

Mogelijkheden en beperkingen van biomassa als energiebron

De organische chemie is in feite koolstofchemie, en het leven op aarde is gebaseerd op koolstof. De levensprocessen ontlelen hun energie aan verbranding van organische stoffen, die langs de weg van de fotosynthese uit zonlicht zijn verkregen. Toch is water de meest overvloedig aanwezige stof in levend materiaal, noodzakelijk als het is als oplosmiddel en transportmedium voor de organische droge stofcomponenten van een levend organisme.

Bij een nadere analyse van de elementensamenstelling van de organische droge stof blijkt dat koolstof daarin als meest constante factor aanwezig is. Het gehalte van koolstof in droge stof in levend materiaal varieert van 40 tot 60% en is daarmee veel stabielere dan dat van de andere elementaire nutriënten. Stikstof bijvoorbeeld kan fluctueren van 0,5% tot 5%.

Een verklaring voor de stabiliteit van het koolstof-gehalte is dat de energiedragers koolhydraten en vetten niet veel in koolstof-gehalte verschillen van de meer structurele componenten als eiwitten en lignine. Terwijl koolhydraten en vetten helemaal geen nutriënten als stikstof of fosfor bevatten, is dat bij de structurele plantenmaterialen als eiwitten en organische fosfaatverbindingen natuurlijk wel zo. Kwaliteit en voedingswaarde van plantemateriaal hangen sterk samen met nutriëntengehalte, maar energieinhoud niet. In feite neemt de energieinhoud vrijwel lineair toe met het koolstofgehalte [1].

Het hoofdproduct van het fotosyntheseprocess in planten is glucose (dat voor 40% uit koolstof bestaat). Glucose is in de eerste plaats een energiebron voor de plant, maar het dient ook als uitgangspunt voor de bouwmaterialen, de structurele componenten. Bij planten is het dus moeilijk een onderscheid te maken tussen fabriek en produkt! Bij verwerking tot vet, lignine of eiwit kan nog enige verdere verhoging van het koolstofgehalte in de plant optreden, maar gemiddeld mogen we wel stellen dat het koolstofgehalte van droge stof 45% bedraagt, met een gemiddelde verbrandingswaarde van 15 MJ kg⁻¹.

De hoeveelheid koolstof die zo in gereduceerde vorm in de biosfeer ligt opgeslagen is aanzienlijk. De fossiele voorraden die natuurlijk ook door de biosfeer in een grijs verleden zijn opgehoopt zullen we hier even buiten beschouwing laten. In biomassa in de vorm van bladeren, takken en vooral hout is in totaal naar schatting circa 500 Gt C aanwezig, en ondergronds in de vorm van humus en bodemkoolstof van organische oorsprong nog eens zo'n 1400 Gt C. De atmosfeer bevat ruim 700 Gt C (overeenkomend met 350 ppm CO₂), en atmosfeer en terrestrische biosfeer wisselen jaarlijks zo'n 50 Gt C uit. Over de oceanen als geheel opgeteld komt daar nog eens 40 Gt C per jaar bij.

Deze uitwisseling is niet een passief diffusieproces, maar wordt aangedreven door de fotosynthese. De biosfeer wordt voortdurend opgeladen met gereduceerde koolstof afkomstig uit atmosferisch CO₂. De terugstroming vanuit de biosfeer naar de atmosfeer levert via de ademhalingsprocessen vervolgens de energie waar het leven op draait. Voor een klein deel (naar schatting zo'n 10%) vindt de terugstroming echter ook plaats door echte verbranding (bos- en savannebranden). Het zou mooi zijn als we deze branden in voor ons als mens nuttige processen zouden kunnen kanaliseren. Deze stroom van circa 5 Gt C per jaar is van dezelfde orde van grootte als ons fossiele brandstofgebruik.

POTENTIELE ENERGETISCHE EFFICIENTIE VAN FOTOSYNTHESE

Het spectrale gebied van de fotosynthetisch actieve straling (PAR) beslaat 400 tot 700 nm golflengte, dat ongeveer 45% van de inkomende zonnestraling uitmaakt. Bij de theoretisch maximale efficiëntie van de fotosynthese zijn 8 fotonen nodig om een molecuul CO₂ te reduceren: een zogenaamde

Dr. ir. J. Goudriaan,
dr. M.J. Kropff en
prof.dr.ir. R. Rab-
binge zijn werk-
zaam bij de vak-
groep Theoretische
Productie-Ecologie
aan de Landbouw-
universiteit Wage-
ningen.

quantum-opbrengst van $1/8$ of $0,125$ [2]. Voor een gemiddelde golflengte van 550 nm (groen), correspondeert deze verhouding met een energetische efficiëntie van 27% . Als we de efficiëntie op de totale inkomende zonnestraling willen betrekken, moet deze theoretische efficiëntie nog worden vermenigvuldigd met de fractie aan PAR (45%) en dan komen we aan een theoretische efficiëntie van 12% .

Verscheidene factoren reduceren deze theoretische efficiëntie. In de eerste plaats wordt in groene bladeren de straling niet alleen door chlorofyl, maar ook door andere niet-fotosynthetische materialen geabsorbeerd, hetgeen de potentiële efficiëntie tot ongeveer 9% terugbrengt.

Ten tweede veroorzaken fotorespiratoire verliezen, die samenhangen met het lage CO_2 -gehalte in de atmosfeer in verhouding tot dat van zuurstof, een verdere daling tot ongeveer 6% . Het stijgende atmosferische CO_2 -gehalte zal dit type verlies wel terugdringen [3] maar deze onderdrukking van fotorespiratie wordt pas aanzienlijk bij een verdubbeling van het CO_2 gehalte of hoger. Een efficiëntie van 6% wordt inderdaad gemeten in gezonde groene bladeren onder lage lichtniveaus. De derde factor die de efficiëntie verlaagt is dat bij hoge stralingsniveaus (boven 200 W m^{-2}) de fotosynthesesnelheid van bladeren verzadigd raakt met licht. Voor deze verzadiging kunnen tal van redenen zijn, en in het algemeen treedt verzadiging eerder op naarmate de voorziening van de plant met water en nutriënten slechter is. De lichtefficiëntie loopt dus terug onder slechte groeiomstandigheden.

Ten vierde consumeren ademhalingsverliezen ongeveer 40% van de bruto CO_2 -opname. Dit is slechts een vuistregel omdat de ademhalingsverliezen sterk samenhangen met de biologische activiteit. Hoe meer droge stof in een inerte vorm als lignine en zetmeel aanwezig is, hoe lager de ademhalingsverliezen. Veredelen op lagere ademhalingsverliezen via veranderde verdelingspatronen in de groeiende plant lijkt op het eerste gezicht een begaanbare weg.

Alles bij elkaar genomen komt de gemiddelde lichtefficiëntie van een gewas dat in optimale condities groeit, uit op 3% in termen van totale globale straling. Dit percentage betekent dat maximaal 2 g J^{-1} droge stof wordt vastgelegd per eenheid straling.

Er zijn verschillen tussen gewassen: de zogenaamde C_4 -soorten zoals mais, suikerriet en sorghum hebben een iets hogere efficiëntie, zo rond $3,4\%$. Binnen de andere groep, die van de C_3 -soorten moet een verder onderscheid worden gemaakt tussen de kleine grassen zoals tarwe en rijst, die een efficiëntie

hebben van $2,8\%$ en de vlinderbloemigen zoals sojaboon die slechts $2,2\%$ halen.

Voor een heel grove berekening van de potentiële opbrengst in Nederland is het voldoende om de klimatologische maandgemiddelden van straling te hanteren. Dan komen we voor de periode mei t/m september op $2,23\text{ GJ m}^{-2}$. Met 3% efficiëntie zou dat 670 GJ ha^{-1} ofwel $44\text{ ton droge stof (ds) ha}^{-1}$ op kunnen leveren. Zo'n hoge opbrengst wordt echter om uiteenlopende redenen nooit gehaald. Vaak is in de aanloopfase van de teelt de bladontwikkeling nog heel slecht en veel licht valt op de grond en gaat verloren. Vaak ook wordt in de afrijpingsfase het licht niet meer nuttig gebruikt. Deze aanloop- en afrijpingsverliezen reduceren de efficiëntie van 3 tot 2% , zodat de potentiële opbrengst 30 ton ha^{-1} ofwel 450 GJ ha^{-1} wordt.

Zouden we dit extrapoleren over het hele begroeide oppervlak op aarde (circa 8000 Mha), dan zouden we per jaar ruim 100 Gt C kunnen oogsten, 20 maal meer dan we nu aan fossiele brandstoffen verstoken!

Helaas zijn er veel slechte gronden en onaanname klimaten op de wereld en is zo veel zeker niet haalbaar. Laten we daarom onze berekening eerst maar beperken tot ons eigen land dat er in natuurlijke geschiktheid veel beter afkomt dan gemiddeld. In Nederland is er circa 2 Mha landbouwgrond, dus aan energie zou 900 PJ jaarlijks winbaar moeten zijn, $1/3$ van het jaarlijks nationale energieverbruik (2700 PJ).

EFFICIENTIE VAN GEBRUIK VAN FOSSIELE ENERGIE

Dat de energieefficiëntie van zonneënergie slechts 3% is, en 97% verloren gaat is niet erg, zolang er maar winst is ten opzichte van onze eigen energietoevoer. Dan denken we in de eerste plaats aan de energiekosten die nodig zijn voor de teelt van de gewassen. De belangrijkste energievreters daarbij zijn de bodembewerking (ploegen) en de grote energieinhoud van stikstofkunstmest. Uiteraard zal het verbouwen van energiegewassen alleen zin hebben als de energetische output flink wat hoger ligt dan de energetische input. Er kleven nogal wat haken en ogen aan de vraag wat wel en wat niet meegerekend moet worden, en dat geldt zowel voor de outputzijde als voor de inputzijde.

Het navolgende voorbeeld is gebaseerd op het NRLO-rapport 'Het gebruik van agrarische producten voor transportbrandstoffen' [4], en op de daarin aangehaalde getallen van Austmeyer en Röver [5]. Opstellers van dit rapport komen tot de conclusie dat de output/input verhouding van energieproduk-

tie op de akker groter is dan één, en tussen de waardes 2 en 3 ligt.

In de eerste berekening wordt gewoon met de energieinhoud van het geoogste produkt gerekend, terwijl in de tweede berekening een conversieslag naar alcohol wordt meegenomen. Het verschil is enorm, wegens de slechte efficiëntie van de conversie. Mogelijk kan hierin verbetering worden gebracht.

Tabel 1a. Tarwe als energiegewas, bruto energieopbrengst (Austmeyer en Röver, [5])

Energiekosten van de teelt	23	GJ ha ⁻¹
Normopbrengst aan korrel	6900	kg ha ⁻¹
Normopbrengst aan stro	7900	kg ha ⁻¹
Bruto energieopbrengst	220	GJ ha ⁻¹
Netto energieopbrengst (220 - 23)	197	GJ ha ⁻¹
Output/input (220/23)	9,5	

Tabel 1b. Tarwe als energiegewas, alcoholroute (Austmeyer en Röver, [5])

Energiekosten van de teelt	23	GJ ha ⁻¹
Normopbrengst aan korrel	6900	kg ha ⁻¹
Normopbrengst aan stro	7900	kg ha ⁻¹
Alcoholopbrengst per kg korrel	0,37	l kg ⁻¹
Energiekosten van alcoholfabricage uit zetmeel	15,3	MJ l ⁻¹
Totale energiekosten alcoholfabricage	39	GJ ha ⁻¹
Totale energie input	62	GJ ha ⁻¹
Energieinhoud van alcohol per liter	21	MJ l ⁻¹
Energieopbrengst aan alcohol uit korrel	54	GJ ha ⁻¹

Door de alcoholconversieslag daalt de netto opbrengst van 197 GJ ha⁻¹ in de eerste berekening naar een negatief getal in de tweede berekening. De netto opbrengst kan alleen positief blijven als het stro mee wordt gerekend. Wellicht kan via een kleinschalig proces de energie van het stro direct voor de alcoholfabricage worden gebruikt, en dan zou misschien toch nog een output/input ratio van boven de 1 kunnen worden gerealiseerd. Suikerbiet wordt ook wel als kandidaat voor energiegewas genoemd. De energiekosten voor de teelt zijn veel hoger dan bij tarwe omdat er voor de biet een intensievere en zwaardere bodembewerking nodig is. Een redelijke schatting is 40 GJ ha⁻¹. De opbrengsten zijn echter ook hoger, rond de 20 ton droge stof per hectare [6]. Dat zou aan bruto energieinhoud (vermenigvuldigen met 15 MJ kg⁻¹) overeenkomen met 300 GJ ha⁻¹. Suikerbiet is echter een vervelend nat produkt en de droge stof kan niet zomaar verbrand worden. Water is natuurlijk hoogst sturend als we organische stof willen verbranden, en het drogingsproces moet dan ook bij

voorkeur niet plaatsvinden op kosten van de eigen energieinhoud, maar op kosten van een of andere externe energiebron. Dat zou kunnen door aan de lucht te drogen, maar voor suikerbiet zit er weinig anders op dan het te vergisten.

Met alcoholvergisting blijven we zitten met het probleem van een scheiding van water en brandstof. Gezien de eerder vermelde grote verliezen gedurende de alcoholroute zou men toch verwachten dat er na vergisting niet meer dan 150 GJ ha⁻¹ zou overblijven, maar Zubr [6] berekende dat 366 GJ ha⁻¹ mogelijk moet zijn, meer dan waarmee hij begon! Hij blijkt zich rijk gerekend te hebben door plotseling op 30 ton ha⁻¹ over te gaan, en ook nog eens methaan mee te tellen dat volgens hem naast alcohol vrijkomt.

ANDERE PRODUCTIEFAKTOREN

Stikstof

De energetische efficiëntie van de fotosynthese loopt zeer sterk terug bij onvoldoende voeding van de plant met stikstof [7]. Bij een C₄-plant is circa 1 g stikstof vereist per m² bladoppervlak, bij een C₃-plant 1,8 en bij een vlinderbloemige zelfs meer dan 2 g m⁻² om optimale efficiëntie te verkrijgen. Vlinderbloemigen zijn voor ons onderwerp niet interessant. Hun produkt is te rijk aan eiwit, dus relatief ongeschikt voor verbranding, en bovendien wordt deze eiwitrijkdom verkregen ten koste van enige droge-stof-opbrengst. Stikstof is enerzijds nodig voor de fotosynthese, maar anderzijds zouden we voor het doel van energieproduktie zo weinig mogelijk stikstof willen hebben. Ten eerste is stikstof een ongewenste stof bij verbranding, ten tweede kost de toediening ervan alleen maar geld en energie. Het optimale niveau van de stikstofbemesting komt voor energiegewassen waarschijnlijk lager uit dan voor gewone landbouwgewassen, maar gezien de sterke terugval van de stralingsefficiëntie bij een lager stikstofgehalte kan er toch niet erg veel bezuinigd worden op stikstof.

Wel is duidelijk dat C₄-planten gunstiger scoren dan C₃-planten, en als we een voorlopige berekening op C₄-planten baseren kunnen we uitgaan van circa 1 g stikstof per m² blad. Voor goede groei is minimaal 3 m² blad nodig per m² grond - ook andere plantorganen bevatten nog wat stikstof - en zo komen we op minimaal 4 g stikstof per m² grond.

Nu is een probleem dat bladeren niet langer dan circa een maand volop kunnen produceren, en dus geleidelijk aan vervangen moeten worden. In een maand kan 600 kg droge stof per m² worden geproduceerd, zodat de

verhouding droge stof/opgenomen stikstof maximaal 150 op 1 is.

Voor tarwe (C_3) is bekend dat de verhouding korrelgewicht/ opgenomen stikstof maximaal 70 bedraagt. Het wordt natuurlijk beter als de bladstikstof opnieuw binnen de plant gerecirculeerd kan worden, en voor een deel is dat inderdaad mogelijk. Theoretisch geschikte gewassen zijn dan meerjarigen met wintervoorraad aan stikstof in overblijvende organen als stamhout, wortelstokken of knollen.

Water

CO_2 -assimilatie kan alleen plaatsvinden in levende natte plantecellen, die daarbij onvermijdelijk water aan de lucht verliezen. Landplanten hebben in de evolutie een beschermende opperhuid ontwikkeld met regelbare huidmondjes, maar toch is de verhouding CO_2 -opname/waterverlies zeer ongunstig wegens het lage CO_2 -gehalte in de lucht. Lager dan 200 kg water verdamping voor elke kg droge stof geproduceerd is bijna niet haalbaar. Dit correspondeert met de vuistregel dat er voor elke ton droge stof per hectare in ons klimaat minstens 20 mm water nodig is. Op een goede bodem is een voorraad van 300 mm water wel beschikbaar. Gevoegd bij de neerslag in de zomer is er dan voldoende. Op slechte gronden ontstaan in droge zomers problemen. C_4 -gewassen die normaal 20 t ha⁻¹ kunnen halen, kwamen in de zomer van 1989 in Engeland wegens een droge zomer (100 mm in het groeiseizoen) niet verder dan 10 t ha⁻¹ [8].

INTENSIVERING VERSUS EXTENSIVERING

Biomassa voor energie, bron van inkomsten?

Bij een minimale tarweprijs van 42 cent per kilogram, zoals bepleit in het rapport Struik, levert de normopbrengst van Tabel 1a een bruto inkomstbedrag op van f 2900,- per ha. De bruto energie-opbrengst is 220 GJ en dat zou aan energiewaarde met ca f 1300,- overeenkomen.

Is tarweteelt bij deze minimumprijs al niet anders dan een tussengewas om de wisseljaren tussen de meer rendabele teelt van aardappelen of bieten te overbruggen, als energiegewas zou het armoe troef zijn.

Wel zouden er enige mogelijkheden kunnen liggen in het geval dat de biomassa een nevenprodukt is, want dan hoeven niet alle lasten in de kostenberekening te worden meegenomen. Natuurlijk blijven we zelfs bij gratis produktie altijd zitten met de oogst- en transportkosten, en die zijn circa f 100,- per ton droge stof [9], ofwel f 6,50 per GJ. Dit is

niet veel minder dan de energieprijs. We komen tot de opmerkelijke conclusie dat het bij de huidige energieprijzen zelfs bijna niet de moeite waard is om het materiaal van het veld te halen!

Het zal altijd zo blijven dat met landbouw verschillende zaken geproduceerd kunnen worden die tot op zekere hoogte met elkaar concurreren. Wij kennen het lijstje van de F's (Farmacy, Flowers, Fruit, Food, Fodder, Fiber, Fuel) in volgorde van dalende prijs en stijgend volume. Ter illustratie zijn in tabel 2 drie produkten (Food, Fodder en Fuel) uit deze lijst voor Nederland gekwantificeerd. In Nederland is ruim 2 Mha aan landbouwgrond aanwezig, zodat men direkt kan zien dat voedsel wel, maar veevoer en energie niet op de Nederlandse akkers geproduceerd kunnen worden.

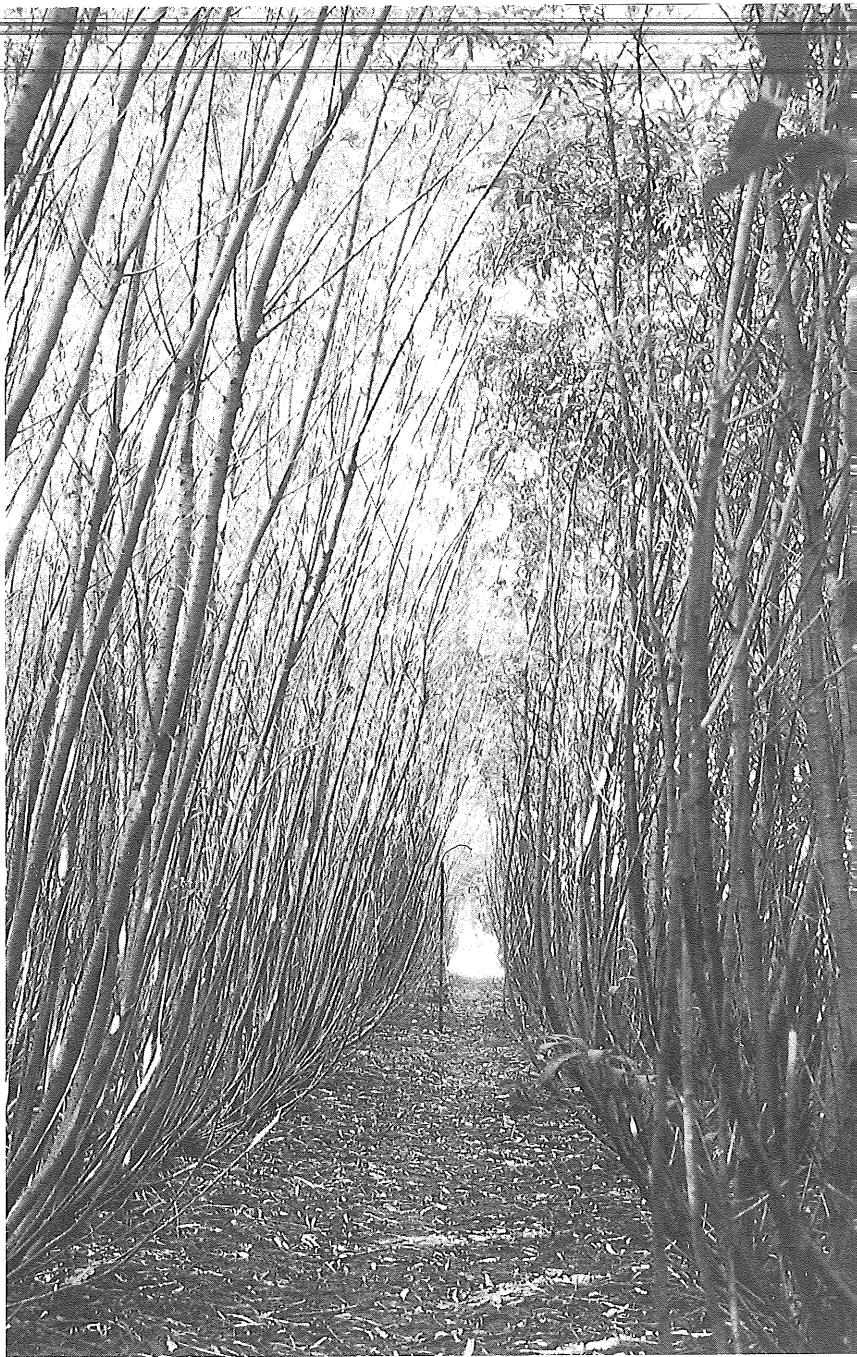
Tabel 2. Consumptie in Nederland in termen van koolstof (naar Wolf, [10]) en van geldwaarde (naar CBS, [11])¹⁾

Produkt	Geld waarde	C inhoud	Minimaal benodigd areaal
Menselijk voedsel	20000 Mf	1,0 Tg C	0,4 Mha
Veevoer	14000 Mf	14,5 Tg C	5,8 Mha
Energie	25000 Mf	46 Tg C	18 Mha

¹⁾ in de voedselprijs is alle voeding meegerekend, en in de hoeveelheid veevoer ook begraasd gras.

Wordt de energieprijs wel zo hoog dat het de moeite waard wordt, dan zal er een economisch overgangsgebied liggen waar fossiele brandstoffen ten dele vervangen zullen gaan worden door alternatieven zoals biomassa. Echter, de natuurlijke produktiemogelijkheden zijn sterk begrensd.

De betekenis van de eerder gegeven berekening van een energetische output/input ratio is zeer beperkt. Het proces kan niet worden opgeschaald in de trant van verdubbeling van input geeft ook verdubbeling van output, zoals men dat bij een industrieel proces gewend is. In de landbouw wordt de output begrensd door fysiologische en klimatologische factoren, en opschalen kan eigenlijk alleen door areaalvergroting (extensivering), en niet door intensivering van de teelt. Wel kan de netto-opbrengst per ha zinvol vergroot worden door de input te verlagen bij behoud van opbrengst. Dat betekent zoeken naar teeltmethodes die weinig bodembewerking vragen, liefst helemaal geen ploegen. We komen dan al gauw terecht bij meerjarigen, dus bij bomen en bij meerjarige grove



In Zweden is een project voor energy farming, waarbij wilgen als energiegewas worden verbouwd.

grasachtigen. Alles wijst erop dat de energetisch nadelige omzetting in alcohol het beste achterwege kan blijven [12].

Het ideale energiegewas

Ondanks enige somberheid over de vooruitzichten voor energiewinning op de akker in Nederland, is het nuttig een beschouwing te wijden aan de karakteristieken van het ideale energiegewas, het zogenaamde ideotype. Zo'n gewas zal zoveel mogelijk aan de volgende eisen moeten voldoen, die echter een zekere mate van strijdigheid bezitten:

a) Een hoge groeisnelheid. Deze eigenschap spreekt voor zich. Het probleem is echter dat de hoge groeisnelheid ook lang moet worden volgehouden.

- b) Biomassa bovengronds: geen knolgewassen. Bovengronds oogsten verlaagt de kosten van de oogst, en spaart de bodem.
- c) Nutriëntgehalte, met name van stikstof, zo laag mogelijk, vooral in te oogsten delen. Nutriënten verlagen de brandstofkwaliteit en moeten zo weinig mogelijk verloren gaan.
- d) Meerjarig gewas, uitlopend vanuit stobben of ondergrondse rhizomen. De kosten van zaai of plant kunnen dan achterwege blijven. Het gewas moet in dit geval wel winterhard zijn.
- e) Vroeg uitlopend in het voorjaar, laat afstervend in het najaar, waarbij de nutriënten terugvloeien naar de overjarige delen van de plant. Het groeiseizoen moet zo lang mogelijk zijn. Het gewas moet dus ook bij lage temperatuur nog redelijk snel kunnen groeien. Het terugvloeien van de nutriënten maakt een lage nutriëntgift mogelijk.
- f) Biomassa droog te oogsten. Vocht verhoogt de transportkosten, verlaagt de houdbaarheid en geeft grote kosten bij het drogen.
- g) Grote ziektebestendigheid. Aanwezigheid van giftige alkaloiden, die het gewas resistent maken, hoeft voor deze gewassen in tegenstelling tot voedselgewassen geen bezwaar te zijn.
- h) Grote concurrentiekracht ten opzichte van onkruiden. Bij een vroeg uitlopen in het voorjaar zal deze eigenschap niet moeilijk te realiseren zijn.
- i) Laag watergebruik en goede weerstand tegen droogte. Een diep wortelend C₄-gewas zal het beste aan deze eis voldoen.

Deze eigenschappen zijn deels gericht op hoge opbrengst, en deels op lage kosten van teelt. Traditioneel gaat hoge opbrengst samen met intensieve teelt, maar lage kosten daarentegen met een extensieve teelt. Een combinatie van deze eigenschappen is wat ongewoon, en het is niet zo vreemd dat onder de traditionele landbouwgewassen eigenlijk geen goede kandidaten voor energiegewassen gevonden kunnen worden.

De eigenschap van de meerjarigheid voert tot twee typen van mogelijke kandidaten: houtachtigen en rietachtigen. Houtachtigen, bomen dus, zijn echter geen C₄-planten en groeien daarom niet zo snel, maar er is ruime ervaring mee in de bosbouw. Ze zijn zeker teeltintensief. Onder de rietachtigen komt de laatste tijd het zogenaamde olifantsgras, ofwel *Miscanthus*, naar voren. Dit gewas is wel een C₄-plant en kan daarom potentieel snel groeien. Het loopt echter ook wat laat uit in het voorjaar, wat waarschijnlijk door hetzelfde C₄-karakter komt. In Nederland wordt dit gewas nog nauwelijks beproefd (1/2 ha) [13].

Het is zeker niet zo dat er nog maar weinig gekeken is naar biomassa als energiebron. De talrijke publikaties op dit terrein [14-18] bewijzen dat er wel degelijk ook in het verleden belangstelling was, maar de voortgang is moeizaam. De oorzaken van de toepassingsproblemen liggen voor een deel in de economische prijsverhoudingen en voor een deel in de natuurlijke beperkingen. Technologische en teelttechnische verbeteringen zullen in de moeizaamheid van de toepassing in slechts beperkte mate verbetering kunnen brengen.

L I T E R A T U U R

- [1] N. Vertregt and F.W.T. Penning de Vries, 1987. A rapid method for determining the efficiency of biosynthesis of plant biomass. *Journal for theoretical biology* 128: 109-119.
- [2] O. Björkman, 1966. "The effect of oxygen concentration on photosynthesis in higher plants." *Physiologia Plantarum* 19: 618-633.
- [3] J. Goudriaan, H.H. van Laar, H. van Keulen and W. Louwerse, 1985. 'Photosynthesis, CO₂ and plant production.' In: W. Day & R. K. Atkin (Eds), *Wheat growth and modeling*, NATO ASI Series, Series A: Life Sciences Vol. 86. Plenum Press, New York, pp. 107-122.
- [4] NRLO, 1990, Het gebruik van agrarische producten voor transportbrandstoffen, NRLO-rapport 90/14. Den Haag.
- [5] K.E. Austmeyer und H. Röver, 1988. Verbundproduktion von Ethanol und Weisszucker. *Zuckerindustrie* 113 (9) : 769.
- [6] J. Zubr, 1990. Sugar beet as an energy crop for northern Europe. In Grassi et al (Eds), *Biomass for energy and industry*, Vol I. Elsevier Applied Science, London.
- [7] T.R. Sinclair, 1990. Nitrogen influence on the physiology of crop yield. In Rabbinge et al.(Eds), *Theoretical Production Ecology: reflections and prospects*. Pudoc, Wageningen.
- [8] S.P. Long, L. Potter, M.J. Bingham, and C.M. Stirling, 1990. An analysis of limitations to the production of C4 perennials as lignocellulosis biomass crops, with reference to trials in E. England. In Grassi et al (Eds), *Biomass for energy and industry*, Vol I. Elsevier Applied Science, London.
- [9] J.C. Blom, 1986. Prospects of energy forestry in the context of alternatives for the CAP. In Sourie and Killen (Eds).
- [10] J. Wolf, 1990. Inventarisatie van niet-fossiele koolstofstromen en -voorraden in terrestrische systemen in Nederland. Intern rapport, Vakgroep Theoretische Produktie-ecologie, LUW, Wageningen.
- [11] CBS, 1990 Statistisch Jaarboek, SDU Uitgeverij, Den Haag
- [12] J.H. Post, 1986. Bioethanol production: a realistic possibility to meet EC-surplus problems? In Sourie and Killen (Eds).
- [13] A. Darwinkel, 1991, pers comm.
- [14] W.A. Côté (Ed), 1982. *Biomass utilization*. NATO-ASI Series Vol 67, Plenum Press, New York.
- [15] A. Strub, P. Chartier and G. Schleser(Eds), 1983. *Energy from biomass*. Applied Science Publishers, London.
- [16] G. Stanhill(Ed), 1984. *Energy and agriculture*. Springer-Verlag, Berlin.
- [17] R. Rabbinge, 1982. Energiewinning door landbouwproduktie. *Landbouwkundig Tijdschrift* 94(1): 25-30.
- [18] J.C. Sourie and L. Killen (Eds), 1986. *Biomass: Recent economic studies*. Elsevier Applied Science Publishers, London. 187 pp.