.	23
Figur 10.	Skisse av et åpent produksjonsanlegg av typen kanalsystem (raceway) med tre separate reaktorer.	25
Figur 11.	Algereaktor av ”skråplan-typen”, Třeboň, Tsjekkia.	26
Figur 12.	Skisse av panelreaktor av pleksiglass med vertikale kanaler for kontinuerlig produksjon av mikroalger (NIVA).	27
Figur 13.	Algereaktor for konvertering av CO ₂ . Sementfabrikk, Elbingerode, Tyskland (Preussag AG).	28
Figur 14.	Skisse av lukket kunstlysreaktor med intern lyskilde.	29
Figur 15.	Produksjon av mikroalger immobilisert på fiberduk (Tyskland).	30
Figur 16.	Forsøksoppsett for algebiotest av avgass fra Esso Slagentangen	32
Figur 17.	Vekstforløpet i algekulturer gjennomboblet med luft og med avgass fra Esso Slagentangen.	33

- Figur 18.** Biomassetetthet og produksjon i en algereaktor med testalgen *Selenastrum capricornutum* i perioder med tilsetning av ren CO₂, henholdsvis CO₂ fra to avgasstyper fra FORESTIA Agnes, Larvik. 35
- Figur 19.** Prinsippskisse for sammenhengen mellom biofotolyse, fotosyntese og respirasjon knyttet til stoffkretsløpene for hydrogen og karbon. 37
- Figur 20.** Fotobioreaktor konstruert ved NIVA for masseproduksjon av blågrønnalger til biofotolyse-forsøk. 42
- Figur 21.** Skisse av hypotetisk anlegg for konvertering av karbondioksid via mikroalger til biomasse og hydrogengass. 44
- Figur 22.** Integrering av systemer for mikroalgedyrking til CO₂-binding ved kraftverk basert på fossilt brensel. 50

Sammendrag

Innledning

- Det er en generell erkjennelse av at begrensning av menneskeskapt utslipp av klimagasser er nødvendig for å stabilisere nivået av disse gassene i atmosfæren. Miljøverndepartementet har i St.meld. nr. 29 (1997-1998) bl.a. formulert behovet for den reduksjonen av CO₂-utslipp som er nødvendig i Norge for oppfølging av Kyotoprotokollen.
- Norges forskningsråd tilrettelegger en virksomhet innenfor FoU-programmet KLIMATEK (Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp) for forskning og utprøving av aktuelle teknologier som kan gi praktisk betydningsfull reduksjon av CO₂-utslipp og andre klimagasser. Forprosjektet som behandles i denne rapporten inngår i slik sammenheng.

Problemstilling

- Utvikling av teknologi som kan ta hånd om CO₂, og innebærer utslippsreduksjoner, er betydningsfull i miljømessig og samfunnsmessig vurdering.
- Fotosyntetiske mikroorganismer utgjør en ressurs med betydelig potensiale for praktisk utnyttelse. Algekulturteknologi (AKT) går ut på å anvende mikroalger til økonomiske produksjonsformål. I forbindelse med problemstillingene til KLIMATEK innebærer AKT to hovedstrategier:
 1. Massedyrking av mikroalger for konvertering av CO₂ til bioenergi og/eller råvarer for produkter fremstilt via fossilt brensel.
 2. Massedyrking av mikroalger for produksjon av hydrogengass som energibærer.

Bakgrunn

- En hovedkonklusjon fra konferansen UNCED i Rio de Janeiro (1992) var behovet for gjennom forskning og utviklingsarbeid å kunne innordne industrisamfunnet som en del av et økologisk kretsløp.
- De biologiske prosesser knyttet til karbonkretsløpet er hovedfaktorer for reguleringen av CO₂-konsentrasjonen i atmosfæren.
- Algekulturteknologi tar mikroalgene i bruk for å gjennomføre biofotolyse og fotosyntese under kontrollerte betingelser til å fremstille varer det er samfunnsmessig behov for. Sollys er energikilde; og vann, karbondioksid sammen med mineralske næringsstoffer er innsatsfaktorene.

AKT og CO₂-binding

- Algenes fotosyntese er en av de viktigste naturlige omsetningsleddene for CO₂. Ved tilrettelagt produksjon og høsting av mikroalger i spesielle anlegg kan CO₂ fra forbrenning av fossile karbonkilder omsettes i energirik algebiomasse og dermed bidra til å redusere utslipp av klimagasser.
- Produksjon av mikroalger forutsetter tilførsel av ressurser i form av lys (solenergi), karbondioksid, vann og mineraler (næringsalter). Så lenge disse ressursene er i overskudd,

formerer algene seg ved celledeling som medfører en eksponensiell økning i algebiomasse. I praksis vil imidlertid tilgangen på lysenergi etterhvert begrense veksten i en tett algekultur.

- Dersom næringssalter og CO₂ tilføres algekulturen i tilstrekkelig mengde, vil potensialet for produksjon bestemmes av tilgangen på lysenergi. Potensialet for produksjon av mikroalger basert på dagslys er derfor avhengig av innstrålingen. I Norge, hvor variasjonen i innstråling gjennom året er stor, vil helårs-produksjon neppe være aktuelt, selv om temperaturen kan holdes optimal ved hjelp av spillvarme. Produksjonspotensialet i Sør-Norge er anslått til maksimalt 20-30 g m⁻² d⁻¹ om sommeren og totalt ca. 25-40 tonn ha⁻¹ i løpet av en vekstsesong fra uke 10-40. Dette er betydelig mer enn areal-avkastningen i landbruk i Norge.
- Algebiomasse består til ca. 45% av karbon. Det innebærer at forbruket av CO₂ er ca. 1,65 kg ved produksjon av 1 kg algebiomasse. Det beregnede produksjonspotensialet for mikroalger i Sør-Norge tilsvarer et CO₂ opptak på ca. 40 - 60 tonn ha⁻¹år⁻¹.
- Masseproduksjon av mikroalger kan foregå i åpne eller lukkede anlegg. Åpne anlegg er ofte utformede som dammer eller kanaler, hvor algekulturen holdes i bevegelse ved hjelp av pumper eller skovlehjul. CO₂-tilførselen skjer som regel ved innblåsing av finfordelte bobler fra perforerte rør på bunnen. Konstruksjonen er forholdsvis enkel, men åpne anlegg gir begrenset kontroll over vekstbetingelsene og dårlig beskyttelse av algekulturen mot infeksjoner av uønskede organismer. Dette har bidratt til at kommersiell produksjon av mikroalger i åpne anlegg er begrenset til noen få arter.
- Ved produksjon av alger i lukkede reaktorer er kulturen innesluttet i gjennomslukte rørkanaler av glass eller plast. På denne måten kan man oppnå en god utnyttelse av dagslys selv med høy biomassetetthet i kulturen. Utnyttelsen av CO₂ kan også gjøres effektiv ved at den tilsettes i et lukket system. Fordelene med lukkede algereaktorer er høyere produksjon per volum og areal, bedre beskyttelse av algekulturen og lavere høstningsomkostning (pga. høyere tetthet). Anlegg basert på lukkede reaktorer er imidlertid mer ressurskrevende, og har foreløpig mest vært brukt til produksjon av høykost-produkter fra mikroalger.
- Det er i 1998 utført forsøk med to industrielle CO₂-utslipp i Vestfold, fra henholdsvis Esso Norge AS på Slagentangen og FORESTIA Agnes AS i Larvik. Resultatene indikerer at avgass fra begge kildene er egnet for produksjon av mikroalger.

Biofotolyse

- I fotosynteseapparatet til mikroalger blir strålingsenergien fra sola omdannet til kjemisk energi, i det vann blir spaltet til oksygen og protoner. Protoner og elektroner genererer molekylært hydrogen. Biofotolyse er betegnelsen på prosessen som gjennomfører dette.
- Den teknologiske anvendelse av biofotolyse til hydrogenproduksjon omfatter i forsøksammenheng bruk av blågrønnalger (cyanobakterier) eller grønnalger i aktive kulturer med vann som hydrogenkilde, eller fotosyntetiserende bakterier med organisk stoff eller hydrogen-sulfid som hydrogenkilde.
- De hydrogen-relaterte prosessene i organismene som gjennomfører biofotolyse er knyttet til enzym-systemene hydrogenase/nitrogenase.

Teknologiske løsninger

- I eksperimentell forbindelse foregår hydrogenproduksjon i fotobioreaktorer konstruert til formålet. De fotosyntetiske mikroorganismene dyrkes i optimale næringsløsninger under kontrollerte vekstbetingelser. Ved å tilrettelegge de fysiologiske forutsetninger for hydrogenproduksjon fra cellene kan molekylært hydrogen fremskaffes.
- Et eksempel på dyrkingssystem med en cellekultur av grønnalger for hydrogenproduksjon - basert på karbondioksyd, mineralske næringsstoffer og vann - blir omtalt og skissert. Det teknologiske siktepunktet er å oppnå en energieffektivitet på ca 10 %.

Forskningsstatus

- Norsk forskning knyttet til biofotolyse og hydrogenproduksjon blir behandlet. Det er laget en oversikt over rapporter og publikasjoner utarbeidet i forskningsprogrammet til Norges forskningsråd betegnet Utnyttelse av Solenergi (IE).
- Norge deltar i det internasjonale forskningssamarbeidet innenfor OECD om biofotolytisk hydrogenproduksjon (IEA Hydrogen Implementing Agreement). NIVA har vært norsk ankerinstitusjon i denne sammenheng. Virksomheten i IEA vil fortsette i et Annex 15: Photobiological hydrogen production, som er under tilrettelegging. NIVA vil bidra og har levert innspill til denne oppgaven.

Perspektiv

- Konvertering av CO₂ fra røykgasser via mikroalger med hydrogenproduksjon bør inngå som et viktig element av algekulturteknologi i norsk sammenheng.
- Med realisering av et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold vil det kunne bli skaffet praktisk grunnlag for positiv og betydningsfull forskningsinnsats i Norge når det gjelder biofotolyse/hydrogenproduksjon.

Abstract

The global Green House Effect is mainly caused by the increase in the atmospheric content of CO₂, due to anthropogenic use of fossil fuels. This insight has brought about profound international changes in the goals, priorities and processes of both science and government.

To deal with the CO₂-problem various solutions have to be investigated and tested technologically for practical purposes. Several indications point to photosynthetic microorganisms as biological tools for the practical fixation of CO₂ at point sources. The theoretical potential of the relevant microalgal processes is >330 t CO₂ ha⁻¹y⁻¹.

The basic concept is to cultivate the microalgae in photobioreactors with flue gas as a CO₂ source. Multiple purpose utilization of the production procedures is an objective. An integrated operation is aimed at, combining the microalgal mass cultivation with biophotolytic production of hydrogen gas, and use of the biomass harvest as food and feed. In this way a potentially beneficial and economic program may be realized.

The present state of art with algal culture technology makes possible only a small and limited contribution to solving the CO₂-problem. However there are several avenues which are followed by national and international research programmes to improve the methods for mass cultivation of microalgae, and the processes for economic biophotolysis of water. The progress of this work is promising for the use of algal culture technology in the biofixation of important quantities of anthropogenic produced CO₂.

A research plant for experimental - and production purposes connected with microalgae is projected in the county of Vestfold. When realized this will be a key element for the necessary research and process improvements of algal culture technology in Norway. Besides it will make possible a fruitful participation in the relevant international research activities and development.

Title: Algal culture technology. - Pilot plant for production of microalgae in Vestfold, Norway. - Report 1
Year: 1999
Author: Olav Skulberg, Torsten Källqvist
Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-3586-8

1. Innledning

Økende mengder i atmosfæren av spesielle gasser - klimagasser - som f.eks. CO₂, medfører risiko for stimulering av den naturlige "drivhuseffekt" (Tyndall 1861, Fenger & Laut 1987). Dette har konsekvenser som bl.a. innebærer forandringer av klimaforhold på globalt nivå. Omfanget av disse forandringer, og hvilke følger de vil få, er ennå lite forstått. Imidlertid er det internasjonalt en generell erkjennelse av at en begrensning av relevante menneskeskapte utslipp er nødvendig for å stabilisere nivået av klimagasser i atmosfæren (IEA 1995, Miljøverndepartementet 1998). I Norge har Miljøverndepartementet og Nærings- og energidepartementet i 1997 igangsatt et nytt program for forskning og utprøving av aktuelle teknologier som kan gi praktisk betydningsfull reduksjon av CO₂-utslipp og andre klimagasser. Norges forskningsråd (NFR) tilrettelegger denne virksomhet bl.a. gjennom FoU-programmet KLIMATEK (Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp).

Forprosjektet som behandles i denne rapport inngår i slik sammenheng.

2. Problemstilling og faglig tilknytning

I global sammenheng bidrar CO₂ med mer enn 50% av den menneskeskapte drivhuseffekten. Også i Norge er CO₂ den dominerende klimagassen som inngår med omlag 70% av utslippene (1996). Utvikling av teknologi som kan ta hånd om CO₂, og innebære utslippsreduksjoner, er derfor betydningsfull både vurdert miljømessig og samfunnsøkonomisk.

Fotosyntetiske mikroorganismer utgjør en ressurs med betydelig potensiale for praktisk utnyttelse. Mikroalgene har hittil i sammenheng med vannforskning hatt særlig interesse knyttet til undersøkelser av vannforekomster. Dette har bidratt til vesentlig kunnskap om mikroalger som nå kan anvendes til å løse forurensningsproblemer, nyttiggjøre avfallsprodukter og fremstille viktige varer for samfunnet. Forholdet innebærer positive muligheter for økonomisk dyrking av mikroalger og vil samtidig gi miljømessige forbedringer.

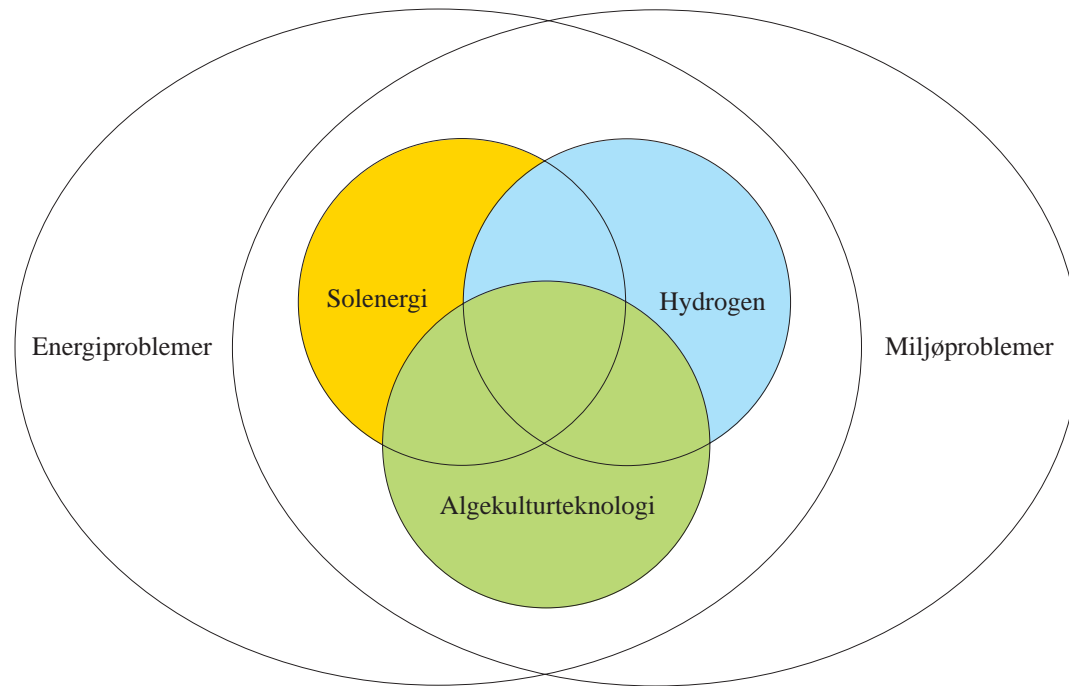
Algekulturteknologi (AKT) går ut på å kultivere mikroalger - prokaryote og eukaryote fotosyntetiske organismer - for å fremstille stoffer, eller anvende dem i prosesser til spesielle formål. Internasjonalt har AKT blitt et omfattende interessefelt. Mikroalgene er et nytt miljøvennlig produksjonsalternativ for essensielle varer basert på fremgangsmåter innordnet prinsippene trukket opp i Agenda 21 (The Rio Declaration on Environment and Development, Keating 1993).

I tilknytning til de aktuelle problemstillingene KLIMATEK omfatter, har mikroalgeprosjektet AKT to hovedstrategier med bidrag av løsninger for å stimulere til bruk av teknologi som kan redusere utslipp av klimagassen CO₂:

- Massedyrking av mikroalger for konvertering av CO₂ til produkter som kan erstatte varer fremstilt via fossilt brensel.
- Massedyrking av mikroalger for biofotolytisk produksjon av hydrogengass som energibærer.

Disse to strategier har ulike tidshorisonter for realisering av teknologi i full skala, også når det gjelder innovasjonsgrad samt potensiale for utslippsreduksjon av CO₂.

Skissen i **Figur 1** illustrerer hvordan algekulturteknologi teoretisk inngår i en helhetlig sammenheng for å bidra til å dekke grunnleggende behov i menneskesamfunnet.

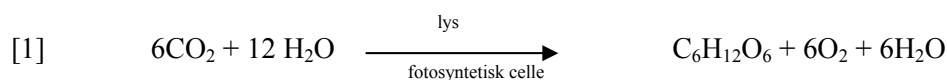


Figur 1. Algekulturteknologi som virksomhetsområde i et overordnet samfunnsperspektiv.

3. Bakgrunn og naturgitte prinsipper

Fornybare energikilder var et hovedtema på United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) i Rio de Janeiro i 1992. Primære og sekundære konsekvenser av den omfattende bruk av fossilt brensel ble erkjent som en hovedtrusel mot en bærekraftig utvikling av menneskesamfunnet (Keating 1993). En hovedkonklusjon var behovet for gjennom forskning og utviklingsarbeid å kunne innordne industrisamfunnet som del av et økologisk kretsløp. Dette innebærer den vesentlige bestrebelsen å stabilisere konsentrasjonen av klimagasser på et nivå som vil forhindre farlig, menneskeskapt påvirkning av klimasystemet (Miljøverndepartementet 1998, Wigley et al. 1998).

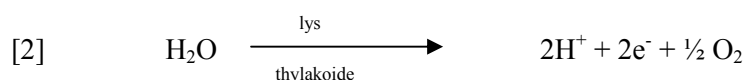
De biologiske prosesser knyttet til karbonkretsløpet er hovedfaktorer for reguleringen av CO₂-konsentrasjonen i atmosfæren. Den fundamentale posisjon som fotosyntesen inntar i stoffomsetningen i biosfæren er godt undersøkt og dokumentert (Schlegel 1985). Fotosyntesen adskiller seg fra andre lysavhengige biologiske prosesser ved at den absorberte strålingsenergi blir benyttet til syntese av organiske forbindelser med et høyt energiinnhold. Utgangsstoffene er karbondioksyd og vann. Bruttolikningen for fotosyntesen illustrerer dette:



Innholdet av karbondioksyd i atmosfæren har hovedsakelig holdt seg konstant - ca 12 µmol/l - gjennom jordklodens forhistorie. Dette er betinget bl.a. av de biologiske prosesser knyttet til respirasjon. Levende organismer tar opp oksygen og omdanner karbohydrater og andre organiske innholdsstoffer til karbondioksyd og vann. Dette skjer under samtidig frigjøring av energi til livsprosessene (se **Figur 19**).

Siden den industrielle revolusjon (1700-tallet) har det vært en økning på ca 27% av atmosfærens innhold av karbondioksyd på grunn av forbrenning av karbonholdig materiale. For å illustrere mektigheten i omsetningsprosessene det dreier seg om, kan noen fakta nevnes. Hvert sekund inngår i gjennomsnitt 10.000 tonn oksygen på verdensbasis til dannelsen av karbondioksyd. Og all karbondioksyd i atmosfæren blir via fotosynteseprosessene sirkulert i løpet av 300 år (Johansson et al. 1993, IEA Greenhouse Gas R&D 1995).

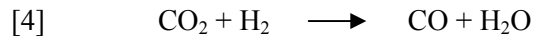
Det første trinnet i fotosyntesen (Ormerod 1992) omfatter spalting av vann i oksygen og hydrogen. Ved hjelp av bestemte pigmenter i fotosyntetiske organismer kan energien i den synlige del av lysspekteret utnyttes til spaltingen av vann i sine elementære bestanddeler:



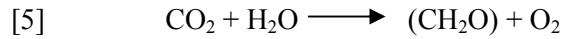
Biofotolyse av vann består i en simultan utskillelse av hydrogen og oksygen ved organismeaktivitet betinget av lysenergi. Elektroner og protoner genererer molekylært hydrogen i den reversible prosess:



Karbondioksyd er ikke nevneverdig kjemisk reaktiv under vanlige temperaturbetingelser, det er en termodynamisk meget stabil forbindelse. I katalytiske prosesser kan karbondioksyd bli redusert på flere måter ved høye temperaturer, f.eks.:



Fotosyntetiske organismer kan imidlertid i sitt stoffskifte benytte vann som reduksjonsmiddel, og prosessen foregår ved lave temperaturer.



Denne CO₂-fiksering blir katalysert av enzymet RuBisCO. Dette enzymet katalyserer også den reversere reaksjon - fotorespirasjon - som bl.a. bidrar til å redusere nettoutbyttet av fotosyntesen.

Algekulturateknologi (AKT) går ut på å nyttiggjøre fotosyntetiske mikroorganismers evne til å gjennomføre reaksjonene [2], [3] og [5] under kontrollerte betingelser i prosesser for å fremstille eller modifisere stoffer som det er samfunnsmessig behov for. Sollyset er energikilde, de stofflige forutsetninger er i første rekke karbondioksyd og vann sammen med mineralske næringsstoffer.

4. CO₂-binding i alger

Alger representerer en av de globalt viktigste naturlige omsetningsledd for CO₂. Opptaket av CO₂ i verdenshavene ved algenes fotosyntese beregnes å være ca 30x10⁹ tonn år⁻¹ (Moore & Braswell 1994) og representerer ca. 40% av den globale primærproduksjonen (Falkowski 1994). Fotosyntesen i havet fører til en reduksjon av partialtrykket av CO₂ i overflatevannet og dermed en øket diffusjon fra atmosfæren til vannet. Ca. 90% av den CO₂ som bindes i fotosyntesen, frigjøres imidlertid igjen i overflatevannet ved respirasjon av algene selv og av andre organismer som beiter på dem. En mindre del transporteres ut av overflatevannet ved sedimentering av alger og andre partikler gjennom sprangsjiktet, og skjermes dermed temporært fra utveksling med atmosfæren. Under sprangsjiktet frigjøres igjen en del av karbonet som CO₂ ved respirasjon, men en del lagres mer varig i sedimentene, og kan danne grunnlag for fremtidige nye fossile karbonkilder.

Den fotosyntetiske produksjonen av alger i verdenshavene er størst nær kontinentene, og i områder hvor næringsrikt dypvann transporteres opp til overflaten. I mesteparten av havområdene er imidlertid produksjonen næringsbegrenset. I senere tid er det konstatert at jern har stor betydning som begrensende faktor for den oseaniske primærproduksjonen. Jern er et essensielt sporstoff for syntese av klorofyll, reduksjon av nitrat og atmosfærisk nitrogenfiksering i mikroalger. Mengden jern som algene trenger er liten, bare 1:10000 til 1:200000 av karbonmengden regnet på atombasis (Sunda et al. 1991), men løseligheten av jern er meget lav i sjøvann, og derfor kan konsentrasjonen av tilgjengelig jern bli så lav at produksjonen blir begrenset av jernmangel. Storskalig tilsetning av jern til verdenshavene er derfor blitt foreslått som et mulig tiltak for å øke CO₂-bindingen ved algenes fotosyntese (Martin & Fitzwater 1988).

En alternativ fremgangsmåte for å utnytte algenes evne til binding av CO₂ er den tilrettelagte produksjon og høsting av mikroalger i spesielle anlegg. Med denne framgangsmåten kan det oppnås en betydelig høyere produksjon per arealenheter og bedre virkningsgrad med hensyn til netto CO₂ retensjon enn ved ekstensiv havgjødsling med jern. Utnyttelse av den produserte algebiomassen til ulike formål som energikilde, fôr og høy-verdi komponenter, kan eventuelt oppveie de forventet høyere kostnadene ved kontrollert produksjon. Konseptet blir bl. a. vurdert og utprøvd i USA, Tyskland, Japan. Praktiske forsøk viser at røykgasser fra varmekraftverk kan brukes som CO₂-kilde for algeproduksjon. (Laws & Berning 1991, Matsumoto et al. 1995, Melkonian 1995).

4.1. Grunnleggende forutsetninger for kontrollert produksjon av mikroalger

Algekulturteknologi som middel for å binde CO₂ bygger på at denne gassen er karbonkilden som ved algenes fotosyntese omdannes til energirike organiske forbindelser i algebiomassen. Fjerningen av CO₂ er altså direkte koplet til netto produksjon av alger, og maksimal produksjon må derfor etterstresves i et anlegg for konvertering av CO₂ til algebiomasse.

Mikroalger formerer seg som andre mikroorganismer hovedsakelig ved vegetativ celledeling. Dette medfører at en algebestand kan øke eksponensielt så lenge vekstbetingelsene gir muligheter for det. Ved eksponensiell vekst kan bestandsutviklingen beskrives med følgende formel:

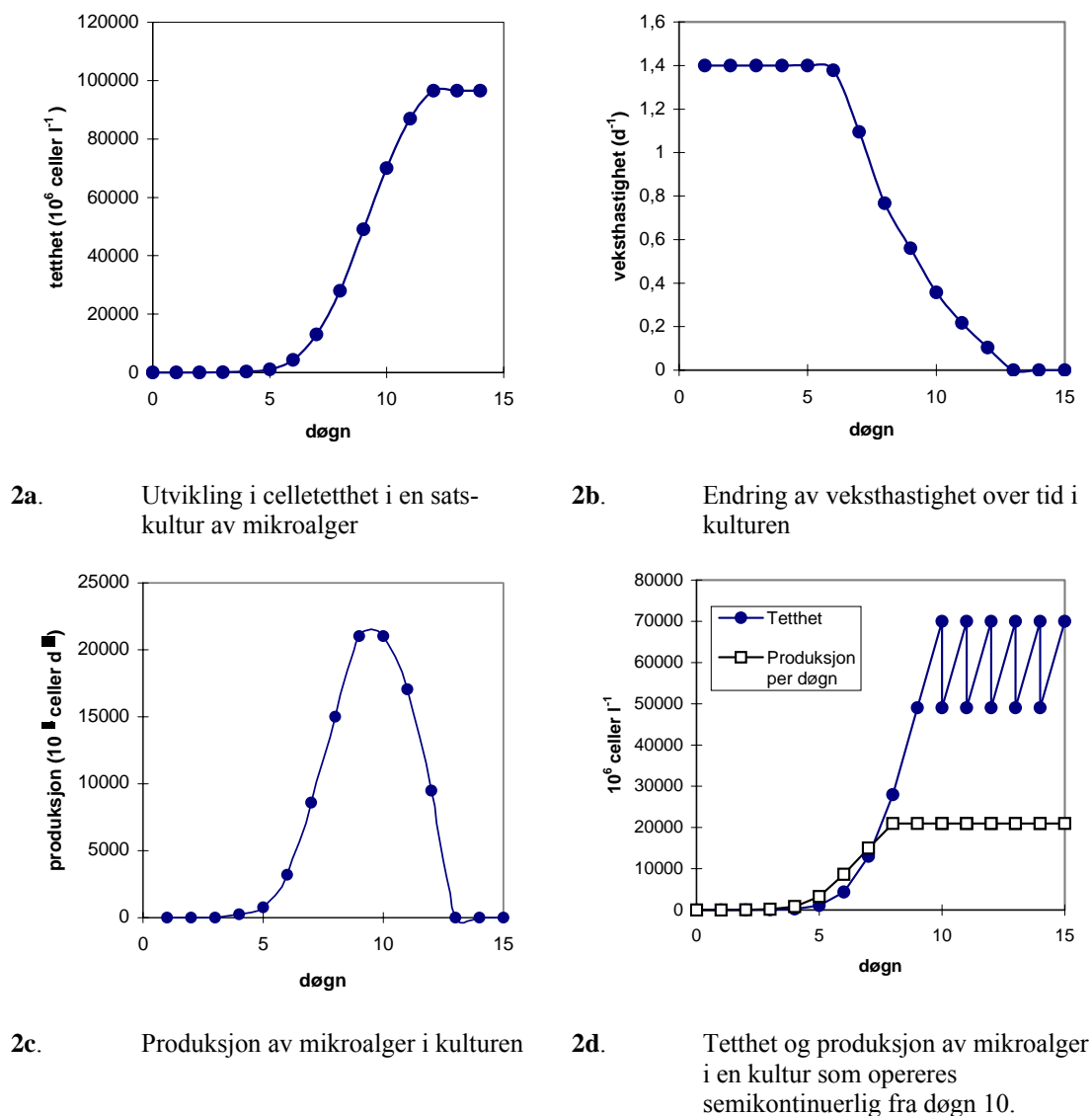
$$X_t = X_0 \cdot e^{\mu t} \quad \text{hvor}$$

X_0 og X_t = antall algeceller ved vekstbegynnelse og ved tiden t (døgn)

μ = veksthastigheten med dimensjonen døgn⁻¹

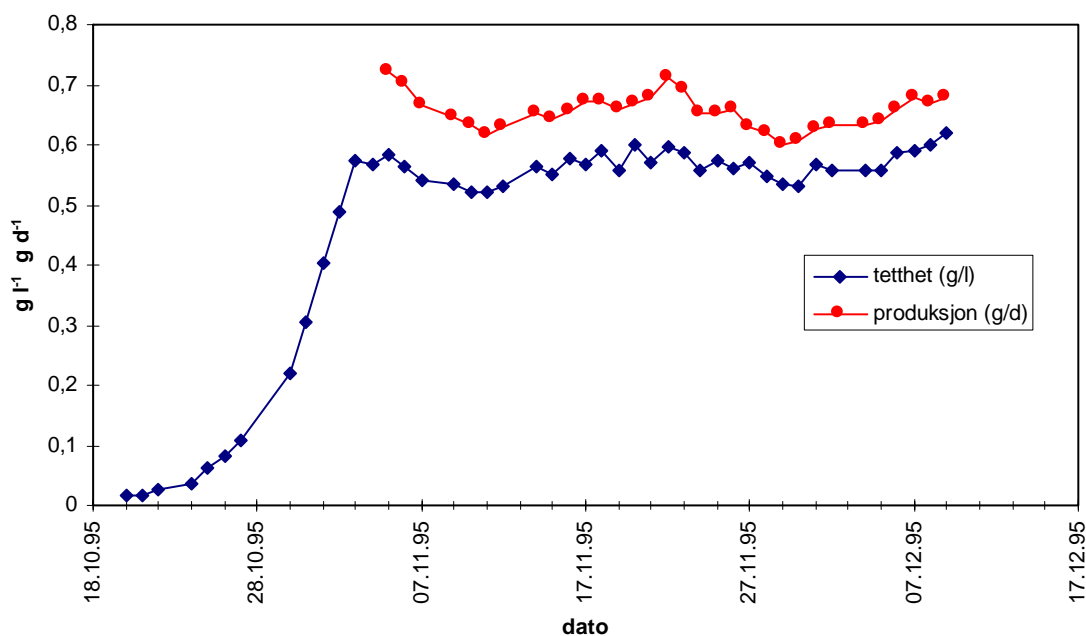
e = basen for naturlige logaritmer (2,718)

Mange mikroalger har ved optimale betingelser en veksthastighet på $1,5\text{-}2\text{ døgn}^{-1}$, som innebærer at celleantallet fordobles 2-3 ganger hvert døgn. Den eksponensielle veksten gir et formidabelt potensiale for produksjon i en algekultur. Med to doblinger per døgn vil feks. en algebiomasse på 1 g kunne øke til 1 kg etter 5 døgn og 1 tonn etter 10 døgn. Dette forutsetter imidlertid at de ressurser som kreves for algevekst blir tilført med tilstrekkelig hastighet og i tilstrekkelig mengde. Fotosyntetisk vekst av alger krever tilgang på karbondioksid som karbonkilde, mineraler i form av oppløste salter i vann og energi i form av lys. I en sats-kultur med endelig volum vil en eller flere av disse ressursene etter hvert begynne å begrense mulighetene for optimal vekst. Veksten minker gradvis inntil kulturen overgår i en stasjonær fase hvor biomassen ikke lenger øker. Vekstforløpet i en slik sats-kultur er vist i **Figur 2 a**. **Figur 2 b** viser hvordan veksthastigheten endres med tiden i samme kultur. Produksjonen - dvs. økningen i celler per døgn bestemt av produktet av biomassen (**Figur 2 a**) og veksthastigheten (**Figur 2 b**) - er vist i **Figur 2 c**. I dette eksemplet oppnås altså maksimal produksjon etter 10-11 døgn. Ved å høste en del av kulturen og etterfylle med nytt vekstmedium kan man holde kulturen i den vekstfasen som gir maksimalt utbytte (**Figur 2 d**).

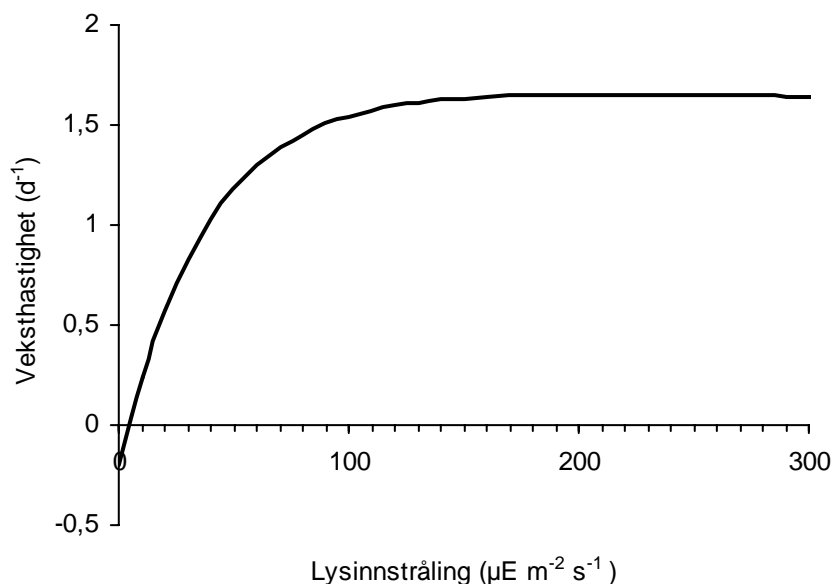


Figur 2. Massedyrking av mikroalger. Vekst- og produksjonsforhold.

Proessen kan også gjøres kontinuerlig ved å pumpe inn vekstmedium og høste algene i utløpet fra kulturen i en reaktor. På denne måten kan man i prinsippet oppnå en konstant produksjon gjennom ubegrenset tid. Ved at algene holdes i samme vekstfase hele tiden vil også algebiomassens sammensetning og kvalitet være relativt konstant. Eksempel på kontinuerlig algeproduksjon i en kunstlysreaktor er vist i **Figur 3**.



Figur 3 Biomassetetthet og produksjon ved kontinuerlig drift av en algereaktor i ca. to måneder.



Figur 4. Innvirkning av lysinnstråling på veksthastighet hos en alge.

Når tilgangen på en eller flere av innsatsfaktorene blir utilstrekkelig for å forsyne den eksponensielt voksende algebiomassen, synker veksthastigheten. I et produksjonssystem for

alger tilføres mineralene som konsentrert næringsoppløsning og CO₂ ved å boble CO₂-beriket luft gjennom kulturen. Tilgangen på disse vekstfaktorer kan hensiktsmessig reguleres i forhold til behovet for vekst. Den begrensende faktoren blir dermed i praksis tilgangen på lysenergi for algenes fotosyntese.

Ved fotosyntesen utnyttes synlig lys, dvs. stråling i bølglengder fra 400-700 nm som absorberes av algenes pigmenter. Lysets innvirkning på algevekst kan generelt beskrives av kurven i **Figur 4**.

En viss energimengde må til for vedlikehold av algebiomassen. Under denne vedlikeholdsenergi fører respirasjon til tap av biomasse og dermed negativ vekst. Ved innstråling over vedlikeholds nivået øker veksthastigheten proporsjonalt med innstrålingen opptil et metningsnivå, hvor veksthastigheten er maksimal (μ_{\max}). Denne hastigheten er konstant over et relativt stort intervall av innstråling, men meget høye lysnivåer kan ha negative effekter på algene, som medfører at veksthastigheten synker. I en tett algekultur hvor algecellene holdes i stadig bevegelse, vil imidlertid oppholdet nær overflaten hvor lysnivået kan være skadelig, være av så kort varighet at lysinhibisjon i praksis trolig har liten betydning. Veksthastigheten ved lysmetning og brattheten på lysresponskurven under lysmetningsnivået, er forskjellig for ulike alger og avhenger også av temperaturen.

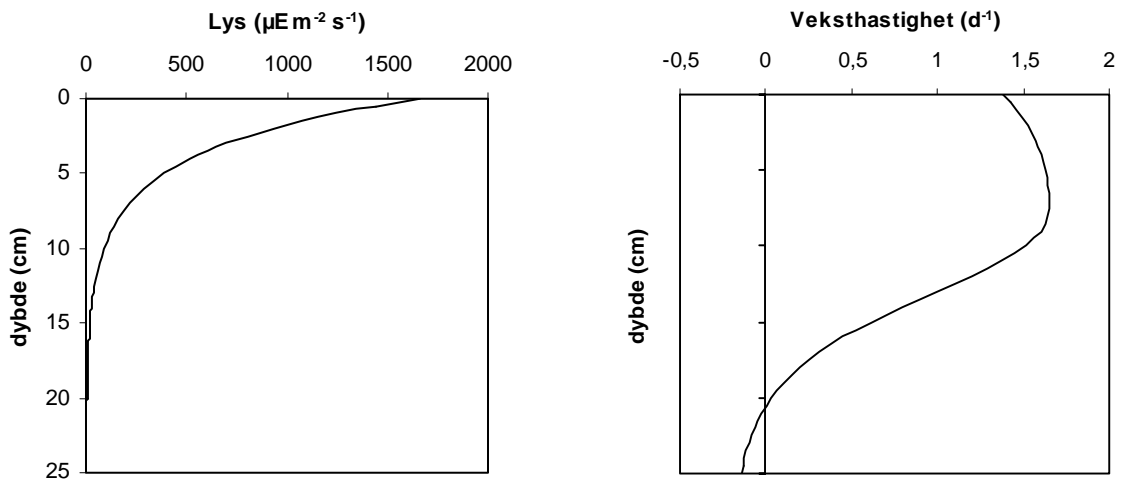
I en tett algekultur synker lysmengden med avstanden fra den belyste overflaten på grunn av absorpsjon i algeceller og mediet. Som følge av algenes selvskygging synker lysintensiteten eksponensielt med avstanden fra overflaten i henhold til:

$$I_z = I_0 \cdot e^{-z \cdot E} \quad \text{hvor:}$$

I_0 og I_z er lysintensitet ved overflaten og på z cm dyp og
 E = ekstinksjonskoeffisienten (cm^{-1}).

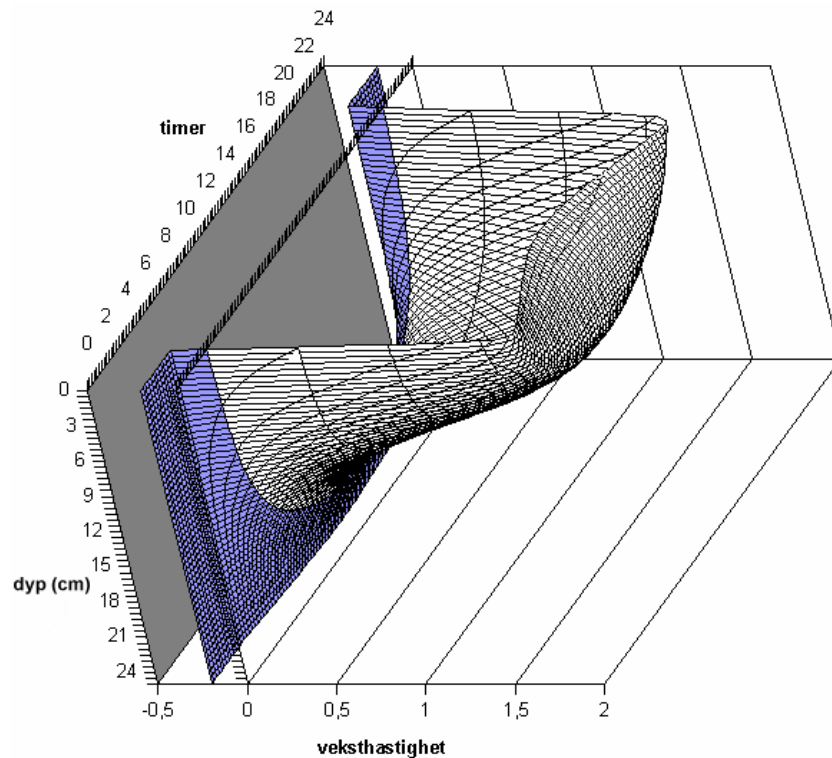
Ekstinksjonskoeffisienten bestemmes hovedsakelig av celletettheten i algekulturen, og lyset svekkes raskere nedover i kulturen jo tettere kulturen er.

Med utgangspunkt i kurvene som beskriver lysets innvirkning på algenes veksthastighet og lysforholdene i en algekultur, kan veksthastigheten hos alger på ulike dyp i en algekultur beregnes (**Figur 5**). Nær overflaten er veksten lysmettet, men lengre ned synker veksthastigheten proporsjonalt med lyset, og blir til slutt negativ.



a. Lys som funksjon av dybde i en algekultur som belyses gjennom overflaten b. Veksthastighet på ulike dyp i en algekultur som belyses gjennom overflaten

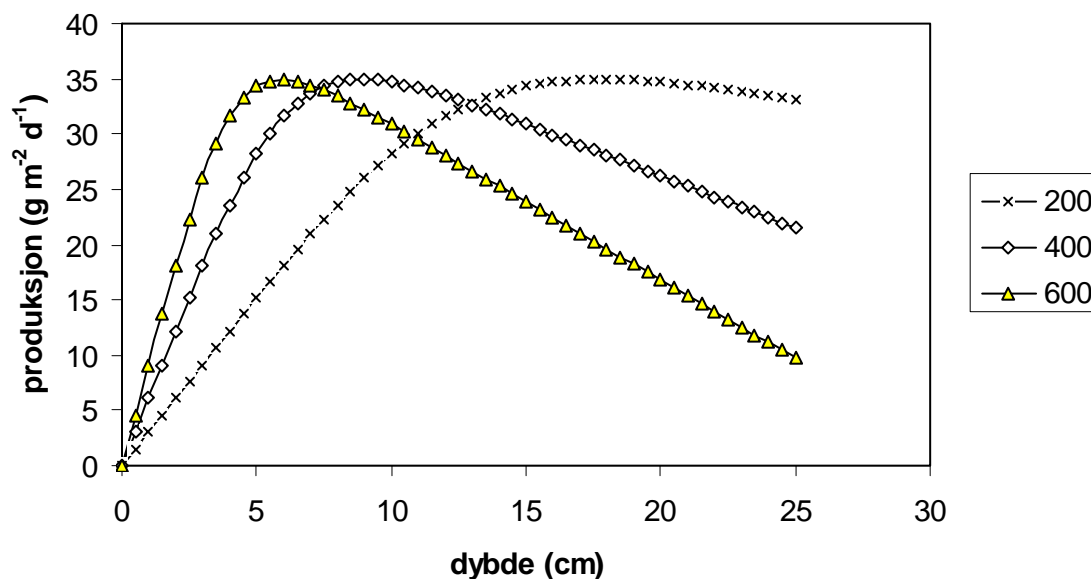
Figur 5. Lysinnstråling og veksthastighet av alger som funksjon av dyp i en algekultur som belyses gjennom overflaten.



Figur 6. Modellsimulering av algevekst i en algereaktor. Figuren viser veksthastighet som funksjon av dybde gjennom døgnet. Kulturtettheten er 200 mg l^{-1} . Lysforholdene er beregnet for 15. juli på breddegraden 60°N , og temperaturen er satt til 20°C .

Dersom mikroalger skal produseres med dagslys som energikilde, vil algenes vekst variere med lysbetingelsene i løpet av døgnet. Dette kan demonstreres med en enkel modell som beregner lysforholdene som funksjon av dypet i en algekultur gjennom døgnet, og algenes veksthastighet som funksjon av lyset. Et eksempel på resultater av en slik modellberegning er vist i **Figur 6**. Beregningen er foretatt med utgangspunkt i innstrålingen om sommeren (15. juli) ved breddegraden 60 °N. (Sør-Norge). Veksthastigheten for en hurtigvoksende grønnalge er beregnet med en biomassetetthet på 200 mg l⁻¹ og 25 cm dybde på algekulturen. Som det fremgår av figuren øker veksthastigheten raskt etter soloppgang og når maksimalt nivå nær overflaten. På grunn av lyssvekkingen nedover i kulturen er veksthastigheten negativ nær bunnen selv når innstrålingen er høyest midt på dagen.

Den integrerte produksjonen gjennom døgnet blir ifølge modellen 23 g m⁻². Dersom kulturens dybde doubles til 50 cm, og alle andre forhold er uforandret, øker den andel av kulturen hvor det er for lite lys til å oppnå positiv vekst og døgntilveksten synker til 13 g. For å oppnå samme høye produksjon som i kulturen med 25 cm dybde måtte biomassetettheten i 50 cm-kulturen reduseres slik at en større del av kulturen får tilstrekkelig tilgang til lys. Eksemplet viser at dybde av algekulturen og tetthet i kulturen er to gjensidig avhengige faktorer som må tilpasses den tilgjengelige lysinnstrålingen for å gi optimal avkastning i et algeproduksjonsanlegg (se **Figur 7**).



Figur 7. Modellsimulering av produksjon av alger som funksjon av dybde og biomassetetthet (200-600 mg l⁻¹).

Figuren viser at den optimale dybden av algereaktoren minker med økende tetthet i kulturen. (Temperatur 25°C, breddegrad 60°N, dato 15.07).

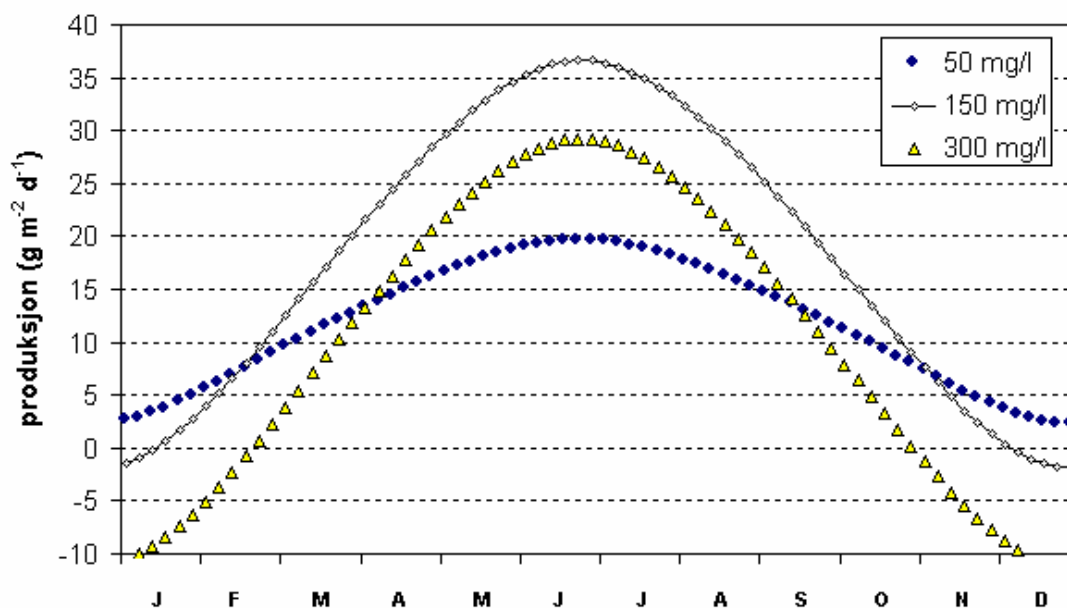
4.2. Produksjonspotensiale

Den samme modellen kan også brukes for å beregne det maksimale potensialet for dagslysbasert algeproduksjon gjennom året. I **Figur 8** er produksjonen i en 25 cm dyp algekultur beregnet for tre ulike kultur tettheter. Temperaturen er forutsatt konstant = 20 °C gjennom hele året. Figuren viser at tettheten 150 mg l⁻¹ gir størst avkastning, med et maksimum på ca. 50 g m⁻² d⁻¹ ved midtsommer. I praksis vil produksjonen ikke kunne bli så høy, bl.a. fordi modellen forutsetter konstant skyfri himmel. Produksjonsdata fra eksisterende algeanlegg viser imidlertid at 50-60 g m⁻² d⁻¹ kan oppnås i korte perioder. For lengre perioder synes 20-30 g m⁻² d⁻¹ være en

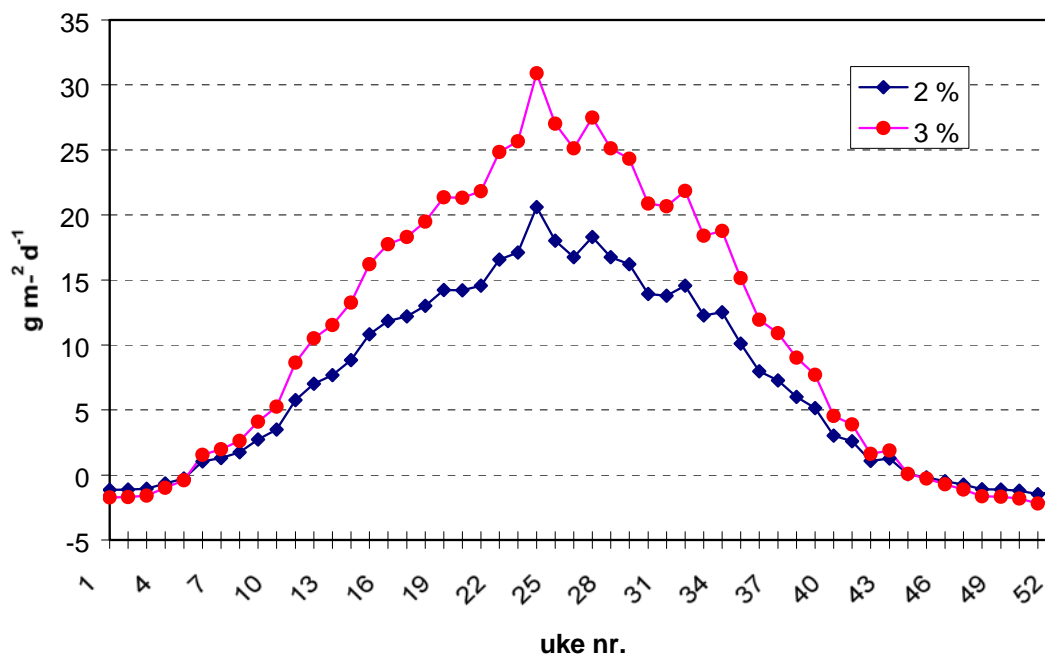
mer sannsynlig avkastning. Det teoretiske utbyttet av fotosyntesen er beregnet til 5-6 % av den totale solenergien (Hall 1986). Utbyttet i åpne dammer er imidlertid lavere. Praktiske erfaringene fra slike systemer viser at 2-3 % av totalinnstrålingen kan omsettes i algebiomasse, som har et energiinnhold på ca. 21 kcal g⁻¹ (Kajan et al. 1984). Dersom man tar utgangspunkt i disse tallene og den registrerte innstrålingen i Oslo (Blindern) kan man få et mer realistisk bilde av produksjonspotensialet i Sør-Norge (se **Figur 9**). Beregningen er basert på en empirisk modell utviklet av Oswald (1988) og viser at den maksimale produksjonen er ca. 30 g m⁻² d⁻¹ i uke 25. Den samlede avkastningen i uke 10-40 utgjør 3,8 kg m⁻², som er ca. 5 ganger høyere enn avkastningen pr. m² av grøntfôr fra landbruk i Norge.

Figuren viser at avkastningen i månedene november-februar vil være marginal på grunn av lav innstråling. Helårs dagslysbasert algeproduksjon vil derfor ikke være aktuelt i Norge, selv om temperaturen kan holdes optimal feks. ved bruk av spillvarme. Tilskudd av kunstlys gir mulighet for å forlenge produksjonssesongen, men vil medføre en betydelig kostnad. Erfaringer fra kunstlysreaktorer med lysstoffør ved NIVA tyder på at energiforbruket for å produsere 1 kg alger er ca. 200 kWh.

Mange alger har evnen til å utnytte organisk stoff som energikilde for vekst (heterotrof vekst). Dette gir mulighet for å opprettholde algeproduksjonen også i perioder med lite lys, ved å tilføre organisk substrat. Heterotrof produksjon gir imidlertid ikke noen positiv CO₂-effekt ved at det organiske substratet også utgjør karbonkilden.



Figur 8. Beregnet potensiell maksimumsproduksjon gjennom året i en 25 cm dyp algereaktor med ulike biomassetetthet (50-300 mg l⁻¹). Breddegraden er valgt til 60 °N og temperaturen 25 °C.



Figur 9. Beregnet potensiell produksjon av mikroalger i Sør-Norge basert på målt lysinnstråling på Blindern. (Ukemiddelverdier 1966-1980.) Beregningen er utført med en empirisk modell (Oswald 1988) med 2 og 3 % konvertering av lysenergien.

Beregninger utført av Mohn og medarb. (1998) av produksjonspotensiale for mikroalger i produksjonsanlegg i form av åpne dammer i Sentraleuropa ga noe lavere tall for produktivitet enn hva som er vist i **Figur 9**. I følge disse beregningene er produksjonen under optimale lysbetingelser 20 g m^{-2} , og den samlede årsproduksjonen ca. $1,5 \text{ kg m}^{-2}$. Forskjellen kan delvis skyldes at man har forutsatt produksjon uten tilførsel av varme. Det påpekes midlertid at det er et betydelig potensiale for å kunne øke avkastningen av mikroalger ved forbedret produksjonsteknologi.

4.3. Omfang av CO₂-binding

Ved at fjerningen av CO₂ i et algeanlegg skjer ved inkorporering av karbon i algebiomassen, er CO₂-fjerningen i et algeanlegg direkte koplet til anleggets netto produksjon, eller avkastning av biomasse. Algebiomasse inneholder ca. 45% karbon. Det innebærer at produksjon av 1 kg alger ved fotosyntese krever tilførsel av 1,65 kg CO₂. CO₂-opptaket pr. arealenhet er altså 1,65 ganger høyere enn biomasseproduksjonen. Ut fra den beregnede potensielle algeproduksjonen som er vist i **Figur 9**, finner man at maksimalt CO₂-opptak om sommeren tilsvarer 2,5- 3,8 g m⁻² d⁻¹. Det samlede CO₂-opptaket i uke 10-40 er beregnet til 4,1-6,2 kg m⁻² som tilsvarer 41-62 tonn ha⁻¹. (Se **Tabell 1**).

Tabell 1. Beregnet produksjon og CO₂-opptak i et algeproduksjonsanlegg med hhv. 2 og 3% utnyttelse av lysenergien (se **Figur 9**).

Virkningsgrad (%)	Maks. døgnprod. (g m ⁻²)	Maks. CO ₂ -forbruk (g m ⁻²)	Produksjon uke 10-40 (kg m ⁻²)	CO ₂ -forbruk uke 10-40 (kg m ⁻²)
2	21	34	2,5	4,1
3	31	51	3,8	6,2

Fordi utnyttelsen av CO₂ ikke er 100% effektiv, vil behovet av CO₂ i et algeproduksjonsanlegg være høyere enn det teoretisk beregnede, og renseeffektiviteten med hensyn til CO₂ vil være tilsvarende lavere. Utnyttelsesgraden er avhengig blant annet av produksjonsanleggets praktiske utforming. Til store produksjonsanlegg vil man trolig måtte basere seg på åpne dyrkingssystemer hvor utnyttelsesgraden av CO₂ er lav. I lukkede anlegg kan man oppnå bedre utnyttelsesgrad. På grunn av at CO₂-opptaket skjer ved fotosyntese vil netto forbruk av CO₂ finne sted på dagtid, mens algene avgir noe CO₂ ved respirasjon om natten.

Hvilken betydning storskala algeproduksjon vil kunne ha i et helhetlig CO₂ -perspektiv avhenger av en rekke forhold både i forbindelse med produksjonen av algebiomasse og hvordan denne blir utnyttet videre. Selv om energikilden ved fotosyntetisk produksjon er sollys, vil tilskudd av energi til oppvarming, pumping, høsting og tørking være nødvendig. Algebiomassen representerer heller ikke et varig deponi for karbon, og utnyttelsen av algebiomassen vil som oftest føre til at CO₂ igjen frigjøres. Effekten av algeproduksjonen i et totalt CO₂- og energiregnskap vil da avhenge av hvilke andre råvarer som algebiomassen kan erstatte. Brukes algebiomassen som energikilde ved direkte forbrenning, som biogass eller biodiesel vil effekten bli den samme som for andre energibærere basert på organisk stoff produsert ved fotosyntese. Det gunstigste alternativet for utnyttelse av algebiomassen i dette perspektivet er fotokjemisk hydrogenproduksjon som er beskrevet i avsnitt 5. Det vises også til behandlingen i Delrapport 2.

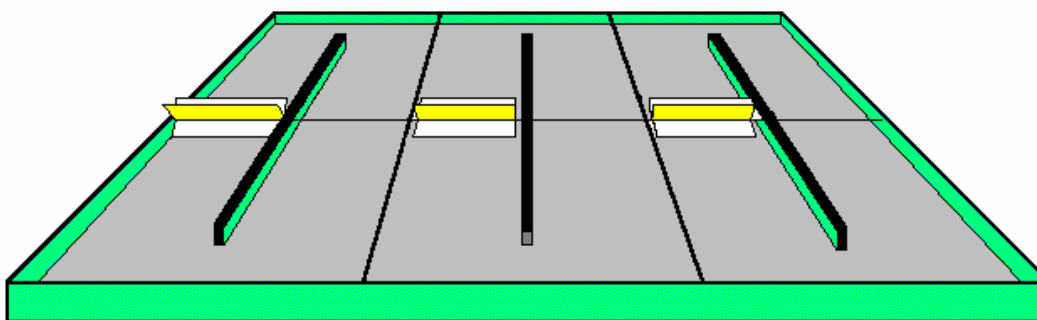
4.4. Anlegg for produksjon av mikroalger

Det eksisterer flere alternative reaktortyper som kan være aktuelle for kommersiell produksjon av mikroalger (Chaumont 1993). Disse kan inndeles i følgende kategorier:

1. Åpne dagslysreaktorer
 - dammer
 - kanaler eller "raceways"
 - skråplan-reaktorer
2. Lukkede reaktorer basert på sollys
 - rør-reaktorer
 - panel-reaktorer
 - plastfilm-reaktorer
3. Lukkede reaktorer basert på kunstlys
4. Reaktorer for immobiliserte alger

4.4.1. Åpne dagslysreaktorer

Åpne dagslysreaktorer er den enkleste formen for massedyrkingsanlegg for mikroalger. De kan ha formen av åpne dammer eller kanaler, og bygges vanlig ved utgraving i bakken. Bunnen dekkes med en folie av plast eller butylgummi. Anleggskostnadene blir dermed forholdsvis lave. Den nødvendige omrøring i kulturen skapes ved mekaniske strømsettere. Når anleggene utformes som meanderende eller sirkulerende kanaler er det vanlig å bruke skovlehjul som strømsettere (**Figur 10**). Dette medfører lavere energiforbruk enn ved pumping i lukkede reaktorer. CO₂ kan tilføres med diffusorer i bunnen av anlegget. Vanlig kulturdybde i dammer og kanaler er ca. 30 cm. Ved lavere dybde er det vanskelig å skape turbulens og å tilføre CO₂. Den forholdsvis store dybden gjør at det ikke går å operere med særlig høye celledettheter i åpne dammer.



Figur 10. Skisse av et åpent produksjonsanlegg av typen kanalsystem (raceway) med tre separate reaktorer.

Algekulturen bringes til å sirkulere i kanalsystemet ved hjelp av skovlehjul.

De fleste storskala-produksjonsanlegg for mikroalger som er i bruk, er av typen åpne dagslysanlegg. Den viktigste begrunnelsen for det er de lave anleggs- og vedlikeholds-kostnadene. Åpne dammer og kanaler har imidlertid flere ulemper som:

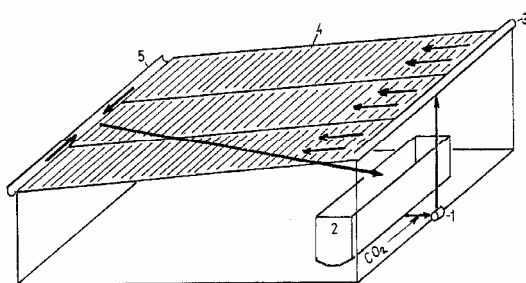
- Fordamping og nedbør påvirker vannbalansen
- Kontaminering i form av "ugress-alger" eller beiteorganismer

- Lav maksimal biomassetetthet som innebærer relativt høye høstingskostnader
- Begrensede muligheter for temperaturkontroll

Disse faktorer medfører at åpne dagslysreaktorer egner seg best for produksjon av "robuste" alger, f.eks. rasktvoksende grønnalger (f.eks. *Chlorella* og *Scenedesmus*), eller alger som kan dyrkes i selektive vekstmedier og dermed er lite utsatt for konkurranse av andre alger (f.eks. *Dunaliella* og *Spirulina*). Internasjonalt er storskala produksjon av mikroalger i åpne dyrkingssystemer foreløpig begrenset til noen få arter.

I åpne anlegg av "skråplan-typen" strømmes algekulturen i et tynt lag nedover en svakt hellende flate med en struktur som gir en turbulent strøm (Doucha & Livanski 1995) - **Figur 11**. Kulturen samles opp i det laveste området, tilsettes CO₂ og pumpes tilbake i dyrkingssystemet. Anleggskostnadene er høyere enn for åpne dammer, men ved at man kan operere med større biomassetetthet i kulturen (1-10 g l⁻¹), reduseres høstingskostnadene. Den høye biomassetettheten innebærer trolig også at risikoen for infeksjon av kulturen er mindre. Sammenlikning av produksjonen i anlegg av skråplantypen med åpne dammer tyder på at skråplan-reaktorene er mer effektive ved lave lysintensiteter (Kajan et al. 1994).

Et liknende prinsipp blir benyttet i et anlegg på Hawaii, beskrevet av Laws et al. (1986). I dette brukes lange renner som algekulturen sirkuleres i. Kulturdybden er 11 cm. I rennene er det plassert skjermer som skaper strømvirvler i kulturen. Vannstrømmen drives av en luftheis med 1 m høyde. CO₂ tilsettes sammen med luften. I dette anlegget har man oppnådd produksjon av over 40 g m⁻² av sjøvannsalgen *Tetraselmis suecica* over en periode av én måned, og ca 30 g m⁻² av kiselalgen *Cyclotella cryptica* over fire måneder (Laws et al. 1988).



Figur 11. Algereaktor av "skråplan-typen", Třeboň, Tsjekia.

1: pumpe, 2: tank, 3: distribusjonsrør, 4: reaktorflate, 5: oppsamlingskanal (Doucha & Livanski 1995).

Ved å bygge inn et produksjonsanlegg i veksthus, kan man skape et delvis lukket system som reduserer svakhetene med de helt åpne anleggene. Blant annet reduseres kontamineringsrisikoen, samtidig som kontrollen av temperatur og fordamping forbedres. Man kan tenke seg å benytte avanserte drivhussystemer hvor også atmosfæren kan kontrolleres f.eks. ved tilførsel av CO₂. Slike produksjonsanlegg kan sies å være en mellomting mellom åpne dyrkingssystemer og lukkede reaktorer.

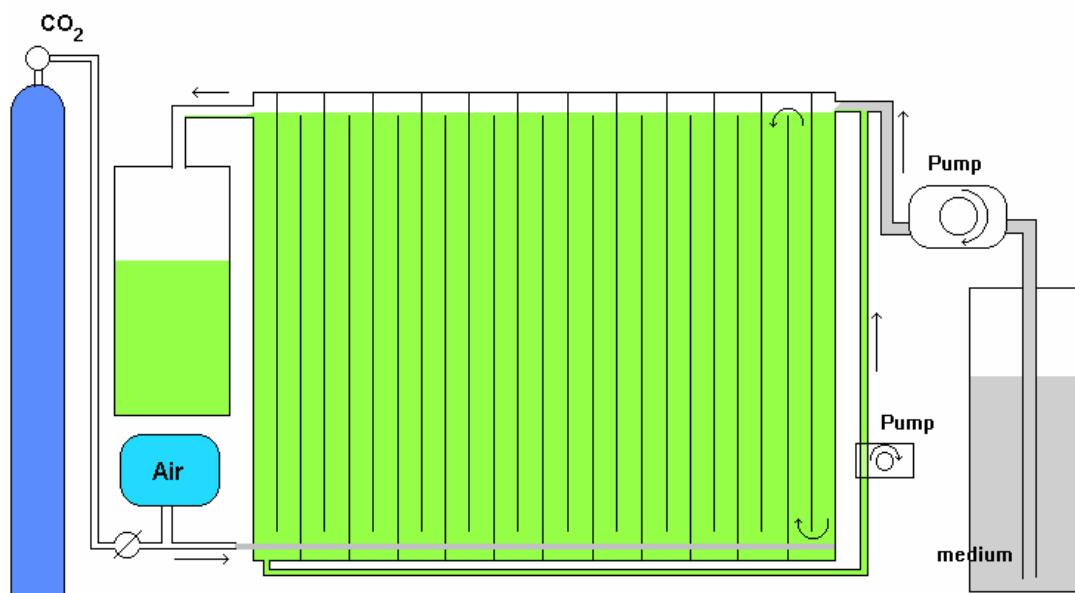
Store, åpne produksjonsanlegg for mikroalger er i kommersiell drift i mange land, særlig i tropiske/subtropiske områder, f.eks. Japan, Filippinene, Australia, Israel og USA

(se Delrapport 3). Liknende tilpassede anlegg benyttes også for rensing av avløpsvann, bl.a. i Sør-Afrika, Israel og USA. De alger som produseres er som regel ulike grønnalger og blågrønnalger (f.eks. *Spirulina platensis*).

I store, åpne dyrkingsanlegg oppnås gjerne en produksjon av 20-30 g algebiomasse $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Richmond 1986, Tredici & Materassi 1992). Beregnet avkastning på årsbasis i tropiske eller subtropiske områder kan oppgå til 50-70 tonn ha^{-1} (Tapie & Bernard 1988).

4.4.2. Lukkede reaktorer basert på dagslys

I de siste tiår er det utviklet flere typer av lukkede reaktorer for dagslysbasert produksjon av mikroalger. Denne utviklingen har vært styrt av ønsket om bedre kontroll av dyrkingsbetingelsene enn hva som er mulig i åpne damanlegg. Som i andre dagslysreaktorer kreves et høyt areal/volum-forhold. Dette oppnås ved å pumpe algekulturen rundt i gjennomsiktige rør (Richmond et al. 1993). Den lysfangende delen av reaktoren kan orienteres slik at utnyttelsen av innstrålingen blir optimal. Kulturen sirkuleres også gjennom en enhet for fjerning av oksygen og tilsetning av CO_2 . Reaktoren kan bygges med rør av glass- eller plastmateriale, eventuelt nedsenket i et vannbasseng for temperaturkontroll.



Figur 12. Skisse av panelreaktor av pleksiglass med vertikale kanaler for kontinuerlig produksjon av mikroalger (NIVA).

I noen reaktorkonstruksjoner har man benyttet kanalplater av pleksiglass av den typen som blir brukt bl.a. i veksthus (Tredici et al. 1991, Pulz et al. 1995). Algekulturen pumpes gjennom kanalene som kan seriekoples for å oppnå et definert strømningsmønster. Platene kan monteres med kanalene orientert vertikalt eller horisontalt. Ved vertikal orientering kan luft/ CO_2 tilføres i bunnen av kanalene slik at en separat enhet for de-oksygenering og CO_2 -tilførsel er unødvendig (**Figur 12**). Platenes tykkelse (1-3 cm) gjør det mulig å operere anleggene med høy biomassetetthet. Anlegg basert på kanalplater er kommersielt tilgjengelige. De benyttes bl.a. i Elbingerode i Tyskland for produksjon av *Chlorella* med CO_2 -utslipp fra en sementfabrikk som karbonkilde (**Figur 13**). Røygassen har et CO_2 -innhold på 20-25%, og tilføres i en mengde av 1 liter per time og liter algekultur. Anlegget er bygget inn i et veksthus med et overflateareal på 80 m^2 . Samlet kulturvolum er 6 m^3 . Produksjonen utgjør ca. 4 kg dogn^{-1} , som tilsvarer $50 \text{ g m}^{-2} \text{dogn}^{-1}$ regnet på hele drivhusarealet.

Ved at kulturen (drivhuset) er oppvarmet av spillvarme fra fabrikk kan anlegget opereres hele året, men foreløpig har man erfaring fra drift i perioden mai-oktober.

Beregninger av energiforbruk ved produksjon av alger i lukkede reaktorer (delrapport 2) har vist sirkulering av kulturen ved pumping medfører et betydelig forbruk av energi. I noen reaktorer brukes luftheis (air-lift) for å drive sirkulasjonen, samtidig som CO₂ tilføres med luftstrømmen. (Ratchford & Fallowfield 1992, Tredici et al. 1998). Dette er en energimessig gunstigere løsning.



Figur 13. Algereaktor for konvertering av CO₂. Sementfabrikk, Elbingerode, Tyskland (Preussag AG).

Algereaktorer basert på plastfilm i form av sylindriske poser blir benyttet til mindre produksjonsenheter. De har vært mye brukt for dyrking av marine alger som fôr i oppdrettsindustrien. Posene fylles med algekultur og henges opp eksponert til dagslys. Omrøring og CO₂-tilførsel kan skje ved tilførsel av luft/CO₂ via diffusorer i bunnen av dyrkingssystemet. Produksjonsteknikken er enkel og anleggskostnadene lave. Produksjonskapasiteten på volum-eller arealbasis er imidlertid trolig mindre enn for kanalplater eller rør-reaktorer under ellers like forhold.

På grunn av bedre beskyttelse av kulturen og kontroll av vekstbetingelsene gir lukkede reaktorer større valgmuligheter med hensyn til bruk av algetyper og produkter. I en reaktor av rørtypen i Frankrike dyrkes f.eks. en encellet rødalge (*Porphyridium cruentum*) for produksjon av bl.a. farmasøytika, polysakkarider og pigmenter (Gudin & Thepenier 1988). Mange "nye" alger vil trolig snart få kommersiell betydning takket være utviklingen av nye dyrkingsmetoder.

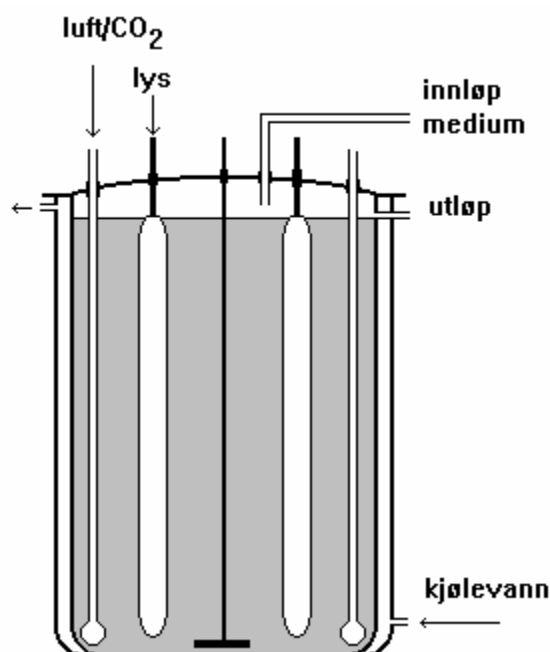
Flere undersøkelser har også vist at det er mulig å oppnå en høyere produksjon per arealenheter i lukkede dagslysreaktorer enn i tradisjonelle åpne anlegg. Ved forsøk i Italia var produksjonen av

Spirulina i en rør-reaktor f.eks. $30\text{--}33\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$, mens produksjonen i åpne dammer under like betingelser sjelden var over $20\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ (Tredici & Materassi 1992).

Eksisterende kommersielle anlegg med lukkede reaktorer er bare bygget i forholdsvis liten målestokk. Større anleggs-og driftskostnader sammenlignet med åpne damanlegg har gjort at lukkede reaktorer foreløpig mest har vært brukt til produksjon av spesielt verdifulle råstoffer.

4.4.3. Lukkede kunstlys-reaktorer

I kunstlys-reaktorer kan lyskilden plasseres inne i kulturen slik at utnyttelsen av lysenergien blir effektiv. Ved at lyskilden kan velges slik at fordelingen av lys tilpasses reaktorens form, kan denne konstrueres med tanke på andre forhold. Det innebærer at kjent fermentorteknikk kan benyttes, og de fleste foto-bioreaktorer har formen av sylindriske beholdere med en eller flere innebyggede lyskilder (Figur 14).



Figur 14. Skisse av lukket kunstlysreaktor med intern lyskilde (NIVA).

Siden driftsbetingelsene i en kunstlysreaktor normalt styres slik at produksjonen blir lysbegrenset, er det viktig å etterstreve en optimal lysutnyttelse. I senere tid har man gjort forsøk med optiske fibre for å lede inn og fordele lys i kulturen (Pulz et al. 1995). I Japan arbeider man med utvikling av lyshøstingsutstyr for å samle dagslys og transportere det med optiske fibre til algereaktorer (Mori et al. 1989). Fremgangsmåten gjør det mulig å kunne redusere arealet av selve algereaktoren.

Energibehovet for å generere lys utgjør en av de vesentligste driftsutgiftene ved algeproduksjon i kunstlysreaktorer. Energiutbyttet blir derfor en nøkkelfaktor ved vurdering av anvendeligheten av slike reaktorer for ulike formål. Radmer og Parker (1994) har beregnet energiforbruket til algeproduksjon med kunstlys (lysstoffrør) til 170 kWh per kg algebiomasse (tørrvekt). Dette er i samsvar med hva som er oppnådd ved praktiske forsøk med grønne alger ved NIVA (200 kWh per kg). Data fra produksjon av rødalgen *Porphyridum cruentum* i kunstlysreaktor (Muller-Fuega et al. 1998) gir et energiforbruk til kunstlys lik 310 kWh per kg .

Lukkede kunstlysreaktorer er den produksjonsteknologi som gir best muligheter for å kontrollere dyrkingsbetingelsene. Dette kan være nødvendig for å få maksimalt utbytte av ønskede innholdstoffer i algebiomassen, eller for å dyrke alger med spesielle krav. De forholdsvis store kostnadene for elektrisk lysenergi gjør at kunstlysbaserte algereaktorer særlig er aktuelt i forbindelse med småskala-produksjon av høykost-produkter (Se f.eks. Muller-Fuega et al. 1998). Den ekstra kostnaden i forhold til dagslysbasert produksjon kan beregnes til ca. 60 kr kg⁻¹, dersom energiprisen er 0,3 kr kWh⁻¹.

4.4.4. Reaktorer for immobiliserte alger

I noen produksjonsanlegg dyrkes alger immobilisert ved hjelp av et fast substrat. Et nytt dyrkingssystem for alger av denne typen er bl.a. utviklet ved Universitetet i Köln (Melkonian 1998, pers. medd.). Mikroalgene vokser på fiberduk montert vertikalt på et roterende stativ. Vekstmediet tilsettes på toppen og sildrer nedover lerretet. Med denne teknikken tilføres CO₂ via luften. Et forsøksanlegg er installert ved en kalkfabrikk i Tyskland (**Figur 15**). CO₂ fra kalkovnen overføres til et drivhus hvor algedyrkingen foregår. På denne måten kan CO₂ i drivhusatmosfæren økes 2-10 ganger over nivået i luft. Drivhusets areal er 9 m², men det totale dyrkingsarealet er 100 m². Produksjonen i anlegget kan utgjøre 300 g d⁻¹ som tilsvarer 33 g m⁻² d⁻¹ regnet på hele drivhuset.



Figur 15. Produksjon av mikroalger immobilisert på fiberduk (Tyskland).

4.5. Systemer for CO₂ - tilførsel

Tilførselen av CO₂ til algekulturer er ved siden av optimalisering av lysutnyttelse de viktigste faktorene ved konstruksjon av algereaktorer. Problemet er grundig behandlet av Becker (1994). Flere ulike teknikker er blitt brukt for å fordele CO₂ i kulturmediet. Man kan skille mellom to forskjellige hovedprinsipper:

- Aktiv gassovertføring ved innblåsing av små gassbobler i mediet eller sprøyting av algekulturen gjennom gass-fasen.
- Passiv overføring ved å skape en stor kontaktflate mellom en CO₂-atmosfære og kulturmediet.

Balansen i karbonomsetningen i en algekultur bestemmes av tilførselen av CO₂, karbonassimileringen ved fotosyntesen og tapet til atmosfæren gjennom kulturoverflaten. Karbonassimilasjonen beror på algenes vekstbetingelser (lys, pH, temperatur, næringsalter etc.) og kan uttrykkes som økningen i biomasse.

I et algeproduksjonsanlegg er det vanskelig å oppnå en jevn fordeling av CO₂. Konsentrasjonen av CO₂ minker med avstanden fra stedet hvor CO₂-tilførselen skjer pga. assimilering i alger og tap til atmosfæren. I et godt balansert system bør CO₂-konsentrasjonen være over den kritiske konsentrasjonen for ubegrenset fotosyntese i alle deler av kulturen. Dersom for mye CO₂ tilføres, risikerer man imidlertid å miste denne ved tap til atmosfæren.

Den enkleste måten å tilføre CO₂ i kulturen er i form av gassbobler. I laboratoriekulturer bruker man ofte innblåsing av ren CO₂, eller luft med CO₂, som fordeles i små bobler via en diffusor. Samme prinsipp brukes også i massekulturer. I åpne dyrkingsanlegg kan CO₂ tilføres gjennom perforerte rør langs med bunnen av systemet. På grunn av at dybden er lav, blir imidlertid denne løsningen lite effektiv, og mye av den tilførte CO₂ går tapt til atmosfæren. For å øke kontakttiden mellom CO₂-boblene og algekulturen, har man noen steder benyttet en plastfilm montert over CO₂-diffusorene for å fange opp resterende CO₂.

Et alternativ til bruk av diffusorer for CO₂-tilførsel i åpne dyrkingssystemer er å plassere flytende klokke fylt med CO₂ på overflaten av kulturene.

I reaktorer av skråplan-typen, og i lukkede reaktorer, kan CO₂-tilførselen gjøres effektivere. En vanlig løsning er å bruke en CO₂-kolonne hvor algekulturen pumpes nedover og møter bobler av CO₂. Hastigheten i vannstrømmen reguleres slik at CO₂-boblene blir igjen i algekulturen tilstrekkelig lenge til at de blir fullstendig absorbert. I lukkede kunstlysreaktorer kan man som regel oppnå en god utnyttelse av CO₂ ved at kulturens dybde kan gjøres så stor at CO₂ får lang kontakttid med kulturen når gassen fordeles i små bobler i bunnen.

I lukkede reaktorer har man lettere for å kontrollere tilsetningen av CO₂ i forhold til algenes behov. Vanligvis sirkuleres kulturen gjennom gjennomsiktige rør eller plater. I kretsløpet inngår også en luftingsstasjon hvor overskudd av oksygen drives ut, Deretter pumpes CO₂ inn i kulturen før den går tilbake til reaktoren.

En annen fremgangsmåte for overføring av CO₂ til algekulturer blir benyttet ved et forsøksanlegg i Tyskland (Melkonian 1998, pers. medd.). CO₂ fra kalkovnene i en kalkfabrikk vaskes ut fra avgassen med en kaliumhydroksidløsning som pumpes til et drivhus. CO₂ frigjøres i atmosfæren i drivhuset hvor algene dyrkes immobilisert på fiberduken (se **Figur 15**). Teknikken har den fordelen at eventuelle forurensninger i avgassen ikke blir overført med CO₂ til algekulturen.

I kommersiell algeproduksjon utgjør CO₂ en betydelig utgift, dersom ikke overskudds- CO₂ fra annen virksomhet kan utnyttes. Det er derfor viktig å regulere tilførselen etter behovet. Ved dagslysbasert produksjon kan det være tilstrekkelig å tilføre CO₂ i en viss tid på dagen. Tilførselen av CO₂ kan også automatiseres vha. pH-styrt dosering.

4.6. Utprøving av aktuelle CO₂-kilder i Vestfold

Forsøk bl.a. utført i Tyskland viser at det er mulig å bruke algekulturer til direkte CO₂-opptak fra avgasser. Resultatene viste at avgasser ga bedre utbytte sammenliknet med CO₂ fra luft (Melkonian 1998, pers. medd.) Også i Japan er det utført praktiske forsøk med bruk av avgasser fra et oljefyrt kraftverk (Hamasaki et al. 1994).

I Vestfold er to aktuelle CO₂-kilder undersøkt: Esso Slagentangen og FORESTIA Agnes, Larvik. Praktiske prøver er utført med avgass fra de to anleggene for å se om de egner seg som CO₂-kilde i algeproduksjon.

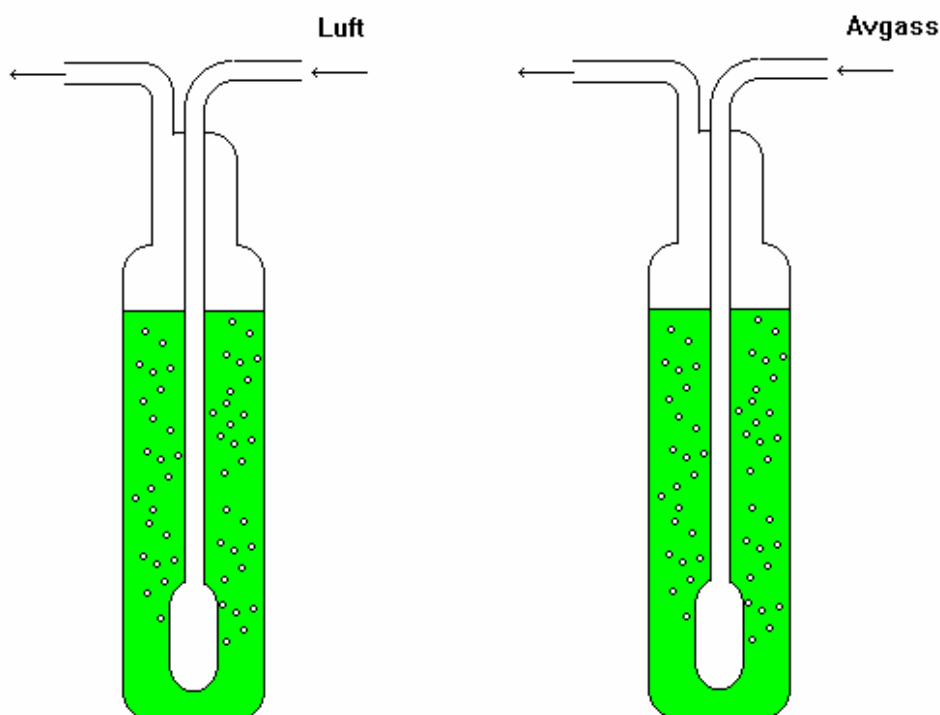
4.6.1. Esso Slagentangen

Avgass fra Esso Slagentangen har et innhold på ca. 9% CO₂, og det totale utslippet er beregnet til 350 000 tonn år⁻¹.

I mars 1998 ble det utført et forsøk for å undersøke om avgass fra oljeraffineriet egner seg som CO₂-kilde for produksjon av mikroalger. Avgass ble oppsamlet på to gasstuber og fraktet til NIVA.

To gassvaske-flasker ble fylt med algevekstmedium (Z8) og podet med algen *Selenastrum capricornutum*. Den ene flasken ble koplet til en gasstube med avgass og den andre til en luftpumpe (**Figur 16**). Gjennomluftingen ble justert slik at gassmengden ble omtrent lik i begge. Flaskene ble belyst fra lysstoffrør som ga en lysmengde tilsvarende 100 μE m⁻² s⁻¹. Veksten ble fulgt ved telling av algeceller med Coulter Counter i 11 døgn.

I ett døgn ble det plassert en gassvaske-flaske fylt med destillert vann mellom gasstuben og algekulturen. Vannet ble tatt ut til analyse av organisk karbon, sulfat og metaller.

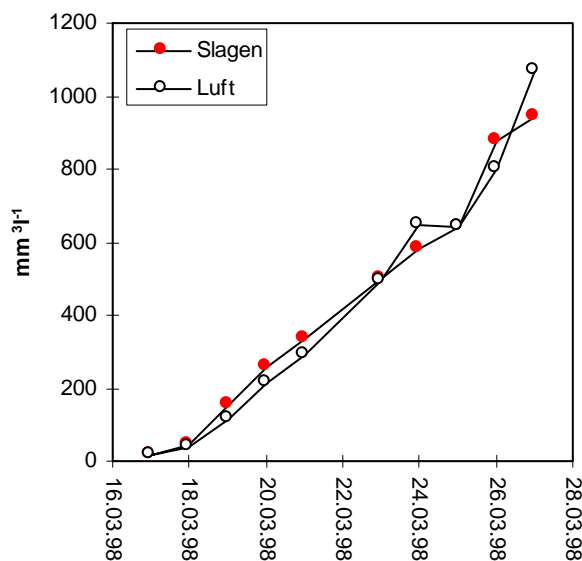


Figur 16. Forsøksoppsett for algebiotest av avgass fra Esso Slagentangen.

I **Figur 17** vises vekstforløpet i de to kulturene målt som samlet algevolum (mm³l⁻¹). Forløpet var meget likt i begge kulturene med linjær økning i algetetthet i ca. 10 døgn. En liten nedgang i algemengden den siste dagen tyder på at veksten da stagnerte i begge. Forsøket måtte da avbrytes fordi gassflasken var tom.

pH-verdien i kulturen med luft steg til 8,8 etter tre døgn og varierte deretter mellom 8,4 og 9,0. I kulturen med avgass var pH-verdien 6,4-6,7. Dette tyder på at luftingen var tilstrekkelig for å

unngå sterk CO₂-begrensning i kulturen, og at veksten til slutt ble begrenset av andre forhold (lys eller næringsstoffer). Den lave pH-verdien i kulturen med avgass skyldes trolig CO₂-innholdet, og viser at den benyttede gassmengden ga mer CO₂ enn algene hadde behov for.



Figur 17. Vekstforløpet i algekulturer gjennomboblet med luft og med avgass fra Esso Slagentangen.

Tabell 2. Resultater av kjemisk analyse av destillert vann gjennomluftet med avgass fra Esso Slagentangen i ett døgn.

Komponent	benevning	enhet	verdi
Organisk karbon	TOC	mg l ⁻¹	4,2
Sulfat	SO ₄	mg l ⁻¹	<0,2
Vanadium	V	µg l ⁻¹	<0,1
Krom	Cr	µg l ⁻¹	<0,1
Jern	Fe	µg l ⁻¹	<5
Cobolt	Co	µg l ⁻¹	0,017
Nikkel	Ni	µg l ⁻¹	0,28
Kopper	Cu	µg l ⁻¹	1,9
Sink	Zn	µg l ⁻¹	1,5
Molybden	Mo	µg l ⁻¹	<0,1
Kadmium	Cd	µg l ⁻¹	3,3
Bly	Pb	µg l ⁻¹	24

Analysene av vann som ble gjennomboblet med avgass i ett døgn er gjengitt i **Tabell 2**. Resultatene viser at gassen inneholder noen organiske komponenter som løses i vann. Sulfatkonsentrasjonen var under deteksjonsgrensen på 0,2 mg l⁻¹. Med unntak av bly og kadmium var innholdet av metaller lavt. Bly-konsentrasjonen, 24 µg l⁻¹, er under det nivå som er giftig for algene, men akkumulering av bly i algene kan eventuelt bety noen begrensninger i bruksområder for algebiomassen. I følge opplysninger fra Esso (Øivind Sundberg) er kilden til bly i avgassen trolig rester av bly i katalysatormasse som stammer fra tidligere bruk av blyholdig bensin. Katalysatorene blir imidlertid skiftet ut etter en tid, og problemet med bly i avgassen vil da bli fjernet. Kadmium-innholdet er ikke så høy at det hemmer veksten av alger, men faren for

akkumulering i algene bør avklares ved analyse av algebiomasse dyrket i pilotanlegg med den aktuelle avgass som CO₂-kilde.

4.6.2. FORESTIA Agnes, Larvik

Forsøk med avgass fra fabrikken til FORESTIA Agnes i Larvik ble utført i august 1998. To ulike typer avgasser; fra hhv. støvfyring og oljefyring ved fabrikken ble komprimert på gasstuber og transportert til NIVA. Siden den tilgjengelige gassmengden var større enn i prøven fra Esso Slagentangen ble utprøvingen foretatt i en 2-liters reaktor med kontinuerlig tilførsel av medium (ca 0,75 l d⁻¹).

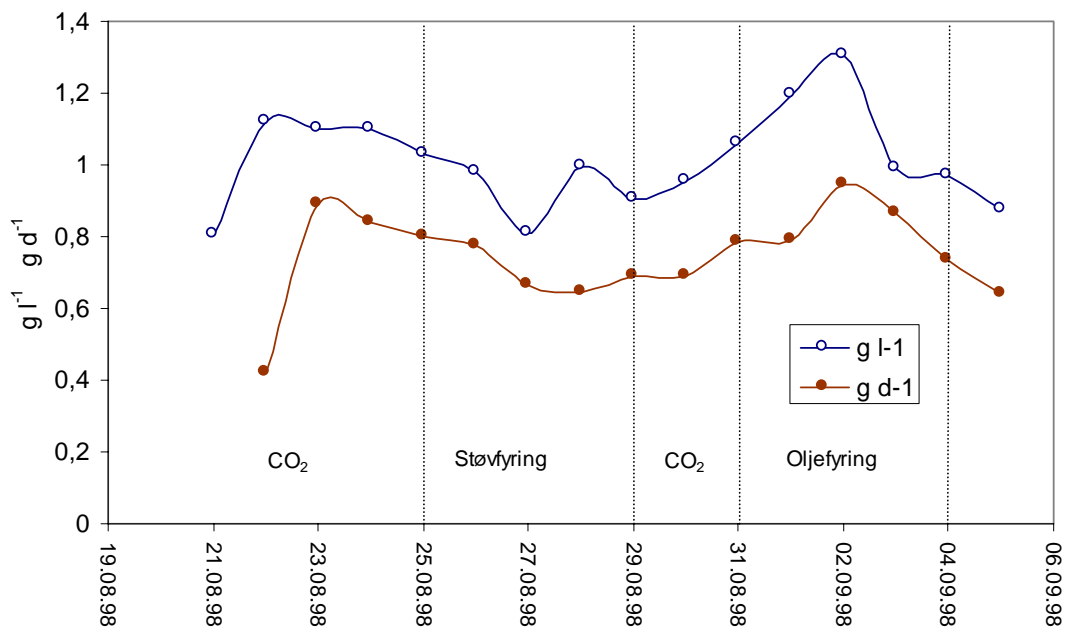
CO₂-tilførselen ble styrt med hjelp av en pH-styrt magnetventil, som åpnet når pH-verdien nådde over 7,5. Reaktoren ble startet opp med ren CO₂ blandet med luft. Når produksjonen var stabil på ca. 1 g d⁻¹, ble avgass fra støvfyring koplet inn som CO₂-kilde. Kulturen ble videreført i 4 døgn før avgassen igjen ble erstattet med ren CO₂ i to døgn. Til slutt ble avgass fra oljefyring koplet inn i 4 døgn.

En gassvaskeflaske med destillert vann ble koplet inn mellom gasstuben og reaktoren i ett døgn. Vannet fra gassflasken ble deretter analysert for innhold av organisk karbon, sulfat og metaller.

Utviklingen i algereaktoren med ulike CO₂-kilder er vist i **Figur 18**. Produksjonen var relativt konstant gjennom hele perioden (0,7-0,95 g d⁻¹). Variasjonene som ble observert ser ikke ut til å skyldes de ulike CO₂-kildene, men er trolig et resultat av ujevn tilførsel av gass pga. en defekt reduksjonsventil.

Begge avgassene var altså egnet som CO₂-kilde for algene.

Analysene av vann som var gjennomboblet av avgassene er vist i **Tabell 3**. Innholdet av organisk karbon og sulfat var lavt. Av metaller ble det funnet noe høyere konsentrasjoner av nikkel, kopper og sink enn i gassen fra Slagentangen. Konsentrasjonene av kadmium og bly var imidlertid lavere. Alle konsentrasjoner er mindre enn det som ventes ha hemmende virkning på alger under de aktuelle forhold. Konsentrasjonen av kopper i avgassen fra oljefyring er den faktor som eventuelt er nærmest til å kunne gi problemer.



Figur 18. Biomassetetthet og produksjon i en algereaktor med testalgen *Selenastrum capricornutum* i perioder med tilsetning av ren CO₂, henholdsvis CO₂ fra avgasstyper fra FORESTIA Agnes, Larvik.

Tabell 3. Resultater av kjemisk analyse av destillert vann gjennomluftet i ett døgn med avgasser fra FORESTIA Agnes, Larvik.

Komponent	benevning	enhet	støvfyring	oljefyring
Organisk karbon	TOC	mg l ⁻¹	0,61	0,63
Sulfat	SO ₄	mg l ⁻¹	<0,1	<0,2
Vanadium	V	µg l ⁻¹	<0,1	<0,1
Krom	Cr	µg l ⁻¹	0,1	0,1
Jern	Fe	µg l ⁻¹	<5	<5
Cobalt	Co	µg l ⁻¹	0,005	0,003
Nikkel	Ni	µg l ⁻¹	1,5	0,41
Kopper	Cu	µg l ⁻¹	3,5	9,4
Sink	Zn	µg l ⁻¹	2,7	4,1
Molybden	Mo	µg l ⁻¹	<0,1	<0,1
Kadmium	Cd	µg l ⁻¹	0,01	0,011
Bly	Pb	µg l ⁻¹	0,12	0,16

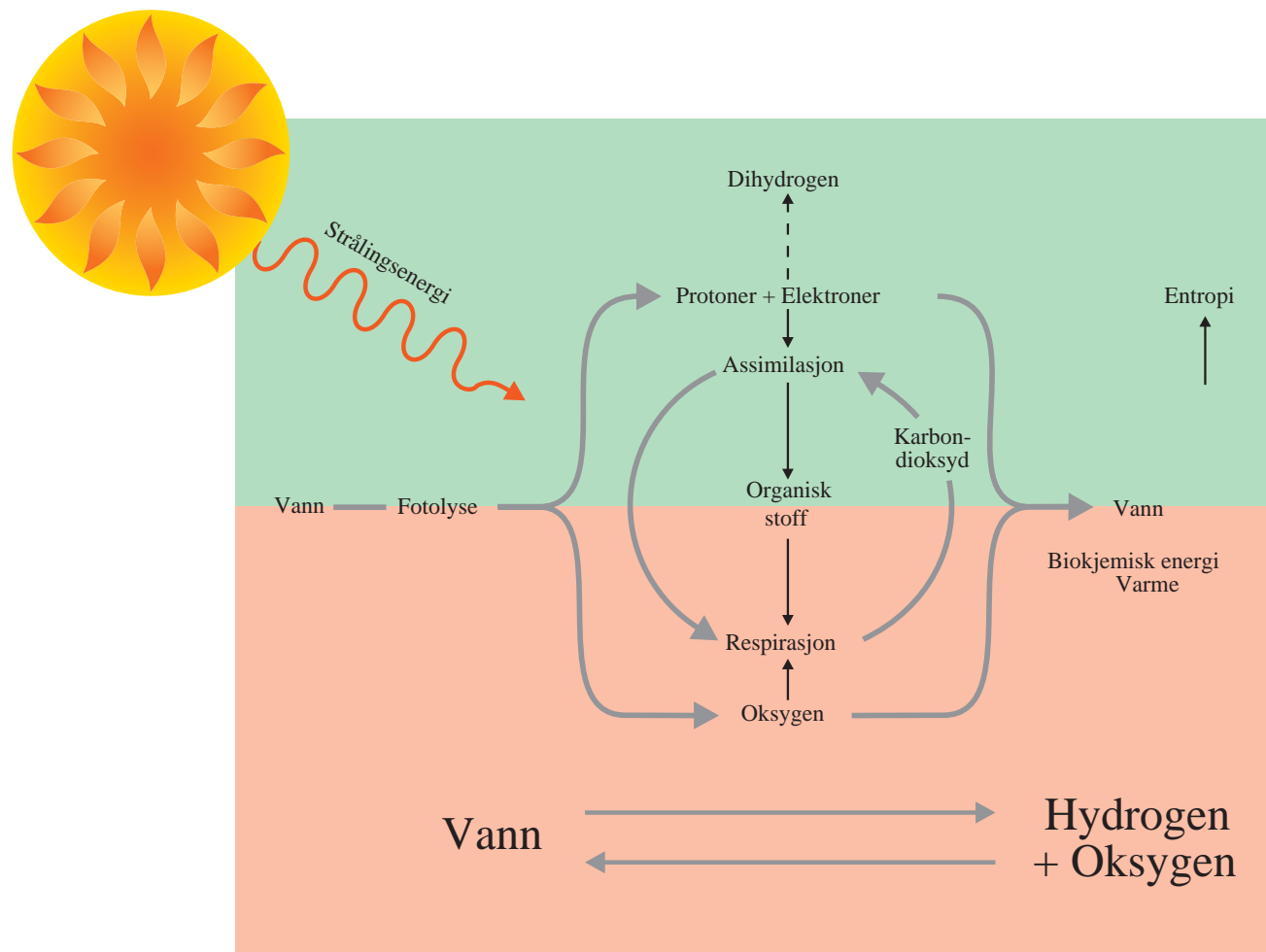
5. Algekulturateknologi og H₂-produksjon

5.1. Teoretisk grunnlag

Fotosyntese og respirasjon er biologiske prosesser som har fundamental betydning for karbonkretsløpet (se avsnitt 3). I stoffskiftesammenheng er det mest interessante hvordan karbon overføres fra en gassformig, anorganisk forbindelse til faste, organiske forbindelser gjennom fotosyntesen; og samtidig den omvendte prosess, hvordan ved respirasjon det organiske stoffet mineraliseres med frisetting av karbondioksid.

Betraktes derimot disse to prosessene i sammenheng med energivekslingen, inntar hydrogen en mer sentral rolle enn karbon. Via fotosyntesen blir strålingsenergien fra sola omdannet til kjemisk energi, i det vann blir spaltet i oksygen og hydrogen. Oksygenet blir frisatt, mens hydrogenet blir bundet til karbon - som stammer fra karbondioksid - i en metastabil tilstand. Potensialdifferansen som de fotosyntetiske organismene på denne måten fremskaffer mellom hydrogen og oksygen, danner det energetiske grunnlaget for organotrofe organismer. Hydrogen blir igjen løst fra de organiske karbonforbindelsene. Det reagerer med oksygen til vann under frigivelse av energi. Denne oksydasjon finner sted i kontrollerte trinn, med en porsjonsvis frembringelse av biokjemisk energi.

Betraktet i global sammenheng (**Figur 19**) utgjør disse prosessene - biofotolyse, fotosyntese og respirasjon - et helhetlig funksjonelt system hvor omdannelsen av strålingsenergi til varme resulterer i en oppbremset entropiøkning. Dette danner forutsetningen for alt organismeliv på jorden.



Figur 19. Prinsippskisse for sammenhengen mellom biofotolyse, fotosyntese og respirasjon knyttet til stoffkretsøpene for hydrogen og karbon.

5.2. Konvertering av CO₂ via mikroalger med hydrogengass-produksjon

Det er betydelige tekniske og praktiske vanskeligheter forbundet med utnyttelsen av solenergien (Johansson et al. 1993). Det gjelder bl.a. hvordan energien kan bli fanget opp, lagret og transportert på hensiktsmessig måte. Her er det hydrogenets muligheter åpner et interessant perspektiv. Hydrogen vil kunne bli den ledende energibæreren i fremtiden (Yürüm 1995). Råstoffet til å skaffe hydrogengass blir vann, og solen den viktigste energikilde. Og vann kan betraktes som en ubegrenset ressurs for hydrogengassproduksjon (Zaborsky 1998).

Hydrogengass er et karbonfritt drivstoff som, når det oksyderes, gir vann som forbrenningsprodukt. Vann i kombinasjon med solenergi til å spalte vannmolekylene, er en rikelig energikilde som inngår i et karbonfritt, naturlig kretsløp. Hydrogenteknologien vil primært være lite negativ i økologisk sammenheng. Det blir f.eks. ingen utslipp av CO₂, SO₂, VOC, og små bidrag med NO_x ved forbrenning av hydrogengass. De øvrige økologiske konsekvenser ved industrisamfunnets energiutnyttelse vil selvsagt hovedsakelig være de samme uansett form for energikilde.

Algekulturteknologi benytter via fotosyntesen sollys som primær energikilde. Biofotolysen av vann i fotosynteseprosessen fremskaffer kjemisk energi (lagret i form av ATP) og hydrogen (i form av NADPH₂). Ved enzymatisk reduksjon av protoner kan hydrogengass utvikles. Det stofflige grunnlag for algekulturteknologi utgjøres av vann, plantenæringsstoffer og karbondioksid. Innebygget i dette ligger en mulighet til utnyttelse av avgasser (f.eks. CO₂) og avfallsstoffer (organisk stoff, kloakkvann, husdyrgjødsel etc.) til produksjonsformål.

I bioreaktorer dyrkes mikroalger og fotosyntetiske prokaryoter (blågrønnalger og/eller anoxyfotobakterier) til produksjon av algebiomasse/dihydrogen. Integreerte separasjons- og renseprosesser tilpasses de komponenter - ekstracellulære og intracellulære - som skal utvinnes og anrikes (hovedprodukter og biprodukter). To kategorier produkter har praktisk interesse å fremstille:

- verdifulle komponenter i små kvantiteter (f.eks. farmasøytika)
- lavpriskomponenter i store kvantiteter (f.eks. fôr, hydrogengass).

Restprodukter etter utvinning av komponenter kan eventuelt føres tilbake til bioreaktorene (f.eks. gjenvinning av plantenæringsstoffer).

Ved å koble konvertering av CO₂ via mikroalger til å fremstille essensielle varer med en likeløpende produksjon av molekylært hydrogen, vil algekulturteknologi kunne få en ekstra økonomisk og samfunnsmessig betydning (Greenbaum 1988, Bolton 1994, Bergene 1995).

5.3. Organismer og prosesser

Det foreligger en omfattende litteratur som behandler organismer og prosesser som inngår i hydrogengassproduksjon (Nandi & Sengupta 1988, Markov et al. 1993, Skulberg 1995). I det følgende blir det bare gjort en forenklet fremstilling av temaet.

Den teknologiske anvendelse av biofotolyseprosessen til hydrogengassproduksjon i forsøks-sammenheng omfatter foreløpig tre forskjellige fremgangsmåter:

- bruk av blågrønnalger (klasse Cyanophyceae) eller grønnalger (klasse Chlorophyceae) i aktive kulturer med simultan dannelse av molekylært hydrogen og oksygen via spaltning av vann.
- bruk av algenes isolerte CFH-system (kloroplast, ferredosin, hydrogenase-system), eller substituerte analoger til dette systemet, i *in vitro*-oppstillinger.
- bruk av fotosyntetiserende bakterier (underklasse Anoxyphotobacteriae, f.eks. svovelbakterier - orden Rhodospirillales, eller "grønne svovelbakterier" - orden Chlorobiales), med organisk stoff eller hydrogensulfid som hydrogenkilde.

Når det gjelder den tredje nevnte gruppen av fremgangsmåter, så er de fotosyntetiserende bakteriene ikke i stand til å spalte vann. Da de vokser på energirike stoffer (heterotrof metabolisme), er de heller ikke netto energiprodusenter ut fra betraktningen biologisk hydrogenproduksjon (utnyttelse av solenergi). Imidlertid kan det her fremheves lovende forsøk med blandkultursystemer (Bushell & Slater 1981) hvor det inngår en fermentativ, anaerob bakterie - f.eks. *Cellulomonas* - og en purpurbakterie - f.eks. *Rhodopseudomonas* - samt et organisk substrat - f.eks. cellulose. Et slikt system åpner for spesielt interessante muligheter (Kerby & Rowell 1992).

I det følgende er det anvendelsen av blågrønnalger og grønnalger til hydrogenproduksjon som fremstillingen er konsentrert om (Skulberg 1995).

5.3.1. Hydrogenproduksjon med grunnlag i grønnalger og hydrogenase

Når arter av grønnalger i slekter som *Scenedesmus* og *Chlamydomonas* blir gitt karbondioksidfri og anaerobe miljøbetingelser, er de i stand til å syntetisere enzymet hydrogenase og skille ut molekylært hydrogen. Hydrogenase-aktivitet er dokumentert i omlag halvparten av alle undersøkte algearter fra ulike systematiske grupper (Kessler 1974). Algeartene som inneholder hydrogenase omfatter både encellede og flercellede former. Men det er likevel en vesentlig forskjell mellom encellede og flercellede alger når det gjelder hydrogenase-aktivitet med mulighet for dannelse av dihydrogen.

Encellede alger kan katalysere et utvalg av hydrogen-relaterte prosesser, som inkluderer bl.a. utskillelse eller opptak av molekylært hydrogen. Dette er eksperimentelt verifisert. Men tilsvarende er ikke tilfelle for flercellede alger. Det er ikke kjent et eneste eksempel på at makroskopiske alger (f.eks. arter av slekten *Ulva*) har fotolytisk produksjon av dihydrogen. Dette til tross for at enzymet hydrogenase er påvist å være til stede i disse algene (Greenbaum & Ramus 1983).

Begrepet hydrogenase omfatter ikke et enkelt enzym, men egentlig en klasse av enzymer. Hydrogenaser er svært varierende i f.eks. molekylvekt, kofaktor-sammensetning og i sine spektroskopiske egenskaper (Mayhew & O'Connor 1982). Dette forhold gjenspeiler trolig de forskjellige funksjoner hydrogenase har i ulike organismer. Hydrogenaser deles gjerne inn i to grupper etter aktuell funksjon i cellen med hensyn til å danne hydrogen eller å forbruke hydrogen. En tredje gruppe omfatter hydrogenaser som kan katalysere begge disse prosessene (reversibel hydrogenase).

Hydrogenase er påvist i og isolert fra flere ikkefotosyntetiserende bakterier (Schlegel & Schneider 1978), blågrønnalger (Rao & Hall 1988, Smith 1990) og grønnalger (Erbes et al. 1979). Enzymet er derimot ikke til stede i moser, bregner eller blomsterplanter.

Omfattende forskningsvirksomhet er utført med hydrogenase knyttet til arter av slekten *Chlamydomonas* (Greenbaum 1991). Dette har resultert i grunnleggende kunnskap om

enzymet og prosessene det katalyserer i algecellene (Reeves & Greenbaum 1989). Den spesifikke aktivitet til ren hydrogenase isolert fra *Chlamydomonas* er bestemt til 1800 $\mu\text{mol H}_2$ per mg protein (molekylvekt ca $4,6 \cdot 10^4$ dalton) pr. minutt. Enzymet har mange sure sidegrupper, inneholder jern og har en aktiveringsenergi tilsvarende 55,1 kJ per mol dannet hydrogen (Roessler & Lien 1984, Greenbaum 1991, Benemann 1998).

5.3.2. Hydrogengassproduksjon med grunnlag i blågrønnalger og nitrogenase

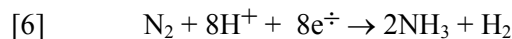
Blågrønnalgene har fordeler når det gjelder produksjon av molekylært hydrogen med cellekulturer bl.a. ved at deres enzymer og fotosynteseapparat generelt er mer stabile sammenliknet med grønnalgenes. Hydrogenstoffskiftet til blågrønnalgene er katalysert av tre typer enzymer (Lambert & Smith 1981, Nandi & Sengupta 1998):

- reversibel hydrogenase som forekommer så vel i vegetative celler som i heterocyster.
- opptak - hydrogenase som forekommer hovedsakelig i heterocystene
- nitrogenase som forekommer i heterocystene.

Enzymet nitrogenase kan katalysere dihydrogendannelse med forbruk av ATP (adenosintrifosfat). Ved fotosyntesebetinget hydrogengassproduksjon via intakte blågrønnalgeceller er det enzymene knyttet til nitrogenfiksering som gjennomfører prosessen.

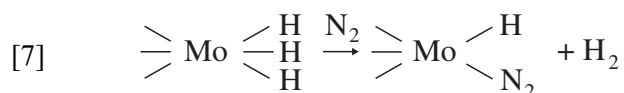
Med hensyn til praktisk hydrogenproduksjon ved hjelp av blågrønnalger, kommer hydrogenase i begrenset betraktning. Den høyeste oppnådde hydrogenasebaserte hydrogengassutskillelse fra intakte celler har vært av størrelsesorden 1 ml/time per g tørrvekt alger (Kentemich et al. 1990). Dette er for minimal hastighet av gassdannelse praktisk vurdert.

Det er betydelig større gassmengder som dannes av blågrønnalger ved hjelp av nitrogenase. Dette enzymkomplekset katalyserer en irreversibel kjemisk reaksjon med bl.a. molekylært hydrogen som resultat:



Enzymet nitrogenase er bygget opp av to proteiner. Det ene er et molybden-jern-svovel-protein og det andre et jern-svovel-protein (Schlegel 1985). Såvel enzymkomplekset som prosessen med N_2 -fiksering er svært oksygenømfintlig. Blågrønnalgene kan i de spesialiserte cellene som heterocystene representerer, beskytte nitrogenfikseringsapparatet mot et ødeleggende partialtrykk av oksygen (Fogg et al. 1973).

Elektronoverføringen i nitrogenase er en kompleks prosess. Dette henger sammen med at flere redoks-aktive metallgrupper inngår, hvor bl.a. molybden inntar en sentral plass. Gjennom binding av dinitrogen til molybden blir det frigjort 1 mol dihydrogen:



5.4. Teknologiske løsninger

5.4.1. Oversikt

Det finnes til nå ingen kommersielle produksjonssystemer for en praktisk/økonomisk fremstilling av molekylært hydrogen med grunnlag i biofotolyse (Benemann 1998). Men intensiv faglig virksomhet fremmer denne forskning og utvikling i mange laboratorier verden over (Zaborsky 1998).

I eksperimentell forbindelse anvendes flere systemer for tilvirkning og utprøvning av fotobioreaktorer til formålet. Noen eksempler på fremgangsmåter som vurderes positive i teknologisk sammenheng kan omtales.

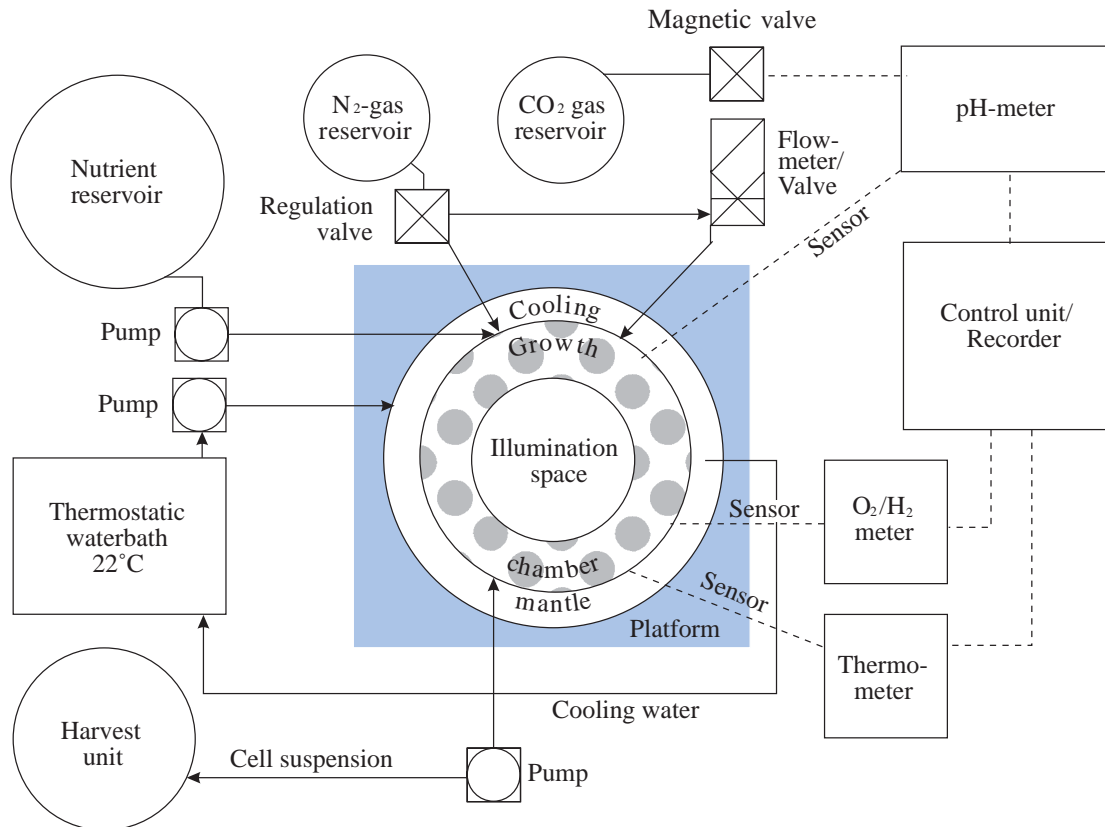
Biofotolytisk produksjon av hydrogengass i algekulturteknologi anvender egnede mikroalger (blågrønnalger eller grønnalger) i spesielle dyrkingssystemer. Mikroalgene dyrkes i optimale næringsløsninger under kontrollerte miljøbetingelser (Skulberg & Skulberg 1990). Ved teknisk å tilrettelegge forutsetningene for hydrogenutskillelse fra algecellene, og med oppsamling av molekylært hydrogen, kan systemet utgjøre en funksjonell reaktor til formålet. To hovedprodukter kan høstes, algebiomasse og gasser (hydrogen, oksygen, i støkiometriske forhold).

Når det gjelder aktuelle dyrkingmåter, omfatter dette moderne tekniske løsninger (Gudin & Thepenier 1986) av åpne, halv lukkede eller lukkede systemer. En skjematisk fremstilling av en fotobioreaktor for biomasse/energi-produksjon er vist i **Figur 20**. Tekniske metoder for oppsamling og anrikning av hydrogengass er til dels sofistikert utviklet (Institutt for energiteknikk 1991). Det er utarbeidet inngående beskrivelser for konstruksjon og operering av fotobioreaktorer (Pirt et al. 1983, Markov et al. 1993). Fremgangsmåtene som benyttes med hensyn til dyrkingmetoder omfatter kontinuerlige kulturer basert på prinsippene for turbidostater eller kjemostater (Veldkamp 1976, Vonshak & Richmond 1985). Fotobioreaktorer for biomasseproduksjon er utviklet i industriell skala, og benyttes i praktisk/økonomisk virksomhet (Richmond 1990, Tredici & Materassi 1992).

Til produksjon av molekylært hydrogen benyttes fotobioreaktorer med utrustning som omfatter reservoir for medium, lyskilde, pumper for sirkulering av kulturløsning, dyrkingsenhet og gassoppsamler, samt instrumentering for styringsfunksjoner.

Noen viktige hensyn for en aktuell, optimal utførelse kan nevnes:

- Dyrkingsenheten må være tett for å unngå diffusjon av hydrogengass ut av reaktoren.
- Det tilrettelegges for effektiv utnyttelse av lysenergi basert på beregning av fotobioreaktorens geometri.
- Hydrogengassproduksjon foregår under mikroaerobe betingelser (atmosfære med lavt partialtrykk av N₂ og O₂). Anaerobe forhold etableres ved utskifting via edelgass (Ar eller He).
- Både kulturer med fri algeceller og immobiliserte algeceller er anvendelige.



Figur 20. Fotobioreaktor konstruert ved NIVA for masseproduksjon av blågrønnalger til biofotolyse-forsøk.

5.4.2. Eksempel på dyrkingssystem med immobiliserte celler av blågrønnalger

Bruk av immobiliserte celler er en velkjent metode innenfor bioteknologi. Blågrønnalgene kan med fordel benyttes i dyrkingssystemer basert på immobilisering (Park et al. 1991). Interessante forsøk med praktisk siktepunkt på hydrogengassproduksjon med denne teknikk - "hollow fibre photobioreaktor" - er foretatt i England (Rao & Hall 1992). Som immobiliseringsmedium ble polyurethan benyttet.

Det ble eksperimentert med flere arter av blågrønnalger (se 5.3.2). De beste resultatene viste *Anabaena variabilis* (Markov et al. 1992). Produksjonen av molekylært hydrogen fant sted i en totrinns operasjon. Første trinn besto i oppdyrking av biomasse av *A. variabilis*. Andre trinn innebar bruken av de fotosyntetisk dannede karbohydrater til generering av dihydrogen under anaerobe kulturbetingelser. Gjennom forsøk som strakte seg over mer enn 5 måneder ble det kontinuerlig produsert inntil $200 \text{ ml H}_2 \text{ g}^{-1}$ tørrvekt mikroalger per time (Markov et al. 1992).

5.4.3. Eksempel på dyrkingssystem med cellekultur av grønnalger

Disse dyrkingssystemene er basert på arter av grønnalger med hydrogenase-aktivitet (se 5.3.1). Grønnalgekulturen binder CO_2 via fotosyntese i reservestoffer som glykogen eller stivelse. Disse stoffene kan gjennom et etterfølgende trinn konverteres til molekylært hydrogen. Dette siste omdannelsestrinn kan foregå utført av grønnalgene selv, eller ved hjelp av fotosyntetiske bakterier, i en fermenteringsprosess (se 5.3). Det blir antatt at anvendelsen

av grønnalgene til gjennomføring av begge de fysiologiske prosessene er praktisk/økonomisk fordelaktig, og at de to prosessene blir tilrettelagt romlig adskilt (Benemann 1998).

Den praktiske fremgangsmåten for hydrogengassproduksjon basert på et slikt prinsipp kan i grove trekk beskrives å omfatte følgende stadier og utrustninger:

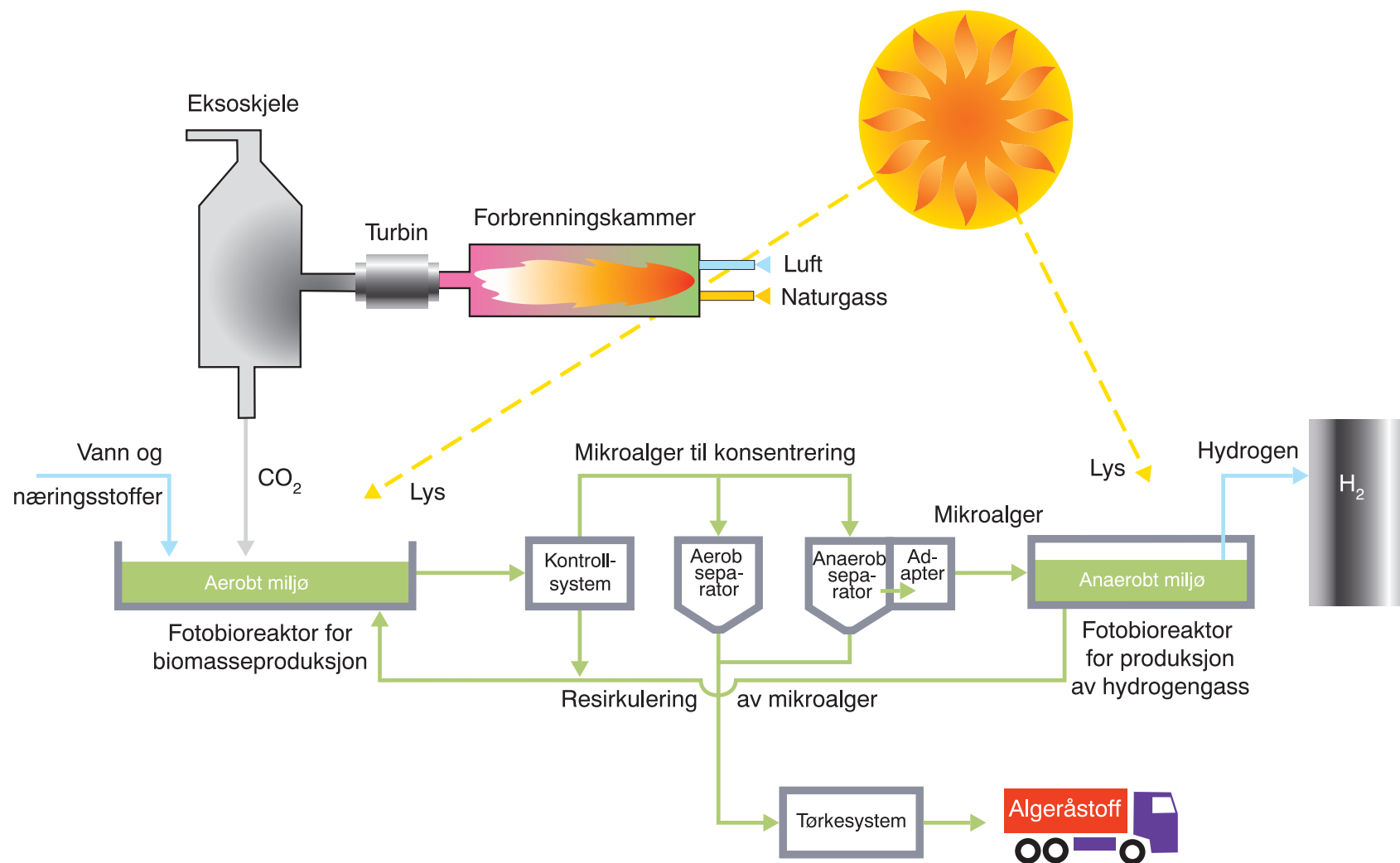
- I en åpen massedyrkingsenhet blir det produsert (assimilasjon) biomasse med høyt organisk tørrstoffinnhold (reservenæring).
- Mikroalgene konsentereres i et høstingssystem til en tyktflytende masse. Dette utføres uten lystilgang og anaerobt for å stimulere dannelsen av hydrogenase i algecellene, og tilrettelegge betingelsene for fermentering av organisk stoff.
- Mikroalgens innhold av reservenæring omdannes i en egen fotobioreaktor (lystilgang, anaerobt) til hydrogengass og karbondioksid.
- Gassene blir separert, og hydrogengass går til oppsamlingsenheter. Den dannede karbondioksid kan eventuelt tas hånd om i et separat fotobioreaktorsystem til produksjon av blågrønnalger (Skulberg 1995).

I **Figur 21** er det gjengitt en skisse av et hypotetisk AKT-anlegg knyttet til et gasskraftverk hvor karbondioksid konverteres via mikroalger til biomasse og hydrogengass.

5.4.4. Utviklingsperspektiv

Det er viktig å understreke at det internasjonalt i forskningssammenheng er utført et meget inngående teoretisk og eksperimentelt arbeid når det gjelder de aktuelle metodenes biokjemi, enzymologi samt den relevante prosessteknologi (Lambert & Smith 1981, Cammack et al. 1985, Bryant 1994). Erfaringene viser bl.a. at produksjonen av dihydrogen under anaerobe betingelser - anoxyfotobakterier - har optimal støkiometri, f.eks. 1:4 med glukose som substrat. Bruken av blågrønnalger - oxyfotobakterier - har imidlertid det største potensialet med vann som substrat, f.eks. direkte biofotolyse (Mitsui et al. 1983).

En vesentlig problemstilling for praktisk biofotolytisk produksjon er effektiviteten de aktuelle prosessene har til fremstilling av hydrogengass (Johansson et al. 1993). Med effektivitet menes da forholdet mellom lagret energi i form av dihydrogen og energien som inngår i prosessen for å fremstille gassen. Det skal ikke her bli gitt noen gjennomgåelse av de omfattende studier som er utført for å belyse dette forholdet (Bell & Gudkov 1993, Hall & Rao 1994). Men noen hovedbetraktninger kan nevnes.



Figur 21. Skisse av hypotetisk anlegg for konvertering av karbondioksid via mikroalger til biomasse og hydrogengass.

Når det gjelder kvantebehovet, vil ett foton av sollys bli absorbert for hvert elektron som føres til reaksjonssenteret i mikroalgenes fotosynteseapparat. Maksimum energieffektivitet til fotosyntesen er teoretisk beregnet til 26% (termodynamisk maksimum energieffektivitet, $\eta_m = 0,32$, Bell & Gudkov 1993). Under praktiske forhold vil imidlertid netto energieffektivitet sjelden kunne overstige 5% (Hall & Rao 1994). Teknologiske prosesser basert på biofotolyse må regne med effektiviteter som ligger nede på dette nivå (Bergene & Skulberg 1994). Utviklingspotensialet er imidlertid betydelig større. I en totrinns produksjonsprosess for hydrogengass - som omtalt i 5.4.3 - er f.eks. det teknologiske siktepunktet å oppnå en energieffektivitet på ca 10% (Benemann 1998). Dette forutsetter at det inngår ett foton per molekyl dihydrogen som dannes, og at en tredjedel av hydrogengassen kan gjenvinnes under den anaerobe fermentering i produksjonsreaktoren. Det stiller samtidig spesielle algekulturteknologiske krav, bl.a. fordelaktige høstingsbetingelser. Trichale blågrønnalger, eller grønnalger som enkelt lar seg flokkulere, kan gi muligheter for dette (Aasgaard et al. 1995).

5.5. Norsk forskning med biofotolyse for hydrogengassproduksjon

Det har hittil i Norge i bare beskjeden utstrekning vært gjort teoretiske og eksperimentelle studier av fotosyntetiske mikroorganismer med siktepunkt hydrogenproduksjon via biofotolyse. Imidlertid er det i grunnforskningssammenheng blitt foretatt vesentlige forskningsarbeider knyttet til molekylbiologiske studier av fotosyntetiske prokaryote og eukaryote mikroorganismer (Knutsen & Lien 1981, Ormerod 1992). Resultatene av denne virksomhet har bl.a. bidratt til å tilrettelegge utviklingen av mulighetene for å nyttiggjøre biofotolyseprosessen til praktiske formål (Madigan 1992, Skulberg 1992).

Da Norges teknisk-naturvitenskapelige forskningsråd (NTNF) tok initiativ til å belyse forsknings- og utviklingsmuligheten knyttet til hydrogen som energibærer i 1989, innledet Norsk institutt for vannforskning arbeidet med oppgaver for å anvende mikroalger i kulturtekniske systemer til hydrogenproduksjon. Forskningsprogrammet Utnyttelse av Solenergi - Industri og energi (IE), Norges forskningsråd - ga støtte til fremdrift av oppgaven. Arbeidet med et forprosjekt - EMS 30314 - ble avsluttet i 1995 med konklusjonen at videreføringen av praktiske og eksperimentell biofotolyseforskning skulle knyttes til FoU av algekulturteknologi i Norge (Skulberg 1995, Aasgaard et al. 1995).

Rapporter og publikasjoner som ble utarbeidet på forskningsfeltet er sammenstilt i oversikten nedenfor.

Bergene, T. & Skulberg, O.M. (1994): Naturen som veiviser mot morgendagens energisamfunn. *Naturen* 118(1): 14-19.

Bergene, T. (1995): Efficiencies and physical principles of various solar energy conversion processes leading to the photolysis of water. Thesis for Dr. Scient. degree. Department of Physics, University of Oslo. 87 pp.

Norsk institutt for vannforskning (1990): Forskning med algekulturer. ISBN 82-577-1743-6. 32 pp.

Norsk institutt for vannforskning (1994): Hydrogenproduksjon - integrert element i utvikling av norsk algekulturteknologi. EMS 30314. Oslo, 29.1. 1994. 20 pp.

Skulberg, O.M. (1992): Hydrogen som energibærer. Biofotolytisk produksjon av hydrogen med bruk av blågrønnalger/alger. Norsk institutt for vannforskning, Oslo. ISBN 82-577-2198-0. 27 pp.

- Skulberg, O.M. (1994a): Norwegian activities in the task area photobiological hydrogen production. Second Planning Workshop. Oslo 10.-11. March 1994 - 2 pp.
- Skulberg, O.M. (1994b): Oscillatoriale cyanoprocaryotes and their application for algal culture technology. Arch. Hydrobiol./Suppl. 105, Algological Studies 75: 265-278.
- Skulberg, O.M. (1995): Hydrogenenergisystemet - morgendagens løsning av menneskehetens energiproblemer. Kronikk i "Aftenposten".
- Skulberg, O.M. (1995): Biophotolysis, hydrogen production and algal culture technology. NATO ASI Series. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 95-110.
- Torp, A.C. (1995): Hydrogenproduksjon ved cyanobakterier. Diplomoppgave. Norges tekniske høgskole. Trondheim. 85 pp.

5.6. Internasjonalt forskningssamarbeid om biofotolytisk hydrogengassproduksjon

5.6.1. Annex 10 of the IEA Hydrogen Implementing Agreement

Et omfattende relevant forskningssamarbeid har blitt gjennomført innenfor rammen av Annexes of the IEA Hydrogen Implementing Agreement. Annex 10 - som formelt avsluttes i 1998 - har vært sentrert om Photoproduction of Hydrogen (Elam 1997, Gaudernack 1998, Riis 1998). Biofotolytisk hydrogengassproduksjon har vært organisert under Subtask B med deltakelse av National Institute of Biology and Human Technology (NIBH), Japan; Hawaii Natural Energy Institute (HNEI), National Renewable Energy Laboratory (NREL) og Oak Ridge National Laboratory (ORNL), USA; Kings College London, UK; Uppsala Universitet, Sverige; Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Norge. Dette forskningssamarbeidet har gitt NIVA fruktbar mulighet til å følge med i fronten av internasjonal biofotolyseforskning med hydrogengassproduksjon som siktemål.

Noen hovedtrekk av det eksperimentelle arbeidet under Annex 10, Subtask B ved NIVA kan nevnes. Det har blitt gjennomført studier av grønnalger og blågrønnalger som kan være egnet for fremstilling av molekylært hydrogen. Det meste av undersøkelsene har vært knyttet til bruk av blågrønnalger med nitrogenaseaktivitet i heterocyster. Gjennom sammenliknende studier av klonkulturer i NIVAs kultursamling av mikroalger er det blitt karakterisert blågrønnalger med høy kapasitet til å danne dihydrogen under kontrollerte vekstbetingelser. Det er foretatt undersøkelser for å klarlegge dyrkingsbetingelser som regulerer produksjonen av dihydrogen. Dette er miljøfaktorer som er bestemmende for den biofotolytiske prosess *in vivo*, og som er vesentlige for en konstruksjon av effektive biofotoreaktorer for hydrogengassproduksjon. Vekstforhold og utbytte av de aktuelle blågrønnalgene er blitt utprøvd i fotobioreaktorer til formålet. I kontinuerlige kulturer med blågrønnalger i NIVAs spesielt utviklede dyrkingsreaktorer er det oppnådd stabil produksjon av mikroalger gjennom en flere måneder lang forsøksperiode.

Rapporter utarbeidet i forbindelse med Annex 10, Subtask B (1994-1997) omfatter:

- Norwegian Institute for Water Research (1994): Norwegian activities in the task area photobiological hydrogen production. IEA Hydrogen Programme. Oslo. 2 pp.
- Norwegian Institute for Water Research (1995): Initiative and progress in Norwegian research on hydrogen producing microalgae. IEA Hydrogen Programme. Oslo. 10 pp.

Norwegian Institute for Water Research (1996): Microalgae. Progress in Norwegian Research on Biophotolytic Production of Hydrogen. IEA Hydrogen Programme. Oslo. 7 pp.

Elam, C.C. (ed.) (1997): IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen. Annual Report. Annex 10: Photoproduction of hydrogen. 71 pp.

5.6.2. Fortsatt forskningsvirksomhet om hydrogengassproduksjon/biofotolyse

Det tilrettelegges for en fortsettelse av det internasjonale forsknings samarbeidet innenfor IEA Hydrogen Implementing Agreement (Riis 1998). Når det gjelder fotoproduksjon av hydrogen er dette foreslått videreført i et forskningsarbeid i Annex 15: Photobiological hydrogen production (Gaudernack 1998).

Det planlagte forskningsarbeidet i Norge som kan tilrettelegges under dette nye Annex 15 fremgår av følgende utdrag fra dokument oversendt til Operating Agent (NIVA 1998):

"The activities at NIVA will mainly be a continuation of the ongoing research work related to biophotolysis and use of photosynthetic microorganisms for hydrogen production. The primary research tasks will include (1) characterization of organisms, (2) contribution to the acquisition of information concerning the database on hydrogen-producing micro-organisms, (3) experimentation with photobioreactors and (4) participation in the collaborative project on genetics and enzymology.

- (1) Clone characterization. Selected strains from the NIVA Culture Collection of Algae will be used in studies of their hydrogen production capability. Nitrogenase-mediated ability to evolve molecular hydrogen will be assayed using whole cell incubation in light surrounded by an argon-carbon monoxide atmosphere. Hydrogenase-mediated hydrogen production will be assayed using dark and anaerobic conditions.
- (2) Database establishment. This task includes the collection and organization of information of available photosynthetic microorganisms suitable for hydrogen production. The compilation effort entered upon in collaboration with the European Culture Collections' Organization (ECCO) and World Federation for Culture Collections (WFCC) will be accomplished.
- (3) Experimentation with photobioreactors. Strains with prominent properties for biophotolytic hydrogen production - see (1) - will be examined in vivo experiments. The purpose is to investigate how growth factors can be conveniently controlled for an effective biophotolytic process. The results are crucial for designing operative photobioreactors.
- (4) Genetics and enzymology. This work will mainly relate to assistance for the now planned comparative genetical studies in Subtask B for screening purposes of organisms, and enhancing their hydrogen-producing capabilities. The NIVA Culture Collection of Algae will support strains and prepare material for the enzymological investigations.

The research work concerned will be carried out in cooperation with the collaborating laboratories executing the ANNEX 15. Particularly this has reference to:

- (1) King's College London (D.O. Hall)
- (2) National Institute of Bioscience and Human Technology (Yasuo Asada), and University of Hawaii (O. Zaborsky).

- (3) National Institute of Bioscience and Human Technology (Yasuo Asada).
- (4) Uppsala University (Peter Lindblad)."

Med realiseringen av et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold vil det bli skaffet til veie fasiliteter med muligheter for positiv og betydningsfull forskningsinnsats i Norge når det gjelder fotobiologisk hydrogenproduksjon. Mangelen på hensiktsmessige laboratorier og utrustning har vært en vesentlig hemsko for utføringen av nødvendige oppgaver i det internasjonale forskningssamarbeidet innenfor IEA.

Hydrogengass-produksjon via mikroalger ved konvertering av CO₂ fra røykgasser bør inngå som et viktig element av algekulturteknologi i landet vårt.

6. Sammenfattende vurdering

Teoretisk kan potensialet mikroalger har til å binde karbondioksyd i anlegg for massedyrking anslås til $> 330 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1}\text{år}^{-1}$. Praktiske og økonomiske forhold innebærer at det foreløpig ikke vil være formålstjenlig å benytte et slikt system som eneste løsning for punktutslipp av karbondioksid.

Imidlertid er det positive muligheter for å ta hånd om betydelige andeler av CO_2 -utslipp til fremstilling av nyttige varer via produksjonsanlegg for mikroalger (ca 1,65 kg CO_2 inngår i produksjon av 1 kg tørrvekt biomasse). Da dette kan være produkter som erstatter varer fremstilt via fossilt brensel, er det dessuten en gevinst i bestrebelsene på å mestre de globale klimagassproblemene.

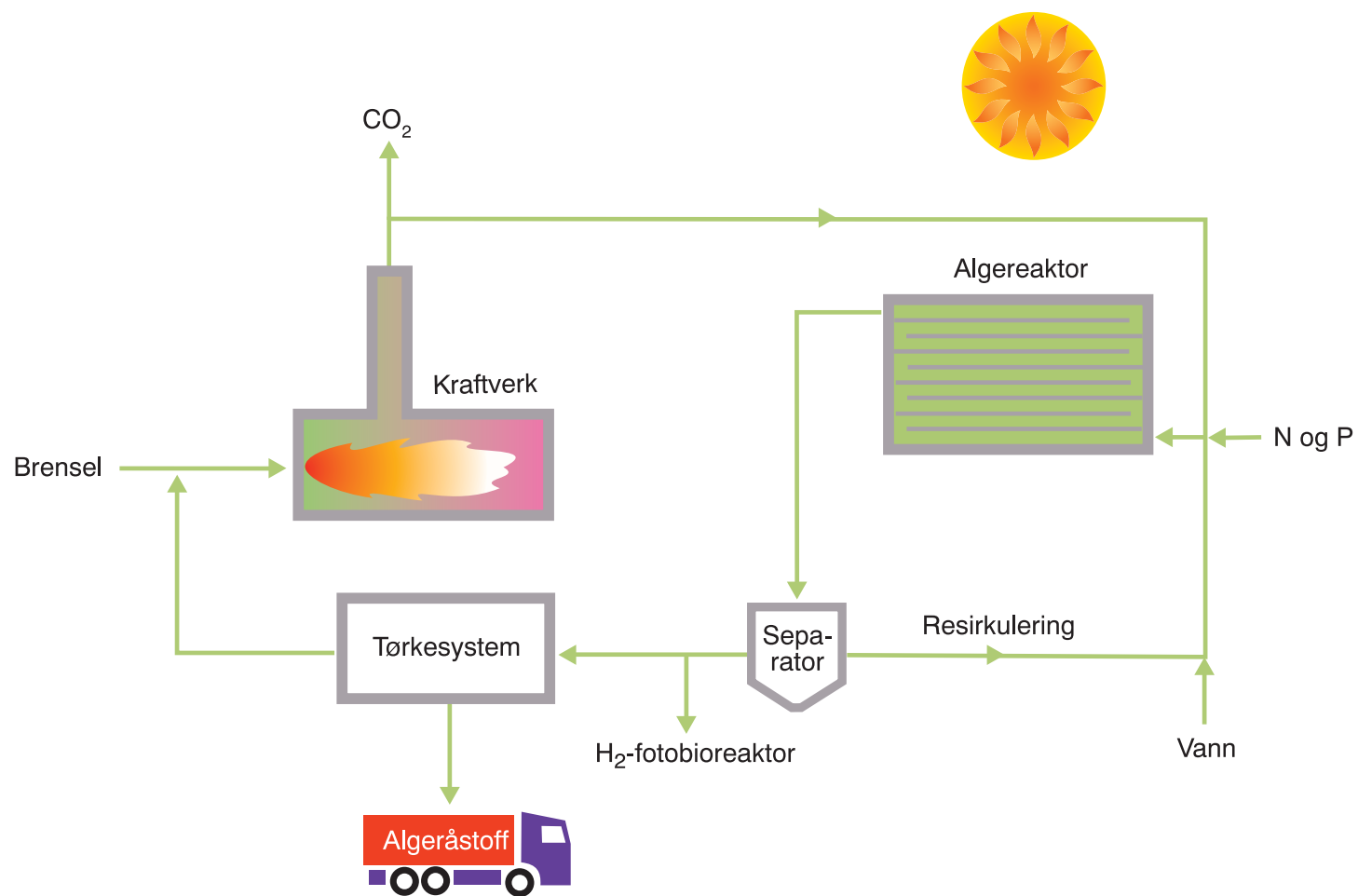
Algekulturteknologi omfatter flere praktiske løsninger for produksjon av viktige stoffer og varer. Spesielt interessant er imidlertid algekulturteknologien som en helhetlig operasjon der flere formål blir tilgodesett. Gjennom integrerte systemer, hvor fremstilling av verdifulle stoffer er koblet med nyttiggjøring f.eks. i renseprosesser eller til miljøforbedrende tiltak, kan løsninger av viktige samfunnsoppgaver kombineres på hensiktsmessig måte.

I et perspektiv om bruk av fornybare energisystemer (Rio Declaration on Environment and Development, juni 1992) inntar algekulturteknologi en sentral plass i den forestående utvikling. Bruken av hydrogen som energibærer i hydrogenenergisystemet åpner for praktiske, globale løsninger som ut fra en teknisk og miljømessig synsvinkel vil være epokegjørende. Fotobiologisk fremstilling av hydrogengass ved spalting av vann via mikroalger vil kunne bli en viktig fremtidig nisje for algekulturteknologi.

Mikroalgekulturer er en praktisk mulighet for utnyttelse av CO_2 . Et anlegg til formålet (**Figur 22**) bør ligge nær kilden for å spare kostnader til frakt, komprimering, lagring og gasstap. Dersom anlegget samtidig kan nyttiggjøre seg avfallsprodukter som næringsstoffer, og dessuten produsere ønskede biprodukter, vil utnyttelse av mikroalger være et godt miljøforetak. Ytterligere beregninger og laboratorieforsøk bør derfor utføres og vurderes.

Et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold vil gi muligheter for realisering av to hovedhensikter:

- Fremskaffe et pilotanlegg for teknologisk utvikling av mikroalgedyrking til en praktisk industriprosess basert på bruk av CO_2 -utslipp.
- Legge praktisk grunn for norsk deltakelse i det internasjonale forskningssamarbeidet knyttet til biofotolytisk hydrogengassproduksjon (IEA Hydrogen Implementing Agreement).



Figur 22. Integrering av systemer for mikroalgedyrking til CO₂-binding ved kraftverk basert på fossilt brensel.

7. Referanser

- Becker, E.W. 1994. Microalgae. Biotechnology and Microbiology. Cambridge Studies in Biotechnology 10. - Cambridge University Press, Cambridge. 293 pp.
- Bell, L.N. & Gudkov, N.D. 1993. Thermodynamics of light energy conversion. - SPB Academic Publishing. The Hague. 204 pp.
- Benemann, J.R. 1998. Process analysis and economics of biophotolysis of water. - IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen. IEA/H2/10/TR2-98. 27 pp.
- Bergene, T. 1995. Efficiencies and physical principles of various solar energy conversion processes leading to the photolysis of water. Thesis for Dr. Scient. degree. Department of Physics, University of Oslo. 87 pp.
- Bergene, T. & Skulberg, O.M. 1994. Naturen som veiviser mot morgendagens energisamfunn. - Naturen 118(1): 14-19.
- Bolton, J.R. 1994. Solar photoproduction of hydrogen. - International Energy Agency, Paris, Annex 10, p. 1-19.
- Bryant, D.A. (ed.) 1994. The Molecular Biology of Cyanobacteria. - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 881 pp.
- Bushell, M.E. & Slater, J.H. (eds.) 1981. Mixed culture fermentations. - Academic Press, London. 175 pp.
- Cammack, R., Hall, D.O. & Rao, K.K. 1985. Hydrogenases. Structure and applications in hydrogen production. - In: R.K. Poole & C.S. Dow (eds.), Microbial Gas Metabolism, p. 75-102. - Academic Press, London.
- Chaumont, D. 1993. Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture. - J. Appl. Phycol. 5: 593-604.
- Doucha, J. & Livanski, K. 1995. Novel outdoor thin-layer high density microalgal culture system: Productivity and operational parameters - Arch. Hydrobiol./Suppl. 106, Algological Studies 76: 129-147.
- Elam, C.C. (ed.) 1997. IEA Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen. - Annual Report. Annex 10: Photoproduction of Hydrogen. 71 pp.
- Erbes, D.L., King, D & Gibbs, M. 1979. Inactivation of hydrogenase in cellfree extracts and whole cells of *Chlamydomonas reinhardtii* by oxygen. - Plant Physiol. 63: 1138-1142.
- Falkowski, P.G. 1994. The role of phytoplankton photosynthesis in global biochemical cycles. - Photosynthetic Research 39: 235-258.
- Fenger, J. & Laut, P. 1987. Drivhuseffekten. Global luftforurensning og klimaendringer. - Fiskers Forlag, Fredriksberg. ISBN 87-89077-15. 186 pp.

- Fogg, G.E., Stewart, W.D.P., Fay, P. & Walsby, A.E. 1973. The blue-green algae. - Academic Press, London. 459 pp.
- Gaudernack, B. 1998. Minutes from Experts Meeting of Annex 10. 7.-9. October 1998. - Institutt for energiteknikk. IFE NSYS. Kjeller. 16.11.1998. 7 pp.
- Greenbaum, E. 1988. Hydrogen production by algal water splitting. - In: C.A. Lembi & J.R. Waaland (eds.), *Algae and Human Affairs*, p. 283-304. - Cambridge University Press, Cambridge.
- Greenbaum, E. 1991. Hydrogen production by photosynthetic water splitting. - In: T.N. Veziroglu & P.K. Takahashi (eds.), *Hydrogen Energy Progress VIII. Proceedings of the 8th World Hydrogen Energy Conference, Honolulu and Waikoloa, Hawaii, USA*, p. 743-754. - Pergamon Press, New York.
- Greenbaum, E. & Ramus, J. 1983. Survey of selected seaweeds for simultaneous photoproduction of hydrogen and oxygen. - *J. Phycol.* 19: 53-57.
- Gudin, C & Thepenier, C. 1986. Bioconversion of solar energy into organic chemicals by microalgae. - *Advances in Biotechnological Processes* 6: 73-110.
- Hall, D.O. 1986. The production of biomass: A challenge to our society. - In: A. Richmond (ed.), *Handbook of Microalgal Mass Culture*, p. 1-24. - CRC Press, Boca Raton.
- Hall, D.O. & Rao, K.K. 1994. *Photosynthesis. Studies in biology. Fifth edition.* - Cambridge University Press. Cambridge. 211 pp.
- Hamasaki, A., Shioji, N., Ikuta, Y., Hukuda, Y., Makita, T., Hirayama, K., Matuzaki, H., Tukamoto, T. & Sasaki, S. 1994. Carbon dioxide fixation by microalgal photosynthesis using actual flue gas from a power plant. - *Applied Biochemistry and Biotechnology* 45/46: 799-809.
- IEA Greenhouse Gas R & D Programme 1995. *Carbon Dioxide Utilisation.* - Report by W. Ormerod, P. Riemes & A. Smith. ISBN 1-898373-17-5. Cheltenham. 31 pp.
- Institutt for energiteknikk 1991. Lagring av hydrogen for bruk i transportsektoren. - Rapport nr. IFE/KR/F-91/048. Kjeller. 77 pp.
- International Energy Agency 1995. *Global Warming Damage and the Benefits of Mitigation.* - IEA Greenhouse Gas R & D Programme, ISBN 1-898373-03-5. 37 pp.
- Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N. & Williams, R.H. (eds.) 1993. *Renewable energy. Sources for Fuels and Electricity.* - Earthscan Publications Ltd. London. 1160 pp.
- Kajan, M., Tichy, V & Simmer, J. 1994. Productivity of algae in different culture systems. - *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 103, *Algological Studies* 73: 111-117.
- Keating, M. 1993. *The earth summit's agenda for change.* - Centre for Our Common Future, Geneva. ISBN 2-940070-00-8. 35 pp.
- Kentemich, T., Haverkamp, G. & Bothe, H. 1990. Die Gewinnung von molekularem Wasserstoff durch Cyanobakterien. - *Naturwissenschaften* 77: 12-18.

- Kerby, N.W. & Rowell, P. 1992. Potential and commercial applications for photosynthetic prokaryotes. - In: N.H. Mann & N.G. Carr (eds.), *Photosynthetic prokaryotes*, p. 233-254. - Plenum Press, New York.
- Kessler, E. 1974. Hydrogenase, photoreduction and anaerobic growth. - In: W.D.P. Stewart (ed.), *Algal Physiology and Biochemistry*, p. 456-473. - University of California Press, Berkeley.
- Knutsen, G. & Lien, T. 1981. Properties of synchronous cultures of *Chlamydomonas reinhardtii* under optimal conditions, and some factors influencing them. - *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 94(3): 599-611.
- Lambert, G.R. & Smith, G.D. 1981. The hydrogen metabolism of cyanobacteria (blue-green algae). - *Biol. Rev.* 56: 589-660.
- Laws, E.A., Taguchi, S, Hirata, J. & Pang, L. 1986: High algal production rates achieved in a shallow outdoor flume. - *Biotechnology and Bioengineering* 28: 191-197.
- Laws, E.A., Taguchi, S., Hirata, J. & Pang, L. 1988: Optimization of microalgal production in a shallow outdoor flume. - *Biotechnology and Bioengineering* 32: 140-147.
- Laws, E.A. & Berning, J.L. 1991: A study of the energetics and economics of microalgal mass culture with the marine chlorophyte *Tetraselmis suecica*: Implications for use of power plant stack gases. - *Biotechnology and Bioengineering* 37: 936-947.
- Madigan, M.T. 1992. The family Heliobacteriaceae. - In: A. Balows, H.G. Trüpes, M. Dworkin, W. Harder & K.H. Schleifer (eds.), *The Prokaryotes*. Second Edition, p. 1981-1992. - Springer Verlag, Berlin.
- Markov, S.A., Bazin, M. & Hall, D.O. 1993. The potential of using cyanobacteria in photobioreactors for hydrogen production. - Environmental Biotechnology Research Group, Division of Life Sciences. King's College London. London. 65 pp.
- Markov, S.A., Rao, K.K. & Hall, D.O. 1992. A hollow fibre photobioreactor for continuous production of hydrogen by immobilized cyanobacteria under partial vacuum. - In: T.N. Veziroglu, C. Derive & J. Pottier (eds.), *Hydrogen energy progress IX*. Proc. 9th World Hydrogen Energy Conference, Paris 1992. p. 641-650. - MCI, Paris.
- Martin, J.H. & Fitzwater, S.E. 1988: Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature* 331, pp. 341-343.
- Matsumoto, H., Shioji, N., Hamasaki, A., Ikuta, Y. Fukuda, M. Sato, N. & Tsukamoto, T. 1995: Carbon dioxide fixation by microalgae photosynthesis using actual gas discharged from a boiler. - *Applied Biochemistry and Biotechnology* 51/52: 681-691.
- Mayhew, S.G. & O'Connor, M. 1982. Structure and mechanism of bacterial hydrogenase. - *Trends in Biochemical Sciences* 7: 18-21.
- Melkonian, M. 1995. Microalgal biotechnology and global CO₂ Reduction: The Challenge for the 21st. century. 2.nd. European Workshop on Biotechnology of Microalgae. Proceedings in press.
- Miljøverndepartementet 1998. Norges oppfølging av Kyotoprotokollen. - St. meld. nr. 29 (1997-1998). Oslo. 90 pp.

- Mitsui, A., Philips, E.J., Kumazawa, S., Reddy, K.J., Ramachandran, S., Matsunaga, T., Haynes, L. & Ikemoto, H. 1983. Progress in research toward outdoor biological hydrogen production using solar energy, sea water, and marine photosynthetic mikroorganism. - *Annals N.Y. Acad. Sci.* 413: 514-530.
- Mohn, F.H., Grobbelaar, J.U. & Soeder, C.J. 1998. Potential of algal biotechnology to ameliorate anthropogenic derived CO₂ in the biosphere. - Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Interlaken 30. August – 2. September 1998.
- Moore, B. & Braswell Jr., B.H. 1994. Planetary metabolism: Understanding the carbon dioxide cycle. - *Ambio* 23 (1): 4-12.
- Mori, Kei et.al.1989. Design for a Bioreactor with Sunlight supply and Operations systems for use in the Space environment. - *Adv. Space Res.* 9 (8):161 - 168.
- Muller-Fuega, A., Le Guédes, R., Hervé, A. & Durand, P. 1998: Comparison of artificial light photobioreactors and other production systems using *Porphyridium cruentum*. - *J. Appl. Phycol.* 10: 83-90.
- Nandi, R. & Sengupta, S. 1998. Microbial production of hydrogen: An overview. - *Critical Reviews in Microbiology* 24: 61-84.
- Norsk institutt for vannforskning 1994. Hydrogenproduksjon - integrert element i utvikling av norsk algekulturteknologi. - EMS 30314. Oslo, 29.1.1994. 20 pp.
- Norsk institutt for vannforskning 1998. Memorandum. IEA Photobiological Hydrogen Production. Planned contributing activities at Norwegian Institute for Water Research. Oslo, March 12th 1998.
- Ormerod, J.G. 1992. Physiology of the photosynthetic prokaryotes. - In: N.H. Mann & N.G. Carr (eds.), *Photosynthetic prokaryotes*, p. 93-120. - Plenum Press, New York.
- Oswald W.J. 1988. Large-scale algal culture systems (engineering aspect). - In: M.A. Borowitzka & L.J. Borowitzka (eds.), *Micro-Algal Biotechnology*, p. 357-394. - Cambridge University Press, Cambridge.
- Park, I.H., Rao K.K. & Hall, D.O. 1991. Photoproduction of hydrogen, hydrogen peroxide and ammonia using immobilized cyanobacteria. - *Int. J. Hydrogen Energy* 16: 313-318.
- Pirt, S.J., Lee, Y.K., Walach, M.R., Pirt, M.W., Balyuzi, H.H.M. & Bazin, M.J. 1983. A tubular bioreactor for photosynthetic production of biomass from carbon dioxide: Design and performance. - *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 33B: 35-58.
- Pulz, O., Gerbsh, N. & Buchholz, R. 1995. Light energy supply in plate-type and light diffusing optical fibre bioreactors. - *J. Appl. Phycol.* 7: 145-149.
- Radmer, R.J. & Parker, B.C. 1994. Commercial applications of algae: opportunities and constraints. - *J. Appl. Phycol.* 6(2): 93-98.
- Rao, K.K. & Hall, D.O. 1988. Hydrogenases: Isolation and Assay. - *Methods in Enzymology.* 167: 501-509.

- Rao, K.K. & Hall, D.O. 1992. Immobilized photosynthetic system: application in biotechnology. - In: J. Barber, M.G. Guerrero & H. Medrano (eds.), Trends in Photosynthetic Research, p. 135-147. - Intercept Ltd., Andover, Hampshire.
- Ratchford, I.A.J & Fallowfield, H.J. 1992. Performance of a flat, air-lift reactor for the growth of high biomass algal cultures. - J. Appl. Phycol. 4:1-9.
- Reeves, M. & Greenbaum, E. 1989. Stoichiometry of photosystems in *Chlamydomonas*. - Photosynthetica 23(1): 1-9.
- Richmond, A. 1986. Outdoor mass cultures of microalgae.- In: A. Richmond (ed.), Handbook of Microalgal Mass Culture, p. 285-330 - CRC Press, Boca Raton.
- Richmond, A., Boussiba, S., Vonshak, A. & Kopel, R. 1993. A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors. -J. Appl. Phycol. 5: 327-332.
- Riis, T.U. 1998. Oppsummering fra møte i Executive Committee i IEAs Hydrogen-program, Ispra 28.-30. oktober 1998. - Norges forskningsråd. Oslo, 12.11. 1998. 2 pp.
- Roessler, P. & Lien, S. 1984. Effects of electron mediator charge properties on the reaction kinetics of hydrogenase from *Chlamydomonas*. - Arch. Biochem. Biophys. 230: 103-109.
- Schlegel, H.G. 1985. Allgemeine Microbiologie. - Georg Thieme Verlag, Stuttgart. 571 pp.
- Schlegel, H.G. & Schneider, K. 1978. Hydrogenases: Their Catalytic Activity, Structure, and Function. - Erich Goltze KG, Göttingen.
- Skulberg, O.M. 1992. Hydrogen som energibærer. Biofotolytisk produksjon av hydrogen med bruk av blågrønnalger/alger. Norsk institutt for vannforskning, Oslo. ISBN 82-577-2198-0. 27 pp.
- Skulberg, O.M. 1995. Biophotolysis, hydrogen production and algal culture technology. - In: Y. Yürüm (ed.), Hydrogen Energy System, p. 95-110. - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Skulberg, O.M. 1996. NIVAs kultursamling av alger. Virksomhet i 1995. - Norsk institutt for vannforskning. ISBN 82-577-2970-1. 9 pp.
- Skulberg, R. & Skulberg, O.M. 1990. Forskning med algekulturer. NIVAs kultursamling av alger. Research with algal cultures. - NIVA's Culture Collection of Algae. - Norsk institutt for vannforskning, Oslo. ISBN 82-577-1743-6. 32 pp.
- Smith, G.D. 1990. Hydrogen metabolism in cyanobacteria. - Phycotalk 2: 131-143.
- Sunda, W.G., Swift, D. and Huntsman, S.A. 1991: Iron requirement in oceanic and coastal phytoplankton. Nature 351, pp. 55-57.
- Tapie, P. & Bernard A. 1988. Microalgae production: Technical and economic evaluation. - Biotechnology and Bioengineering 32: 973-885.
- Torp, A.C. 1995. Hydrogenproduksjon ved cyanobakterier. - Diplomoppgave. Norges tekniske høgskole, Trondheim. 85 pp.

- Tredici, M.R., Carlozzi, P., Chini Zittelli, G. & Materassi, R. 1991. A vertical alveolar panel (VAP) for outdoor mass cultivation of microalgae and cyanobacteria. – *Bioresource Technology* 38: 153-159.
- Tredici, M.R. & Materassi, R. 1992. From open ponds to vertical alveolar panels. The Italian experience in the development of reactors for the mass cultivation of phototrophic microorganisms. - *J. Appl. Phycol.* 4: 221-231.
- Tredici, M.R., Chini Zittelli, G. & Benemann, J.R. 1998. A tubular integral gas exchange photobioreactor for biological hydrogen production. – In: O.R. Zaborsky, (ed.), *BioHydrogen*, p. 391-401. Plenum Press, New York.
- Tyndall, J. 1861. On the absorption and radiation of heat by gass and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction. - *Philosophical Magazine and J. of Science.* 22 (146): 169-194 & 22(147): 273-285.
- Veldkamp, H. 1976. *Continuous Culture in Microbial Physiology and Ecology.* - Meadowfield Press Ltd., Bushey. 68 pp.
- Vonshak, A. & Richmond, A. 1985. Problems in developing the biotechnology of algal biomass production. - *Plant and Soil* 89: 129-135.
- Wigley, T.M.L., Smith, R.L. & Santer, B.D. 1998. Anthropogenic Influence on the Autocorrelation Structure of Hemispheric-Mean Temperatures. - *Science*, 27 November 1998, 282: 1676-1679.
- Yürüm, Y. (ed.) 1995. *Hydrogen Energy System. Production and Utilization of Hydrogen and Future Aspects.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 341 pp.
- Zaborsky, O.R. (ed.) 1998. *BioHydrogen.* - Plenum Press, New York. 552 pp.
- Aasgaard, G.F., Englund, G., Hansen, H.E., Källqvist, T., Skulberg, O.M. & Skulberg, R. 1995. Professional background for development of algal culture technology - a perspective on progress. - Norwegian Institute for Water Research. ISBN 82-577-2900-0. Oslo. 21 pp.

Ekstrakt:

Norges forskningsråd tilrettelegger en virksomhet for FoU-programmet KLIMATEK (Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp) for forskning og utprøving av aktuelle teknologier som kan gi praktisk betydningsfull reduksjon av CO₂-utslipp og andre klimagasser. Forprosjektet som behandles i denne rapporten inngår i slik sammenheng. Fotosyntetiske mikroorganismer utgjør en ressurs med betydelig potensiale for praktisk utnyttelse. Algekulturteknologi (AKT) går ut på å anvende mikroalger til økonomiske produksjonsformål. I forbindelse med problemstillingene til KLIMATEK innebærer AKT to hovedstrategier: Massedyrking av mikroalger for konvertering av CO₂ til bioenergi og/eller råvarer for produkter fremstilt via fossilt brensel, og massedyrking av mikroalger for produksjon av hydrogengass som energibærer. Algenes fotosyntese er en av de viktigste naturlige omsetningsleddene for CO₂. Ved tilrettelagt produksjon og høsting av mikroalger i spesielle anlegg kan CO₂ fra forbrenning av fossile karbonkilder omsettes i energirik algebiomasse og dermed bidra til å redusere utslipp av klimagasser. Algebiomasse består til ca 45% av karbon. Det innebærer at forbruket av CO₂ er ca 1,65 kg ved produksjon av 1 kg algebiomasse. Det beregnede produksjonspotensialet for mikroalger i Sør-Norge tilsvarer et CO₂ opptak på ca 40-60 tonn ha⁻¹år⁻¹. Det er i 1998 utført forsøk med to industrielle CO₂-kilder i Vestfold; ESSO Raffineriet på Slagentangen og Agnes Fabrikk i Larvik. Resultatene indikerer at avgass fra begge kildene er egnet for produksjon av mikroalger.

Den teknologiske anvendelse av biofotolyse til hydrogengassproduksjon omfatter i forsøksammenheng bruk av blågrønnalger (cyanobakterier) eller grønnalger i aktive kulturer med vann som hydrogenkilde, eller fotosyntetiserende bakterier med organisk stoff eller hydrogensulfid som hydrogenkilde. I eksperimentell forbindelse foregår hydrogengassproduksjon i fotobioreaktorer konstruert til formålet. De fotosyntetiske mikroorganismene dyrkes i optimale næringsløsninger under kontrollerte vekstbetingelser. Ved å tilrettelegge de fysiologiske forutsetninger for hydrogengassutskillelse fra cellene kan molekylært hydrogen fremskaffes. Et eksempel på dyrkningssystem med en cellekultur av grønnalger for hydrogengassproduksjon - basert på karbondioksid, mineralske næringsstoffer og vann - blir omtalt og skissert. Det teknologiske siktepunktet er å oppnå en energieffektivitet på ca 10%. Norge deltar i det internasjonale forskningssamarbeidet innenfor OECD om biofotolytisk hydrogengassproduksjon (IEA Hydrogen Implementing Agreement). NIVA har vært norsk ankerinstitusjon i denne sammenheng. Virksomheten i IEA vil fortsette i et Annex 15: Photobiological hydrogen production, som er under tilrettelegging.

Med realisering av et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold vil det kunne bli skaffet praktisk grunnlag for positiv og betydningsfull forskningsinnsats i Norge når det gjelder biofotolyse/hydrogengassproduksjon. Konvertering av CO₂ fra røykgasser via mikroalger med hydrogengassproduksjon bør inngå som et viktig element av algekulturteknologi i norsk sammenheng.

Kortversjon

Norges forskningsråd tilrettelegger en virksomhet for FoU-programmet KLIMATEK (Teknologi for reduksjon av klimagassutslipp) for forskning og utprøving av aktuelle teknologier som kan gi praktisk betydningsfull reduksjon av CO₂-utslipp og andre klimagasser. I forbindelse med problemstillingene til KLIMATEK innebærer Algekulturteknologi (AKT) to hovedstrategier: Massedyrking av mikroalger for konvertering av CO₂ til bioenergi og/eller råvarer for produkter fremstilt via fossilt brensel, og massedyrking av mikroalger for produksjon av hydrogengass som energibærer. Ved tilrettelagt produksjon og høsting av mikroalger i spesielle anlegg kan CO₂ fra forbrenning av fossile karbonkilder omsettes i energirik algebiomasse og dermed bidra til å redusere utslipp av klimagasser. Det beregnede produksjonspotensialet for mikroalger i Sør-Norge tilsvarer et CO₂ opptak på ca 40-60 tonn ha⁻¹år⁻¹. Det er i 1998 utført forsøk med to industrielle CO₂-kilder i Vestfold; ESSO Raffineriet på Slagentangen og Agnes Fabrikk i Larvik. Resultatene indikerer at avgass fra begge kildene er egnet for produksjon av mikroalger.

Den teknologiske anvendelse av biofotolyse til hydrogengassproduksjon omfatter i forsøksammenheng bruk av blågrønnalger (cyanobakterier) eller grønnalger i aktive kulturer med vann som hydrogenkilde, eller fotosyntetiserende bakterier med organisk stoff eller hydrogensulfid som hydrogenkilde. Det praktiske siktepunktet er å oppnå en energieffektivitet på ca 10%.

Med realisering av et eksperiment- og produksjonsanlegg for mikroalger i Vestfold vil det kunne bli skaffet praktisk grunnlag for positiv og betydningsfull forskningsinnsats i Norge når det gjelder biofotolyse/hydrogengassproduksjon. Konvertering av CO₂ fra røykgasser via mikroalger med hydrogengassproduksjon bør inngå som et viktig element for utvikling av algekulturteknologi i norsk sammenheng.

Algekulturteknologi

Eksperiment- og produksjonsanlegg
for mikroalger i Vestfold

RAPPORTOVERSIKT

Delrapport 1	CO ₂ -binding og H ₂ -produksjon
Delrapport 2	Livsløpsanalyser av CO ₂ -baserte algeprodukter
Delrapport 3	Utnyttelse av spillvarme og avløpsvann for produksjon av mikroalger
Delrapport 4	Algetyper, anvendelsesområder og forretningsmuligheter
Delrapport 5	Konseptbeskrivelse for hovedprosjekt
6	SAMMENDRAGSRAPPORT