

Die Grenzen der Ertragsbildung in landwirtschaftlichen
Kulturen

CABO Publ. nr. 103
Wageningen

J. Goudriaan und H. van Keulen

Aus:

Hohenheimer Arbeiten, Heft 97

Aufgaben und Grenzen der Pflanzenproduktion in der
Landwirtschaft

DIE GRENZEN DER ERTRAGSBILDUNG IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN KULTUREN

Von J. Goudriaan und H. van Keulen. Wageningen

Es ist eine immer wieder auftauchende Frage, ob die Grenzen der Ertragsbildung in landwirtschaftlichen Kulturen eigentlich ökonomischer oder agrartechnischer Art sind. Sie sind beider Art zugleich; denn die ökonomischen Verhältnisse bestimmen die Aufwendungen der Bauern z. B. an Arbeit, Kapital und Energie, und diese beeinflussen die Umwelt der Pflanzen und damit den naturalen Ertrag. Hier sollen ausschließlich die physikalisch-chemischen Begrenzungen behandelt werden. Trotzdem kann die Ökonomie nicht ganz außer Betracht bleiben; denn es ist zwischen schwer (teuer) und leicht (billig) zu verbessernden Faktoren zu unterscheiden. Bodenfaktoren können oft leicht verbessert werden, während die Verbesserung von Wetterfaktoren nur bei teurem Endprodukt lohnt, wie etwa im Gartenbau.

Der potentielle Ertrag

Im Ackerbau ist das Wetter als gegeben zu betrachten. Man kann jedoch Wasser- und Nährstoffmangel durch Zuführen verhindern. Das dann erzielbare Ertragsniveau, der potentielle Ertrag, wird durch Strahlung, Temperatur und manchmal CO_2 beschränkt.

Dieser potentielle Trockenmassenertrag kann berechnet werden aus der Lichtabhängigkeitskurve der Photosynthese einzelner Blätter von Pflanzen, die unter optimalen Voraussetzungen herangezogen wurden. Die Neigung der Kurve bei schwachem Licht wird die Effizienz der Lichtausnutzung genannt und beträgt etwa $14 \times 10^{-9} \text{ kg CO}_2/\text{Joule absorbierten photosynthetisch aktiven Lichtes (400 - 700 nm)}$, was 15 % Ausnutzung der Lichtenergie entspricht. Das Maximum bei Lichtsättigung beträgt etwa $1.7 \times 10^{-6} \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für eine C_4 -Pflanze (wie Mais) und etwa $1.1 \times 10^{-6} \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für eine C_3 -Pflanze (wie Weizen). Bei niedriger Temperatur oder sonst ungünstigen Bedingungen (Wasser- oder Nährstoffmangel) sinkt das Maximum, aber die Anfangsneigung bleibt praktisch unverändert. In einem Simulationsmodell, das die Lichtverteilung über den Blättern berücksichtigt, kann durch Summierung der Assimilation in allen Blättern die Brutto-Trockenmassenproduktion gefunden werden. Im Gegensatz zu einer oft geäußerten An-

nahme erweist sich der Blattstand (horizontal, vertikal, zufällig verteilt) als unwichtig für die Tagessumme (GOUDRIAAN, 1977). Sehr wichtig sind dagegen die Menge einfallender Strahlung, ihre Verteilung während des Tages und die Anteile der direkten und der diffusen Komponente. Der Breitengrad wirkt indirekt über die Tageslänge und damit über die Intensitätsverteilung während des Tages. De WIT (1965) berechnete für bestimmte Bedingungen die in Tabelle 1 angegebenen Tagessummen der Bruttoassimilation.

Tab. 1: Berechnete tägliche Bruttoassimilation (kg/ha) eines C_3 -Pflanzenbestands unter normalklarem (nk) und normalbewölktem (nw) Himmel in Abhängigkeit vom Breitengrad (nach de Wit, 1965).

Breite °N		15 Jan.	15 Febr.	15 März	15 Apr.	15 Mai	15 Juni	15 Juli	15 Aug.	15 Sept.	15 Okt.	15 Nov.	15 Dez.
0	nk	413	424	429	426	417	410	413	422	429	427	418	410
	nw	219	226	230	228	221	216	218	225	230	228	222	216
10	nk	376	401	422	437	440	440	440	439	431	411	385	370
	nw	197	212	225	234	236	235	236	235	230	218	203	193
20	nk	334	371	407	439	460	468	465	451	425	387	348	325
	nw	170	193	215	235	246	250	249	242	226	203	178	164
30	nk	281	333	385	437	471	489	483	456	412	356	299	269
	nw	137	168	200	232	251	261	258	243	216	182	148	130
40	nk	218	283	353	427	480	506	497	455	390	314	241	204
	nw	99	137	178	223	253	268	263	239	200	155	112	91
50	nk	147	223	310	409	484	522	509	448	358	260	173	130
	nw	60	100	150	207	251	273	265	230	178	121	73	51
60	nk	66	151	254	383	487	544	523	436	316	195	94	49
	nw	19	60	114	187	245	276	265	216	148	82	31	11
70	nk	0	65	185	350	506	612	575	427	262	114	7	0
	nw	0	16	74	158	241	291	273	200	112	38	1	0
80	nk	0	0	94	333	571	663	632	474	195	11	0	0
	nw	0	0	24	133	257	318	297	196	80	2	0	0
90	nk	0	0	0	371	588	677	646	497	167	0	0	0
	nw	0	0	0	131	269	319	302	215	35	0	0	0

Diese Ergebnisse sind in Abbildung 1 für 50° n.Br. und einzelne Monate dargestellt. Mit der Bewölkung wechselt die potentielle Bruttoassimilation im Sommer zwischen 300 und 450 kg Zucker/ha und Tag (schraffierte Zone). Für den mittleren Wert (unterbrochene Linie) kann die potentielle Produktion z. B. von Winterweizen nach einer Methode von Van KEULEN (1970) einfach berechnet werden.

Bei unvollständiger Bodenbedeckung wird die potentielle Produktion multipliziert mit dem Deckungsgrad (annäherungsweise bei Winterweizen 15. April - 1. Mai 0.25, 1. Mai - 15. Mai 0.5, und dann 1 bis zur Ernte am 1. August). Die entsprechend reduzierte tägliche potentielle Bruttoassimilation (P_g) ist in Tabelle 2 dargestellt. Von diesen Werten ist die Atmung zu subtrahieren, nach McCREE (1971)

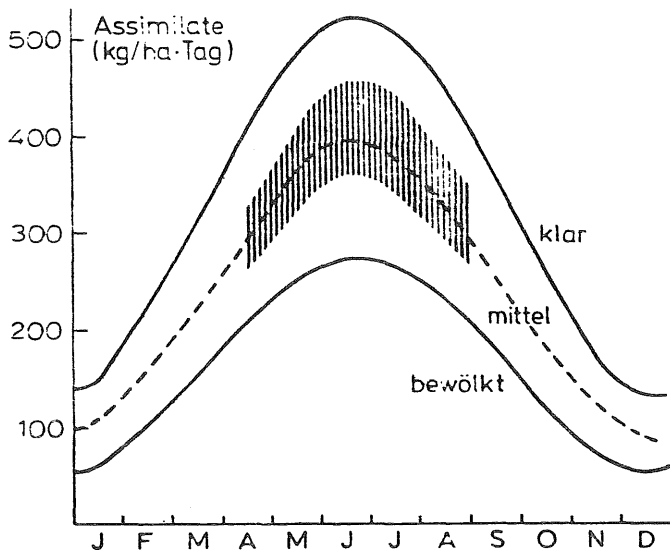


Abb. 1: Assimilation eines C_3 -Pflanzen-Bestandes im Jahreslauf für 50° nördl. Breite (nach DE WIT, 1965).

und PENNING de VRIES (1974) geteilt in Erhaltungs- und Wachstumsatmung. Für eine Pflanze mittlerer chemischer Zusammensetzung kann die tägliche Erhaltungsatmung (R) zu etwa 1.5 % der im Mittel eines Zeitabschnittes vorhandenen Trockenmasse (W) angenommen werden (der Anstieg bei höheren Temperaturen bleibt hier außer Betracht). Der übrigbleibende Kohlenhydratstrom steht dem Wachstum zur Verfügung, wird dabei aber - weil Wachstum mit energieintensiven chemischen Umwandlungen verbunden ist - zum Teil veratmet. Die Effizienz der Umwandlung hängt nicht ab von der Temperatur, sondern nur von der Art der gebildeten Pflanzenstoffe (Tabelle 3). Durchschnittlich kann bei Getreide mit einer Erhaltung von 70 % der für das Wachstum verfügbaren Assimilatmasse als strukturelle Trockenmasse gerechnet werden (bei höherer Temperatur

Tab. 2: Tägliche reduzierte Bruttoassimilation (P_g), Erhaltungsaerung (R) und Nettoassimilation (P_n) sowie über die jeweilige Zeit summierte Nettoassimilation (W_p) und vorhandene Trockenmasse (W_T). Alle Angaben in kg/ha, Erläuterungen im Text.

Periode	P_g	R	P_n	W_p	W_T
15.4. - 1.5.	77.5	5.7	50.3	754	754
1.5. - 15.5.	170	22.9	103.0	1545	2299
15.5. - 1.6.	375	61.0	220	3520	5819
1.6. - 15.6.	390	109	196	2940	8759
15.6. - 1.7.	395	152	170	2720	11479
1.7. - 15.7.	385	188	138	2070	13549
15.7. - 1.8.	365	216	104	1664	15213

verlaufen das Wachstum und damit die Wachstumsaerung zwar schneller, erschöpfen sich aber auch die verfügbaren Reserven eher, so daß die tägliche Gesamtwachstumsaerung gleich bleibt).

In Tabelle 2 sind die Verläufe der nach der Formel

$$P_n = 0.7 \times (P_g - 0.015 \times W)$$

errechneten täglichen Netto-Trockenmasseproduktion und der jeweils vorhandenen Trockenmasse dargestellt. Für letztere

ergeben sich aus diesem einfachen Rechenexempel am Ende der Wachstumszeit gut 15000 kg/ha. Bei Annahme eines Kornanteils von 60 % der Trockenmasse und von 15 % Wasser im Korn ist der potentielle Kornertrag 10700 kg/ha. Bei Sommerweizen beträgt der potentielle Ertrag wegen der etwas kürzeren Wachstumszeit nur 9500 kg/ha.

Tab. 3: Faktoren für die Bildung verschiedener Pflanzensubstanzen aus Glucose (nach Penning de Vries, 1974).

Stoffgruppe	(g/g Glucose)
Kohlenhydrate	0.826
Stickstoffverbindungen	0.404
Organische Säuren	1.104
Lignine	0.465
Fette	0.330

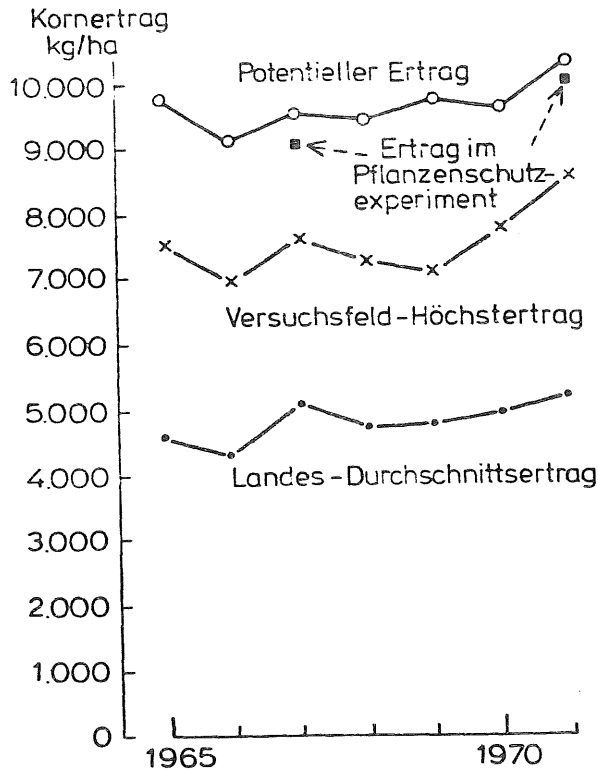


Abb. 2: Potentielle und aktuelle Kornerträge in den Niederlanden 1965 - 1971, Winterweizen (nach pers. Mitt. von DE VOS und DE WIT, 1975).

Dies sind durchschnittliche Werte; wechselnde Wetterbedingungen verursachen Schwankungen von Jahr zu Jahr (siehe Abbildung 2). Obwohl die Erträge von Versuchsfeldern ersichtlich höher sind als der Landesdurchschnitt, besteht auch dort noch eine Kluft von einigen 1000 kg/ha zum potentiellen Ertrag. Daß daran hauptsächlich Abreifungskrankheiten schuld sind, wird durch Ergebnisse von De VOS (pers. Mitteilung) in Experimenten gezeigt, in denen Krank-

heiten durch Fungizide vorgebeugt wurde (Abbildung 2). In dieser letzten Wachstumsphase nahmen die Pflanzen bereits allen benötigten Stickstoff auf, so daß höhere Stickstoffgaben als jetzt üblich (250 kg/ha) auch nicht näher an den potentiellen Ertrag heranführen.

Verfeinerung und Prüfung

Die bisherigen Berechnungen sind sehr grob. Sie können durch eine Beschreibung der Prozesse in zahlreichen Einzelheiten verfeinert werden, wobei die Anwendung eines Simulationsmodells fast unvermeidlich ist. Dessen Ergebnisse können durch periodische Ernten überprüft werden, aber die zeitliche Auflösung ist nicht besser als eine pro Woche. Die Voraussage des täglichen Verlaufs der Photosynthese und Transpiration entzieht sich damit der Überprüfung. Darum entwickelten LOUWERSE und EIKHOUDT (1975) eine Methode, den Gaswechsel von CO₂ und Wasserdampf einer Pflanze in einem transparenten Kasten von 1 m³ momentan zu messen. Die Beeinflussung der Umgebung der Pflanze durch die Messung ist im Modell rechnerisch zu berücksichtigen. Man kann nicht nur die täglichen Verläufe verfolgen, sondern auch die Temperatur und den CO₂-Gehalt ändern und die Dunkelatmung messen. Ergebnisse solcher Messungen und entsprechender Simulationen wurden veröffentlicht von De WIT et al. (1978), Van KEULEN et al. (1975) und Van KEULEN and LOUWERSE (1975).

Wassermangel

Die bisherigen Berechnungen haben Wassermangel außer Betracht gelassen, der aber (bei Düngung) oft limitierend ist. Der nach der dargelegten Methode - unter Berücksichtigung eines Wachstumsstillstandes nach jedem Schnitt und einer reduzierten Photosynthesekapazität nach dem ersten Schnitt - errechnete potentielle Ertrag beträgt für Gras ca. 20 t/ha. Ein Transpirationskoeffizient niedriger als 350 wurde für Gras fast nie gemessen. Zur Erzielung des potentiellen Ertrages wären also 700 mm Wasser nötig. Selbst in West-Europa ist soviel Wasser im Sommer kaum vorhanden, sofern die Böden nicht einen entsprechenden Niederschlagsüberschuß aus dem Winter speichern können. Die Reduktion durch Wassermangel hängt daher ab von der Wetterlage und von der Bodenform. Proportionalität zwischen Produktion und Wasserverbrauch vorausgesetzt, kann man berechnen, daß der durch Wassermangel reduzierte potentielle Korn'ertrag bei Winterweizen wie folgt von der Wasserkapazität eines Bodens abhängt (Van HEEMST et al., 1978):

Wasserkapazität (mm)	50	100	150	200
Potentieller Kornertrag (kg/ha)	7300	8500	10000	10500

In trockenen Regionen ist die Reduktion durch Wassermangel noch viel stärker. Trotzdem ist in der nördlichen Negev bei nur 250 mm Jahresniederschlag der potentielle Ertrag mit ca. 5000 kg/ha noch überraschend hoch. Das Wasser kann dort relativ gut ausgenutzt werden, weil Niederschlag und Wachstum in der kühlen Jahreszeit stattfinden. In einem Sommerregengebiet, wie der Sahel, wird für dieselbe Produktion etwa zweimal soviel Wasser benötigt. In beiden Fällen ist jedoch die aktuelle Produktion vielfach viel niedriger als die auf Grund des vorhandenen Niederschlags mögliche. Daß selbst in relativ trockenen Gebieten die Nähr-elemente N, P oder K limitierend sind, wird noch näher illustriert in Abbildung 3. Die Variabilität ist in der aktuellen Produktion viel geringer als in der potentiellen, weil in den relativ nassen Jahren Nährstoffe wuchsbeschränkend sind.

Die potentielle Produktion bei Wassermangel hängt stark von der Pflanzenart ab. C_4 -Pflanzen (wie Mais, Zuckerrohr und Sorghum) haben einen Transpirationskoeffizienten von ca. 200 gegenüber 350 bei C_3 -Pflanzen (Pflanzen gemäßiger Regionen, aber auch z. B. Reis). Dieser Unterschied ist physiologisch begründet in der größeren Affinität der carboxylierenden Enzyme für CO_2 in C_4 -Pflanzen, so daß diese bei derselben CO_2 -Assimilation ihre Stomata doppelt so eng schließen können. Natürlich können andere Faktoren (wie Trockenmasseverteilung) diesen Vorteil wieder aufheben, aber trotzdem erscheinen C_4 -Pflanzen besser geeignet für trockene Gebiete.

Stickstoff

Oft ist Stickstoff der limitierende Faktor. Pflanzen unterscheiden sich ziemlich stark in ihrer Fähigkeit zur Verdünnung des aufgenommenen Stickstoffs (der in Eiweiß eingebaut wird). Der minimale N-Gehalt ist in Raygras ca. 1.6 % (ALBERDA, 1965), in Getreidestroh ca. 0.4 % und im Korn ca. 1.1 %. Daraus resultiert ein minimaler N-Bedarf von 14 kg/1000 kg Korn (11 kg in den 1000 kg Korn und 3 kg in 700 kg Stroh). Wenn die N-Aufnahme durch eine Frucht pro Vegetationsperiode bekannt ist, kann der durch Stickstoff limitierte Ertrag leicht berechnet werden. Bei zunehmender N-Aufnahme steigt der Ertrag nur allmählich auf ein maximales Niveau, weil der Gehalt auch zunimmt (Abbildung 4 a und Abbildung 4 b). Im Grunde ist jetzt das Verhältnis Ertrag:N-Aufnahme bekannt, so daß die Frage

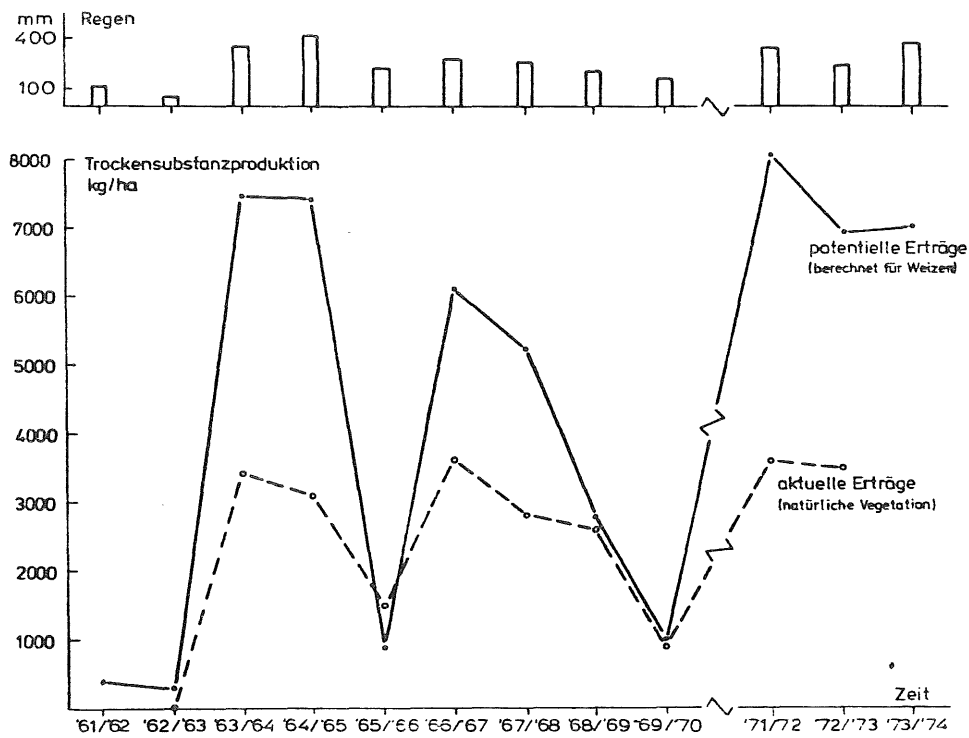


Abb. 3: Potentielle wasserlimitierte und aktuelle Erträge in Trockengebieten (nach VAN KEULEN, 1975).

bleibt, wieviel N aufgenommen wird. Dies hängt linear ab von der Stickstoffgabe (Abbildung 4 c). Deshalb braucht man zur Beschreibung dieser Beziehung nur die Aufnahme ohne Stickstoffgabe und den Anstieg der Geraden. Dieser Anstieg gibt an, inwieweit der gedüngte Stickstoff in der Pflanze wiedergefunden wird, und wird deshalb die Ausnutzung genannt. In schlecht belüfteten Böden mit viel organischer Substanz wird Nitrat schnell reduziert zu flüchtigen Stickstoffverbindungen, also für die Pflanzen unbrauchbar (Denitrifikation). Besonders bei hohen Temperaturen kann dieser Prozeß den NO_3 -Vorrat eines Bodens

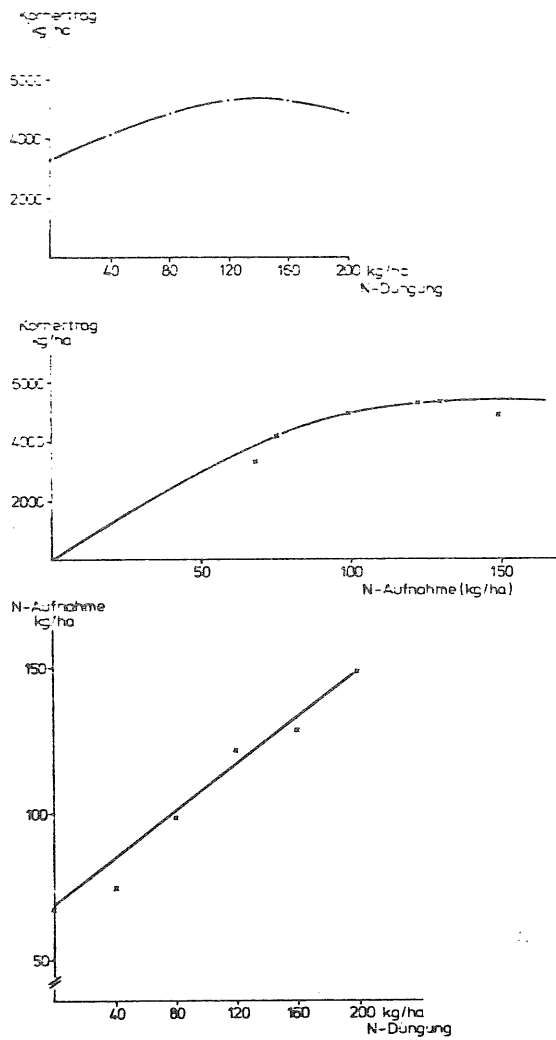


Abb. 4: Stickstoff und Weizenertrag (86 % Tr.masse) (DILZ, 1971).
 a) N-Düngung und Kornertrag;
 b) N-Aufnahme und Kornertrag;
 c) N-Düngung und N-Aufnahme (Ausnutzung 0.41)
 Ort: Spijk, Niederlande, 1965. - Sorte: Ibis.
 - Düngung: Kalkammonsulfat.

innerhalb einiger Tage verbrauchen. Die Ausnutzung kann dann bis auf 0.2 fallen. In einem gut belüfteten Boden und bei sorgfältiger, rechtzeitiger Düngung kann die Ausnutzung bis 0.7 - 0.8 steigen. Die Steigerung der durchschnittlichen Produktion von ca. 4000 kg/ha auf ca. 6000 kg/ha in den letzten Jahrzehnten wurde in den Niederlanden nicht durch Steigerung der Stickstoffdüngung erzielt, sondern durch eine Verbesserung der Ausnutzung von ca. 0.4 auf 0.7.

Ohne Stickstoffdüngung wird das Niveau der Stickstoffaufnahme völlig abhängig von der nicht-symbiotischen Stickstoffbindung und dem Stickstoff aus Niederschlägen (ca. 10 - 30 kg/ha), so daß dann Kornerträge von 700 - 2100 kg/ha möglich sind. In der Zwei- und Dreifelderwirtschaft wurden die im Brachjahr verfügbar werdenden Nährstoffe nicht genutzt, sondern in das nächste Jahr übertragen, natürlich verbunden mit Verlusten. Für Leguminosen ist das Niveau wegen der eigenen symbiotischen Stickstoffbindung viel höher, und - ausgenommen kurz nach der Keimung - eigentlich immer ausreichend. Wegen des viel höheren Eiweißgehalts ist aber der Phosphatbedarf ziemlich groß.

Geschwindigkeit der Produktionssteigerung

Praktisch überall liegen die aktuellen Erträge viel niedriger als die potentiellen und zwar mit einem Faktor 0.5 in den Niederlanden bis 0.05 in einigen tropischen Gebieten. Es ist aber eine harte Realität, daß die vorhandenen Möglichkeiten nicht von einem auf den anderen Tag wirklich ausgenutzt werden können. Die Geschwindigkeit der Produktionssteigerung ist beschränkt durch mehrere Faktoren der Infrastruktur, der Ökonomie, des Kenntnisniveaus usw. In kleinen Regionen können die Steigerungsgeschwindigkeiten stark auseinanderlaufen, aber im Durchschnitt von Kontinenten oder großen Ländern trifft eine ziemlich einfache Regel zu (Abbildung 5):

17 kg/ha jährlich bei Kornerträgen < 2000 kg/ha und
78 " " " " " " > 2000 " " .

In der UdSSR steigt die Kornproduktion schneller als diese allgemeine Regel angibt und ist vielleicht daher auch empfindlicher für Rückschläge. Der Knick bei 2000 kg/ha beruht wahrscheinlich darauf, daß von diesem Ertrag ab externe Inputs (Mineraldünger, Bewässerung) eine wichtige Rolle spielen. Im übrigen kann man die Ursachen dieser hier angegebenen einfachen Regel nur erraten; sie gehören vielmehr zum Forschungsgebiet der Gesellschaftswissenschaften.

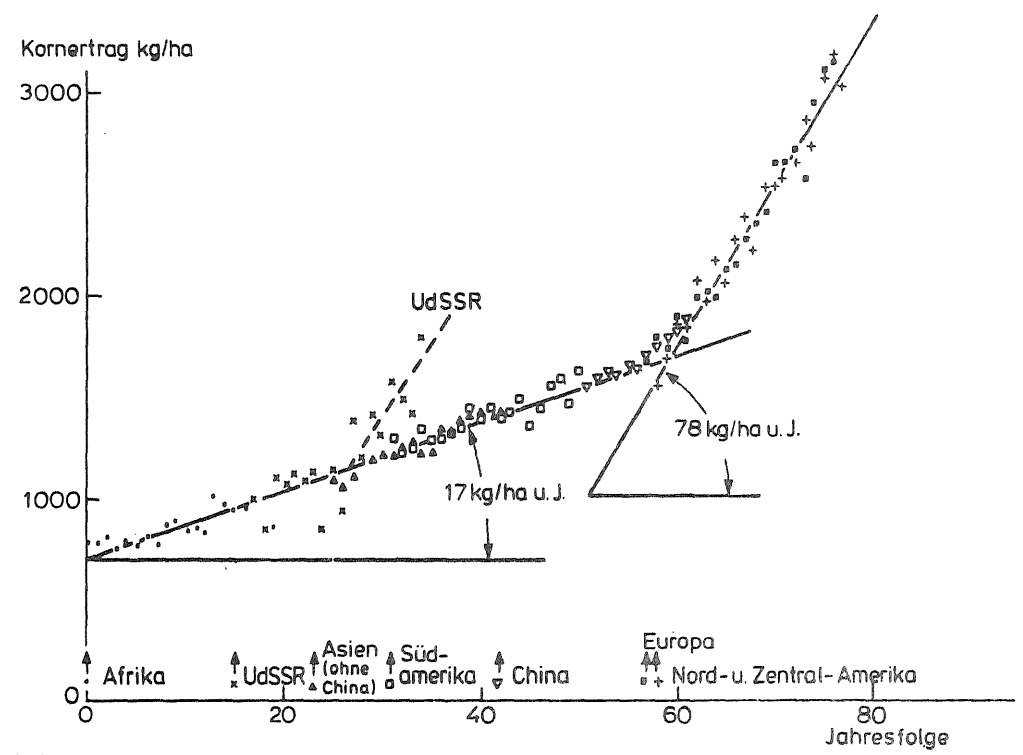


Abb. 5: Ertragsentwicklung in verschiedenen Anbaugeländern 1954 - 1973 (Daten der FAO, nach DE WIT und VAN HEEMST, 1976). Die Position des Jahres 1954 ist für jedes Gebiet durch einen Pfeil angegeben.

Literatur

- ALBERDA, Th., 1965: The influence of temperature, light intensity and nitrate concentration on dry matter production and chemical composition of *Lolium perenne* L. *Neth. J. agric. Sci.*, 13: 335 - 360.
- DILZ, K., 1971: Effect of chlormequat on the growth of cereals. 2. 1965 - 1966 trials. *Netherlands nitrogen technical bulletin* 10: 1 - 40.
- GOUDRIAAN, J., 1977: Crop micrometeorology: A simulation study *Simulation monographs*. Pudoc, Wageningen.
- HEEMST, H.D.J. van, H. van KEULEN en H. STOLWIJK, 1978: Potentiele, bruto en netto landbouwproductie in Nederland. *Landbouwkundig Tijdschrift* (im Druck).
- KEULEN, H. van, 1975: Simulation of water use and herbage growth in arid regions. *Simulation monographs*. Pudoc, Wageningen.
- KEULEN, H. van, W. LOUWERSE, L. SIBMA and Th. ALBERDA, 1975: Crop simulation and experimental evaluation - a case study. In: *Photosynthesis and productivity in different environments* Cambridge University Press.
- KEULEN, H. van, and W. LOUWERSE, 1975: Simulation models for plant production. *Proceedings Symposium on Agrometeorology of the wheat crop* (Braunschweig, 1975). WMO.
- KEULEN, H. van, 1976: A calculation method for potential rice production. *Contr.Centr.Res.Inst.agric.Bogor*, no. 21.
- KEULEN, H. van, 1977: Nitrogen requirements of rice with special reference to Java. *Contr.Centr.Res.Inst.agric. Bogor*, no. 30.
- LOUWERSE, W. and J.W. EIKHOUDT, 1975: A mobile laboratory for measuring photosynthesis, respiration and transpiration of field crops. *Photosynthetica* 9: 31 - 34.
- McCREE, K., 1971: An equation for the rate of respiration of white clover plants under controlled conditions. In: *Prediction and measurement of photosynthetic productivity*. p. 221 - 230. Pudoc, Wageningen.
- PENNING de VRIES, F.W.T., 1974: Substrate utilization and respiration in relation to growth and maintenance in higher plants. *Neth.J.agric.Sci.* 22: 40 - 44.

WIT, C.T. de, 1965: Photosynthesis of leaf canopies. Agric. Res. Rep.. Pudoc, Wageningen.

WIT, C.T. de, 1975: Substitution of labour and energy in agriculture and options for growth. Neth.J.agric.Sci 23: 145 - 162.

WIT, C.T. de and H.D.J. van HEEMST, 1976: Aspects of agricultural resources. In: Chemical Engineering in a changing world. Ed. W.T. Koetsier. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

De WIT et al., 1978: Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Simulation monographs. Pudoc, Wageningen.

