

Inventarisatie Aquatische Biomassa

Vergelijking tussen algen en landbouwgewassen

Koenraad Muylaert & Johan Sanders

K.U.Leuven Campus Kortrijk, Laboratorium Aquatische Biologie

Wageningen University and Research Centre, Leerstoel Valorisatie van Plantaardige Productieketens

Studie uitgevoerd in opdracht van Agentschap NL, Nederland

December 2009 – Januari 2010

Muylaert, K. & Sanders, J. (2010) Inventarisatie Aquatische Biomassa: vergelijking tussen algen en .
landbouwgewassen. K.U.Leuven Campus Kortrijk, 16 pp.

Opdrachtgever: Agentschap NL, Nederland

Contactpersoon: Marjan J.P. Botman (M.J.P.Botman@minez.nl)

Contactpersoon: Prof. Koenraad Muylaert

K.U.Leuven Campus Kortrijk, Laboratorium Aquatische Biologie

E. Sabbelaan 53, B-8500 Kortrijk, Belgium

Tel: +32 56 24 62 83, Fax: +32 56 24 69 99

Email: koenraad.muylaert@kuleuven-kortrijk.be

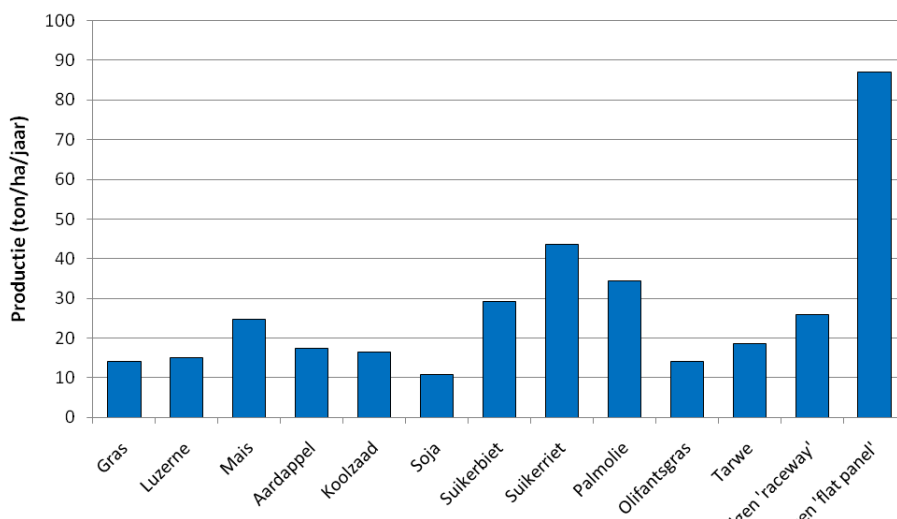
Maximale productiviteit van algen

Algen en landbouwgewassen produceren biomassa via het zelfde mechanisme van fotosynthese. De bovengrens van de productiviteit van zowel algen als landbouwgewassen wordt bepaald door de maximale efficiëntie van de fotosynthese en bedraagt ongeveer 12%. Uitgaande van een gemiddelde instraling van zonlicht van ongeveer 120 W/m^2 voor Nederland zou fotosynthese ongeveer 4.5 TJ/ha/jaar aan energie kunnen vastleggen.

De verbrandingswaarde van de biomassa geproduceerd door landbouwgewassen varieert van ongeveer 14 to 24 GJ/ton DS (droge stof) en is hoger naarmate de biomassa meer olie bevat. Ook een hoog lignine-gehalte leidt tot een relatief hoge verbrandingswaarde. Indien we uitgaan van algenbiomassa met een oliegehalte van 28% (zie Lardon et al. 2009), dan is de verbrandingswaarde van algen ongeveer 21.8 GJ/ton DS. Dit betekent dat algen in Nederland jaarlijks maximaal 208 ton DS/ha/jaar aan biomassa kunnen produceren. Dit dient gezien te worden als de absolute bovengrens van biomassa productie via algen. In de praktijk wordt deze efficiëntie van 12% nooit gehaald. In operationele teeltsystemen wordt momenteel slechts een efficiëntie van ongeveer 1.5% bereikt (Wijffels et al. 2010), wat overeenkomt met een biomassa-productie van 26 ton DS/ha/jaar. Deze bestaande operationele systemen zijn allen open teeltsystemen van het type 'raceway pond'. In fotobioreactoren van het type 'flat panel' kan een hogere efficiëntie bereikt worden. Laboratorium en pilootopstellingen suggereren dat in 'flat panel' fotobioreactoren een efficiëntie van 5% haalbaar moet zijn (Wijffels et al. 2010), wat overeenkomt met een productie van 87 ton DS/ha/jaar¹. Een dergelijke efficiëntie werd totnogtoe echter nog niet aangetoond in langlopende en grootschalige systemen.

In Fig. 1 wordt de productiviteit van algen in 'raceway pond' systemen en 'flat panel' fotobioreactoren in een Nederlandse context vergeleken met de productie van enkele traditionele landbouwgewassen. De data voor landbouwgewassen werden overgenomen uit Brehmer (2008). De productiviteit van algen in 'raceway ponds' is vergelijkbaar met de productiviteit van bijvoorbeeld maïs maar is lager dan die van suikerbiet, palmolie en suikerriet. De productiviteit van algen in 'flat panel' fotobioreactoren is dan weer ruim hoger dan die van alle landbouwgewassen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat recente studies aantonen dat een commerciële productie van suikerriet in Brazilië met een rendement van 99 ton DS/ha/jaar haalbaar moeten zijn (Goldemberg & Guardabassi 2009). Ook de productiviteit van algen is ongetwijfeld hoger in (sub)tropische gebieden dan in een Nederlandse context aangezien de instraling van zonlicht er dubbel zo hoog is.

¹ De biomassaproducties die hier geschat worden zijn iets hoger dan de schattingen van Wijffels et al. (2010) omdat we hier uitgaan van een lagere verbrandingswaarde van de biomassa. Wijffels et al. (2010) geeft een productie van 21 ton DS/ha/jaar voor 'raceway' systemen en van 64 ton DS/ha/jaar voor 'flat panel' fotobioreactoren. De fotosynthetische efficiëntie van de teeltsystemen is echter dezelfde.

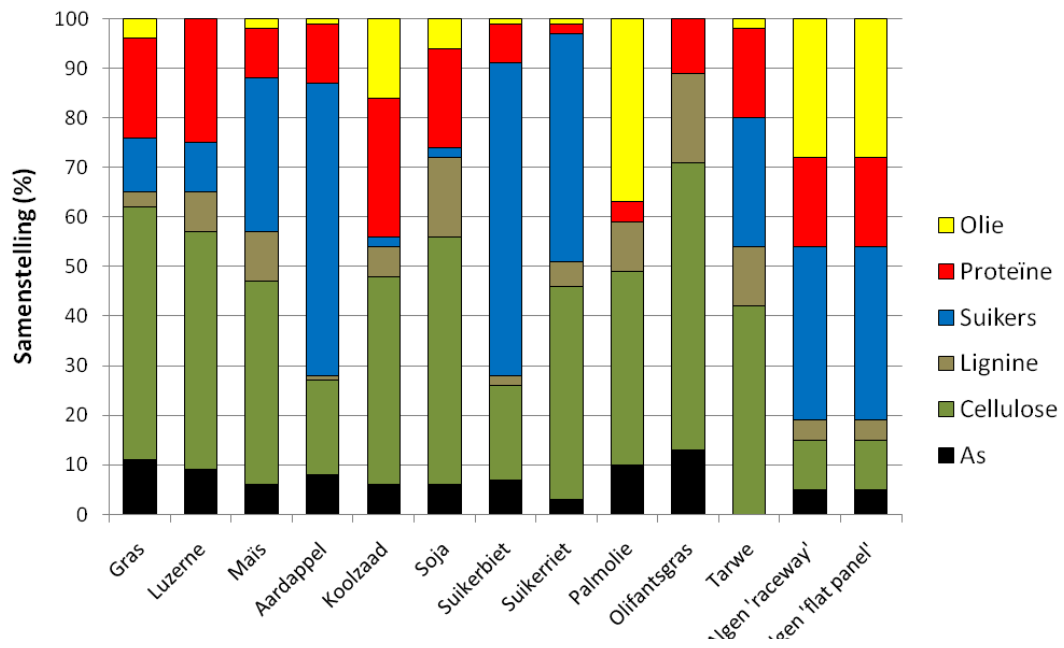


Figuur 1: Productiviteit van enkele landbouwgewassen en van algen in ton droge stof ha⁻¹ jaar⁻¹.

Samenstelling van de biomassa

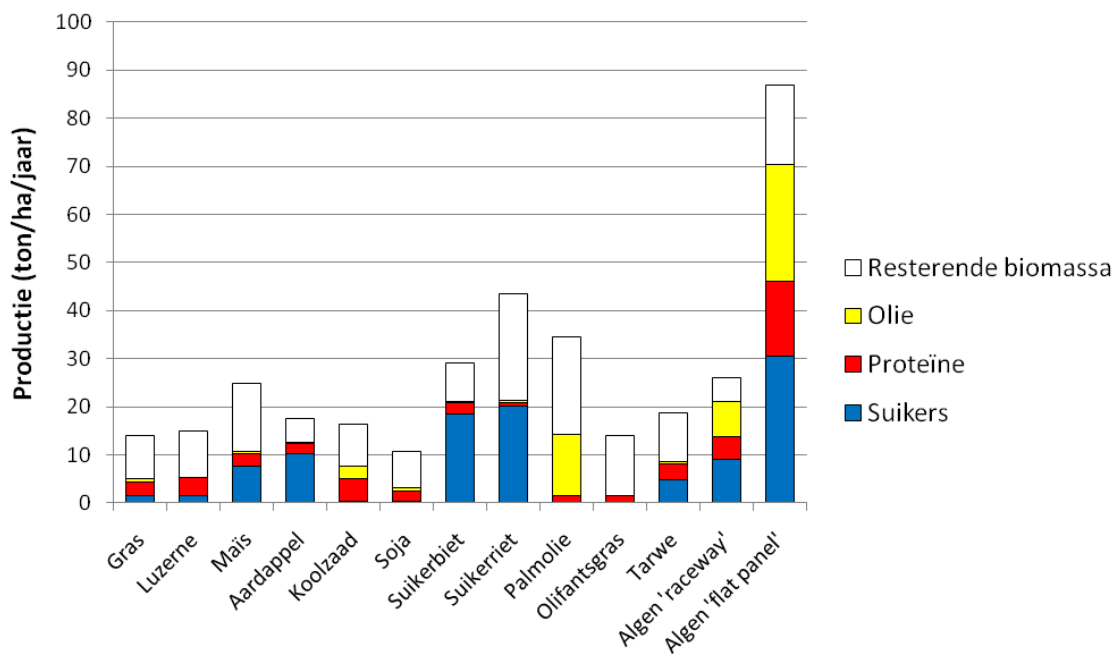
In Fig. 2 wordt de samenstelling van de biomassa vergeleken tussen algen en landbouwgewassen. Gegevens over landbouwgewassen werden overgenomen uit Brehmer (2008). Het is belangrijk te beseffen dat deze gegevens de samenstelling van de biomassa weergeven voor het totale bovengrondse productie van het gewas en niet alleen dit deel van het gewas dat traditioneel geoogst wordt. Gegevens over de samenstelling van de biomassa van algen werden overgenomen uit Lardon et al. (2009). Lardon et al. (2009) geeft de samenstelling van *Chlorella* weer, één van de meest frequent geteelde algen. Lardon et al. (2009) geeft echter geen data voor cellulose, asgewicht en wasachtige substanties zoals algaenan. Hier gaan we ervan uit dat cellulose 10% van de biomassa uitmaakt, as ongeveer 5% en algaenan ongeveer 5%. Algaenan wordt in Fig. 1 weergegeven onder 'lignine' omdat het net als lignine een energierijke substantie is die resistent is tegen biologische afbraak.

In tegenstelling tot landbouwgewassen zijn algen relatief arm aan cellulose, lignine of moeilijk afbreekbare substanties. In vergelijking met traditionele gewassen zijn algen relatief rijk aan suikers (onder de vorm van zetmeel), proteïnen en olie. Het lage gehalte aan stoffen met een relatief lage waarde zoals cellulose en lignine en het hoge gehalte aan stoffen met een relatief hoge waarde zoals olie en proteïne maakt algen een aantrekkelijk gewas.



Figuur 2: Vergelijking van de samenstelling van de biomassa van algen en landbouwgewassen.

In Fig. 3 wordt de absolute productie van suikers, proteïne en olie vergeleken tussen algen en landbouwgewassen. Dus ook de biomassa die normaal gezien verloren gaat wordt in dit scenario gevaloriseerd. Algen in 'flat panel' fotobioreactoren produceren zowel meer proteïne, suikers als olie dan alle andere gewassen. Algen in 'raceway pond' systemen worden wat betreft productie van proteïne enkel geëvenaard door koolzaad. Wat betreft productie van olie worden algen in 'raceway pond' systemen enkel overtroffen door palmolie. Hier dient opgemerkt te worden dat de 'best practice' productie van palmolie die opgegeven wordt door Brehmer (2008) (12.8 ton olie/ha/jaar) hoog is in vergelijking met de gemiddelde productie van palmplantages (ongeveer 6 ton olie/ha/jaar). Wat betreft productie van suikers worden algen in 'raceway pond' systemen overtroffen door zowel suikerriet, suikerbiet als aardappel.

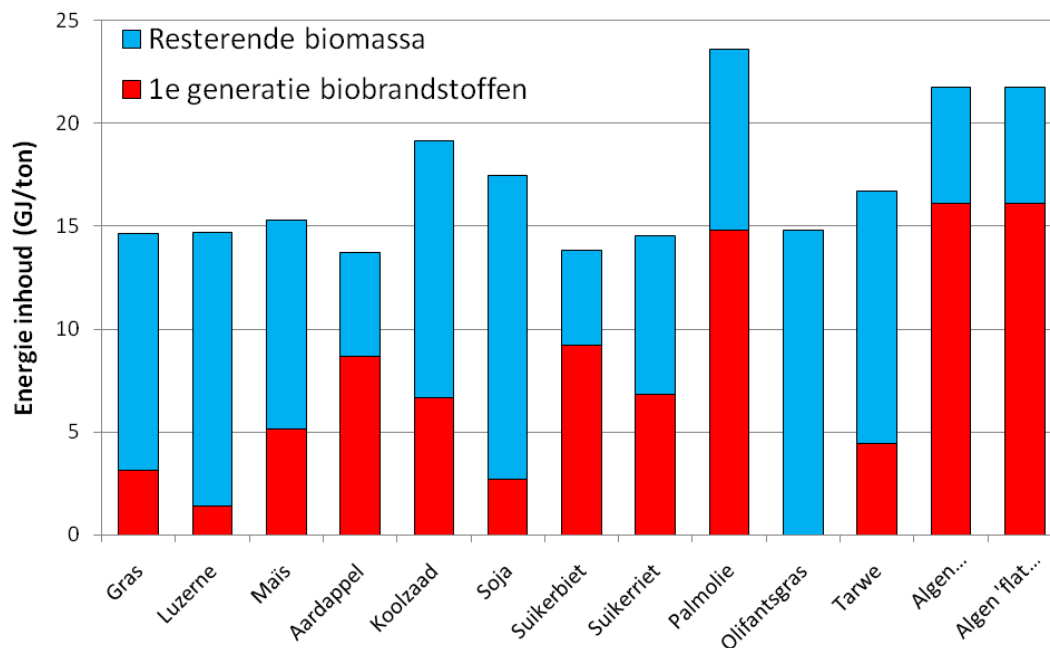


Figuur 3: Productie van suikers, proteïne, olie en resterende biomassa door landbouwgewassen en algen in ton droge stof ha⁻¹ jaar⁻¹.

Verbrandingswaarde van de biomassa

De verbrandingswaarde van de biomassa werd afgeleid uit de samenstelling van de biomassa. Opnieuw gaat het hier voor landbouwgewassen om de totale bovengrondse biomassa en niet alleen dat deel van de biomassa dat traditioneel geoogst wordt. Olie (40 GJ/ton) heeft de hoogste verbrandingswaarde, gevolgd door lignine (26 GJ/ton). Proteïne (18 GJ/ton) en cellulose en suikers (beide 14 GJ/ton) hebben een lagere verbrandingswaarde. Omwille van het hoge gehalte aan olie heeft algenbiomassa een relatief hoge verbrandingswaarde. De waarde die hier berekend wordt ligt iets lager dan deze gebruikt in Wijffels (2010) maar is vergelijkbaar met deze gebruikt in Lardon et al. (2009).

In Fig. 4 wordt de verbrandingswaarde van algen vergeleken met die van landbouwgewassen. De totale verbrandingswaarde van algen is iets lager dan die van palmolie, maar hoger dan die van alle andere gewassen. Wanneer we enkel kijken naar de energie die vastgelegd is dat deel van de biomassa dat gebruikt kan worden voor 1e generatie biobrandstoffen (suikers en olie), dan scoren algen hoger dan alle andere gewassen.



Figuur 4: Vergelijking van de energie-inhoud of verbrandingswaarde van biomassa afkomstig van algen en van landbouwgewassen. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen energie vastgelegd in potentiële grondstoffen voor eerste generatie biobrandstoffen en energie vastgelegd in de resterende biomassa.

De totale energie-input bij productie van biomassa wordt onderverdeeld in energie nodig voor de productie (meststof, pesticiden, irrigatie en teelt) en processing van de biomassa (fractionatie en drogen, transport en opslag). Voor landbouwgewassen zijn deze gegevens overgenomen uit Brehmer (2008). Voor algen zijn de gegevens gebaseerd op de studie van Wijffels et al. (2010). Wijffels et al. (2010) geeft echter enkel gegevens voor de teelt en niet voor meststof, pesticiden, irrigatie, fractionatie, drogen, transport en opslag. Daarom is hier een schatting gemaakt van de vereiste energie-input voor de ontbrekende stappen in het productieproces. Ook voor het teeltproces zelf werden een aantal minder energie-intensieve alternatieve processen voorgesteld met de bedoeling een veeleer optimistische schatting te maken van de vereiste energie-input tijdens de productie.

- **Meststof**

Algen hebben zowel stikstof, fosfor en kalium als CO₂ nodig als meststof. Voor CO₂ gaan we ervan uit dat deze geleverd wordt via rookgassen en dat de productie van CO₂ daarom geen energie kost. De energie-input voor het toedienen van CO₂ wordt geschat op 0.14 GJ/ton DS biomassa (Kadam 2001). Als meststof wordt NPK kunstmest gebruikt en de energiekost hiervoor bedraagt 1.16 GJ/ton DS biomassa (Brehmer 2008).

- **Pesticiden**

In de literatuur zijn geen kwantitatieve gegevens terug te vinden over het gebruik van pesticiden bij algenteelt. Desinfectie van water is echter een vereiste bij het produceren van zuivere algenbiomassa. Hiervoor kan chloor gebruikt worden aan een concentratie van 0.5 g DS/m³ (Kott et al. 1966). Voor de productie van chloor is ongeveer 18 GJ/ton DS vereist. Voor 'raceway' systemen gaan we uit van een biomassa-concentratie van 0.25 g DS/l. Dat betekent dat om 26 ton DS biomassa te produceren 104 000 m³ water gedesinfecteerd dient te worden. Voor 'flat panel' systemen gaan we uit van een biomassa-concentratie van 5 g DS/l. Dat betekent dat om 87 ton DS biomassa te produceren 17 400 m³ water gedesinfecteerd dient te worden. Omgerekend vereist desinfectie via chloor 0.002 GJ/ton DS biomassa in 'raceway' systemen of 0.0001 GJ/ton DS biomassa in 'flat panel' systemen.

- **Irrigatie**

In Nederland wordt evaporatie gemiddeld op jaarbasis gecompenseerd door neerslag. In 'raceway' systemen kan tijdens de zomerperiode evaporatie hoger zijn dan neerslag. Dit verlies aan water dient gecompenseerd te worden via irrigatie. Aangezien hiervoor geen gegevens gevonden werden wordt de kost voor irrigatie voorzichtig geschat op 0.05 GJ/ton DS, wat vergelijkbaar is met andere Nederlandse gewassen. Aangezien 'flat panel' systemen gesloten zijn treedt hier geen evaporatie op. Voor koeling wordt er vanuit gegaan dat hier geen gebruik gemaakt wordt van evaporatie van water. Daarom wordt voor 'flat panel' systemen geen energie-input voor irrigatie in rekening gebracht.

- **Teelt**

'Raceway ponds' - Gezien de lange levensduur van 'raceway ponds' wordt de energiekost die gepaard gaat bij de constructie door Wijffels et al. (2010) niet in rekening gebracht. Voor het verpompen van water (0.76 GJ/ton) en het in suspensie houden van de algen (2.73 GJ/ton DS) worden de cijfers uit Wijffels et al. (2010) gebruikt. Voor het oogsten gaat Wijffels et al. (2010) uit van het gebruik van centrifugatie via industriële decanters. Uitgaande van een vermogen van 50 kW en een debiet van 50 m³/uur is ongeveer 3.6 MJ nodig om 1 m³ suspensie te verwerken.

Voor 'raceway' systemen dient 104 000 m³ suspensie verwerkt te worden om 26 ton biomassa te oogsten, of ongeveer 14.4 GJ/ton DS. Lardon et al. (2009) stellen echter flocculatie voor in combinatie met centrifugatie. Recent onderzoek naar het gebruik van algen voor waterzuivering in Nederland toonde aan dat het haalbaar is om auto-flocculatie te gebruiken voor pre-concentratie van algen (Uijterlinde & Heijkoop 2010). Via auto-flocculatie kunnen algen 10 x opgeconcentreerd worden van 0.025% (0.25 g DS/l) tot 0.25% (2.5 g DS/l). Verdere opconcentratie gebeurt via centrifugatie tot een algenpasta met een drogestofgehalte van 25%. Hiervoor wordt het energieverbruik 10 x gereduceerd tot 1.44 GJ/ton DS.

'Flat panel' fotobioreactoren - De plastics gebruikt in de constructie van 'flat panel' systemen hebben een kortere levensduur. Wijffels et al. (2010) gaan uit van een levensduur van 1 jaar. Dit zorgt voor een energie-input van 8.01 GJ/ton DS voor de plastics van de reactoren. Hier wordt optimistisch uitgegaan van een langere levensduur van 5 jaar, wat de kost reduceert tot 1.3 GJ/ton DS. 'Flat panel' systemen zijn vooral energie-intensief omwille van het hoge energieverbruik dat nodig is voor de beluchting van de systemen, namelijk 168 GJ/ton DS. Nieuwe systemen zijn efficiënter en zouden tot een derde minder energie verbruiken, of 56 GJ/ton DS (persoonlijke mededeling R. Wijffels). Daarbovenop komt nog een kost van 0.52 GJ/ton DS voor pompen. In 'flat panel' fotobioreactoren is de biomassa concentratie reeds 5 g DS/l en is flocculatie bij het oogsten niet vereist als pre-concentratie stap. Voor 'flat panel' fotobioreactoren dient 17 400 m³ suspensie verwerkt te worden om 87 ton DS biomassa te oogsten. Uitgaande van een energieverbruik van 3.6 MJ/m³ is daarvoor ongeveer 0.72 GJ/ton DS nodig.

De totale energiekost voor teelt komt op 4.93 GJ/ton DS voor 'raceway ponds' en 58.54 GJ/ton DS voor 'flat panel' fotobioreactoren.

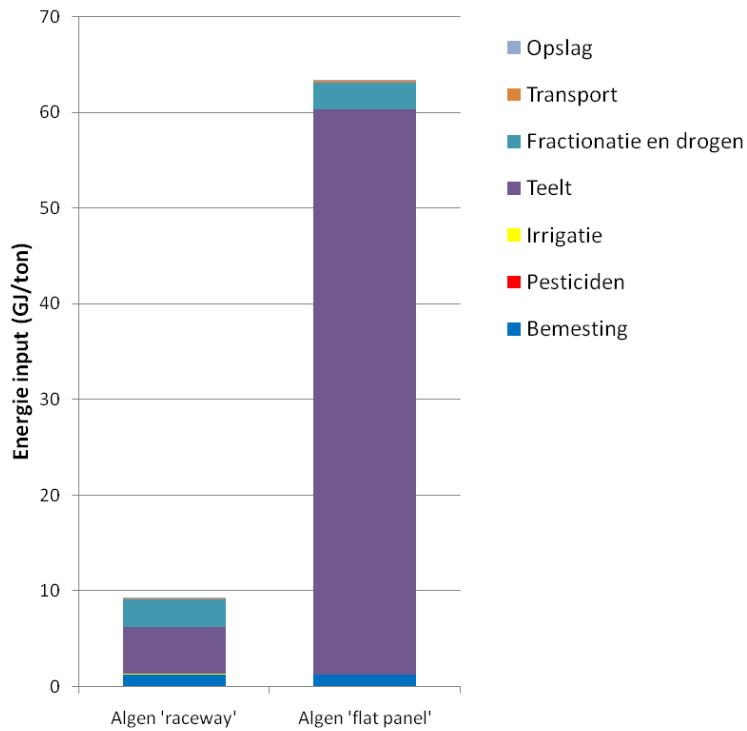
- **Fractionatie en drogen**

Na het oogsten dient de biomassa ontsloten te worden door de cellen open te breken. Hiervoor wordt uitgegaan van een energieverbruik van 10% van de verbrandingswaarde van de biomassa, of 2.18 GJ/ton DS.

Olie, waterige oplossing en vaste partikels wordt vervolgens van elkaar gescheiden via drie-fase centrifugatie. Gegeven een watergehalte van 75% dient per ton droge biomassa 4 m³ natte algenpasta gecentrifugeerd te worden. Hierbij gaan we ervan uit dat dit gebeurt met een industriële decanter met een vermogen van 50 kW en een relatief laag debiet van 5 m³ natte paste/uur, wat uitkomt op een kost van 0.14 GJ/ton DS. Dit levert een vaste koek op die de celwand bevat (voornamelijk cellulose en algaenan), een drijvende laag olie en een suspensie met zetmeel en proteïnen. Uit deze suspensie worden proteïnen geprecipiteerd door verwarming. Er wordt uitgegaan van 4 m³ suspensie/ton DS biomassa. Uitgaande van een efficiënte warmterecuperatie zou het energieverbruik beperkt blijven tot een temperatuursverhoging met 20°C, wat 0.34 GJ/ton DS kost. In totaal verbruikt de fractionatie 2.66 GJ/ton DS biomassa.

- **Transport en opslag**

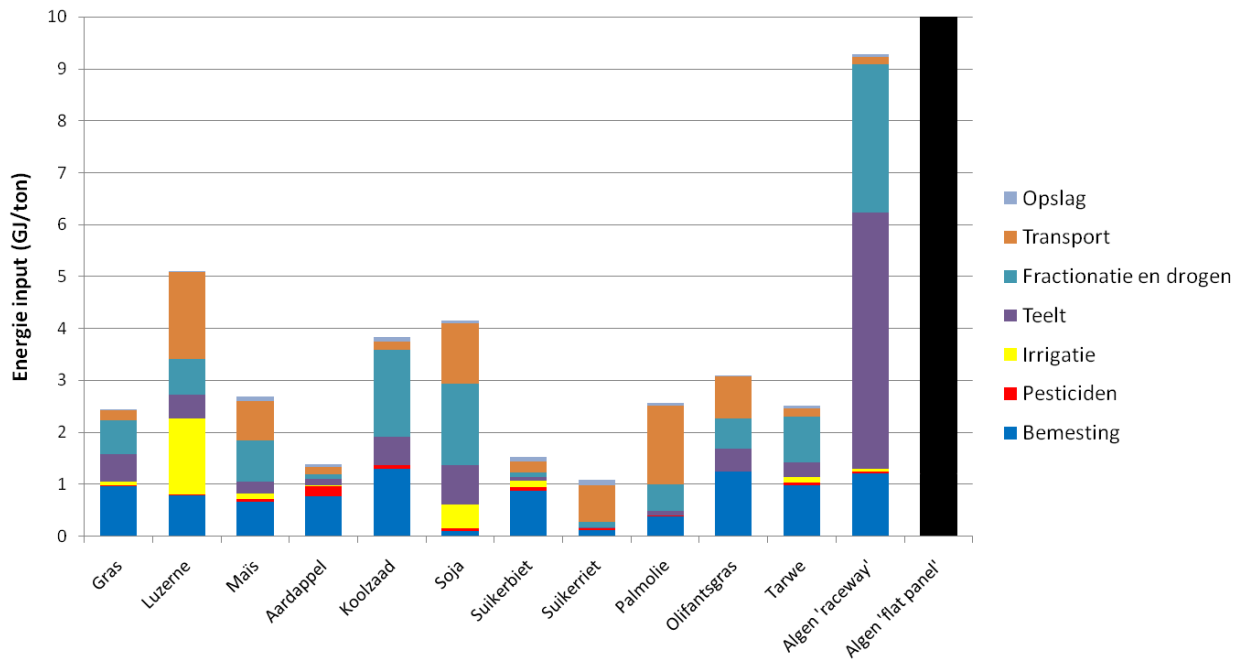
De transportkosten worden geschat op 0.15 GJ/ton DS en de opslagkosten op 0.05 GJ/ton DS, wat vergelijkbaar is met de kosten voor transport en opslag van Nederlandse gewassen.



Wanneer de energie-input in 'raceway ponds' vergeleken wordt met 'flat panel' fotobioreactoren (Fig. 5), dan blijkt deze veel hoger te zijn voor de 'flat panel' fotobioreactoren. Dit enorme verschil is vooral te wijten aan de hoge energie-input voor beluchting. Deze energie-input dient gereduceerd te worden met minstens een factor 10 om op het niveau te komen met 'raceway pond' systemen.

Figuur 5: De energie-input voor productie van algenbiomassa in 'raceway pond' systemen en 'flat panel' fotobioreactoren.

In Fig. 6 wordt de energie-input vergeleken tussen algen en landbouwgewassen. De energie-input voor algen in 'flat panel' fotobioreactoren is minstens 10 keer hoger dan die voor landbouwgewassen. De energie-input voor algen in 'raceway systemen' is lager maar toch nog bijna dubbel zo hoog dan die voor het meest energie-intensieve landbouwgewas (luzerne). In vergelijking met de meeste gewassen is de energie-input zelfs drie tot vier keer zo hoog.

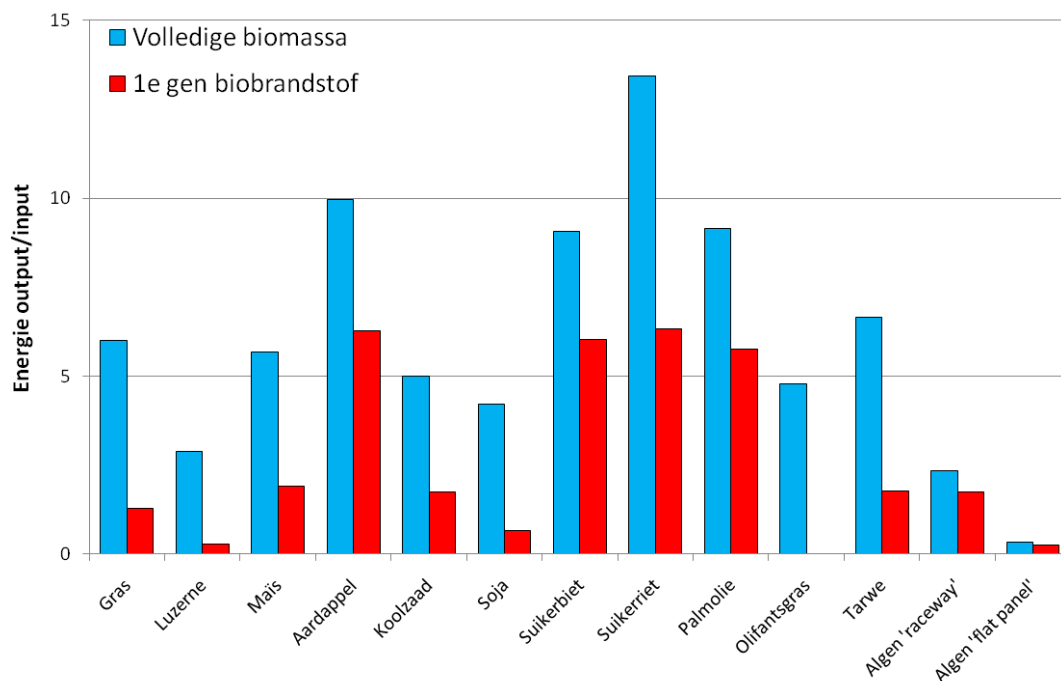


Figuur 6: Vergelijking van de energie-input tijdens de productie van biomassa van algen en landbouwgewassen.

Verhouding energie output ten opzichte van input

In Fig. 7 wordt de verhouding van de energie-input over de verbrandingswaarde van de biomassa weergegeven. De productie van algen in 'flat panel' fotobioreactoren kost ongeveer 2.6 keer meer energie dan de biomassa maximaal kan genereren. De verhouding input-output is kleiner dan 1 en de energie-balans is dus negatief. De energiebalans voor algen in 'raceway ponds' is positief en de biomassa kan in principe 2.5 keer meer energie genereren dan de energie die verbruikt wordt voor de productie van de biomassa. In vergelijking met andere landbouwgewassen is de energiebalans van algen in 'raceway ponds' echter vrij laag. De meeste landbouwgewassen scoren dubbel tot vier keer hoger.

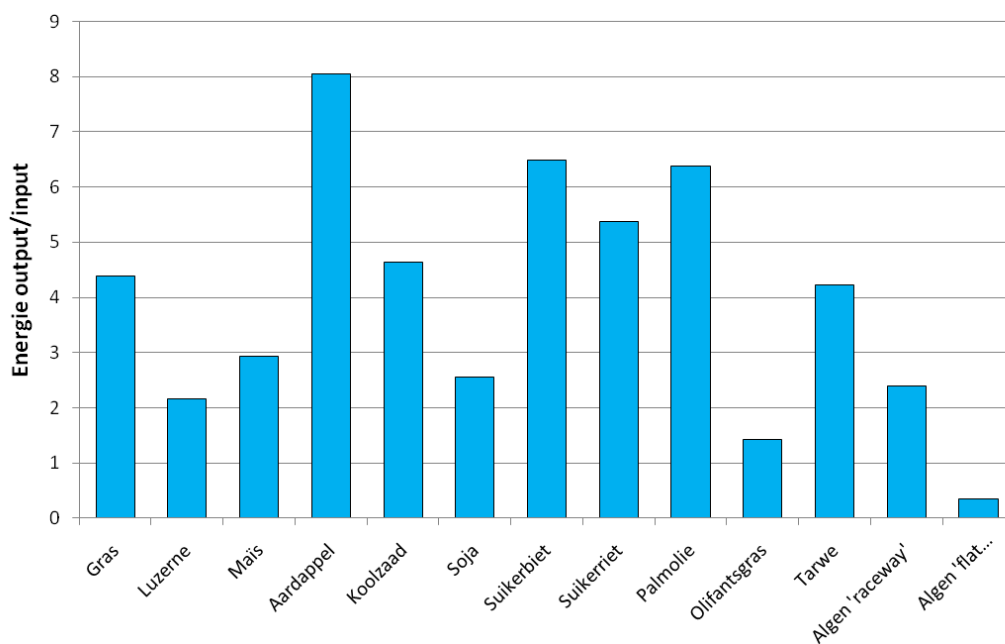
Algen zijn rijk aan grondstoffen voor 1^e generatie biobrandstoffen, zoals suikers en olie. Wanneer we kijken naar de energiebalans voor productie van suikers en olie scoren algen laag in vergelijking met suikerriet, suikerbiet, tarwe en palmolie. Algen scoren wel hoger dan maïs, koolzaad en soja.



Figuur 7: Verhouding van de input van energie tijdens het productieproces en de output van energie onder de vorm van biomassa. Zowel de totale energie-output als enkel de energie-output onder de vorm van grondstoffen voor 1^e generatie biobrandstoffen (suikers en olie) zijn weergegeven.

Wanneer biomassa gebruikt wordt in een bioraffinage context wordt de biomassa gebruikt voor productie van chemicaliën veeleer dan als brandstof. Chemicaliën afgeleid van biomassa vervangen in dit geval chemicaliën die via klassieke weg in de petrochemie geproduceerd worden. Productie van chemicaliën uit biomassa is vaak minder energie-intensief dan productie via de petrochemie (Brehmer 2008). Daardoor kan een hogere energiebesparing gerealiseerd worden door de biomassa in te zetten in bioraffinage. Voor de berekeningen zijn we ervan uitgegaan dat suikers omgezet worden in ethyleen en dat dit een energiebesparing oplevert van 10 GJ/ton suikers in vergelijking met klassieke chemie. Amino-zuren uit proteïnen worden gebruikt voor productie van stikstofderivaten en leveren een energiebesparing op van 40 GJ/ton proteïne. Olie wordt omgezet in ethylesters en dit levert 40 GJ/ton olie op.

In Fig. 8 wordt de verhouding van energie-input over winst weergegeven voor een situatie waarin biomassa gebruikt wordt als grondstof voor chemicaliën via bioraffinage. Algen hebben een hoge inhoud van zowel olie, proteïne als suikers en zijn daarom potentieel interessant voor bioraffinage. De hoge energie-input resulteert echter in een lage energie-winst voor bioraffinage. Algen scoren in bioraffinage vergelijkbaar met soja, maïs, luzerne en olifantsgras maar lager dan alle andere landbouwgewassen.



Figuur 8: Verhouding van de energie-input tijdens de productie van biomassa over de energiebesparing indien de biomassa gebruikt wordt voor bioraffinage tot grondstoffen voor de chemische industrie.

Conclusies

Algen hebben in een Nederlandse situatie een gemiddelde ('raceway ponds') tot hoge ('flat panel' fotobioreactoren) productie in vergelijking met de meeste landbouwgewassen. De samenstelling van algenbiomassa is vrij aantrekkelijk vanwege een laag gehalte aan lignine/cellulose en een hoog gehalte aan proteïne, suikers en olie. Deze samenstelling geeft algenbiomassa een vrij hoge verbrandingswaarde. Algenbiomassa is rijk aan grondstoffen voor 1^e generatie biobrandstoffen en is potentieel interessant voor bioraffinage.

De energie-input bij productie van algen in 'flat panel' fotobioreactoren is bijzonder hoog omwille van de hoge energievereiste voor menging via beluchting. Deze hoge energie-input bij teelt in 'flat panel' fotobioreactoren wordt niet gecompenseerd door de hoge opbrengst, waardoor de energiebalans negatief is.

De productie van algen in 'raceway ponds' kost minder energie dan in 'flat panel' fotobioreactoren. De energiebalans voor 'raceway ponds' is weliswaar positief, maar globaal genomen ongunstiger dan die van landbouwgewassen. Ook wanneer we de balans opmaken voor grondstoffen voor 1^e generatie biobrandstoffen (suikers en olie) scoren algen slechter dan de meeste landbouwgewassen. De energiebalans is veel lager dan 10, waardoor gebruik van de biomassa voor productie van biobrandstoffen af te raden is. Algen scoren echter even goed als koolzaad, maïs en soja, drie gewassen die vandaag de dag in de V.S. en Europa als bron van biobrandstoffen gebruikt worden. Ondanks het hoge gehalte aan zowel olie, proteïne als suikers scoren algen in een context van bioraffinage tot grondstoffen voor chemie matig in vergelijking met de meeste landbouwgewassen. Andere recente studies kwamen eveneens tot de conclusie dat algen op dit moment geen oplossing zijn voor productie van biobrandstoffen omdat de energie-input voor teelt en processing te hoog is (vb. van Beilen et al. 2009).

In deze studie werd uitgegaan van een vrij optimistische schatting van de energie-input voor productie van biomassa. Bovendien is voor sommige schatting uitgegaan van technologieën waarvan nog niet is aangetoond dat ze in de praktijk op grote schaal haalbaar zijn. Daarom moet er van uitgegaan worden dat nog onderzoek en ontwikkeling nodig is om de energie-input die hier wordt voorgesteld te kunnen benaderen. Om competitief te zijn met landbouwgewassen zal de energie-input voor 'raceway pond' systemen sterk gereduceerd moeten worden. Algen worden al enige tijd geteeld in 'raceway pond' systemen geteeld, zij het vooral voor hoogwaardige producten. Daarom is de technologie voorlopig nog niet geoptimaliseerd naar energie-efficiëntie. Totnogtoe is relatief weinig onderzoek uitgevoerd naar optimalisatie van de energie-input bij de teelt van algen en processing van algenbiomassa. Met de middelen die een middelgroot land als Nederland ter beschikking heeft zal dit vermoedelijk minstens 10 jaar duren en de kans dat alternatieve technologieën voor duurzame energie dan verder geëvolueerd zijn is groot (van Beilen 2009).

Hier werd een scenario uitgewerkt voor algenteelt in Nederland. Wellicht is de energiebalans positiever in subtropische regio's, waar instraling van zonlicht en dus ook de productiviteit een stuk hoger is. Algen hebben als belangrijke voordeel ten opzichte van landbouwgewassen dat ze biomassa kunnen produceren op grond die niet geschikt is voor landbouw, zoals woestijnen of eventueel zelfs op zee. Daarom kunnen ze een bron van biomassa vormen die complementair is met die van landbouwgewassen.

Brehmer (2008) Chemical Biorefinery Perspectives: The valorisation of functionalised chemicals from biomass resources compared to the conventional fossil fuel production route. PhD Thesis, Wageningen University.

Goldemberg, J. & Guardabassi, P. (2009) The potential for first-generation ethanol production from sugarcane. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4: 17-24.

Kadam, K. (2001) Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: Environmental Implications on a Life Cycle Basis, Technical Report; National Renewable Energy Laboratory.

Kott, Y., Hershkovitz, G., Shemtob, A. & Sless, J. B. (1966) Algicidal Effect of Bromine and Chlorine on *Chlorella pyrenoidosa*. *Applied Microbiology* 14: 8-11.

Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., J.-P. Steyer & O. Bernard (2009) Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental Science & Technology* 43: 6475-6481.

Uijterlinde, C.A. & Heijkoop, N.W. (2010) Effluentpolishing met algentechnologie: tussentijds rapport. Stowa, Utrecht.

Van Beilen, J.B. (2009) Why microalgal biofuels won't save the internal combustion machine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 4: 41-51.

Wijffels, R. (2010).

Tabel met de gegevens gebruikt in de figuren.

Opbrengst	Gras	Luzerne	Mais	Aardappel	Koolzaad	Soja	Suikerbiet	Suikerriet	Palmolie	Olijfsaatsgras	Tarwe	Algen 'raceway'	Algen 'flat panel'
ton DW/ha	14.1	15	24.8	17.5	16.4	10.8	29.2	43.5	34.5	14	18.6	26	87
ton WW/ha	81	61	87	73	88	22	143	140	72	16	19	104	348
Nuttig product	dry hay	dry hay	grains	tubers	seeds	seeds	beets	green matter	fruits	dry hay	grains	dewatered cake	dewatered cake
Ton geoogst nuttig product	14.1	15	13.8	65	5.5	4	100	125	25	14	10.3	104	348
Land	Nederland	USA	USA	Nederland	België	USA	Duitsland	Brazilië	Maleisië	USA	Frankrijk	Nederland	Nederland
Samenstelling biomassa													
As	11	9	6	8	6	6	7	3	10	13	0	5	5
Cellulose	51	48	41	19	42	50	19	43	39	58	42	10	10
Lignine	3	8	10	1	6	16	2	5	10	18	12	4	4
Suikers	11	10	31	59	2	2	63	46	0	0	26	35	35
Proteïne	20	25	10	12	28	20	8	2	4	11	18	18	18
Olle	4	0	2	1	16	6	1	1	37	0	2	28	28
watergehalte (%)	83	75	71	76	81	51	80	69	52	13	2	75	75
Opbrengst suikers, proteïne en olie													
Suikers	1.6	1.5	7.7	10.3	0.3	0.2	18.4	20.0	0.0	0.0	4.8	9.1	30.5
Proteïne	2.8	3.8	2.5	2.1	4.6	2.2	2.3	0.9	1.4	1.5	3.3	4.7	15.7
Olle	0.6	0.0	0.5	0.2	2.6	0.6	0.3	0.4	12.8	0.0	0.4	7.3	24.4
Resterende biomassa	9.2	9.8	14.1	4.9	8.9	7.8	8.2	22.2	20.4	12.5	10.0	4.9	16.5
Energie-inhoud van biomassa													
Berekende energie-inhoud (GJ/ton)	14.7	14.7	15.3	13.7	19.2	17.4	13.8	14.5	23.6	14.8	16.7	21.8	21.8
Fractie 1e generatie biobrandstoffen	3.1	1.4	5.1	8.7	6.7	2.7	9.2	6.8	14.8	0.0	4.4	16.1	16.1
Resterende biomassa	11.5	13.3	10.1	5.1	12.5	14.8	4.6	7.7	8.8	14.8	12.2	5.7	5.7
Energie-input (GJ/ton)													
Gras	0.96	0.79	0.67	0.76	1.30	0.09	0.88	0.11	0.38	1.24	0.97	1.30	1.30
Bemesting	0.03	0.01	0.05	0.21	0.06	0.06	0.05	0.04	0.02	0.01	0.05	0.00	0.00
Pesticiden	0.07	1.47	0.09	0.01	0.00	0.46	0.14	0.00	0.00	0.00	0.11	0.05	0.00
Irrigatie	0.52	0.47	0.24	0.13	0.55	0.75	0.06	0.02	0.09	0.43	0.29	4.93	58.54
Teelt	0.65	0.68	0.80	0.09	1.69	1.58	0.10	0.10	0.50	0.59	0.87	2.66	2.66
Fractionatie en drogen	0.18	1.67	0.75	0.13	0.15	1.17	0.21	0.70	1.52	0.81	0.17	0.15	0.15
Transport	0.02	0.01	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.11	0.06	0.02	0.04	0.05	0.05
Opslag	0.02	0.01	0.09	0.05	0.09	0.05	0.09	0.11	0.06	0.02	0.04	0.05	0.05
Totaal (GJ/ton)	2.44	5.09	2.69	1.38	3.83	4.15	1.53	1.08	2.57	3.10	2.50	9.14	62.70
Bioraffinage besparing (GJ/ha)													
Olle	23	0	20	7	105	26	12	17	511	0	15	291	974
Proteïne	113	150	99	84	184	86	93	35	55	62	134	187	626
Suikers	16	15	77	103	3	2	184	200	0	0	48	91	305
Verhouding energie output/input													
1e gen biobrandstof	1.3	0.3	1.9	6.3	1.7	0.6	6.0	6.3	5.8	0.0	1.8	1.8	0.3
Volledige biomassa	6.0	2.9	5.7	10.0	5.0	4.2	9.1	13.4	9.2	4.8	6.7	2.4	0.3
Bioraffinage	4.4	2.2	2.9	8.0	4.6	2.6	6.5	5.4	6.4	1.4	4.2	2.4	0.3