

Algekulturateknologi - naturgitte forutsetninger og praktiske løsninger

Av Torsten Källqvist

Torsten Källqvist er ansatt som forskningsleder ved Norsk institutt for vannforskning

Innledning

Mikroalger har gjennom årene blitt lansert som løsningen på verdens matvarekrise og som fremtidig energikilde, men de mest optimistiske vyene er ikke blitt innfridd. Likevel har industriell utnyttelse av mikroalger fått økende betydning internasjonalt, bl.a. for produksjon av førtilskudd, helse-kostprodukter og spesialkjemikalier. Mikroalgene representerer utvilsomt et stort utnyttet potensiale ved sin mangfold og høye produktivitet. Utfordringene ligger fremfor alt i utviklingen av teknologi for kost-effektiv produksjon. Til nå er de fleste eksempler på kommersiell utnyttelse av mikroalger fra land i tropiske og subtropiske områder, men forholdene ligger også til rette for en satsning på algekulturateknologi i Norge.

Grunnleggende forutsetninger for kontrollert produksjon av mikroalger

Vekst og formering av mikroalger

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:

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

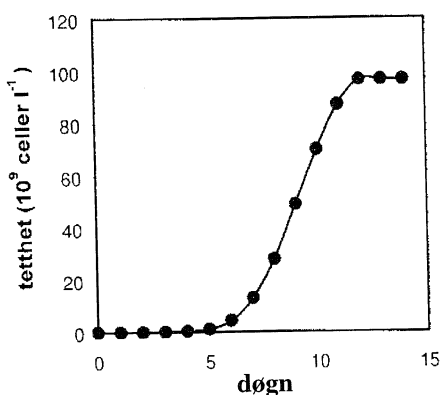
hvor

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

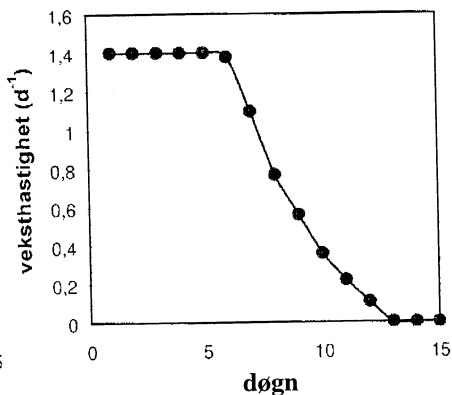
μ = veksthastigheten med dimensjonen døgn⁻¹

e = grunntallet for naturlige logaritmer (2,718)

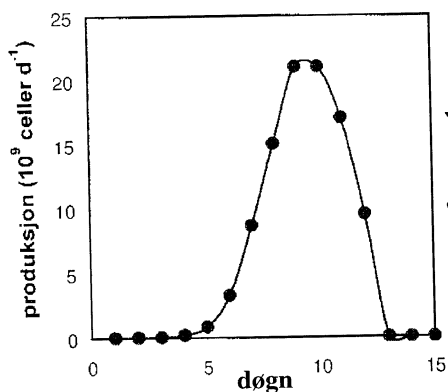
Mange mikroalger har ved optimale betingelser en veksthastighet på 1,5-2 døgn⁻¹, som innebærer at celleantallet fordobles 2-3 ganger hvert døgn⁻¹. Den eksponensielle veksten gir et formidabelt potensiale for produksjon i en algekultur. Med to doblinger per døgn vil f.eks. en algebiomasse på 1 g kunne øke til 1 kg etter 5 døgn og 1 tonn etter 10 døgn. Dette forutsetter imidlertid at de



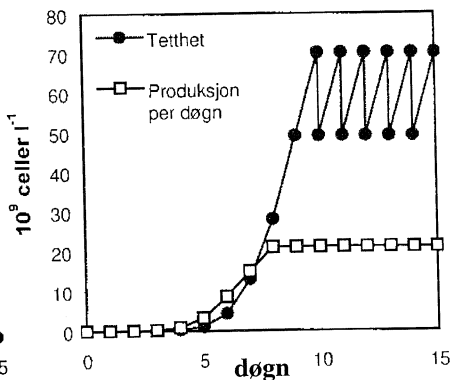
a. Utvikling i celledensitet i en satskultur av mikroalger



b. Endring av veksthastighet over tid i kulturen



c. Produksjon av mikroalger i kulturen

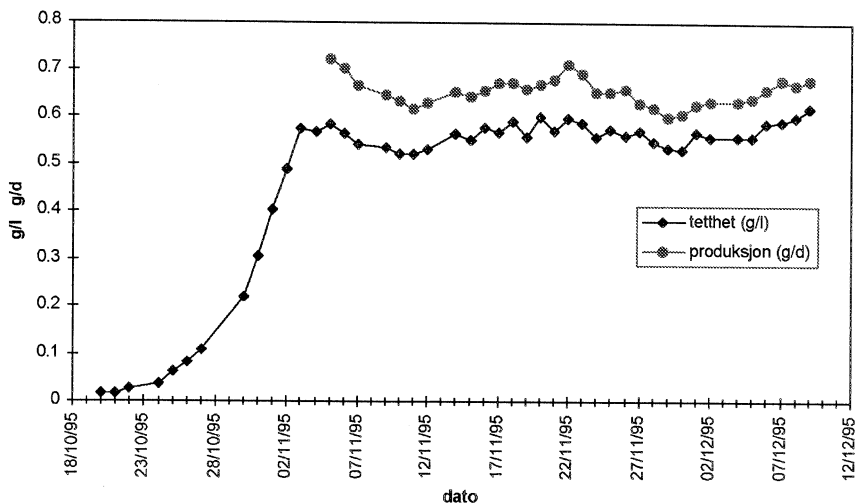


d. Tettethet og produksjon av mikroalger i en kultur som opereres semikontinuerlig fra døgn 10

Figur 1. Massedyrking av mikroalger. Vekst og produksjonsforhold

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 be-

grense 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 1a. Figur 1b viser hvordan veksthastigheten endres med tiden i samme kultur. Produksjonen - dvs. økningen i celler per døgn bestemt av produktet av biomas-



Figur 2. Biomassetetthet og produksjon ved kontinuerlig drift av en algereaktor i ca. to måneder. Reaktortypen er vist i figur 14.

sen Figur 1a) og veksthastigheten Figur 1b) - er vist i Figur 1c. I dette eksemplet oppnås altså maksimal produksjon etter 9-10 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 1d).

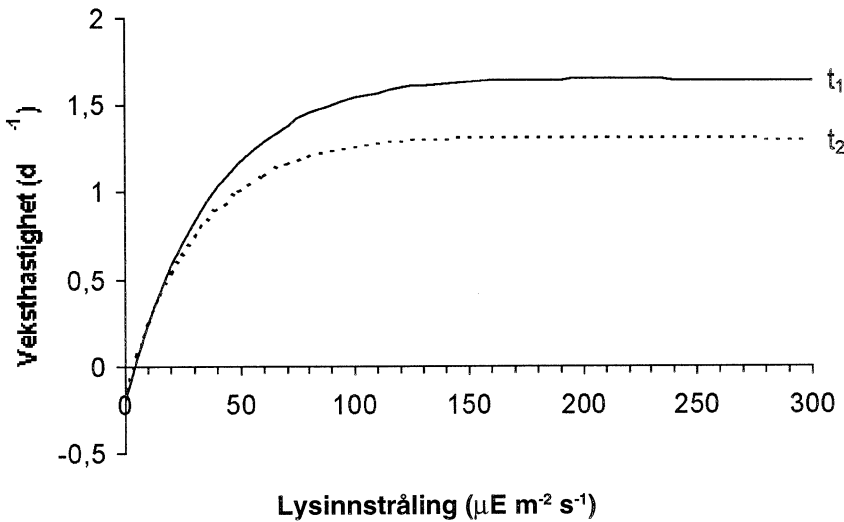
Proessen kan også gøres kontinuerlig ved å pumpe inn vekstmedium og høste algene i utløpet fra kulturen i en reaktor. På denne måten kan man i prinsippet oppnå en konstant produksjon gjennom ubegrenset tid. Ved at algene holdes i samme vekstfase hele tiden vil også algebiomassens sammensetning og kvalitet være relativt konstant. Eksempel på kontinuerlig algeproduksjon i en kunstlysreaktor er vist i figur 2.

Næring

Når tilgangen på en eller flere av

innsatsfaktorene blir utilstrekkelig for å forsyne den eksponensielt voksende algebiomassen, synker veksthastigheten. Behovet for mineraler som inngår i algebiomassen dekkes ved nærings-salter oppløst i kulturmediet. Analyser av algene viser at en lang rekke elementer inngår, men i svært forskjellige mengde.

For mange av elementene er behovet så lite at selv innholdet i naturlig ferskvann eller sjøvann gir mulighet for en betydelig algeproduksjon. Noen elementer blir imidlertid meget raskt minimumsfaktorer ved algevekst i naturlig vann. Det gjelder fremfor alt fosfor og nitrogen som må tilføres i form av fosfat og nitrat eller ammonium. En annen vesentlig faktor er jern, som må tilføres sammen med kompleksdannere for å unngå utfelling i mediet. Innholdet av fosfor og nitrogen i algene



Figur 3. Innvirkning av lysinnstråling på veksthastigheten hos en alge ved to ulike temperaturer

varierer, avhengig av algeart og vekstbetingelser, men ofte finner man at fosfor utgjør ca. 1% og nitrogen ca. 7% av algebiomassen.

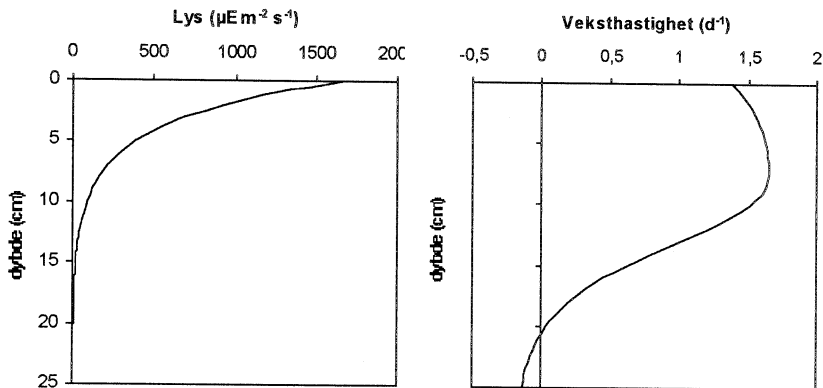
CO₂

Algenes fotosyntese skjer med CO₂ som karbonkilde. Opptaket skjer fra løst CO₂ i vannfasen eller eventuelt fra bikarbonat. Ved opptak av CO₂ forskyves likevekten i karbonatsystemet slik at ny CO₂ frigjøres fra bikarbonat, noe som fører til at pH-verdien stiger. Dermed vannet er i kontakt med atmosfæren vil CO₂ fra luften løses i vannet for å erstatte det som er tatt opp av algene. I en tett algekultur med høy fotosynteseaktivitet vil imidlertid hastigheten i disse likevektsprosessene være for lav til å forsyne algene med den nødvendige CO₂, og veksten blir karbon-

begrenset. For å opprettholde en høy produksjon i en algereaktor må derfor CO₂ tilføres, f.eks. ved å boble CO₂-beriket luft gjennom kulturen. CO₂-forbruket i et algeanlegg er direkte koplet til anleggets netto produksjon, eller avkastning av biomasse. Algebiomasse inneholder ca. 45% karbon. Det innebærer at produksjon av 1 kg alger (tørrestoff) ved fotosyntese krever tilførsel av 1,65 kg CO₂.

Lysenergi

I et produksjonsanlegg for alger vil det som regel være mulig å regulere tilførselen av næringssalter og CO₂ i forhold til behovet for vekst. Den begrensende faktoren blir dermed i praksis tilgangen på lysenergi for algenes fotosyntese.



a Lys som funksjon av dybde i en algekultur som belyses gjennom overflaten

b. Veksthastighet på ulike dyp i en algekultur som belyses gjennom overflater

Figur 4. Lysinstråling og veksthastighet av alger som funksjon av dyp i en algekultruir som belyses gjennom overflaten

Ved fotosyntesen utnyttes synlig lys, dvs. stråling i bølgelengder fra 400-700 nm som absorberes av algenes pigmenter. Lysets innvirkning på algevekst kan generelt beskrives av kurven i figur 3.

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.

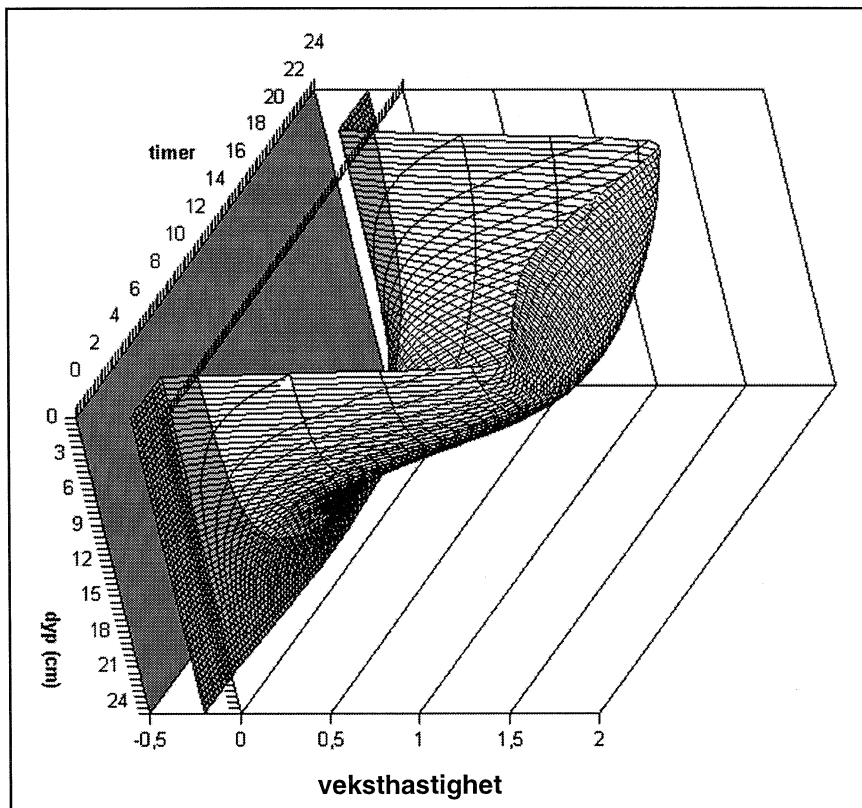
I en tett algekultur synker lysmengden med avstanden fra den belyste overflaten på grunn av absorpsjon i algeceller og mediet. Som følge av algenes selvskygging synker lysintensiteten eksponensielt med avstanden fra overflaten i henhold til:

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

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



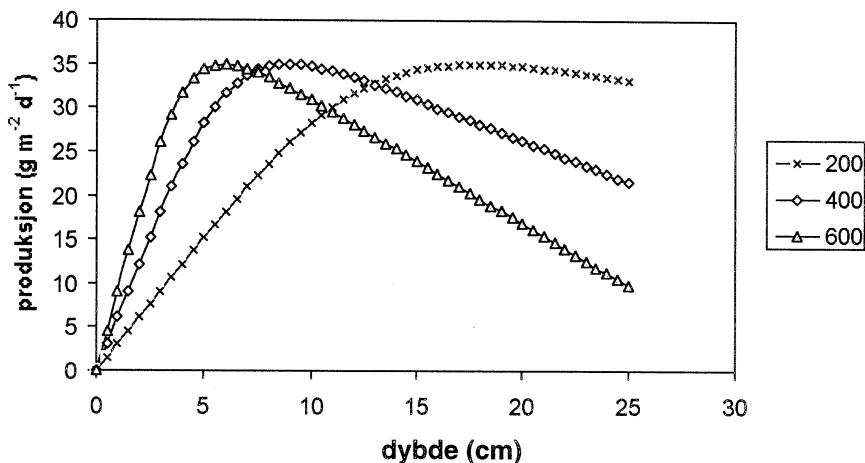
Figur 5. Modellsimulering av algevekst i en algereaktor. Figuren viser veksthastighet som funksjon av dybde gjennom døgnet. Kultur tettheten er 200 mg l^{-1} . Lysforholdene er beregnet for 15. juli på breddegraden 60°N , og temperaturen er satt til 20°C .

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 4). Nær overflaten er veksten lysmettet, men lengre ned synker

veksthastigheten proporsjonalt med lyset, og blir til slutt negativ.

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 ly-

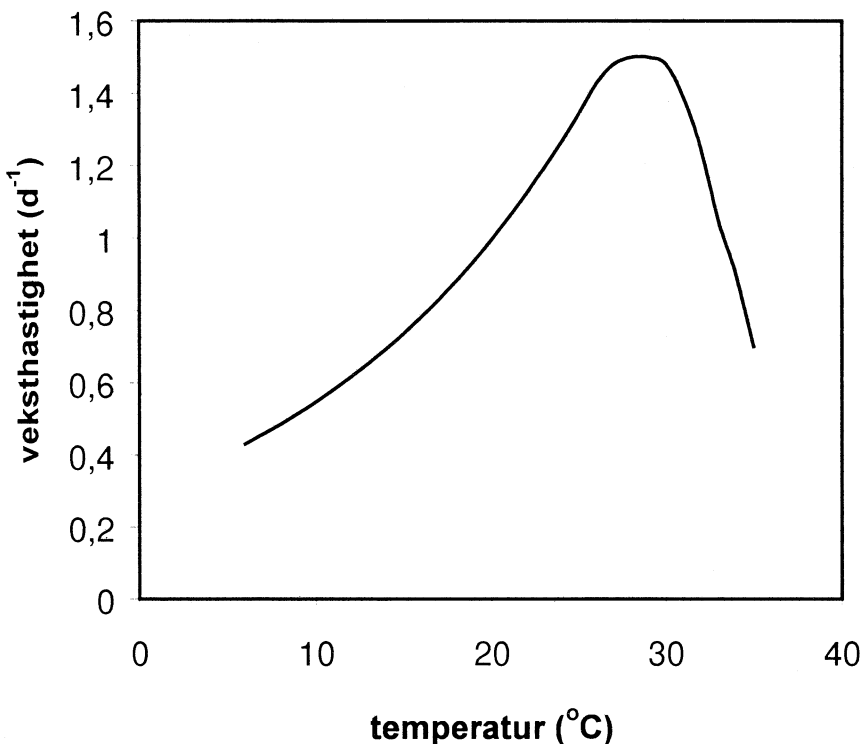


Figur 6. Modellsimulering av produksjon av alger som funksjon av dybde og biomassetetthet (200-600 mg l⁻¹). Figuren viser at den optimale dybden av algereaktoren minker med økende tetthet i kulturen. (Temperatur 20 °C, breddegrad 60 °N, dato 15.07).

set. Innstrålingen i kulturen som funksjon av tid blir beregnet fra lattitud, dato og klokkeslett etter en modell utviklet av Anthony Walsby (pers. medd.). Lysforholdene som funksjon av dybde i kulturen blir beregnet på grunnlag av empiriske data for lyssvekking i en kultur av grønnalger. Et eksempel på resultater av en slik modellberegning er vist i figur 5. 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 i en kontinuerlig drevet algkultur 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 døgntproduksjonen 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.

I virkligheten vil hver alge i kulturen være i kontinuerlig bevegelse gjennom lysfeltet og eksponert til raske variasjoner i innstråling. Beregningene i modellen forutsetter at den integrerte produksjonen i vannsøylen kan beregnes fra de veksthastigheter algene vil ha ved eksponering til et konstant lysnivå på ulike dyp. Det er påvist at den variasjon i innstråling som algene vil opp-



Figur 7. Eksempler på temperaturreponskurve for en mikroalge. Veksthastigheten øker eksponensielt med temperaturen og kulminerer i et maksimum ved optimal temperatur.

leve i en tett kultur med effektiv omrøring kan gi en høyere produksjon enn ved konstant lys Grobbelaar et al. 1992). Denne effekten vil kunne føre til at produksjonspotensialet er noe høyere enn modelle forutsier. Likevel viser eksemplet i figur 6 at dybde av algekulturen og biomassetetthet i kulturen er to gjensidig avhengige faktorer som må tilpasses den tilgjengelige lysinnstrålingen for å gi optimal avkastning i et algeproduksjonsanlegg.

Temperatur

Temperaturen kan innvirke på algenes veksthastighet dels ved å påvirke helningen på lysresponskurven ved lysbegrenset vekst, og dels ved å påvirke den maksimale veksthastigheten ved lysmetning (μ_{\max}) som vist i figur 3.

Vanligvis øker μ_{\max} eksponensielt med temperaturen opp mot et temperaturoptimum som vist i figur 7. Økningen i veksthastighet ved 10 graders temperaturøkning (Q_{10}) er ofte ca. 2,

dvs. en dobling ved 10 graders temperaturøkning. Optimumstemperaturen varierer mye mellom ulike alger. Alger med naturlig forekomst i kalde omgivelser som f.eks. arktiske eller antarktiske havområder, kan ha optimum ved ca. 10 °C, mens andre som er tilpasset vokseplasser i varme kilder, har optimumstemperaturer på 50 °C eller mer (Precht et al. 1973). En undersøkelse av ulike planktonalger isolert fra norske innsjøer, viste at de fleste hadde optimumstemperatur mellom 24 og 28 °C (Källqvist 1982). En av de mest brukte mikroalgene for kommersiell produksjon, blågrønnalgen *Spirulina platensis*, er en tropisk alge med optimumstemperatur på ca. 35 °C (Vonshak 1997).

Selv om temperaturoptimum varierer meget mellom ulike arter, har temperaturen en generell effekt på produksjenspotensialet av alger. Ved å sammenstille foreliggende informasjon om temperaturresponsen hos ulike alger, fant Eppley (1972) at den maksimale veksthastigheten (samtlige alger innberegnet) økte eksponensielt med temperaturen med en Q_{10} på 1,88. Dette betyr at alger med lav optimumstemperatur også generelt har lavere maksimal veksthastighet enn alger med høy optimumstemperatur. Den høyeste observerte veksthastigheten øker altså fra 0,62 d⁻¹ ved 0 °C (doblingstid 72 timer), 1,17 d⁻¹ ved 10 °C (doblingstid 14 timer), 2,07 d⁻¹ ved 20 °C (doblingstid 8 timer) til 3,62 ved 30 °C (doblingstid 4,5 timer) (Raven 1988). Ved temperaturer over 40 °C øker imidlertid ikke lenger veksthastigheten med en Q_{10} på

1,88. Det er grunn til å minne om at disse veksthastighetene er observerte maksimumsverdier blant en rekke mikroalger. Den maksimale veksthastigheten er generelt relatert til organismenes størrelse, slik at algene med de minste cellestørrelsene som regel har de høyeste veksthastighetene.

Hvilken temperatur som man bør etterstrebe i et produksjonsanlegg for mikroalger, er altså avhengig av hvilken art som skal produseres. Dersom høyest mulig biomasseproduksjon skal oppnås, bør man velge en art med høy maksimal veksthastighet og høy optimumstemperatur (30-35 °C). Den kvalitative sammensetningen av den produserte biomassen kan imidlertid være avhengig av dyrkingstemperaturen, og dermed kan det være gunstig å velge en lavere temperatur for å oppnå en bestemt kvalitet på algebiomassen. Dersom valget av algeart er gitt på grunn av et spesielt produkt, må temperaturkravet til denne kartlegges. Som regel vil det være gunstig å holde temperaturen i den nedre delen av det optimale området.

Utover det å velge den optimale dyrkingstemperatur for den aktuelle alge, foreligger det et ytterligere potensiale for å øke algeproduksjonen ved å justere temperaturen i kulturen etter lysforholdene. Dette har sammenheng med at algenes vekst er resultatet av to motvirkende prosesser; fotosyntese og respirasjon. Algenes produksjon av ny biomasse foregår ved fotosyntese, hvor vann spaltes i hydrogen og oksygen, og karbondioksid reduseres til energirike karbohydrater. Fritt oksygen er et bi-

produkt ved prosessen. Samtidig med denne anabole prosessen foregår en katabolisk nedbrytning av energirikt organisk materiale ved algenes respirasjon. Ved respirasjonen forbrukes oksygen og produseres karbondioksid.

Betydningen av respirasjonen for netto produksjon kompliseres av at respirasjonen ikke er konstant gjennom døgnet dersom lysmengden varierer fra dag til natt. Respirasjonen er således høyere i lys enn i mørke. Den varierer også gjennom mørkeperioden med høyest aktivitet i begynnelsen av en mørkeperiode (Sakshaug 1993).

Både vekst og respirasjon er temperaturavhengige prosesser. Noen studier tyder på at Q_{10} for respirasjon er lavere enn for brutto produksjon og veksthastighet. Tang & Peters (1995) beregnet Q_{10} for respirasjon til 1,38, mens Grobbelaar & Soeder (1985) bestemte Q_{10} for respirasjon hos en grønnalge til 1,43-1,68 avhengig av temperatur og lysbetingelser som algene var dyrket under.

I et produksjonsanlegg for alger vil det være ønskelig å redusere respirasjonstapet mest mulig. Erfaringer fra eksisterende anlegg viser at fra 2-10 % (Grobbelaar & Soeder 1985) eller 10-16 % (Torzillo et al. 1991) av biomassen i en algekultur kan gå tapt ved respirasjon i løpet av natten. Dette tilsier at det er gunstig å foreta høsting om kvelden dersom man ønsker mest mulig avkastning i form av biomasse. Biomassens kvalitative sammensetning endres imidlertid gjennom natten bl.a. ved at proteiner syntetiseres i mørke, og høstingstidspunkt trenger derfor

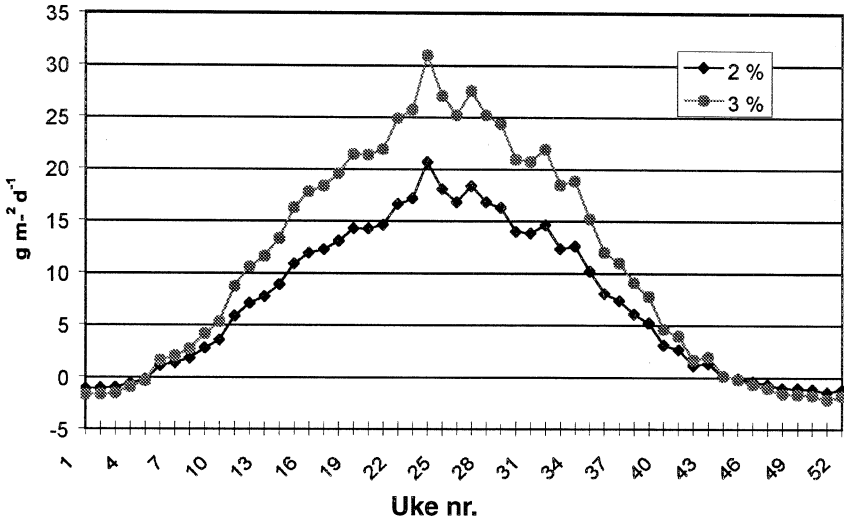
også å vurderes ut fra biomassens egenskaper.

Med effektiv temperaturstyring bør det være mulig å redusere respirasjonstapet om natten i et dagslysbasert algeproduksjonsanlegg. Ved å kjøle ned algekulturen om natten og raskt øke temperaturen til optimumtemperaturen for vekst ved soloppgang, kan avkastningen optimaliseres.

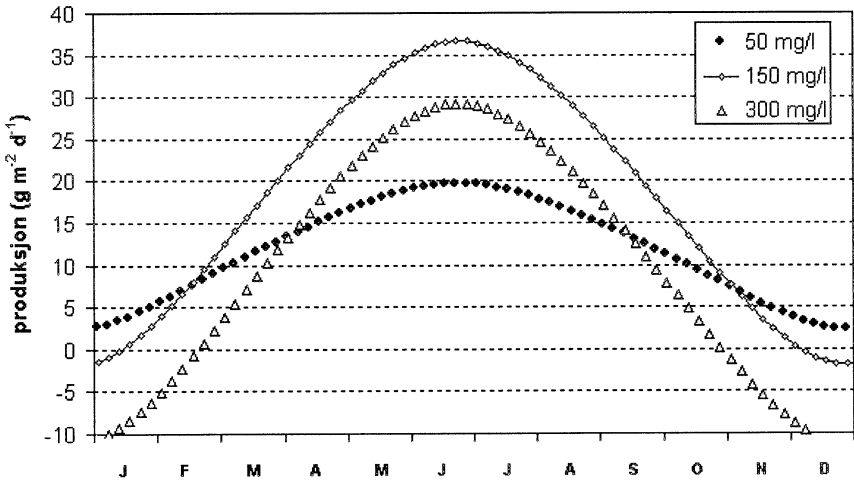
Potensiale for algeproduksjon i Norge

Produksjonsdata for mikroalger i eksisterende anlegg viser at en avkastning på 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 realistisk avkastning. Det teoretiske utbyttet av fotosyntesen er beregnet til 5-6 % av den totale solenergien (Hall 1986). Den produktivitet som er oppnådd i praksis tilsvarer imidlertid et utbytte på 2-3 % (Kajan et al. 1994). Dersom man tar utgangspunkt i disse tallene og den registrerte innstålingen i Oslo (Blindern), kan man få et bilde av produksjonspotensialet i Sør-Norge (se figur 8). 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



Figur 8. Beregnet potensiell produksjon av mikroalger i Sør-Norge basert på målt lysinnstråling på Blindern. (Ukemiddelverdier 1966-1980). Beregningene er utført med en empirisk modell (Oswald 1988) med 2 og 3% konvertering av lysenergien.



Figur 9. Beregnet potensiell maksimumsproduksjon gjennom året i en 25 cm dyp algereaktor med ulike biomassetetthet. Breddegraden er valgt til 60 °N og temperaturen 20 °C gjennom hele året.

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.

Modellen som ble brukt til å beregne veksthastigheten av mikroalger i en algereaktor kan også brukes for å beregne det maksimale potensialet for dagslysbasert algeproduksjon gjennom året. I figur 9 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. 37 g m⁻² d⁻¹ ved midsommer. I praksis vil produksjonen bli noe lavere fordi modellen forutsetter konstant skyfri himmel.

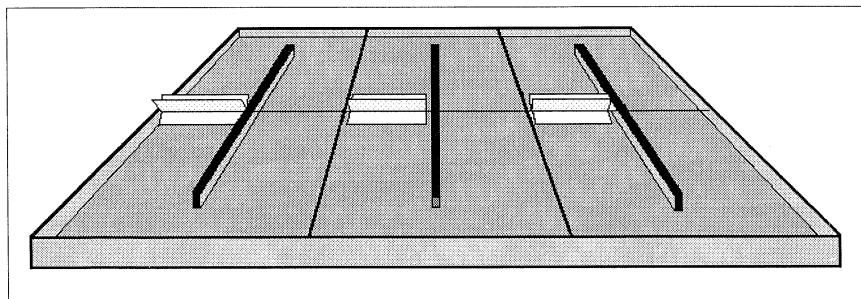
Utforming av anlegg for produksjon av mikroalger

Flere alternative reaktortyper som blir benyttet for kommersiell produksjon av mikroalger (Chaumont 1993). Disse kan inndeles i følgende kategorier:

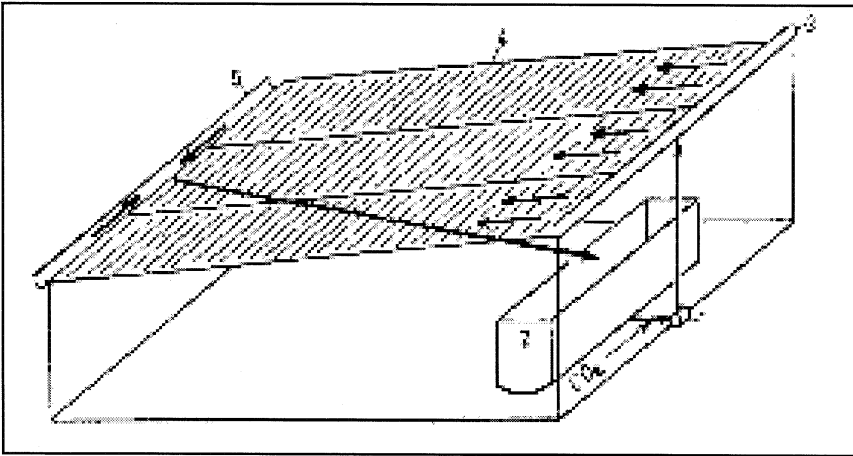
1. Åpne dagslysreaktorer
 - dammer
 - kanaler eller "raceways"
 - skråplan-reaktorer
2. Lukkede reaktorer basert på sollys
 - rør-reaktorer
 - panel-reaktorer
 - plastfilm-reaktorer
3. Lukkede reaktorer basert på kunstlys
4. Reactorer for immobiliserte alger

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)



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



Figur 11. Algereaktor av "skråplan-typen". Trebon, Tsjekkia, 1: pumpe, 2: tank. 3: distribusjonsrør, 4: reaktorflate, 5: oppsamlingskanal. (fra Doucha & Livanski 1995).

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 celletettheter i åpne dammer.

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

- Fordamping og nedbør påvirker vannbalansen
- Kontaminering i form av "ugressalger" 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.

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. Liknende tilpassede anlegg benyttes også for ren-

sing av avløpsvann, bl.a. i Sør-Afrika, Israel og USA. De alger som produseres er som regel ulike grønnalger og blågrønn-alger (f.eks. *Spirulina platensis*).

I åpne anlegg av "skråplan-typen" strømmer 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 nerkanten, tilsettes CO₂ og pumpes tilbake i dyrkingssystemet. Anleggskostnadene er høyere enn for åpne dammer, men ved at man kan operere med større biomassetthet i kulturen (1-10 g l⁻¹), reduseres høstingskostnadene. Den høye biomassettheten inneærer trolig også at risikoen for infeksjon av kulturen er mindre. Sammenligning 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 skjermesom skaper strømvirvler i kulturen. Vannstrømmen drives av en luftheis med 1m høyde. CO₂ tilsettes sammen med luften. I dette anlegget har man oppnådd produksjon av over 40 g m⁻² av sjøvannsalgen *Tetra-selmis suecica* over en periode av én måned, og ca 30 g m⁻² av kiselalgen *Cyclotella cryptica* over fire måneder (Laws et al. 1988).

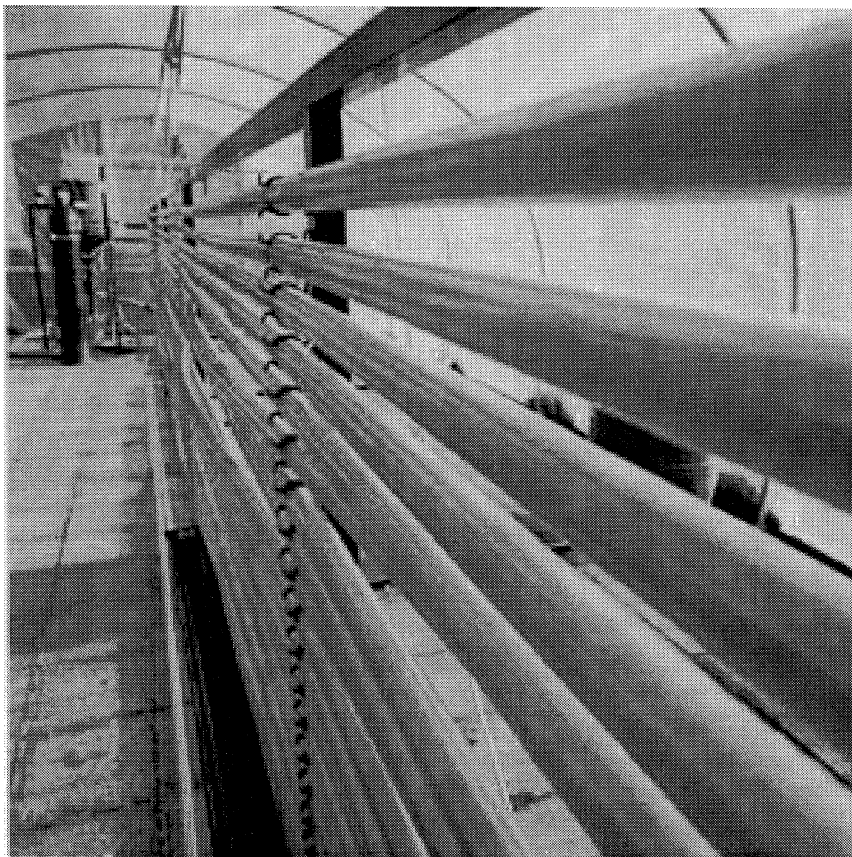
Ved å bygge inn et produksjonsanlegg i veksthus, kan man skape et delvis lukket system som reduserer svak-

hetene med de helt åpne anleggene. Blant annet reduseres kontamineringsrisikoen, samtidig som kontrollen av temperatur og fordampning forbedres. I Norge vil dette sannsynligvis være nødvendig for å utnytte produksjonspotensialet om våren og høsten. Man kan tenke seg å benytte avanserte drivhus-systemer 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.

I store, åpne dyrkingsanlegg oppnås gjerne en produksjon av 20-30 g algebiomasse m⁻² 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).

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 for å forsyne kulturen med lysenergi. 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. Reaktoren kan bygges med rør av glass- eller plastmateriale, eventuelt nedsenket i et vannbasseng for temperaturkontroll.

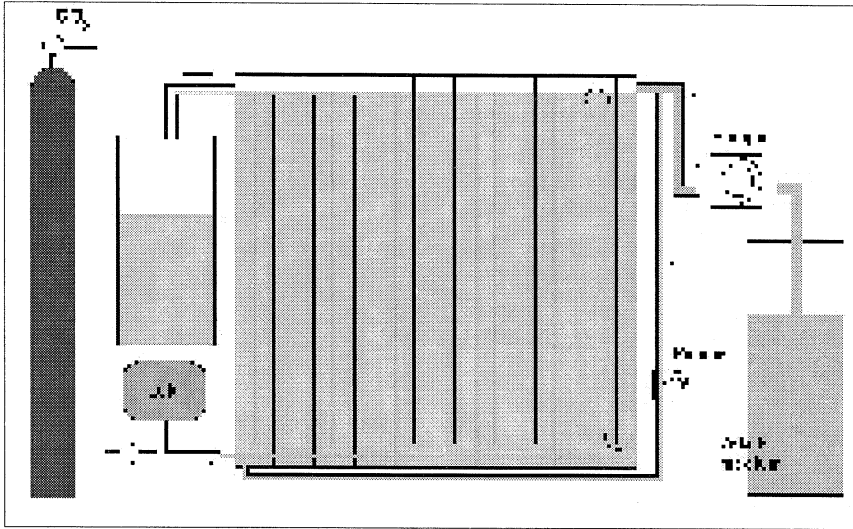


Figur 12. Lukket reaktor av rørtypen (Biofence)

Kulturen sirkuleres vanligvis gjennom en enhet for fjerning av oksygen og tilsetning av CO_2 . Figur 12 viser en kommersielt tilgjengelig reaktor av rørtypen (Biofence).

I noen reaktorkonstruksjoner har man benyttet kanalplater av plexiglass 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. En eksperimentreaktor av denne typen er konstruert ved NIVA (Figur 13). Hver reaktorplate rommer ca. 13 l algekultur. Platenes tykkelse (1,6 cm) gjør det mulig å operere anleggene med høy biomassetetthet. Reaktoren kan brukes i



Figur 13. Skisse av panelreaktor av pleksiglass med vertikale kanaler for kontinuerlig produksjon av mikroalger (NIVA)

dagslys, eller med kunstlys fra lys-stoffrør montert mellom platene. Anlegg basert på kanalplater er kommersielt tilgjengelige.

Pumping for sirkulering av algekulturen kan medføre et betydelig forbruk av energi i lukkede reaktorer. I noen reaktorer brukes luftheis (air-lift), for å drive sirkulasjonen, samtidig som CO₂ tilføres med luftstrømmen, slik at det ikke er behov for en separat enhet for utlufting og CO₂-tilsetning. (Ratchford & Fallowfield 1992, Tredici et al. 1998). Dette er en energimessig gunstigere løsning enn sentrifugalpumper. 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 enn anlegg med åpne dammer. 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 1986). Mange "nye" alger vil trolig snart få kommersiell betydning

takket være utviklingen av nye dyrkingsmetoder.

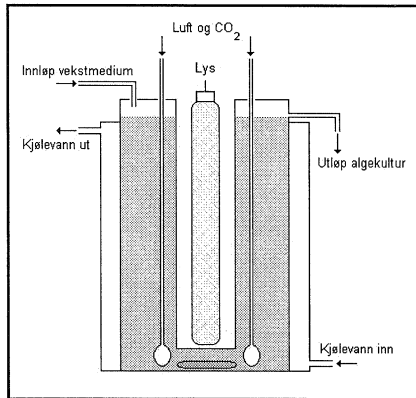
Flere undersøkelser har også vist at det er mulig å oppnå en høyere produksjon per arealenheter i lukkede dagslysreaktorer enn i tradisjonelle åpne anlegg. Ved forsøk i Italia var produksjonen av *Spirulina* i en rør-reaktor f.eks. 30-33 g m⁻² d⁻¹, mens produksjonen i åpne dammer under like betingelser sjelden var over 20 g m⁻² 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.

Lukkede kunstlysreaktorer

I kunstlysreaktorer kan lyskilden plasseres inne i kulturen slik at lysenergien utnyttes effektivt. 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). I andre reaktorer sirkuleres algekulturen i rør med ekstern eller intern belysning (Se f. eks. Muller-Fuega et al. 1998).

I senere tid har man gjort forsøk med optiske fibre for å lede inn og fordele lys i kulturen (Javanmardian & Pals-



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

son 1991, Pulz et al. 1995). I Japan arbeider man med utvikling av lyshøstingsutstyr for å samle dagslys og transportere det med optiske fibre til algeaktorer (Mori et al. 1989). Fremgangsmåten gjør det mulig å kunne redusere arealet av selve algeaktoren.

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 grønnsalg ved NIVA (200 kWh per kg). Data rapportert fra produksjon av rødalgen *Porfyridum cruentum* i kunstlysreaktor (Muller-Fuega et al. 1998) tyder på 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 innholdsstoffer 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.

Reaktorer for immobiliserte alger

Bruk av immobiliseringsteknikker ved produksjon av mikroalger blir bl.a. benyttet for å forenkle høstingen. Innstøping av algene i alginatkuler er én teknikk som blir brukt for rensing av avløpsvann (de la Noüe et al. 1990, Traveso et al. 1992). 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 fiberdok montert vertikalt på et roterende stativ. Vekstmediet tilsettes på toppen og sildrer nedover lerretet. Med denne teknikken tilføres CO₂ via luften.

Referanser

Chaumont, D. 1993: Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture. - *J. Appl. Phycol.* 5: 593-604.

de la Noüe, J., Chevalier, P. & Proulx, D. 1990: Effluent treatment with

immobilized microalgae and cyanobacteria. - *Wastewater Treatment by Immobilized Cells*, p. 143-152. - CRC Press, Boca Raton, Fl.

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.

Eppley, R.W. 1972: Temperature and phytoplankton growth in the sea. - *Fishery Bull. Fish Wildl. Serv. U.S.* 70: 1063-1085.

Gudin, C & Thepenier, C. 1986: Bioconversion of solar energy into organic chemicals by microalgae. - *Advances in Biotechnological Processes* 6: 73-110.

Grobbelaar, J.U. & Soeder, C.J. 1985: Respiration losses in planktonic green algae grown in raceway ponds. - *J. Plankt. Res.* 7 (4): 497-506.

Grobbelaar, J.U., Kroon, B.A., Burger-Wiersma, T. & Mur, L.R. 1992: Influence of medium frequency light/dark cycles of equal duration on the photosynthesis and respiration of *Chlorella pyrenoidosa*. *Hydrobiol.* 238: 53-62.

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.

- Javanmardian, M. & Palsson, B.O.* 1991: High density photoautotrophic cultures: Design, construction and operation of a novel photobioreaktor system. - *Biotechnol. Bioengin.* 38: 1182-1189.
- Kajan, M., Tichy, V & Simmer, J.* 1994: Productivity of algae in different culture systems. - *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 103, *Algological Studies* 73: 111-117.
- Källqvist, T.* 1982: Innvirkning av lysintensitet og temperatur på vekst-hastigheten til planktonalger i laboratoriekulturer. - *NTNF Utvalg for Eutrofieringsforskning. Intern rapport* 11/82. 46 pp.
- 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.
- 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 cultures photobioreactors and other production systems using *Porphyridium cruentum*. - *J. Appl. Phycol.* 10: 83-90.
- 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.
- Precht, H., Christophersen, J., Hensel, H. & Larcher, W. (eds.)* 1973: *Temperature and life*. - Springer Verlag, Berlin. 779 pp.
- 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.
- 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.
- Raven, J.A.* 1988: Limits to growth. - In M.A. Borowitzka, & L.J. Borowitzka, (eds.), *Micro-Algal Biotechnology*, p. 331-356. - Cambridge University Press, Cambridge
- 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.

Sakshaug, E. 1993: The relationship between phytoplankton growth rate and production with emphasis on respiration and excretion. - ICES Marine Science Symposia 197: 63-68.

Tang, E.P.Y. & Peters, R.H. 1995: The allometry of algal respiration. - J. Plankt. Res. 17(2): 303-315.

Tapie, P. & Bernard A. 1988: Microalgae production: Technical and economic evaluation. - Biotechnology and Bioengineering 32: 973-885.

Torzillo, G., Sacchi, A. Materassi, R. & Richmond, A. 1991: Effect of temperature on respiration loss in *Spirulina platensis* grown in outdoor tubular photobioreactors. - J. Appl. Phycol. 3(2): 103-109.

Travieso, L., Benitez, F. and Duperion, R. 1992: Sewage treatment using immobilized microalgae. - Bioresource Technology 40: 183-187.

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.

Vonshak, A. (ed.) 1997: *Spirulina platensis* (Arthrospira): Physiology, Cell biology and Biotechnology. - Taylor & Francis Ltd., London. 233 pp.