

Energetische aspecten van de plantaardige produktie

Methoden voor winning van energie door middel van planten zijn energetisch gezond, maar niettemin niet bruikbaar op enige grote schaal. Weliswaar zijn de mogelijkheden tot voedselproductie erg groot, maar het gebruik van energie in andere vorm is in een enigermate ontwikkelde samenleving zoveel groter dan het verbruik van voedsel dat tegelijkertijd de mogelijkheden voor energieproductie klein zijn. Een groter bezwaar is echter dat verbouwen van energie water, meststoffen, grond en kennis vraagt die ook nodig zijn voor de productie van voedsel en dat politieke en sociaal-economische problemen zo groot zijn dat het nauwelijks mogelijk is de stijgende vraag naar voedsel tengevolge van de stijgende wereldbevolking bij te houden.

C. T. de Wit

Voor het reduceren van een CO_2 molecuul via de gecanoniseerde vergelijking $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{licht} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$ zijn minimaal 8 quantum licht nodig in het golflengtegebied van 400-700 nm. Het maximale rendement van de fotosynthese is dus ongeveer 25 procent of ruim $15 \cdot 10^{-6}$ g CO_2 per joule licht, geabsorbeerd door het chlorofyll. Het gemeten maximale rendement is 8-12 10^{-6} g CH_2O per joule licht geabsorbeerd door het blad, afhankelijk van de plantensoort. Maximale licht (400-700 nm) intensiteiten zijn ruim 3 Joule $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, zodat theoretisch een fotosynthese van 200 kg $\text{CH}_2\text{O} \text{ ha}^{-1}$ ($100 \times 100 \text{ m}^2$) uur^{-1} bereikt zou kunnen worden. Maximale rendementen worden echter alleen bereikt bij lage lichtintensiteiten. Bij hoge intensiteiten is de transportsnelheid van CO_2 vanuit de lucht, de door de huidmondjes van de bladeren en de maximale snelheid waarmee CO_2 vastgelegd kan worden de beperkende factor. De maximale fotosynthese per eenheid van bladoppervlak blijkt daarom voor veel plantensoorten circa 20 kg $\text{CH}_2\text{O} \text{ ha}^{-1} \text{ uur}^{-1}$ te bedragen en deze waarde wordt reeds bereikt bij lichtintensiteiten van niet groter dan 1 joule $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$. Er gaat dus veel licht verloren.

gewasoppervlakken

Een gewasoppervlak is geen biljartlaken, maar bestaat uit bladeren die allerlei kanten opstaan, over de ruimte verdeeld zijn en wel een oppervlak hebben van vier maal het grondoppervlak. Er is dus onderlinge beschaduwing en zelfs de bladeren die aan het directe zonlicht blootstaan ontvangen dit vaak onder hoeken waarbij de gemiddelde lichtintensiteit laag is. Uitgebreide en goed geverifieerde modellen zijn aanwezig waarmee de lichtverdeling over de bladeren berekend kan worden uit de intensiteit van de directe zonnestraling, de diffuse hemelstraling, de architectuur van het gewas en de reflectie en transmissie coefficient voor de bladeren. Deze modellen zijn ook van natuurkundig belang omdat hiermee niet alleen de reflectie van verschillend begroeide aardoppervlakken bij verschillende zonnestand berekend kan worden (remote sensing), maar ook omdat ze toepasbaar zijn voor het doorrekenen van allerlei verstrooiings en absorptie verschijnselen in homogene en niet homogene mediums. Samen met modellen over de turbulente uitwisseling in en boven gewassen en gegevens over de fotosynthese functie van de afzonderlijke bladeren kan hiermee de fotosynthese van gewasoppervlakken berekend worden. Het blijkt dat de maximale fotosynthese bij helder weer wel 60 kg $\text{CH}_2\text{O} \text{ ha}^{-1} \text{ uur}^{-1}$ kan bedragen en dit is circa drie maal groter dan het maximum van afzonderlijke bladeren.

Bij bewolkt weer wordt de helft van deze waarde bereikt. De lichtintensiteit is dan weliswaar 4 tot 5 maal kleiner, maar de lichtverdeling over de bladeren is veel beter. Deze waarden zijn aanmerkelijk kleiner dan het theoretische maximum van 200 kg $\text{CH}_2\text{O} \text{ ha}^{-1} \text{ uur}^{-1}$, maar er zijn geen serieuze ideeën geopperd die het mogelijk maken het maximale rendement van circa 25 procent van het licht te halen met systemen die voor hun reactie aangewezen zijn op het schaars in de atmosfeer voorkomende CO_2 .

Dit zou wel mogelijk kunnen zijn bij op chlorophyll gebaseerde systemen die H_2 leveren, maar hiervoor wordt verwezen naar een artikel van Schaafsma in een vorige aflevering van dit tijdschrift.

Met behulp van deze programma's en gegevens over het verloop van de straling zijn dagtotalen van de brutofotosynthese berekend. De brutofotosynthese gedurende het groeiseizoen bedraagt ongeveer 300 kg $\text{CH}_2\text{O} \text{ ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ en 50 kg $\text{CH}_2\text{O} \text{ ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ rond kerstmis. De lage waarden gedurende de winter zijn alleen bereikbaar in kassen waar de temperatuur op peil gehouden wordt en kunnen dan verhoogd worden door verrijking van de lucht met CO_2 .

De suiker wordt niet als zodanig opgezakt, maar gebruikt door de plant voor groei en onderhoud. Dit kost energie en berekeningen op grond van biochemische gegevens over de omzettingprocessen hebben aangetoond dat zelfs bij een goed groeiend gewas op deze wijze minstens 20-60 procent van de vastgelegde assimilaten verademd wordt, afhankelijk van de aard van de producten die gevormd worden. Het maken van koolhydraten voor opslag in zaad of aardappelen is relatief goedkoop, maar het maken van vetten duur.

Rekening houdende met niet oogstbare wortels, komt het erop neer dat de produktiesnelheid van oogstbaar materiaal circa 200 kg $\text{ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ kan bedragen. Een verbrandingswaarde van 20 MJ kg^{-1} aannemend, komt dit overeen met een rendement van ruwweg 4000/70.000 of 6 procent van het licht en 3 procent van de totale globale straling.

Het blijkt dat deze groeisnelheden en dus deze rendementen inderdaad bereikt worden met uiteenlopende gewassen. De totale efficiëntie over de gehele groeiperiode is echter vaak aanmerkelijk minder omdat veelal slechts gedurende een deel van de tijd een gesloten, groen gewasoppervlak gehandhaafd kan worden. In gunstige gevallen, bijvoorbeeld met populieren en gras, zijn totale produkties van over de 20.000 kg $\text{ha}^{-1} \text{ jaar}^{-1}$ bereikt. Potentiële groeisnelheden van tropische gewassen zoals rijst en tarwe zijn vaak wat lager door de

kortere dagen en de wat ongunstiger lichtverdeling en door de hogere onderhoudskosten van het gewas, maar kunnen anderzijds in principe gedurende het hele jaar bereikt worden. Er zijn bovendien enkele plantensoorten (maïs, suikerriet) die een fotosynthese mechanisme hebben met een lagere zogenaamde carboxylatie weerstand en van deze planten kan de potentiële groeisnelheid in warme klimaten oplopen tot $350 \text{ kg CH}_2\text{O ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$. Wanneer het dan ook nog, zoals met suikerriet, mogelijk is gedurende een groot deel van het jaar een groen gewas oppervlak te handhaven zijn produkties van tegen de $100.000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ in principe mogelijk met een energie efficiëntie van circa 5 procent over het gehele jaar op basis van de totale globale straling.

Het verbouwen van energie

Groeisnelheden van $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dag}^{-1}$ worden ook bereikt in sommige wouden, maar alleen zolang de situatie gehandhaafd blijft waarbij alles wat ter plaatse groeit ook weer ter plaatse rot, dus waar oogsten afwezig blijft. Alleen dan blijven de mineralen en stikstof in omloop voor het voortdurend vormen van nieuwe, gezonde bladeren. Bij geregeld oogsten zijn verliezen niet te vermijden. Deze ontstaan door uitspoeling, omzetting van stikstofverbindingen in elementaire stikstof en wat fosfaat betreft vooral door fixatie met een snelheid die al bij een lage concentratie in de grond overeenkomt met de snelheid van verwerking. Na enkel succesvolle jaren dalen de produkties schrikbarend, tot circa $1/20$ ste van het potentiële niveau.

Potentiële opbrengsten kunnen in geval van oogsten alleen gehaald worden bij toepassing van een heel scala landbouwkundige maatregelen, waarvan waterbeheersing en bemesting de voornaamste zijn. Samen met zaaien of planten, onderhoud, oogsten en andere noodzakelijke werkzaamheden vraagt dit nogal wat energie, maar – zoals we later zullen zien – niet schrikbarend veel: bij bijna potentiële opbrengsten is dit met 15 procent van de energieopbrengst wel bekeken. Het verbouwen van energie is dus energetisch gezond, maar daarom nog niet praktisch toepasbaar.

Er zijn absolute beperkingen. In tegenstelling tot modieuze beweringen zijn de potentiële mogelijkheden van voedselproductie groot. Een schatting gebaseerd op bovenstaande produktiebeschouwingen, klimaatgegevens en bodemkundige gegevens voor een 220 geografische/bodemkundige zones levert als een absoluut maximum 50 miljard ton 'graan equivalenten' per jaar op. Dit is meer dan voldoende om 50 miljard mensen een goed dieet te verschaffen, al is het wel te hopen dat het lang niet zo ver komt. Echter de behoefte aan energie in andere vorm dan voedsel is in een enigermate ontwikkelde samenleving zeker enige malen groter zodat mogelijkheden die uit het oogpunt van voedselvoorziening ruim zijn, tezelfdertijd krap zijn uit het oogpunt van energievoorziening.

Zoals gezegd kan het verbouwen van energie alleen maar plaats vinden met toepassing van water, meststoffen en kennis die evenzo nodig zijn voor de verbouw van landbouwgewassen en onder omstandigheden waar ook landbouwgewassen verbouwd kunnen worden. Nu is het zo dat de produktie van landbouwgewassen minstens met 4 procent per jaar moet toenemen, wil de bevolkingsgroei bijgehouden worden en de voedingstoestand van de mensheid als geheel tezelfdertijd verbeteren. Dit is, ondanks de grote potentiële mogelijkheden een heel

hoog percentage, en waarschijnlijk zullen zich zoveel moeilijkheden blijven voordoen op het politieke en sociaal-economische vlak dat van bijhouden van de bevolkingsgroei nauwelijks sprake zal zijn.

Willen we nu ook nog energie gaan verbouwen dan zet dit alleen zoden aan de dijk, wanneer uit deze hoofde de landbouwproduktie nog eens een 4 procent per jaar extra stijgt. Pas dan zal na een jaar of 20 deze energievoorziening een niveau bereikt hebben dat energetisch gelijk is aan de voedselproduktie. Deze 4 procent extra betekent echter dat de landbouwproduktie met 8 procent per jaar zou moeten stijgen. Wanneer dit al mogelijk zou zijn, zou het wel van een erg onwijs beleid getuigen deze produktie stijging niet aan de voedselvoorziening ten goede te laten komen. Wat natuurlijk niet wegneemt dat zich op sommige plaatsen en voor enige tijd omstandigheden kunnen voordoen waar het stichten van energieplantages zin kunnen hebben. In die gevallen verwacht ik veel van suikerriet.

Voedselbalans in Nederland

De plantaardige produktie in Nederland is wat groter dan de helft van de mogelijke produktie.

Een Nederlander consumeert ongeveer 4.000 MJ per jaar en onze totale voedselconsumptie bedraagt zo ruwweg $65 \cdot 10^9$ MJ (eenheden) plantaardige en dierlijke produkten. Daarnaast exporteren we ongeveer 13 eenheden in de vorm van dierlijke produkten. Om deze te maken zijn circa 80 eenheden plantaardige produkten nodig, terwijl de netto invoer van plantaardige produkten slechts 70 eenheden bedraagt. Wij gebruiken dus een klein deel van de plantaardige produktie van eigen bodem om veeproducten voor export te maken. We zijn dus zelfverzorgend op het gebied van voedsel, dat wat calorieën betreft voor ongeveer $\frac{1}{3}$ uit dierlijke produkten bestaat en wat eiwitten betreft voor ongeveer $\frac{2}{3}$. Hier is nogal wat plantaardige produktie voor nodig, vooral van grassen en groenvoer en tijdens de omzetting gaat het grootste deel hiervan weer verloren, in totaal 260 eenheden. Het rendement van alle omzettingen is nog veel kleiner: uiteindelijk wordt netto tegen de $0.05 \cdot 10^9$ MJ/jaar mensenvlees geproduceerd; bio-energetisch gezien is Nederland een systeem dat vrijwel in evenwicht is. Dit zijn gegevens voor het midden van de zestiger jaren. De energie verbruikscijfers in tabel 1 hebben betrekking op dezelfde periode.

Tabel 1

Verbruik van energie in de Nederlandse landbouw, veeteelt en tuinbouw uitgedrukt in 10^9 MJ/jaar.

Verwarming kassen	65	
Tuinbouwtrekkers	1	
Verwarming schuren	2	
Landbouwtrekkers	10	
Zelfaandrijvende machines	0.3	
Electriciteit op boerderij ($\times 3$)	10	
Electriciteit voor gemalen ($\times 3$)	1	
Olie voor gemalen	–	
Stikstofmeststoffen	25	
Fosfaat en kali meststoffen	6	
Afschrijving duurzame produktiemiddelen	30	(Ruweschatting)
TOTAAL	159	

(Ruwe schatting)

Vanwege het aanbrengen van goede en niet zo goede verbeteringen aan de schattingen wijken de getallen altijd af van eerder gepubliceerde, hetgeen een bekende in het

Jeruzalem van de 'energie inhoud' berekeningen niet zal verbazen.

Het totaal energieverbruik in landbouw, veeteelt en tuinbouw is dus ongeveer 150 MJ/jaar en dus ongeveer 10 procent van het totale verbruik in Nederland. Opvallend is dat vrijwel de helft hiervan verbruikt wordt in de tuinbouw voor het produceren van verpakt water in de vorm van bloemen en zomergroenten in de winter; mooi en lekker, maar energetisch erg duur. Voor landbouw en veeteelt zijn $85 \cdot 10^9$ MJ/jaar nodig, wat vrijwel gelijk is aan de produktie van energie in de vorm van menselijk voedsel. In de landbouw wordt fossiele energie dus omgezet in een andere vorm van hoogwaardige energie in een verhouding van 1:1. Dit is meer dan gezegd kan worden van veel andere menselijke activiteiten waarbij wel energie geconsumeerd wordt, maar geen energie wordt geproduceerd. Het berekenen van dergelijke verhoudingen heeft daarom niet de minste zin.

Wel is het interessant dat de afvalproduktie in landbouw en veeteelt ongeveer $300 \cdot 10^9$ MJ/jaar bedraagt: mest en warmte bij de dierlijke produktie plus ruwweg $50 \cdot 10^9$ MJ/jaar in de vorm van stro en loof. Hiervan gaat meer dan de helft verloren als warmte, maar toch zou gesteld kunnen worden dat bij zorgvuldige verzameling 1/4

gebruikt zou kunnen worden als energiebron na met bijna 90 procent efficiëntie omgezet te zijn in methaan, via anaerobe gisting. De resulterende $60 \cdot 10^9$ MJ/jaar is in theorie vrijwel gelijk aan de energieconsumptie in landbouw en veeteelt. In theorie want de moeilijkheden van verzamelen zijn onoverkoombaar groot en bovendien zou het onthouden van de organische stof aan de grond het handhaven van de produktie moeilijk maken. Het energieverbruik direct op de boerderij is slechts $20 \cdot 10^9$ MJ/jaar en dit is een hoeveelheid die wel verzamelbaar en winbaar is, zodat wat dit betreft de boerderijen zelfvoorzienend te maken zijn. Omdat bovendien de fosfaat en kali toestand van de grond goed is en althans een deel van de stikstof via vlinderbloemige planten onttrokken zou kunnen worden aan de lucht, zou in tijden van nood het energieverbruik op de boerderij drastisch verminderd kunnen worden.

In het bijzonder wanneer gedecentraliseerde methoden van stikstofbinding door middel van organische afval, warmte van zon en electriciteit uit wind mogelijk blijken, zouden voor wat zonniger streken bedrijfssystemen te ontwikkelen zijn waarbij hoge produktie gepaard gaat met een vrijwel verwaarloosbaar extern energieverbruik.
