



ENSPAC Research Papers
on Transitions to a Green Economy
01/12

Biobrændsel fra alger – potentiale og hype

by
Søren Laurentius Nielsen

The Department of Environmental, Social and Spatial Change
ENSPAC

Roskilde University

**ENSPAC Research Papers on Transitions to a Green Economy
document and disseminate green economy research from the METRIK
and ENVIRONMENTAL DYNAMICS research groups, the GREECO
team and other green economy research at ENSPAC**

The work published in this research paper series includes working papers, documentation of empirical data, technical reports, literature reviews, discussion papers, lecture notes and other material that can be useful for a wider audience, but is not necessarily ready for publication in scientific journals.

Please note that:

Most of the papers are 'work in progress' on its way to publication in peer reviewed journals or books. Thus, comments and criticisms are warmly welcomed. For this purpose, the address(es) of the author(s) is specified below.

© Søren Laurentius Nielsen

2012

All rights reserved. Extracts of this paper may be reproduced in other media provided permission in writing is obtained from the author(s).

ISBN: 978-87-7349-801-9

Abstract:

Det vurderes at være muligt at etablere en rentabel produktion af algebiomasse i Danmark hvis parametrene vælges rigtigt, herunder at der anvendes alger tilpassede til lokale forhold og deres vækstbetingelser optimeres indenfor det muliges rammer.

En sådan produktion bør fokusere på produktion af højværdiprodukter, ikke på energiproduktion. Efter ekstraktion af de(t) udvalgte højværdiprodukt(er) bør restbiomassen dog naturligvis anvendes til energiproduktion for at forbedre rentabilitet og bæredygtighed. På tilsvarende måde bør forureningsbegrænsning indtænkes aktivt i produktionen gennem udnyttelse af næringsstoffer fra spildevand og CO₂ fra røggas – igen for at forbedre rentabilitet og bæredygtighed.

It is estimated that it will be feasible to establish a production of algal biomass in Denmark, given that the parameters are set right, including the use of locally adapted algae and optimization of their growth conditions.

Such a production should focus on the production of high value products rather than energy, but the residual biomass should be utilized for energy production after extraction of the high value products to improve reliability and sustainability. Likewise, pollution mitigation should be integrated in the production by utilizing nutrients from sewage and CO₂ from flue gas.

Acknowledgements:

I am indebted to many colleagues in Denmark and abroad for fruitful discussions and inspiration, and especially to Algal Innovation Center Denmark.

Academic disciplines involved:

Biology, phycology

Keywords:

Micoalgae, Macroalgae, Biofuel, High Value Products

Address for correspondence:

Søren Laurentius Nielsen,

Department of Environmental, Social and Spatial Change (ENSPAC),

Roskilde University, P.O. Box 260, RUC 11.2, DK-4000 Roskilde, DENMARK

Direct Phone: +45 4674 2722

Cell Phone: +45 2344 8318

E-mail: nielsen@ruc.dk

Contens

Indledning	5
Mikroalger	5
Makroalger	16
Forundersøgelser på Lolland	18
Konklusioner	20
Litteratur	21

Tabel 1: Beregningseksempel for henholdsvis et teoretisk "best case" scenarie (scenarie 1) og et mere realistisk scenarie for Danmark (scenarie 2). 12

Tabel 2: Beregningseksempel for henholdsvis et teoretisk "best case" scenarie (scenarie 1) og et mere realistisk scenarie for Danmark (scenarie 2). 15

Tabel 3: Produktivitet og forbundne omkostninger for produktion af store brunalger i hhv. tyske del af Nordsøen og indre danske farvande..... 17

Tabel 4: Mængder af "tang" (makroalger og ålegræs) som vil kunne indsamles fra opskyllet i Køge Bugt (Fredenslund, et al., 2010). 17

Tabel 5: Omkostninger forbundet med indsamling af "tangen" i Tabel 4 (Fredenslund et al., 2010). 17

Figur 1. Tal for olieudbyttet fra mikroalger sammenstillet fra en række kilder af Kristina Weyer, Solix Biofuels (Weyer, et al., 2008). Data er hentet fra (Chisti, 2007; Schenk et al., 2008; Sheehan, Dunahay, Benemann, & Roessler, 1998; Walton, 2008) .. 6

Figur 2. Tabsprocesser i mikroalgers omsætning af lysenergi fra solen til olie (Weyer, Bush, Darzins, & Willson, 2008) 8

Figur 3. Et højoptimeret, men usandsynligt, scenarie for omsætningen af solenergi til energi bundet i algeolie (Weyer, et al., 2008)..... 10

Figur 4. Et højoptimeret, men usandsynligt, scenarie for omsætningen af solenergi til energi bundet i algeolie (Weyer, et al., 2008)..... 11

Figur 5. En fotobioreaktor af den høje smalle (laminære) type. Ben Gurion Universitetet, Sede Boqer, Israel. Eget fot..... 13

Figur 6. Åbne algedamme ("raceway ponds") ved Seambiotics forsøgsproduktionsanlæg ved Ashkelon, Israel. Eget fot. 14

Figur 7. Line- og ringsystemer til dyrkning af makroalger (tang) (Wegeberg & Felby, 2010)..... 16

Figur 8. Algedammene i Onsevig Klimapark. Eget fot.....	18
Figur 9. Åbne kar ("mini-damme") med mikroalger i Søllested (Boelsmand, 2010). .	19

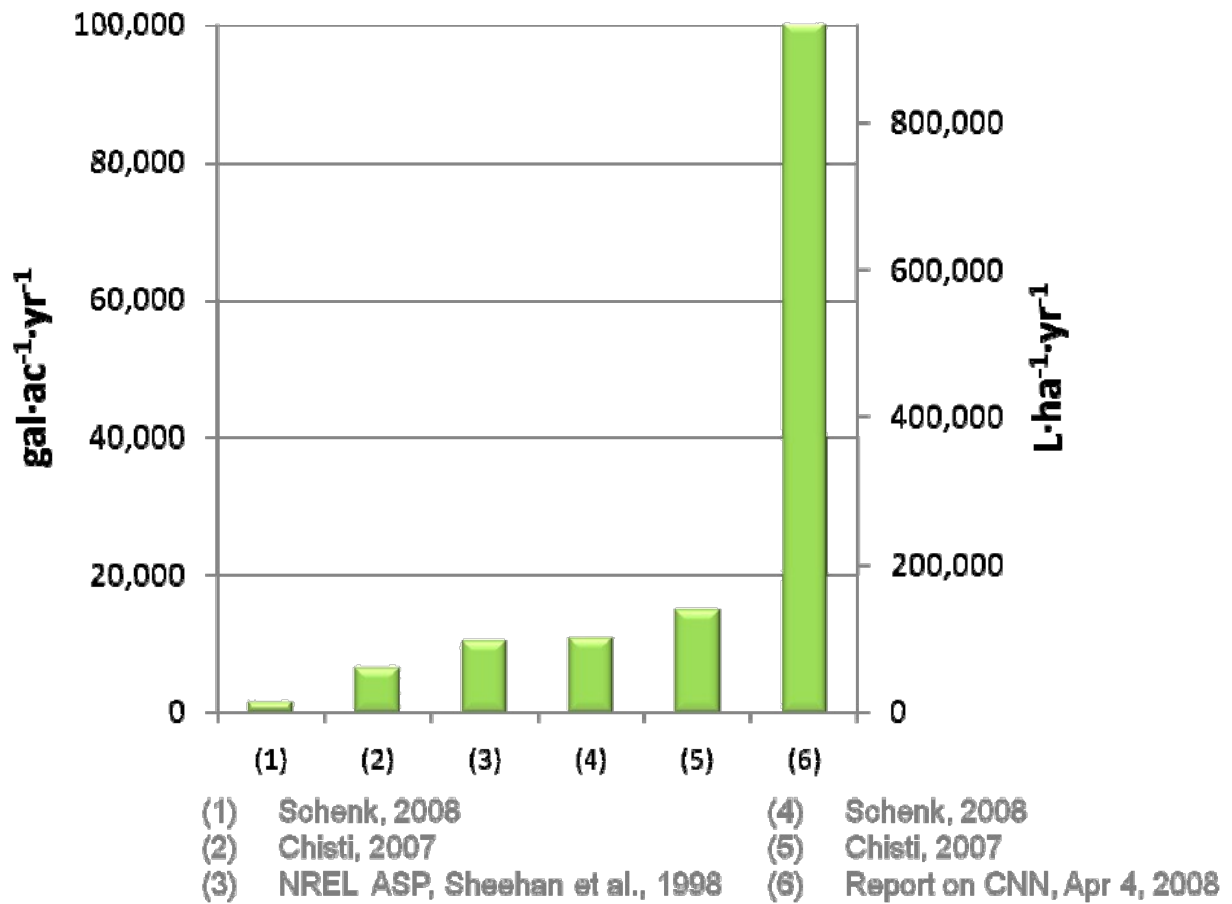
Indledning

Den nærværende tekst er en gennemskrivning af et mundtligt indlæg holdt på konferencen "Klimaomstilling Sjælland", som blev holdt på Roskilde Universitet d. 26. januar 2011. Formålet med indlægget – og dermed med denne tekst – er at forsøge at give en realistisk vurdering af mulighederne for at udvinde energi af algebiomasse. Man ser ofte endog meget høje tal for det potentielle energiudbytte fra algebiomasse fremført, især i medierne, men også ind imellem i den tekniske og videnskabelige litteratur. Nogle gange ses tal så høje at det ikke blot virker urealistisk at opnå så høje virkningsgrader i konkret produktion, men så høje at de ligefrem må betegnes som værende i modstrid med naturlovene. Her vil først blive undersøgt hvad det kan lade sig gøre at opnå fra produktion af mikroalger under danske forhold, dernæst vil prisen for hhv. produktion og indsamling af biomasse fra makroalger (ofte kaldet tang) blive illustreret med et par eksempler, og til sidst vil nogle foreløbige data fra produktion af trådalger og mikroalger i Onsevig og Søllested på Lolland blive gennemgået.

Mikroalger

For mikroalger fremføres det ofte at man kan opnå en meget høj produktivitet pr. areal – et udsagn som at "mikroalger er 100 gange så effektive som andre energiafgrøder" ses, måske især i projektansøgninger, men også andre steder, f. eks på Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/Algae_fuel). Kristina Weyer fra Solix Biofuels har, sammen med kolleger, sammenstillet tal for den mulige produktion af olie fra mikroalger (Figur 1) (Chisti, 2007; Weyer, et al., 2008). Man bemærker den store forskel på tallene fra en række videnskabelige kilder (søjle 1 – 5) og et indslag på CNN (søjle 6), som angiver op til 1000 m³ olie ha⁻¹ år⁻¹, hvor de videnskabelige kilder angiver tal i størrelsesordenen 12 – 150 m³ olie ha⁻¹ år⁻¹.

Algae Oil Projections



Figur 1. Tal for olieudbyttet fra mikroalger sammenstillet fra en række kilder af Kristina Weyer, Solix Biofuels (Weyer, et al., 2008). Data er hentet fra (Chisti, 2007; Schenk et al., 2008; Sheehan, Dunahay, Benemann, & Roessler, 1998; Walton, 2008)

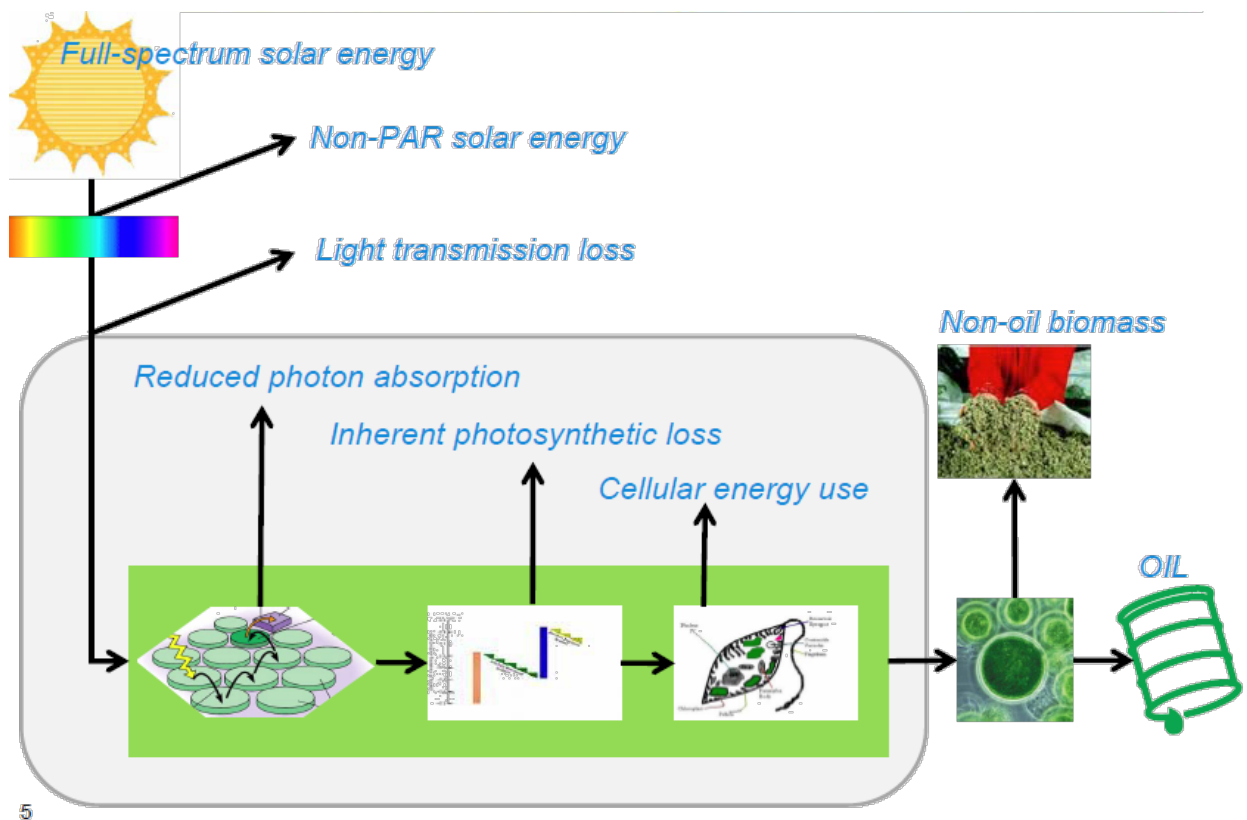
Spørgsmålet er nu hvilket udbytte, det vil kunne lade sig gøre at opnå ved optimering dels af de alger, der anvendes i produktionen, dels ved optimering af produktionsbetingelserne, altså hvad er det højeste udbytte der teoretisk vil kunne opnås – og hvad er det realistisk at forvente sig ved produktion i Danmark? Først og fremmest må man indse at termodynamikkens hovedsætninger også gælder for mikroalger. Det betyder blandt andet at man aldrig vil kunne trække mere energi ud af et system end der er puttet ind i det – man vil aldrig kunne få mere energi ud af algerne i form af olie end de har optaget i form af sollys – og selv dette vil ikke kunne opnås da algerne taber energi til omgivelserne i alle de led, der indgår i algernes omdannelse af energi fra sollys i energi bundet i olie. I Figur 2 ses de væsentligste led og tabsprocesser i algernes omdannelse af energi i sollys til energi i olie (Weyer, et al., 2008). Disse er som følger:

Solen udsender stråling i bølglængdeområdet 100 nm til 1 mm (1.000.000 nm) (*Full-spectrum solar energy*), men kun en mindre del af spektret fra ca. 400 nm til ca. 700 nm kan udnyttes af planter og alger i deres fotosyntese, såkaldt *photosynthetically active radiation* (PAR), som nogenlunde svarer til synligt lys. Alger er ikke 100 % optisk tætte – en del af det lys som når algen passerer igennem den (*Light transmission loss*).

Hvis den lysmængde som algen absorberer overstiger hvad der svarer til ca. 20 % af fuldt sollys vil algen ikke kunne udnytte lyset fuldt ud i fotosyntesen, algens lysudnyttelseeffektivitet falder med lysintensiteten – der er tale om "spild af fotoner" – *Reduced photon absorption* (Walker, 2009; Williams, 2010). Ud af den mængde lysenergi som algen faktisk absorberer i form af fotoner tabes en del ved omsætning i selve fotosynteseprocessen (*Inherent photosynthetic loss*) (Walker, 2009; Williams, 2010).

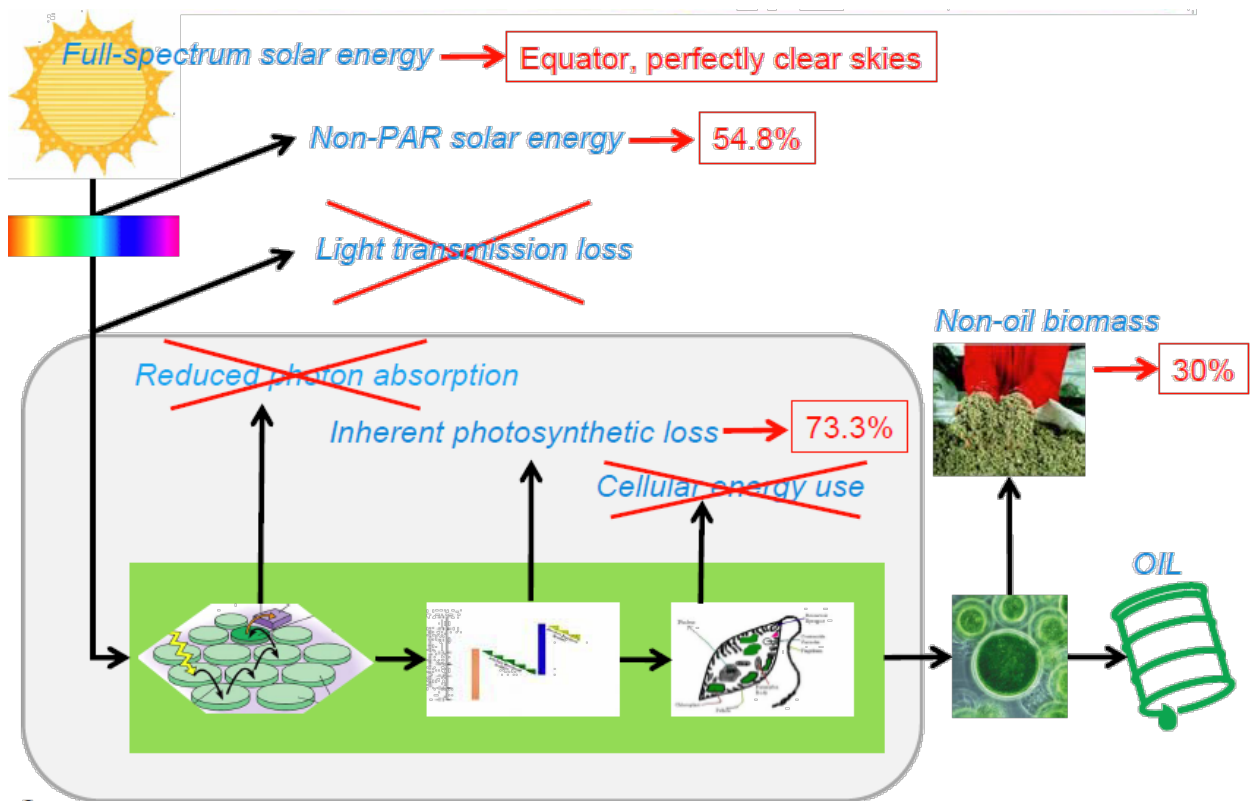
Alger har, som alle levende væsener, selv et stofskifte. De bruger selv en del af den energi, de har optaget gennem fotosyntesen (*Cellular energy use*).

Kun en del af algebiomassen er olie.



Figur 2. Tabsprocesser i mikroalgers omsætning af lysenergi fra solen til olie (Weyer, Bush, Darzins, & Willson, 2008)

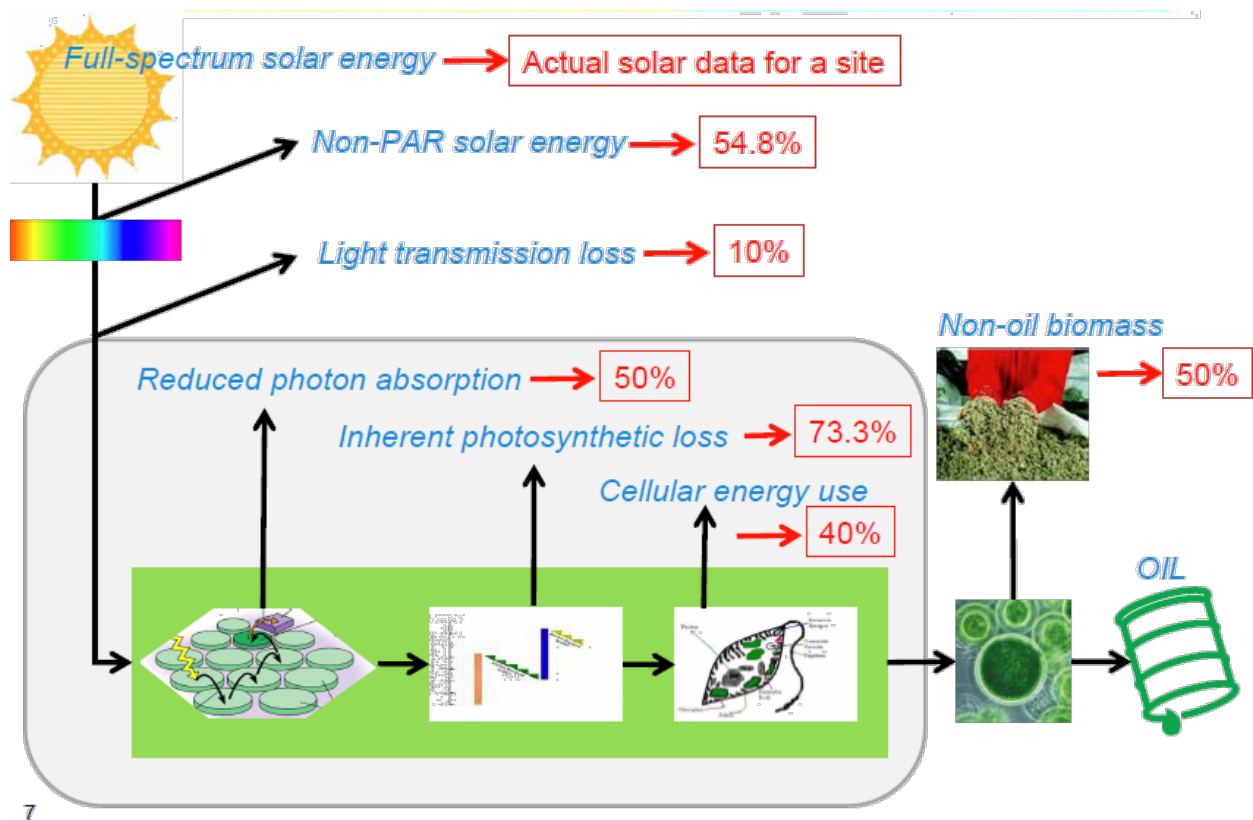
Vi kan nu opstille to scenarier. I det første har vi lagt vores algeanlæg på ækvator et sted hvor der aldrig er en sky på himlen, og vi har optimeret produktionsforholdene med hensyn til lys, således at algerne aldrig modtager mere lys end de kan absorbere med 100 % effektivitet, altså intet tab af fotoner. Desuden har vi fundet en alge som er 100 % optisk tæt (ingen transmission af lys), som er optimeret med hensyn til absorption af lys, som ikke har noget energitab ved eget stofskifte, og som indeholder olie svarende til 70 % af biomassen. Det skal understreges at med undtagelse af det høje olieindhold, som er fundet i enkelte alger, og måske optimering af algernes lysabsorption (Flynn, Greenwell, Lovitt, & Shields, 2010), er det en særdeles urealistisk alge som ikke findes og som næppe ville kunne frembringes selv ved genetisk manipulation. Vi kan ikke gøre noget ved det faktum at 54,8 % af det sollys som når frem til jordens overflader ligger uden for PAR-området og at der tabes energi i selve fotosyntesen, svarende til 73.3 % af den absorberede energi. Det har vist sig overraskende svært at forbedre fotosyntesens effektivitet ved genetisk manipulation (Ben-Amotz, personlig kommunikation). Det skal i denne forbindelse nævnes at selvom den optimale alge til olieproduktion har hurtigt vækst, optimal lysudnyttelse og højt lipidindhold så opnås optimale værdier for disse tre forhold aldrig i den samme alge da der er et biologisk *trade-off* mellem de tre parametre. Således opbygger alger kun et højt olieindhold når de udsættes for næringsstofmangel og dermed har langsom vækst (Hu et al., 2008).



6

Figur 3. Et højoptimeret, men usandsynligt, scenarie for omsætningen af solenergi til energi bundet i algeolie (Weyer, et al., 2008).

I det andet scenarie opererer vi med faktiske solindstrålingsdata for det sted anlægget er placeret, f. eks. i Danmark, og vi opererer endvidere med realistiske værdier for de øvrige tabsprocesser hentet fra vor viden om faktisk eksisterende alger. I en sådan alge går 10 % af det indkommende lys igennem biomassen uden at blive absorberet, 50 % af det absorberede lys er i overskud af hvad der rent faktisk kan omsættes i fotosyntese ("tabte fotoner"), tabet i selve fotosyntesen er som ovenfor 73,3 %, 40 % af den resterende energi bruges af algen selv i sit stofskifte, og algebiomasse indeholder kun 50 % olie (Weyer, et al., 2008).



Figur 4. Et højoptimeret, men usandsynligt, scenarie for omsætningen af solenergi til energi bundet i algeolie (Weyer, et al., 2008).

Vi kan nu indsætte tal for henholdsvis solindstrålingen på ækvator uden at tage højde for noget skydække (scenarie 1) og den gennemsnitlige solindstråling i Danmark, hvor der tages højde både for Danmarks placering mellem 54° og 58° N og de klimatiske forhold i Danmark (data fra Danmarks Meteorologiske Institut, scenarie 2). Dernæst regner vi eksemplerne igennem med de tab af energi i omsætningsleddene, som vi har stillet op for de to scenarie (Tabel 1).

Tabel 1: Beregningseksempel for henholdsvis et teoretisk "best case" scenarie (scenarie 1) og et mere realistisk scenarie for Danmark (scenarie 2).

	Teoretisk best case	
	(ækvator, skyfri himmel)	Danmark
Solenergi (MJ m ⁻² år ⁻¹)	11.500	4.200
% PAR	45,8 %	45,8 %
Lysabsorption i alge	100 %	90 %
Fotonfangst i fotosystem	100 %	50 %
Fotosyntetisk effektivitet	26,7 %	26,7 %
Biomasse akkumuleringseffektivitet	100 %	60 %
% olie	70 %	50 %
Energi i biomasse (MJ m ⁻² år ⁻¹)	1.406	139
Energi i olie (MJ m ⁻² år ⁻¹)	984	70
Volumetrisk olieproduktion (m ³ ha ⁻¹ år ⁻¹)	500	35

Som det ses kan der maksimalt opnås en olieproduktion på 500 m³ ha⁻¹ år⁻¹ selv under hypotetisk optimale forhold. En realistisk produktion under danske forhold begrænser sig til 35 m³ ha⁻¹ år⁻¹. Det må endda understreges at selv dette tal skal opfattes som en maksimalt opnåelig værdi under forhold der nok er realistisk mulige, men stadig optimale. I forhold til hvad der er rapporteret andetsteds (Figur 1) bemærkes det at selv vores teoretiske *best case* scenarie med sine ikke-biologisk realisable forudsætninger ligger på blot halvdelen af hvad der i pressen ind i mellem rapporteres som muligt at opnå med mikroalger (Walton, 2008). Vores fysisk/biologisk realistiske scenarie for Danmark ligger på niveau med, om end i den lave ende af, hvad der er rapporteret i den videnskabelige litteratur (Chisti, 2007; Schenk, et al., 2008; Sheehan, et al., 1998).

I virkelighedens verden er der overordnet set to måder at producere mikroalger på i stor skala. I lukkede systemer, såkaldte fotobioreaktorer, som kan være opbygget på flere forskellige måder, men som oftest har form af rørsystemer eller laminære systemer i form af smalle, høje tanke, og i åbne damme. Begge typer af systemer har deres fordele og ulemper. Fotobioreaktorer er forholdsvis dyre i konstruktion og drift, men giver de højeste udbytter per areal som anlægget optager, værdier på 48 – 72 g biomasse $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ er blevet opgivet (Chisti, 2007). I sammenligning hermed er åbne damme billigere i anlæg og drift, men giver lavere udbytter. Med hensyn til udbytte findes en stor variation i de angivne værdier, f. eks. 2 – 20 g biomasse $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Ben-Amotz, 2009) og 35 g biomasse $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Chisti, 2007). Endnu en ulempe ved åbne damme er netop at de er åbne, og dermed udsatte for fordampning, forurening og infektion med uønskede organismer såsom zooplankton, som lever af alger. Den ulempe har de lukkede fotobioreaktorer ikke.



Figur 5. En fotobioreaktor af den høje smalle (laminære) type. Ben Gurion Universitetet, Sede Boqer, Israel. Eget fot.



Figur 6. Åbne algedamme (“raceway ponds”) ved Seambiotics forsøgsproduktionsanlæg ved Ashkelon, Israel. Eget fot.

Debatten om hvorvidt man bør bruge fotobioreaktorer eller åbne damme til produktion af algebiomasse er ofte skarp og kan antage en nærmest ”religiøs” karakter hvor tilhængere af de to typer af produktionssystemer står stejlt overfor hinanden. Tilhængere af åbne damme argumenterer at fotobioreaktorer er så dyre i anlæg og drift at produktion af algebiomasse i fotobioreaktorer aldrig vil kunne gøres rentabel, mens tilhængere af fotobioreaktorer omvendt mener at åbne damme har så lave produktiviteter og er så udsatte overfor forurening at produktion i åbne damme aldrig vil kunne gøres rentabel. Den største del af den kommercielle produktion af algebiomasse i dag sker dog i åbne damme.

I Tabel 2 kan ses nøgletal for omkostninger og produktion i to anlæg, der anvender åbne damme. Dels det Israelsk-Japanske firma NBT’s anlæg i Eilat, Israel, som producerer β -caroten til kosttilskud og dels Seambiotics anlæg ved Ashkelon, Israel, som kan betegnes som et storskala forsøgsanlæg. De væsentligste forskelle er at Seambiotics anlæg er gennemautomatiseret og kan klare sig med en lavere bemanning end NBT’s anlæg og at Seambiotics anlæg er optimeret mht. el-forbrug, hvilket især opnås ved nye konstruktioner af de omrørere, som kræves for at holde algerne i dammene i suspension (Ben-Amotz, 2009). Desuden ligger Seambiotics anlæg på billig jord (lave jordskatter) og har meget lavere udgifter til den CO_2 som tilføres som gødskning af algerne. Det sidste skyldes at anlægget i Ashkelon

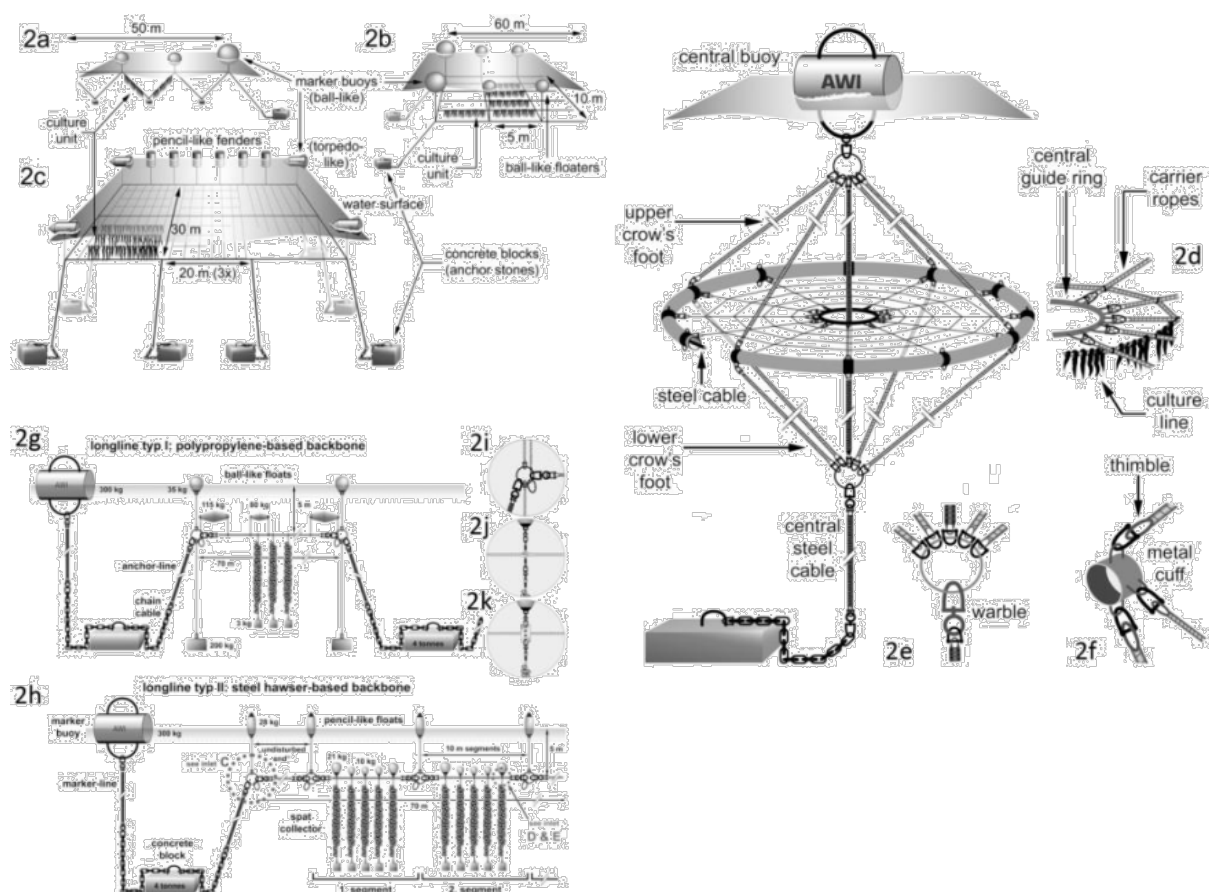
modtager sin CO₂ i form af røggas fra sin nabo, som er et af Israels største kulfyrede elektricitetsværker, mens NBT's anlæg tilføres CO₂ i fødevarekvalitet fra tryktanke. Tilsammen betyder dette at NBT's anlæg i Eilat har omkostninger på 17 USD per kg produceret algetørstof, hvilket kun gør produktion af højværdiprodukter (som β-caroten) rentabel, mens Seambiotics anlæg ved Ashkelon har omkostninger på blot 0,34 USD per kg produceret algetørstof, hvilket er lavt nok til at også produktion af biobrændsel vurderes at være rentabel (Ben-Amotz, 2009).

Tabel 2: Beregningseksempel for henholdsvis et teoretisk "best case" scenarie (scenarie 1) og et mere realistisk scenarie for Danmark (scenarie 2).

	<i>Dunaliella</i> NBT Ltd., Eilat	Seambiotic/IEC Plant (estimated)
	Cost in US\$/year	
Manpower	500,000 (20 workers)	120,000 (8 workers)
Electricity (\$0.125/KW) & residual energy	180,000	30,000
Fertilizers (N,P,K, Fe) and other chemicals	36,000	36,000
Domestic Land Taxes	50,000	10,000
CO₂	150,000	5,000
Sea Water	200,000	5,000
Fresh Water	20,000	10,000
Other supplies and Miscellaneous	30,000	20,000
Total	<u>1,166,000</u>	<u>236,000</u>
Yearly production of dry algae biomass	70 tons (2g/m ² /day)	700 tons (20g/m ² /day)
Cost per 1Kg dry microalgae	\$17.00	\$0.34
Market Price	\$4,000 β-Carotene Health Food	For Bio-Fuel cost should be below \$0.5/kg algal dw

Makroalger

Makroalger kaldes ofte også tang. I modsætning til mikrolager som både findes i ferskvand og i havet, findes makroalger hovedsageligt i havet. De kan dyrkes på forskellige systemer af liner eller ringe (Figur 7).



Figur 7. Line- og ringsystemer til dyrkning af makroalger (tang) (Wegeberg & Felby, 2010).

Tabel 3 viser tal for produktiviteten af makroalger på sådanne systemer og de dermed forbundne omkostninger, dels i indre danske farvande, dels i den tyske del af Nordsøen (Wegeberg & Felby, 2010). Når produktiviteten er tre gange så høj, og omkostningerne per produceret kg dermed tilsvarende lavere, i den tyske del af Nordsøen, sammenlignet med indre danske farvande, skyldes det især at havvandets saltholdighed er væsentlig højere i Nordsøen end i indre danske farvande. Dette giver væsentlig bedre vækstbetingelser for de store brunalger man som oftest er interesserede i. Tilsvarende tal ville kunne opnås for disse alger i den danske del af Nordsøen, eller ved produktion af andre, mindre saltkrævende alger, såsom søsalat (*Ulva lactuca*), i indre danske farvande.

Tabel 3: Produktivitet og forbundne omkostninger for produktion af store brunalger i hhv. tyske del af Nordsøen og indre danske farvande

	Produktion (t våd vægt ha ⁻¹)	Pris (DKK t våd vægt ⁻¹)
Indre danske farvande	120	125
Tyske del af Nordsøen	320 – 400	40 – 50

Makroalger kan også indsamles som opskyllet tang på stranden. Dette er undersøgt i et projekt i Solrød Kommune (Fredenslund, et al., 2010). Tabel 4 opsummerer hvilke mængder der vil kunne indsamles i Køge Bugt og Tabel 5 opsummerer de hermed forbundne omkostninger.

Tabel 4: Mængder af “tang” (makroalger og ålegræs) som vil kunne indsamles fra opskyllet i Køge Bugt (Fredenslund, et al., 2010).

Område	Estimeret mængde af tang pr. år (tons)
Greve Kommune	8.400
Solrød Kommune	4.000
Køge Kommune	4.400
Ølseagle Revle-Staunings Ø naturreservat	5.400
I alt (naturreservat undtaget)	16.800
I alt (naturreservat medtaget)	22.200

Tabel 5: Omkostninger forbundet med indsamling af “tangen” i Tabel 4 (Fredenslund et al., 2010).

Aktivitet	Prisgrundlag	Årlig omkostning kr.
Indsamling af tang og løst materiale fra strand ^a	15 km * 50.000 kr. / km	750.000
Indsamling og forbehandling af materiale indsamlet med strandrenser		
Ilæsning og udjævning af sand: 1 gummiged	1.200 kr. / time * 728 timer	875.000
Forbehandling tromlesigte ^b	1.400 kr. / time * 728 timer	1.000.000
Transport til biogasanlæg	30 kr. ton * 6700 tons	200.000
Oprensning af sand fra biogasanlæggets tanke	100 kr. / tons (v. 20 % sand)	134.000
Sum		2.960.000

Man kan af de to tabeller se at omkostningerne beløber sig til ca. 135 kr. t⁻¹, hvilket er ca. 10 % mere end det vil koste at dyrke den samme mængde tang i indre danske farvande.

Forundersøgelser på Lolland

Roskilde Universitet har i samarbejde med Aalborg Universitet (Esbjerg) og Fachhochschule Flensburg været involveret i et projekt under ledelse af Grønt Center. Under dette projekt blev der udført to serier af forundersøgelser:

Onsevig Klimapark

Som en del af Onsevig Klimapark er der etableret en række algedamme bag havdiget (Figur 8).



Figur 8. Algedammene i Onsevig Klimapark. Eget fot

I disse damme er gjort forsøg med dyrkning af især grønne trådalger (*Rhizoclonium* sp. og *Cladophora* sp.) i drænvand, der blev tilledt dammene fra den bagvedliggende landbrugsjord. Der kunne opnås en produktivitet på $7,4 \text{ g tørstof m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Boelsmand, 2010). Forudsættes det at der vil kunne produceres algebiomasse 8 måneder om året fås følgende tal for produktionen (Boelsmand, 2010):

$17,7 \text{ t tørstof ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$
 $1,2 \text{ t protein ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$
 $0,1 \text{ t olie ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$

Disse tal er ikke imponerende, men skyldes uden tvivl næringsmangel, idet nærmere undersøgelser har vist at algerne i dammen var fosfor-begrænsede, især på grund af et højt carbonat-indhold i drænvandet som udfældede fosforen i vandet (S.L. Nielsen, unpubl. data).

Søllested Rensningsanlæg

I Søllested blev der gjort forsøg med dyrkning af mikroalger (*Chlorella vulgaris*) i spildevand. Det var oprindeligt meningen at der skulle have været tilført CO₂ i form af røggas fra det nærliggende halmfyrede varmeværk, men på grund af tekniske vanskeligheder blev der i stedet tilsat CO₂ fra trykflasker (Figur 9).



Figur 9. Åbne kar ("mini-damme") med mikroalger i Søllested (Boelsmand, 2010).

Produktiviteten i de åbne kar ved Søllested var 7 g algebiomasse m⁻² d⁻¹ (Boelsmand, 2010), hvilket under tilsvarende forudsætninger som overfor giver:

14,8 t tørstof ha⁻¹ år⁻¹
2,4 t protein ha⁻¹ år⁻¹
0,7 t olie ha⁻¹ år⁻¹

Disse tal er faktisk på niveau med hvad der er rapporteret fra NBT's tidligere omtalte anlæg i Eilat (Ben-Amotz, 2009), hvilket må betegnes som meget opmuntrende med hensyn til mulighederne for produktion af algebiomasse i Danmark. Dog må det understreges at tallene for den potentielle produktion på årsbasis er ekstrapolerede på basis af produktionen i de tre sommer måneder (fra primo juni til primo september).

Konklusioner

- Der er en masse *hype* omkring produktionen af algebiomasse, og der bliver fremsat mange tal og vurderinger som er højst urealistiske og ligefrem i strid med naturlovene.
- Det vurderes dog at være muligt at etablere en rentabel produktion af algebiomasse i Danmark hvis parametrene vælges rigtigt, herunder at der anvendes alger tilpassede til lokale forhold og deres vækstbetingelser optimeres indenfor det muliges rammer.
- En sådan produktion bør fokusere på produktion af højværdiprodukter, ikke på energiproduktion. Efter ekstraktion af de(t) udvalgte højværdiprodukt(er) bør restbiomassen dog naturligvis anvendes til energiproduktion for at forbedre rentabilitet og bæredygtighed. På tilsvarende måde bør forureningsbegrænsning indtænkes aktivt i produktionen gennem udnyttelse af næringsstoffer fra spildevand og CO₂ fra røggas – igen for at forbedre rentabilitet og bæredygtighed.
- Indsamling af "tang" er en mulighed, men faktisk dyrere end at dyrke makroalger. Husk at "tang" – også i død tilstand - indgår i naturens kredsløb. Indsamling af død biomasse kan have uønskede effekter.

Litteratur

- Ben-Amotz, A. (2009). *Bio-fuel and CO₂-capture by micro-algae*. Paper presented at the Wind, Sea and Algae.
- Boelsmand, J. (2010). Udnyttelse af algers potentiale til miljøtekniske og industrielle formål. Paper presented at the Akvakulturkonference.
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294-306.
- Flynn, K. J., Greenwell, H. C., Lovitt, R. W., & Shields, R. J. (2010). Selection for fitness at the individual or population levels: Modelling effects of genetic modifications in microalgae on productivity and environmental safety. [Article]. *Journal of Theoretical Biology*, 263(3), 269-280.
- Fredenslund, A. M., Gudmundsson, E., Møller, H. B., Fafner, K., Hjort-Gregersen, K., Kjær, L. L., et al. (2010). *Udnyttelse af tang og restprodukter til produktion af biogas. Fase 1: Forundersøgelse*. Solrød: Solrød Kommune.
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., et al. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, 54, 621-639.
- Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C., et al. (2008). Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenergy Research*, 1(1), 20-43.
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J. R., & Roessler, P. (1998). *A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program - Biodiesel from Algae*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Walker, D. A. (2009). Biofuels, facts, fantasy, and feasibility. *Journal of Applied Phycology*, 21(5), 509-517.
- Walton, M. (2008). Algae: 'The ultimate in renewable energy'. CNN. Retrieved from http://edition.cnn.com/2008/TECH/science/04/01/algae.oil/index.html?iref=all_search
- Wegeberg, S., & Felby, C. (2010). Algae biomass for bioenergy in Denmark. Biological/technical challenges and opportunities. Copenhagen: University of Copenhagen.
- Weyer, K., Bush, D., Darzins, A., & Willson, B. (2008). *Theoretical maximum algal oil production*. Paper presented at the Algae Biomass Summit.
- Williams, P. J. I. B. (2010). Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy & Environmental Science*, 3, 554-590.