

Aspekte landwirtschaftlicher Produktionsquellen

C.T. de Wit / H.D.J. van Heemst

Dieser Forschungsbericht stellt neuere Forschungsergebnisse zur Erschließung von Hilfsquellen für die Produktion von Nahrungsmitteln vor.

Zunächst werden zwingende Gegebenheiten, die in Eigenschaften der Pflanzen und der Sonneneinstrahlung begründet sind, erörtert. Dazu kommen zwingende Gegebenheiten, die mit der Beschaffung von Wasser und mit der Bodenqualität zusammenhängen. Es sieht so aus, als liege die Nahrungsmittelproduktion, die durch optimale Nutzung vorhandener Pflanzenarten sowie durch längst bekannte Techniken der Bodenverbesserung, des Düngemiteleinsatzes und durch Anbaumethoden erzielt werden kann, um etwa dreißigmal höher als die gegenwärtige Weltproduktion an Nahrungsmitteln – vorausgesetzt, die Pflanzen werden nicht von Krankheiten und Schädlingen befallen.

Damit ist zugleich gesagt, daß der Kern des Welternährungsproblems nicht der Mangel an Hilfsquellen, sondern vielmehr die Unfähigkeit des Menschen ist, diese potentiellen Quellen besser auszuschöpfen.

Daß Landwirtschaft den Lebensunterhalt derer, die sie betreiben, sichern kann, zeigt, daß es möglich ist, genügend landwirtschaftliche Erzeugnisse zu produzieren ohne anderen Aufwand als die Arbeitskraft der Verbraucher dieser Erzeugnisse. Eine zahlenmäßig zunehmende städtische Bevölkerung kann jedoch nur dann hinreichend ernährt werden, wenn den in der Landwirtschaft Tätigen Produktionsmittel zur Verfügung gestellt werden, die den Ertrag steigern und Arbeitskräfte ersetzen können. Eine Analyse des MOIRA-Teams – der Name steht als englische Abkürzung für „Modell internationaler Vergleiche in der Landwirtschaft“ – setzt die landwirtschaftliche Produktion eines Landes in Beziehung zum Produktionspotential, zum Einsatz menschlicher Arbeitskraft, zum Einsatz arbeitskraftsparender Techniken – wie Traktoren – und schließlich zur Anwendung ertragsteigernder Mittel, nämlich der Düngemittel. Der Bedarf an Arbeitskräften und arbeitskraftsparender Technik steigt überproportional mit dem Erreichen des potentiellen Ernteertrags in einem Land – und sei es auch nur, weil

mehr und mehr ungeeignete Böden in die Produktion miteinbezogen werden. Der Bedarf an Düngemitteln jedoch steigt praktisch proportional mit dem Ertrag – ein Phänomen, das durch die landwirtschaftliche Praxis in Ländern mit einem hohen Ernteertrag je Hektar bestätigt wird.

Im Hinblick auf die wichtigsten Düngemittel ergibt sich, daß *Kalium* in unerschöpflichen Mengen vorhanden ist und daß in voraussehbarer Zukunft nur ein Bruchteil der *Phosphat*quellen erschöpft sein wird, die heute zu wirtschaftlich vernünftigen Preisen abgebaut werden können.

Ob genügend *Stickstoff* vorhanden ist, hängt eng mit der Energie-Situation zusammen, die hier in Bezug auf den wechselseitigen Einsatz von Sonnenenergie, fossiler Energie und menschlicher Arbeitsenergie in der Landwirtschaft erörtert werden soll. Es zeigt sich, daß die Energie-Effizienz im Ackerbau während der letzten zwanzig Jahre unverändert geblieben ist, obwohl die Arbeitsproduktivität um mehr als das Zweifache gestiegen ist.

Photosynthese und Ertrag

Unter Landwirtschaft verstehen wir diejenige menschliche Aktivität, die Sonnenenergie mit Hilfe von Pflanzen und Tieren in nützliche, das heißt eßbare chemische Energie umwandelt. Der grundlegende photosynthetische Prozeß spielt sich in den Blättern ab, wo mindestens acht Lichtquanten nötig sind, um die Umwandlung von Kohlendioxyd in Kohlehydrat zu bewerkstelligen. Die *theoretisch* mögliche Effizienz dieses Umwandlungsprozesses liegt bei 25 Prozent oder 15×10^{-6} Gramm Kohlendioxyd pro Joule Strahlungsenergie, die vom grünen Chlorophyll absorbiert wird. Aufgrund unvermeidlicher Verluste beträgt die höchste *gemessene* Effizienz aber nur 8 bis 12×10^{-6} Gramm Kohlendioxyd pro Joule. Die maximale Lichtintensität beträgt etwa $3 \text{ Joule cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, so daß eine Photosynthese von 200 Kilogramm Kohlehydrat pro Hektar pro Stunde erreichbar erscheint. Jedoch ist maximale Effizienz nur bei geringer Lichtintensität zu erreichen. Bei hoher Lichtintensität wirkt sich der Transport von Kohlendioxyd aus der Luft durch die Blattoberfläche zu der Stelle, wo der chemische Umwandlungsprozeß stattfindet, als hemmender Faktor aus, und das Maximum an Photosynthese beträgt deshalb für viele Anbaupflanzen nur 20 Kilogramm Kohlehydrat pro Hektar pro Stunde – ein Ergebnis, das bei einer Licht-

intensität von etwa $1 \text{ Joule cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ (1 Wattsekunde pro Zentimeter hoch minus 2 pro Minute hoch minus 1) erzielt wird.

Wegen ihrer physiologischen Anpassungsfähigkeit ist die Photosynthese nicht auf bestimmte Temperaturen angewiesen und vollzieht sich häufig normal, wenn die tägliche Durchschnittstemperatur über zehn Grad Celsius liegt. Einige Anbaupflanzen tropischer Herkunft, zum Beispiel Mais, können ein doppelt so hohes Maximum an Photosynthese erreichen. Aber selbst bei diesen wird viel Lichtenergie nicht besonders wirksam umgesetzt, sobald die Lichtintensität sehr hoch ist.

Bei diesen Feststellungen ist jedoch zu bedenken, daß ein Pflanzenbestand sich nicht flach wie ein grünes Billardtuch ausbreitet, sondern aus Blättern besteht, die mehr oder weniger zufällig angeordnet sind und mit ihrer gesamten Oberfläche eine etwa viermal größere Fläche ergeben, als der Bestand an Bodenfläche verlangt. Das bedeutet, daß sich das Licht auf eine Blattoberfläche verteilt, die beträchtlich größer als die Bodenfläche ist, so daß die durchschnittliche Lichtintensität geringer ist. Deshalb kann die maximale Photosynthese eines Bestandes bis auf 60 Kilogramm Kohlehydrat pro Hektar pro Stunde ansteigen. Das ist erheblich mehr als die vorher genannten 20 Kilogramm der einzelnen Blätter. In den letzten zwölf Jahren sind zuverlässig evaluierte Modelle zur Berechnung der Lichtverteilung und der daraus folgenden Brutto-Photosynthese entwickelt worden (de Wit 1965; Goudriaan 1976), die eine solide Grundlage für die Berechnung der Photosynthese abgeben.

Der „Zucker“, der durch diesen photosynthetischen Prozeß gebildet wird, wird nicht als solcher aufbewahrt; er wird vielmehr von der Pflanze für ihr Wachstum und ihre Erhaltung verwendet. Das erfordert Energie. Berechnungen, die sich auf die Kenntnis der biochemischen Prozesse, die hier ablaufen, stützen, haben gezeigt, daß bei gut wachsenden Pflanzen 35 Prozent der photosynthetischen Produkte für Atmungsprozesse verbraucht werden, die diese Energie liefern (Penning de Vries 1972).

Das quantitative Wissen über Photosynthese und Atmung der Pflanzen ist inzwischen so weit fortgeschritten, daß es sogar möglich erscheint, den täglichen Verlauf der Netto-Kohlendioxid-Assimilation mit hinreichender Genauigkeit zu berechnen (van Keulen und Louwense 1973; van Keulen 1975). Es ergibt sich in der Theorie, aber auch bei Feldmessungen in den Niederlanden, daß die tägliche Wachstumsrate einer geschlossenen Pflanzenoberfläche, die mit Nährstoffen und Wasser gut versorgt wird, in der Wachstumsperiode etwas über 200 Kilogramm

Trockenmasse pro Hektar $^{-1}$ und pro Tag $^{-1}$ beträgt.
Die Wachstumsrate bei Algenkulturen erreicht die gleiche Größenordnung, verlangt jedoch technische Konstruktionen, die noch schwieriger zu bauen und zu bedienen sind als Gewächshäuser, in denen beliebige Gemüsesorten und Blumen gezüchtet werden.
Bei einer Anbaupflanze wie Weizen zeigt sich dieses Wachstum zunächst in der Bildung von Wurzeln, Blättern und Halmen, aber nach der Blüte herrscht die Samenbildung vor. Die Zeitspanne, in der der Samen ausgebildet wird, beträgt bei gesunder Pflanze etwa fünfzig Tage; unter diesen Bedingungen kann der Samenertrag sich auf 10000 bis 11000 Kilogramm pro Hektar belaufen.

Die Weltnahrungsreserve

Mit Hilfe von Simulationsmodellen ist es möglich, die Weltnahrungsproduktion in Abhängigkeit von Sonnenstrahlung und Temperatur recht zuverlässig zu schätzen. Wenn man annimmt, daß die gesamte Erdoberfläche, soweit sie aus Land besteht, optimal mit Nährstoffen und Wasser ausgestattet wäre, so reichte die Gesamtsumme der Weltproduktion an Nahrungsmitteln aus, um die Bedürfnisse von 1000×10^9 (1000 Milliarden) Menschen zu befriedigen; allerdings könnten alle diese armen Leute dann zwar *vom* Lande, nicht aber gleichzeitig *auf* diesem Lande leben.

Es gibt jedoch viele andere Faktoren, die den Ernteertrag einschränken; die Faktoren, die mit der Wasserversorgung und der Bodenqualität zusammenhängen, sind von Buringh, van Heemst und Staringh (1974) erörtert worden.

Zu diesem Zweck wurde die Welt in 222 Bodenregionen unterteilt, und zwar auf der Basis der internationalen Bodenkarten der Welternährungsorganisation (FAO). Die Bodenfläche, die durch den Einsatz vorhandener Technologien urbar gemacht werden kann, wird für jede Bodenregion geschätzt. Die potentielle Produktion eines Landes wird für jede Bodenregion auf der Grundlage der Zahlen der Sonneneinstrahlung und der Temperatur berechnet und in Kilogramm Getreide-Einheiten pro Hektar und Jahr ausgedrückt. Zusätzlich wird auch Zahlenmaterial zur Luftfeuchtigkeit und Windbewegung benutzt, um die potentielle Verdunstung nach der bekannten Penman-Methode (Penman 1948) zu schätzen. Allerdings wird der potentielle Ernteertrag im allgemeinen nicht erreicht – und zwar wegen Wassermangels und nicht-optimaler Bodenbeschaffenheit.

Die vorhandene Wassermenge wird pro Monat aus der Niederschlagsmenge, nach physikalischen Eigenschaften des Bodens und nach potentieller Verdunstung berechnet. Entsprechend den ziemlich gut abgesicherten quantitativen Methoden (Makkink und van Heemst 1975; van Keulen 1975) entsteht ein direkter Ertragsminderungsfaktor aus dem Verhältnis zwischen Wassermenge und potentieller Verdunstung. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten der Bewässerung für jede Region anhand der bestehenden und geplanten bewässerten Gebiete aufgrund der Möglichkeiten, Wasser für die Bewässerung herbeizuschaffen, und der Boden-Topographie ermittelt (H.J. Moen und K.J. Beek 1974).

Es gibt keine direkte Methode, Ertragsminderungsfaktoren aufgrund ungünstiger Bodenbeschaffenheit, die nicht durch erprobte Verfahren der Düngung, Bodenverbesserung und Anbautechniken beeinflusst werden kann, zu ermitteln; jedoch werden von Buringh und anderen Landwirtschaftsexperten (1974) in enger Zusammenarbeit mit Bodenkundlern, die weltweite Erfahrung haben, Schätzungen vorgenommen. Der kleinste der Reduktionsfaktoren für Wasser oder Boden wird dann benutzt, um aus der *potentiellen* Produktion die *maximal mögliche* Produktion zu errechnen. Diese maximale Produktion wird in sechs Klassen dargestellt, deren oberste 25000 bis 30000 Kilogramm Getreide-Einheiten pro Hektar und deren niedrigste Erträge von Null bis 5000 Kilogramm Getreide-Einheiten pro Hektar umfaßt.

Nehmen wir Afrika als Beispiel:

Etwa 24 Prozent des afrikanischen Kontinents sind potentiell Agrarland, aber bis jetzt werden nur 20 Prozent dieser Fläche bebaut, und der Ertrag dieses bebauten Bodens macht nur einen Bruchteil des maximal möglichen Ertrages aus.

Wenn man die Berechnungen auf die ganze Erde ausdehnt, darf man schließen, daß sich 25 Prozent der Landmasse oder 3420 Millionen Hektar als Anbaufläche eignen; 470 Millionen Hektar können bewässert werden. Gegenwärtig werden jedoch erst 1400 Millionen Hektar bebaut, und erst 200 Millionen Hektar werden bewässert.

Die maximale Produktion beträgt 50 Milliarden Tonnen Getreide-Einheiten; das ist fast vierzigmal mehr als die gegenwärtige Produktion von 1,3 Milliarden Tonnen Getreide-Einheiten oder, wenn man davon ausgeht, daß zur Zeit nur 65 Prozent des urbaren Landes für Getreideanbau genutzt werden, fast dreißigmal mehr als die gegenwärtigen Erträge an Körnerpflanzen. Diese Menge würde den Kalorienbedarf von 100 Milliarden Menschen decken; wenn man jedoch eine hinreichend

abwechslungsreiche Ernährung sowie den Verzehr von Fleisch in die Rechnung einbezieht, wäre eine Schätzung von 40 Milliarden angemessen. Da die Menschheit sich gegenwärtig jeweils innerhalb von dreißig Jahren verdoppelt, haben wir bis zur Katastrophe noch eine Gnadenfrist von etwas über hundert Jahren – keine lange Zeitspanne, wenn man die Größenordnung des Problems bedenkt.

Die errechnete Produktion bezieht sich auf *den* Ertrag, den man mit jetzt angebauten Getreidesorten und bei voller Ausschöpfung von Bodenverbesserungsmaßnahmen, Düngemethoden und Anbautechniken unter der Voraussetzung erzielen kann, daß weder Schädlinge noch Pflanzenkrankheiten oder andere Schäden auftreten.

Damit soll nicht gesagt werden, es sei leicht, die Kluft zwischen dem, was experimentell möglich, und dem, was praktisch durchführbar ist, zu überbrücken, das heißt, die Ertragsunterschiede einerseits zwischen Versuchsstationen und gut verwalteten Ackerbaubetrieben und andererseits zwischen gut geleiteten Landwirtschaftsbetrieben und den Durchschnittserträgen (Oram 1976) zu beseitigen. Genausowenig soll damit gesagt werden, es sei wünschenswert, daß die Menschheit bis an ihre äußersten Grenzen wachse; aus dem bisher Gesagten geht aber deutlich hervor, daß der Kern des Welternährungsproblems weniger darin liegt, daß zu wenig Produktionsquellen zu erschließen wären, als vielmehr in der Unfähigkeit des Menschen, die optimale Ausschöpfung aller Produktionsquellen zu organisieren.

Das Produktionsmuster

Es sei hier wiederholt: Die Tatsache, daß Landwirtschaft für den Lebensunterhalt der in ihr Arbeitenden betrieben werden kann, zeigt, daß es möglich ist, genügend Nahrung und andere wesentliche landwirtschaftliche Erzeugnisse zu produzieren, ohne mehr als die Arbeitskraft der Verbraucher zu investieren.

Aber aus der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung ergibt sich, daß die in der Landwirtschaft tätige Bevölkerung auch in wachsendem Maße landwirtschaftliche Produkte für eine wachsende städtische Bevölkerung liefern muß. Deshalb muß die Produktivität pro landwirtschaftlicher Arbeitskraft ständig steigen. Und das ist nur möglich, wenn der landwirtschaftlichen Bevölkerung ertragsteigernde und arbeitskraftersetzende Produktionsmethoden vermittelt werden.

Im Rahmen der Entwicklung eines Modells über internationale Ver-

gleiche in der Landwirtschaft, MOIRA genannt, stellten Linnemann und andere (1976) fest, daß sie eine quantitative Einsicht in die Materie brauchten. Zwecks Gewinnung quantifizierbarer Größen wurde eine Querschnittserhebung in 106 Ländern gemacht, um die Nachfrage nach Nahrungsmitteln zu dem Ertrag, zu dem Ertragspotential und den Produktionsmethoden in Beziehung setzen zu können.

Das Ertragspotential eines Landes wird zu diesem Zweck ausgedrückt in der Gesamtmenge potentiell ackerbaren Landes (woraus für die Formel die Abkürzung PAL entsteht), in Hektar und in der maximalen Produktion (Y_m) pro Hektar von PAL. Die tatsächliche Leistung wird ebenfalls in Hektar von PAL ausgedrückt, so daß der Quotient (Y/Y_m) ein direktes Maß darstellt, mit dem der Nutzungsgrad der verfügbaren Produktionsquellen ermittelt werden kann. Die Produktion wird hierbei in Kilogramm verzehrbare Proteine statt in Getreide-Einheiten oder in Kalorien gemessen. Dies nicht, um in dem ziemlich müßigen Streit über die Frage, ob Kalorien oder Proteine sich eher für eine Abgrenzung eignen, eine bestimmte Position einzunehmen, sondern vielmehr, um eine direktere Verbindung zur Stickstoffumwälzung herstellen zu können. Die Menge des verzehrbaren Proteins setzt sich aus der Menge des pflanzlichen Proteins, das für den menschlichen Verzehr geeignet ist, sowie dem tierischen Protein zusammen, das sich aus dem pflanzlichen Protein bildet, das für den Verzehr ungeeignet ist, wobei beide Arten als primäre Protein-Quellen anzusehen sind. Ein Teil der Produktionskapazität für verzehrbare Protein wird für nicht verzehrbare Produkte geopfert und geht im Herstellungsprozeß verloren; dies gilt besonders für die Fleischerzeugung auf Getreidebasis. Deshalb ist die Menge des verzehrbaren Proteins größer als die des verzehrten Proteins, aber der Unterschied hängt zu einem erheblichen Teil von der Einkommensklasse des Verbrauchers ab.

Wegen der begrenzten Daten, die hier zur Verfügung standen, wurde der Einsatz von landwirtschaftlicher Arbeitskraft proportional zur landwirtschaftlichen Bevölkerung betrachtet, der Einsatz arbeitskraftersetzender Produktionsmittel proportional zur Anzahl der Traktoren und die Verwendung ertragsteigernder Produktionsmittel proportional dem Kilogramm-Verbrauch an Düngemitteln. Alle Produktionsmittel werden auch in Hektar von PAL ausgedrückt.*

*Anm. d. Hrsg.: Den Originaltext der Arbeitskraftäquivalenzgleichung und der Ertragsgleichung finden Sie auf Seite 42.

Es läßt sich feststellen, daß der Mechanisierungsgrad, wenn die landwirtschaftliche Bevölkerung durch Maschinen ersetzt wird, mehr als proportional steigt; aus der Substitutionsgleichung für Arbeitskraft und Traktoren ist auch abzulesen, daß die landwirtschaftliche Produktion entweder ohne den Einsatz von Traktoren oder ohne den Einsatz von Arbeitskraft erzielt werden kann. Von diesen Aussagen trifft die erste zu; hingegen ist die Automatisierung noch nicht so weit fortgeschritten, daß man die zweite Schlußfolgerung allzu wörtlich nehmen sollte.

Als ursprüngliche Effizienz des Einsatzes von äquivalenter Arbeitskraft ergaben sich 51 Kilogramm verzehrbare Protein pro Kopf der in der Landwirtschaft Arbeitenden pro Jahr, wenn keine Traktoren verwendet werden. Dies ist doppelt so viel wie der Nahrungsbedarf; dieses Ergebnis bedeutet, daß eine zahlenmäßig geringe Bevölkerung sich in jedem Land am Leben erhalten kann, wenn sie in den für die Produktion von Nahrungsmitteln günstigsten Regionen lebt. Wenn man die Untersuchungsergebnisse tabellarisch auflistet, bleiben zwar im Einzelfall noch Abweichungen sichtbar, aber für volkswirtschaftliche Berechnungen tritt der Haupttrend doch deutlich zutage, zumal der Bestimmungskoeffizient bei über 0,8 liegt. Und der Wissenschaftler, der sich mit Anbaufragen beschäftigt, mag auch zufrieden sein, weil ein Vorgehen, bei dem die *potentiellen* Produktionsquellen miteinbezogen sind, noch das am wenigsten angreifbare ist.

Die Analyse schließt ein, daß die Anbaumethoden in jedem Land dem rationellen Einsatz der Arbeitskraft angemessen sind. Ein meßbarer Indikator ist der Verbrauch von Düngemitteln für die Herstellung von verzehrbarem pflanzlichen Protein in Beziehung zum Ertrag pro Hektar von PAL. Zwar weichen auch hier die Einzeldaten erheblich voneinander ab, aber generell kann man ableiten, in welchem Ausmaß Düngemittel benötigt werden, wenn der Ertragsgrad über dem Basisgrad von 80 Kilogramm verzehrbaren Proteins pro Hektar des tatsächlich bewirtschafteten Bodens liegt.

Wir wollen dies nun anhand eines Beispiels verdeutlichen: Nehmen wir ein Land „X“ mit einer Gesamtbevölkerung von 5 Personen pro Hektar/PAL und mit einem Verbrauch von 50 Kilogramm verzehrbaren Proteins pro Kopf und Jahr. Der Verbrauch verzehrbaren Proteins pro Hektar entspricht dann 250 Kilogramm pro Hektar/PAL – also des potentiell zu bewirtschaftenden Bodens –, und für die maximale Produktion von 2000 Kilogramm verzehrbaren Proteins pro Hektar/PAL werden 5,7 Arbeitskräfte benötigt. Wenn dann die in der Landwirt-

schaft tätige Bevölkerung 20 Prozent ausmacht – oder eine Person pro Hektar/PAL – dann folgt aus der Substitutionsgleichung, daß der Mechanisierungsgrad durch 0,05 Traktoren pro Hektar/PAL gekennzeichnet wird und der Düngemittelbedarf bei 125 Kilogramm pro Hektar/PAL liegt. Wenn sich andererseits die potentielle Nahrungsquelle auf 500 Kilogramm verzehrbaren Proteins vermindert, steigert sich die Arbeitskraftdichte auf zehn Einheiten und der Mechanisierungsgrad auf 0,17 Traktoren – immer auf Hektar von PAL bezogen. In ähnlicher Weise werden damit die Folgerungen aus Veränderungen in der Bevölkerungsdichte, in der Ernährungsweise oder in der Abwanderung der landwirtschaftlich tätigen Bevölkerung zunächst einmal überschlägig quantifiziert.

Ein weiteres Problem betrifft die jährliche Ertragswachstumsrate, die auf den ersten Blick in einer etwas überraschenden Weise vom Ertragsgrad abhängt. Wenn man die jährlichen Getreideerträge der wichtigsten Anbaugebiete für die Jahre 1954 bis 1973 betrachtet, so zeigt sich: Die jährliche Zuwachsrate bei Erträgen unter 1700 Kilogramm pro Hektar steigt nur um 17 Kilogramm pro Hektar und Jahr; über diesem Ertragsgrad steigt sie jedoch um 78 Kilogramm pro Hektar und Jahr. Offensichtlich stellt dies den Grenzwert dar, an dem sich der Übergang von einer *traditionellen* Landwirtschaft mit geringfügigen äußerlichen Investitionen zu einer *modernen* Landwirtschaft mit erheblichem Einsatz äußerer Hilfsmittel vollzieht.

Gerade *unterhalb* der genannten Ertragsrate von 1700 Kilogramm beträgt die jährliche Wachstumsrate nur ein Prozent: Das ist entschieden zu wenig, um mit der Bevölkerungsentwicklung Schritt zu halten. Dann gilt das Interesse der Vermehrung des landwirtschaftlich genutzten Bodens und dem Vermeiden von Hungersnöten.

Gerade *über* diesem Punkt beträgt das relative jährliche Wachstum 4,5 Prozent – das ist mehr als der Anstieg der Bevölkerung in den betreffenden Ländern. Hier wird man mehr Wert darauf legen, nicht-optimal produktiven Boden nicht länger landwirtschaftlich zu nutzen, Primärprodukte zu veredeln und Luxusgüter zu produzieren.

Den Übergang von der eher traditionellen zur modernen, hochtechnisierten Landwirtschaft hat man in der UdSSR bei einem Ertrag von 1100 Kilogramm pro Hektar versucht – nicht mit allzu großem Erfolg in Anbetracht der Schwankungen der Erträge. China scheint jetzt gerade den kritischen Punkt mit 1700 Kilogramm pro Hektar zu erreichen, und das macht verständlich, weshalb im gegenwärtigen Fünfjahresplan den Düngemitteln so viel Bedeutung zugemessen wird.

Düngemittel

Eine statistische Analyse läßt eine mehr oder weniger lineare Relation zwischen Düngemittelverbrauch und Ertragsgrad vermuten. Das scheint der allgemeinen Vorstellung von abnehmenden Erträgen bei geringerem Düngemittelverbrauch zu widersprechen.

Jedoch werden gleichzeitig andere agrikulturelle Techniken – wie zum Beispiel Fruchtwechsel, Methoden der Bodenverbesserung, Regulierung der Wasserzufuhr und Kontrolle des Unkrauts und der Pflanzenkrankheiten – angewendet, und dies führt tatsächlich zu einer Situation, in der der Düngemittelverbrauch nur noch dem Ertragsgrad proportional wächst.

Das läßt sich auch anhand der Wirkung von Stickstoff auf den Weizenanbau in den Niederlanden unter Bedingungen, die unterschiedlichste Höchstertträge zulassen, nachweisen. Unabhängig vom Ertragsgrad – wenigstens bis zu einer Ertragshöhe von 80 Prozent des potentiellen Höchsterttrages – ist die Wirksamkeit des Düngemittelverbrauchs gleich. Um *diesen* Ertragsgrad oder einen etwas höheren wird der Ertrag hauptsächlich durch Ausdehnung der Wachstumszeit mittels Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten gesteigert. Derselbe Stickstoff wird dann längere Zeit gebraucht und stärker in den Samen akkumuliert. Grasland-Experimente (Alberda 1971) haben gezeigt, daß aufgetragener Stickstoff vollständig resorbiert wird, wenn man sich potentiellen Höchstertträgen nähert, jedoch im allgemeinen nur zu etwa 50 Prozent bei niedrigeren Erträgen, das heißt, wenn der Pflanzenwuchs weniger genau beobachtet und kontrolliert wird.

Was Phosphat angeht, so ist erwiesen, daß bei relativ geringen Ernteerträgen auf Böden mit relativ geringem Phosphatgehalt nur ein kleiner Teil des zugeführten Phosphates aufgenommen wird, während der bei weitem größte Teil in Eisen- und Aluminiumverbindungen in einer für die Pflanze nicht verwertbaren Form gebunden wird; verlängerte Bodennutzung mit steigenden Erträgen führt zu einer Situation, in der ein großer Teil der Eisen- und Aluminiumverbindungen gestättigt ist. Unter holländischen Bedingungen hat diese Erscheinung zu dem Rat geführt, Phosphat in etwa dem Maße zuzusetzen, in dem es dem Boden durch das Einbringen der Ernte entzogen wird.

Mit Kalk wird gedüngt, um den pH-Wert, den Wasserstoffexponenten, des Bodens zu kontrollieren. Aber ein fast neutraler Wasserstoffwert reicht auch für die potentiellen Höchstertträge aus, so daß von mittleren Erträgen an aufwärts der Kalkbedarf mit steigenden Erträgen nicht

mehr ansteigt.

All dies führt zu der bedeutenden Schlußfolgerung, daß der Bedarf an Düngemitteln sich relativ verringert, wenn statt mittlerer Ertragswerte hohe erreicht werden, so daß eine geradlinige Relation, wie sie aus ökonomischen Analysen erschlossen werden kann, auch für höhere Ertragswerte extrapoliert werden darf, ohne daß die Gefahr besteht, den Düngemittelbedarf zu unterschätzen.

Natürlich ist der Weltverbrauch an Düngemitteln in den vergangenen Jahrzehnten bei steigender Nahrungsmittelproduktion rapide angestiegen, und man sollte sich fragen, ob die verbleibenden Quellen ausreichen. Eine Analyse des MOIRA-Teams bejahte diese Frage. Bei einer jährlichen Wachstumsrate von 5 Prozent beim Phosphatverbrauch sind für die nächsten 35 Jahre, in denen eine Verdoppelung der Weltbevölkerung zu erwarten ist, 1500 Millionen Tonnen Phosphat (1500 Megatonnen) erforderlich. Das sind nur 10 Prozent der Menge im Phosphatgestein, das nach sorgfältiger Schätzung mit den heutigen Techniken und zu heutigen Preisen genutzt werden kann. Darüber hinaus hat es den Anschein, als würde eine Verdoppelung des Preises zu einer fünffachen Erhöhung der kommerziell interessanten Reserven führen; damit wiederum würde die erforderliche Menge auf nur zwei Prozent der vorhandenen Reserven sinken.

Der steigende Bedarf an Kalium scheint sich nur auf 0,1 Prozent der kommerziell interessanten Quellen zu belaufen; im Hinblick auf die Praxis ist dies keine Größe von Belang.

Stickstoff in seiner elementaren Form ist in unerschöpflichen Mengen in der Luft enthalten, aber seine Umwandlung in Ammoniak, so daß die Pflanze ihn verwerten kann, verlangt Energie, gleichgültig ob diese auf industriellem Weg oder mit biologischen Mitteln beschafft wird. Der Vorrat an Ammoniak hängt deshalb eng mit der Energiebeschaffung zusammen.

Energie

Landwirtschaft ist eingangs als die menschliche Aktivität definiert worden, Sonnenenergie mittels Tier und Pflanze in nützliche *chemische* Energie umzuwandeln. Zusätzlich sind *fossile* Energie und *menschliche* Energie erforderlich, um eine Farm zu bewirtschaften und die Materialien, die dafür gebraucht werden, herzustellen. Nicht nur *ein* Energiestrom, sondern *drei* Energieströme sind an der landwirtschaftlichen

Produktion beteiligt, und wenn man die Produktivität eines dieser Ströme optimiert, so schließt das nicht zwangsläufig die Optimierung der beiden anderen mit ein.

Um die Produktivität der Energie und der Arbeitskraft eines Landwirtschaftssystems zu beurteilen, genügt es nicht, nur den direkten Brennstoffbedarf (für Traktoren zum Beispiel) und die direkte Arbeitskraft im landwirtschaftlichen Betrieb zu untersuchen; ebenso müssen der „indirekte“ Kraftstoff und die „indirekte“ Arbeit in Rechnung gestellt werden, die für die Herstellung von Materialien aus Rohstoffen und für ihren Transport in den Landwirtschaftsbetrieb gebraucht werden. Die Summe aus direktem und indirektem Kraftstoffverbrauch wird Gesamtenergie (= AE) genannt, Gesamtarbeit (= AL) heißt dementsprechend die Summe aus direkter und indirekter Arbeit.

Die Bestimmung des Anteils von Gesamtenergie und Gesamtarbeit an den wichtigsten landwirtschaftlichen Produkten dürfte ein wertvolles Instrument sein, um das Ergebnis steigender Preise für Energieträger im voraus abzuschätzen und damit auch Mangelsituationen und ihre Auswirkungen zu berechnen. Dies wäre eine gemeinsame Aufgabe für Wirtschaftswissenschaftler und Techniker verschiedener Fachrichtungen, aber solange der notwendige interdisziplinäre Versuch nicht ausgereift ist, können alle Ergebnisse nur grobe Schätzungen sein.

Dies sollten wir nicht vergessen, wenn wir anhand der jüngsten Aufstellungen zur holländischen Landwirtschaft (Oskam 1975; Lange 1975; de Wit 1975 a,b) schätzen, daß die Gesamtenergie in landwirtschaftlichen Betrieben, die ausschließlich Ackerbau betreiben, etwa 35 Giga-Joule pro Hektar (35 GJ/ha) beträgt, wovon etwa die Hälfte, hauptsächlich in der Form von Kraftstoff, direkt auf den landwirtschaftlichen Betrieb entfällt und etwas weniger als die Hälfte indirekt, hauptsächlich für die Herstellung von Düngemitteln, verwendet wird. So erfordert zum Beispiel die gebrauchsfertige Herstellung von Ammoniaknitrat nach Schuffelen (1975) 100 Mega-Joule pro Kilogramm (MJ/kg) oder, umgerechnet, 10 Giga-Joule pro Hektar, wenn 100 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr verwendet werden. Überraschenderweise liegt der Energieaufwand für die Herstellung von Stickstoff unabhängig vom Pro-Kopf-Einkommen der Bevölkerung eines Landes bei 1,4 Prozent des gesamten Energieverbrauchs, während der Energieverbrauch für landwirtschaftliche Zwecke in höher entwickelten Ländern insgesamt etwa 5 Prozent des gesamten Energieverbrauchs ausmacht. Dieser Bedarf ist so gering, daß man daraus schließen darf, daß die Menschheit nicht wegen Energiemangels hungern müssen sollte; und der Bedarf ist

immerhin so groß, daß wir uns um einen möglichst optimalen Einsatz Gedanken machen sollten.

Die Gesamtarbeit, die in Ackerbaubetrieben der Niederlande eingesetzt wird, beträgt nach Oskam (1975) etwa 0,084 Person pro Hektar und Jahr, wovon der größere Teil, nämlich 0,067 Person pro Hektar und Jahr, auf den direkten Einsatz entfällt. Der Gesamtenergieverbrauch in Höhe von 35 Giga-Joule plus Gesamtarbeitseinsatz in Höhe von 0,084 Person pro Hektar und Jahr erbringt einen Ernteertrag von 50 Prozent des potentiellen Ertrages oder einen Ertrag von 5000 Kilogramm Weizen pro Hektar.

Landwirtschaft ist als Gegenstand menschlichen Wirkens so alt wie die Menschheit und alle altüberlieferten Tätigkeiten – wie Haus- und Webbau, Transportieren oder Weben. Sie kann mit geringem Arbeitsaufwand bei hohem Energieverbrauch betrieben werden oder umgekehrt. Das Wissen, daß 1970 35 Giga-Joule pro Hektar plus 0,084 Arbeitskraft pro Hektar und Jahr nötig waren, um 5000 Kilogramm Weizen zu produzieren, stellt deshalb nur einen Punkt dar, wenn man eine Ertragsgleichung in ein Kurvenbild fassen wollte, dessen Achsen Gesamtenergie und Gesamtarbeit bilden. Wollte man versuchen, 5000 Kilogramm Weizen mit so wenig Energieaufwand wie möglich zu produzieren, würde man den Spaten, die Hacke und die Sichel anstelle von Traktor, Pflug und Mähdrescher benutzen. Eine historische Analyse des Autors (de Wit 1975) zeigt, daß das erstgenannte Verfahren etwa 0,4 Arbeitskraft bei 5000 Kilogramm Ernteertrag pro Hektar erforderte. Trotzdem wäre aber noch ein Energiebedarf von 15 Giga-Joule pro Hektar (wie wir schon vorher ausgeführt haben) für die Herstellung von Düngemitteln und anderen ertragsteigernden Maßnahmen anzusetzen. Damit läßt sich in dem genannten Kurvenbild ein zweiter Punkt festlegen.

Eine Extrapolation unterhalb der Menge von 0,084 Arbeitskraft pro Hektar zeigt, daß eine weitere Eliminierung von Arbeitskraft, verglichen mit dem bisherigen Energieaufwand, wenig mehr an Energie verlangt. Dies würde durch Automation (und Maßstabsvergrößerung) ohnehin erreicht werden. Es läßt sich dann erkennen, daß höchstens 47 Giga-Joule pro Hektar erforderlich wären, aber dieser Extremwert ist unrealistisch. Immerhin liegt dieser Wert erheblich unter der Verbrennungswärme von 80 Giga-Joule pro Hektar, die in Form von Getreide geerntet wird. Offensichtlich wird in einer modernen Agrarwirtschaft mehr Energie produziert als verbraucht, aber da wir Kraftstoff nicht essen können und Getreide nicht anstelle von Kraftstoff verwendet wird, brauchen wir dieser Überlegung nicht nachzugehen. Andererseits

enthalten auch die 4000 Kilogramm Stroh und Stoppeln, die gleichzeitig pro Hektar anfallen, Energie – und es ist zu bedenken, daß diese Energie mit einem Effizienzfaktor von 80 Prozent durch Fermentierung in Methan umgewandelt werden kann, so daß damit prinzipiell der gesamte Energiebedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes abgedeckt werden könnte.

Die Gesamtarbeit war in den fünfziger Jahren doppelt so hoch wie in unserem Jahrzehnt (Oskam 1975), während der Gesamtenergieverbrauch und der Ertrag pro Hektar um 30 Prozent niedriger lagen (Lange 1976). Deshalb verringerte sich innerhalb von 25 Jahren die Gesamtarbeit um die Hälfte, aber trotzdem blieb der Ernteertrag pro Berechnungseinheit für die Gesamtenergie gleich. Dabei ist es überraschend, daß die Produktivität in Bezug auf Energie sich in den Niederlanden nicht verringert zu haben scheint.

Aus Informationsmangel wird im allgemeinen unterstellt, daß die Energie-Effizienz in industriellen Prozessen nicht zugenommen habe. Das stimmt natürlich nicht, wie aus der erheblichen Effizienzsteigerung bei der Ammoniakherstellung, die Quartulli und Wagener 1973 belegt haben, abzulesen ist. Spekulationen über zukünftige Entwicklungen sollten weitere Verbesserungen der Effizienz in Rechnung stellen.

Es ist auch aufschlußreich, das marginale Ersatzverhältnis von Gesamtenergie in Bezug auf Gesamtarbeit und Energieverbrauch pro Arbeitskraft zu betrachten. Gegenwärtig beträgt der Energieverbrauch 420 Giga-Joule pro Arbeitskraft und das marginale Ersatzverhältnis 125 Giga-Joule pro Arbeitskraft. Der letztgenannte Wert bedeutet, daß der Energiemehrverbrauch in der Landwirtschaft und ihren Zulieferindustrien um 125 Giga-Joule pro Jahr für jede Arbeitskraft steigen müßte, die durch Automation oder Mechanisierung ersetzt wird. Dies würde weniger als DM 10,- pro Tag kosten. Die Aufwärtsbewegung in der Ertragsgleichungsfunktion konnte in der Vergangenheit deshalb erfolgen, weil der Preis einer Arbeitskraft kontinuierlich stieg, verglichen mit dem Preis energieverbrauchender Produktionsmittel. Diese günstige Situation könnte sich ändern, wenn die Energielieferanten sich auf ihre Monopolposition besinnen und die Inflation beibehalten wollen. Für diesen Fall sollten die Regierungen versuchen, das zukünftige Wachstum zu steuern, indem sie ein solch marginales Ersatzverhältnis zwischen Energie und Arbeitskraft anstreben, das – sei es über Preise oder andere Steuerungsinstrumente – für die Gesellschaft insgesamt als optimal und durchsetzbar gelten kann.

Labour equivalence equation:

... Because of the limited data base input of agricultural labour was considered proportional to agricultural population (A), the input of labour replacing means of production proportional to the number of tractors (T) and of yield increasing means of production proportional to the kilogram use of fertilizers (F). All means of production are also expressed per hectare PAL.

The data for 106 countries were subjected to a statistical analysis on basis of the labour equivalence equation:

$$L = A + K_1 \cdot (\sqrt{T + K_2} - \sqrt{K_2})$$

and the *yield equation*:

$$Y = \frac{E \cdot L}{E \cdot L + Y_m} \cdot Y_m$$

Other power terms in the substitution equation of labour and tractors proved not to be significant. The numerical values of K_1 appeared to be 22 and K_2 , a correction term for low tractor densities, was set at .0004....

The yield equation approaches to:

$$Y = E \cdot L$$

with L approaching to zero. E is therefore the initial efficiency of the use of equivalent labour. Its numerical value was found to be 51 kg consumable protein per unit L or per caput of the agricultural population (per year), in situations where no tractors are used ...

Literatur

- Alberda, Th. (1971): „Stikstofbemesting van grasland en kwaliteit van het oppervlaktewater“, in: *Stikstof 69* (1971), S. 377–383.
Buringh, P./Heemst, H.D.J. van/Staringh, G. (1974): *The absolute maximum food production of the world*. Soil Science Dept., Wageningen University 1974.

- Gondraan, J. (1976): *Simulation of microclimate*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen (in Vorb.).
- Keulen, H. van (1975): *Simulation of water use and herbage growth in arid regions*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen 1975.
- Keulen, H. van/Louwerse, W. (1973): „Simulation models of plant production“, in: *Proc. W.M.O.-Symposium „On agrometeorology of the wheat crop“*, Braunschweig 1973.
- Lange, J.M. (1975): *De energie-huishouding in de Nederlandse landbouw*. Publ. nr. 12, IMAG, Wageningen 1975.
- Linneman, H. et al. (1976a): *Food for a doubling world population*. Progress Report of the Free University in Amsterdam, 1976.
- Linneman, H. et al. (1976b): *MOIRA – A model of International Relations in Agriculture*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam (in Druck).
- Makkink, G.F./Heemst, H.D.J. van (1975): *Simulation of the water balance of arable land and pastures*. Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen 1975.
- Moen, H.J./Beek, K.J. (1974): *Literature study on the potential irrigated acreage in the world*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen 1974.
- Oram, P.A. (1976): *New opportunities for blending science and tradition in agriculture*. Symposium on the world food problem and cooperation in agricultural research, Wageningen, June 1976.
- Oskam, H.J./Smit, J.G.P. (1975): *De planten van de landbouw- en voedingsmiddelenindustrie in de Nederlandse volkshuishouding*. Agric. Economy Dept., Wageningen University 1975.
- Penman, H.L. (1948): *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. of the Royal Society, A, Volume 193, 1948.
- Penning de Vries, F.W.T. (1974): „Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants“, in *Neth. J. agric. Sci.* 22 (1974), S. 40–44.
- Quartulli, O.J./Wagener, D. (1973): „Technologie der Ammoniaksynthese in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft“, in: *Erdöl und Kohle* 26/4 (1973), S. 192–198.
- Schuffelen, A.C. (1975): „Energy balance in the use of fertilizers“, in: *SPAN* 18 (1975), S. 18–19.
- Vos, H. de (1975): *Field photosynthesis of winterwheat during the grain filling under highly fertile conditions*. Second Intern. Winterwheat Conference, Zagreb 1975 (im Druck).
- Wit, C.T. de (1965): *Photosynthesis of leaf canopies*. Agric. Res. Reports no. 663, 1965.
- Wit, C.T. de (1975a): „Agriculture's uncertain claim on world energy resources“, in: *SPAN* 18 (1975), no. 1, S. 2–4.
- Wit, C.T. de (1975b): „Substitution of labour and energy in agriculture and options for growth“, in: *Neth. J. agric. Sci.* 23 (1975), S. 145–162.