

Instituut voor Bodemvruchtbaarheid Groningen

Theo Johan FERRARI

Versuchsauswertung nach dem Prinzip mehrdimensionaler Systeme, insbesondere bei der Bodenfruchtbarkeitsforschung

1. Einleitung

Man beachtet selten, daß die Untersuchung der landwirtschaftlichen Erscheinungen im allgemeinen und der Bodenfruchtbarkeit im besonderen eine eigene Betrachtungsweise und eine eigene Methodik fordert, BOUSSINGAULT hat als erster schon 1834 einen sog. Feldversuch angelegt, in dem 5 Fruchtwechsel untersucht wurden, aber die Erfahrung und die Kenntnisse waren in den nächsten 50-70 Jahren zu gering, um die Notwendigkeit einer eigenen Methode einzusehen. Die Bedeutung der üblichen Feldversuche gründet sich auf die aus den Naturwissenschaften stammende Methode, einen Faktor zu ändern und zu verfolgen, ob diese Änderung eine entsprechende Änderung des Ertrages zur Folge hat. Der Ceteris-paribus-Annahme gemäß kann die Ertragsänderung der vorgenommenen Änderung, z. B. der Düngergabe, zugeschrieben werden.

Die allgemeine Erfahrung jedoch war und ist, daß die Ergebnisse dieser Versuche immer verschieden sind, daß auch die Ergebnisse der Untersuchungen über dasselbe Problem wechseln und daß es schwierig ist, allgemein gültige Folgerungen zu ziehen. Einer der ersten, der sich mit dieser Frage beschäftigte, war P. WAGNER. In seinen „Beiträge zur Ausbildung der Düngungslehre“ von 1833 fragt er sich, warum man nach 25 Jahren der Forschung noch immer dieselben Versuche durchführt und warum keine zuverlässigen Folgerungen gezogen werden können. Er antwortet hierauf: „Wir haben keine exakte und kritische Methode der Düngungsversuche“. Diese Erfahrungen brachten die Forscher dazu, die Zahl der Versuche zu vermehren, um dadurch in den Schlußfolgerungen unabhängiger von zufälligen Verhältnissen zu sein. Man war nämlich der Meinung, daß zufällige Verhältnisse von Wetter und Boden für diese Unterschiede verantwortlich waren; der Durchschnitt einer großen Menge von Ergebnissen würde die zufälligen Unterschiede eliminieren. Die Schwierigkeit dieser Methode ist aber, daß ein Durchschnitt den Bauern nicht befriedigt; er möchte doch für seine eigenen Verhältnisse beraten werden.

Die spätere Entwicklung ging in zwei Richtungen. Die erste Richtung erwartete die Lösung besonders in der Gewinnung von zuverlässigeren Daten. Man war der Meinung, daß die Unterschiede in den Ergebnissen vorwiegend durch die Unzuverlässigkeit der Daten bestimmt würden. Diese Richtung hat viele Anhänger gewonnen. Die zweite Richtung hat mehr versucht, eine Erklärung für diese Unterschiede zu finden, woraus eine Richtung entstanden ist, die die Bodenfruchtbarkeit als ein mehrdimensionales System betrachtet. Zum besseren Verständnis wird erst kurz die erste Richtung besprochen.

2. Erhöhung der Zuverlässigkeit durch statistische Eliminierung von Unterschieden (Signifikanzprüfung)

Eine Seite der Zuverlässigkeit hängt mit der Genauigkeit innerhalb eines Versuches zusammen. Die Erfahrung hatte damals schon gelehrt, daß die Bodenheterogenität innerhalb eines Feldversuches meistens groß ist. Hierdurch ist es oft schwierig festzustellen, ob eine Ertragsdifferenz der Variäzen durch den Eingriff, d. h. den Behandlungsunterschied der Prüfglieder, durch den Unterschied in den Bodenverhältnissen oder durch beide verursacht wird. Man hat Methoden entwickelt, um diese störenden Einflüsse zu eliminieren. Bekannt sind unter

ändern die Methoden von HOLTMARK und LARSEN, MITSCHERLICH und KNUT VIK. Die bekannteste Methode ist zweifelsohne die auf der Varianzanalyse beruhende Methode von R. A. FISHER. Ihr Prinzip ist, daß man versucht, auf verschiedene Weisen eine genügende Trennung zwischen den verschiedenen Varianzursachen zu erreichen, um damit eine möglichst zuverlässige Folgerung zu ziehen. Durch eine richtige Kombination der Wiederholungen und Parzellenverteilung versucht man, den Einfluß der Bodenheterogenität rechnerisch zu eliminieren. Die Umstände werden möglichst günstig gestaltet, um einen Einfluß zuverlässig feststellen zu können. Die Anzahl von Stufen des zu variierten Faktors wird der Anzahl von Wiederholungen geopfert. Dies bedeutet, daß man dann zu wenig Stufen hat, um einen guten Zusammenhang zwischen Faktor und Ertrag, ausgedrückt durch eine Kurve, zu finden. Es ist meist unmöglich festzustellen, ob man den Höchstertrag erreicht oder nicht erreicht hat. Dieser Mangel gewinnt an Bedeutung durch die Notwendigkeit, Wechselwirkungen zu untersuchen, wozu die Zahl von Prüfgliedkombinationen stark erhöht werden muß.

Diese starke Betonung der Erwerbung von „zuverlässigen“ Unterschieden ist zweifelsohne der Hintergrund des Systems gewesen, um diese Methode auch bei der zusammenfassenden Auswertung von Versuchsserien anzuwenden. Die hierbei hervortretende Unzuverlässigkeit des Endresultats, die mit der von jeher bekannten großen Streuung der Ergebnisse zwischen den Versuchen zusammenhängt, hat man versucht durch eine Verkleinerung dieser Streuung mittels einer homogenen Stichprobe der Versuche abzufangen. Aber man weicht hiermit so stark von den normalen Umständen ab, daß es sehr fraglich ist, ob diese Methode überhaupt zu brauchbaren Resultaten führen kann. SANDISON (1959) schrieb hierüber: „A lower between trial error, leading to significance from fewer trials is not necessarily a matter of congratulation, but suggests that the trial centre or seasons may not have been sufficiently representative“. Man achtet mehr auf die Genauigkeit der mit der zusammenfassenden Auswertung erhaltenen Folgerungen als auf eine mögliche Erklärung der Unterschiede. Man erhält also Aussagen in Form von: „Die Differenzen in der Reaktion auf eine Kalidüngung zwischen den Versuchen sind signifikant“, eine Aussage, die landwirtschaftlich nicht zu gebrauchen ist. Man hat erst viel später angefangen, die verschiedenen Varianzeinflüsse mit Hilfe von Gruppenbildungen (Stratifikation) zu deuten, z. B. eingeteilt nach bodenkundlichen Klassen; eine kausale Erklärung versucht man hiermit nicht zu geben. Bezeichnend ist eine Veröffentlichung von REITH und INKSON (1963) „Effects of fertilisers and farm-yard manure on swedes and turnips“. Sie schreiben in der Zusammenfassung: „Phosphorus increases the yield of roots in all but four of the experiments and this nutrient generally had a greater effect than either nitrogen or potassium. The response to potassium was significant in only half of the experiments and its effect on yield was normally less than that of nitrogen“.

Die starke Betonung der Signifikanz mit der Konsequenz vieler Wiederholungen und weniger Stufen hat die Forscher mehr zu qualitativen als zu quantitativen Folgerungen veranlaßt. Diese Auffassungen waren kein guter Nährboden für eine zusammenfassende Auswertung der Versuchsserien in Richtung auf kausale Beziehungen. Eines hängt mit dem anderen zusammen. Folgende Umstände begünstigen die Verbreitung der Ansichten FISHERS und seine Schule: die unzweifelhaft hohen mathematischen Qualitäten der Varianzanalyse, die Möglichkeiten, den Einfluß der störenden Faktoren zu eliminieren und die Signifikanz in einer Zahl anzugeben, die vielen Erfolge mit dieser Methode auch in anderen Wissenschaften, die Möglichkeit, die Methode ziemlich schematisch anzuwenden, und schließlich die zentrale Stellung, die Rothamsted im britischen Weltreich einnahm. Die Varianzanalyse hat als Auswertungsmethode schließlich ihre

vorherrschende Stellung deshalb erlangt, weil sie sich als Nachweis von Ertragsunterschieden im Sortenprüfungswesen gut eignete. Dabei konnte aber nur die Signifikanz der Wechselwirkungen von Standort-, Witterungs- und anderen Anbaubedingungen geprüft, aber deren Einfluß als Ertragsfaktoren nicht untersucht werden. Dieser Mangel wurde bei der allgemein üblich gewordenen Anwendung der Varianzanalyse nicht genügend beachtet, auch bei Versuchen, deren Varianten sich nicht qualitativ, sondern quantitativ unterscheiden (z. B. Düngungssteigerungen).

Die Folgen sieht man in den heutigen statistischen Handbüchern: ausgedehnte Besprechung der Varianzanalyse und der darauf gegründeten Versuchsanlagen und eine verhältnismäßig geringe Aufmerksamkeit, die die Regressionsanalyse findet. In seinem Aufsatz „Causal inference from observational data“ bespricht der Ökonom WOLD (1956) die modernen Methoden, Erscheinungen zu beschreiben und zu erklären. Er schreibt: „A fourth broad area remains — explanation on the basis of observational data. In this field, which embraces among other things a large proportion of social research, progress has been less systematic and spectacular. Current textbooks reveal the stepchild treatment which this sort of problem has received from professional statisticians“. Wir wagen die Behauptung, daß die ausgedehnte Anwendung der Varianzanalyse die praktische Bedeutung der Bodenfruchtbarkeitsforschung außerhalb der Niederlande stark verzögert hat. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, daß man die Bestimmung der Signifikanz und die Erhöhung der Genauigkeit mehr als Zweck denn als Mittel betrachtet hat. Vielsagend sind die Worte von YATES (1964) beim Tod von FISHER. Er schließt wie folgt: „The most commonly occurring weakness in the application of Fisherian methods is, I think, undue emphasis on tests of significance, and failure to recognise that, in many types of experimental work estimates of the treatment effects, together with estimates of the errors to which they are subject, are the quantities of primary interest“. Und weiter schreibt er: „And some of them, indeed, came to regard the achievement of a significant result as an end in itself“.

3. Erfassung und Erklärung von Unterschieden als mehrdimensionales Wirkungsgefüge (Bodenfruchtbarkeit als ein mehrdimensionales System)

Diese Aussage von YATES führt auch zur Besprechung der Forschungsrichtung, die mehr darauf gerichtet ist, bei allen Untersuchungen die Unterschiede zwischen den Versuchen als wesentlich zu betrachten und sie zu erklären. Die Forschung soll dann die hierfür verantwortlichen Faktoren angeben. Die Bodenfruchtbarkeitsforschung in den Niederlanden hat von etwa 1930 an diese Richtung verfolgt. Sie begann mit der Aussage von de VRIES, daß der Ertrag eine Funktion von vielen Faktoren ist und daß die Bodenfruchtbarkeit als ein mehrdimensionales System betrachtet werden muß. Wichtig war sein Vortrag 1934 über „Düngungsfragen in ihren gegenseitigen Beziehungen als polydimensionales Problem“. Von der damit eingeleiteten Entwicklung der Einsichten und Auffassungen soll im Folgenden ein Eindruck vermittelt werden.

Eine Untersuchung über die Faktoren, die die Größe der Steigerung oder Herabsetzung der pH als Folge einer Stickstoffgabe im Boden bestimmen, ist von großer Bedeutung für diese Entwicklung gewesen. In diesem Beispiel wurde eine Wechselwirkung untersucht, aber einer der Faktoren wurde nicht künstlich vom Forscher geändert. Wegen der großen Bedeutung, die dieser Anfang für die weitere Entwicklung hatte, soll die Auswertung kurz beschrieben werden.

Man hatte folgendes Problem: Aus einer Anzahl mehrjähriger Versuche waren die Endsteigerung oder Enderniedrigung der pH bekannt, die der Boden durch fortgesetzte Düngung mit schwefelsaurem Ammoniak oder mit Chilesalpeter

erfährt. Die Auswertung zeigt, daß diese Änderungen nicht gleich groß waren. Auf einigen Versuchsfeldern war das pH stark gesteigert, andere Versuche zeigten nur eine kleine Steigerung. Hier tritt wieder das alte Problem der geringen Übereinstimmung der Versuche auf, dem die Forscher immer begegneten. Es ist ein fruchtbarer Gedanke gewesen, eine bestimmte Bodeneigenschaft als Ursache für diese Unterschiede zwischen den Versuchen anzunehmen und die Ergebnisse der Versuche aus diesem Gesichtspunkt miteinander in Zusammenhang zu bringen. In diesem Falle ist als kausaler Faktor die sog. „ Q_N “ genommen, d. h. Verhältnis zwischen der Menge Stickstoff pro ha und der Menge Humus pro ha in der Krume. Man konnte auf Grund bestimmter Erwägungen über den erreichten End-pH einen solchen Einfluß erwarten. Tatsächlich wurde ein deutlicher Zusammenhang zwischen Q_N einerseits und den Steigerungen und Erniedrigungen der pH andererseits gefunden (Abb. 1). Dieser Zusammenhang

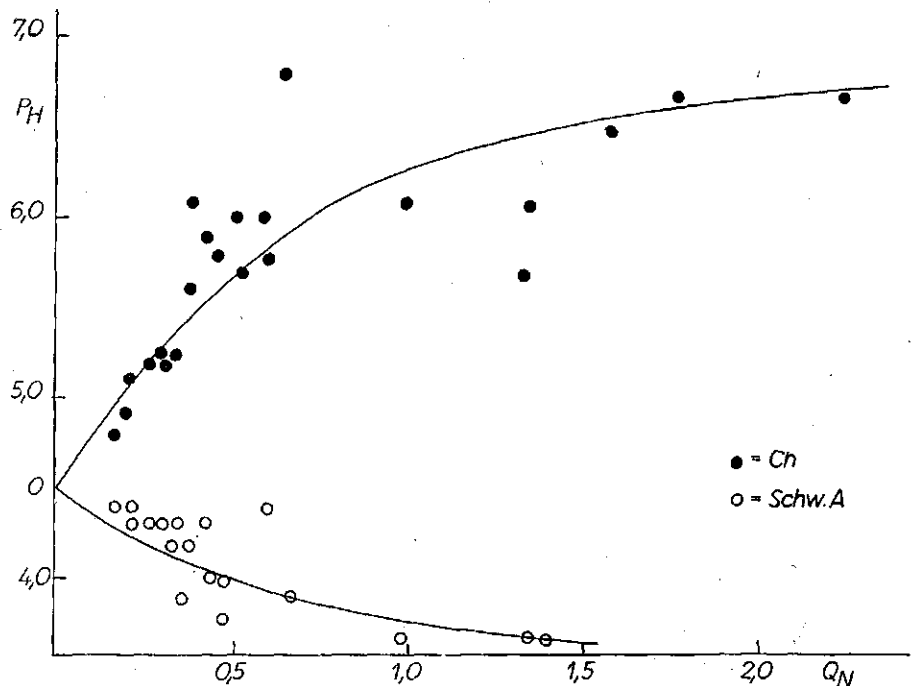


Abb. 1: Zusammenhang zwischen End-pH und Q_N ; jeder Punkt ist das Ergebnis eines Feldversuches.

wurde in einer dreidimensionalen graphischen Darstellung (Abb. 2) veranschaulicht. Hiermit war die Hypothese bestätigt und eine Schätzung der Größe des Einflusses erhalten. Es war jetzt möglich, die Änderung der pH unter dem Einfluß der Stickstoffdüngung vorauszusagen. Dieses Beispiel ist für unsere Auseinandersetzung deshalb so wichtig, weil hierin eine Anzahl von Prinzipien angewendet wurde, die für die Ausarbeitung einer mehrdimensionalen Betrachtung wichtig sind.

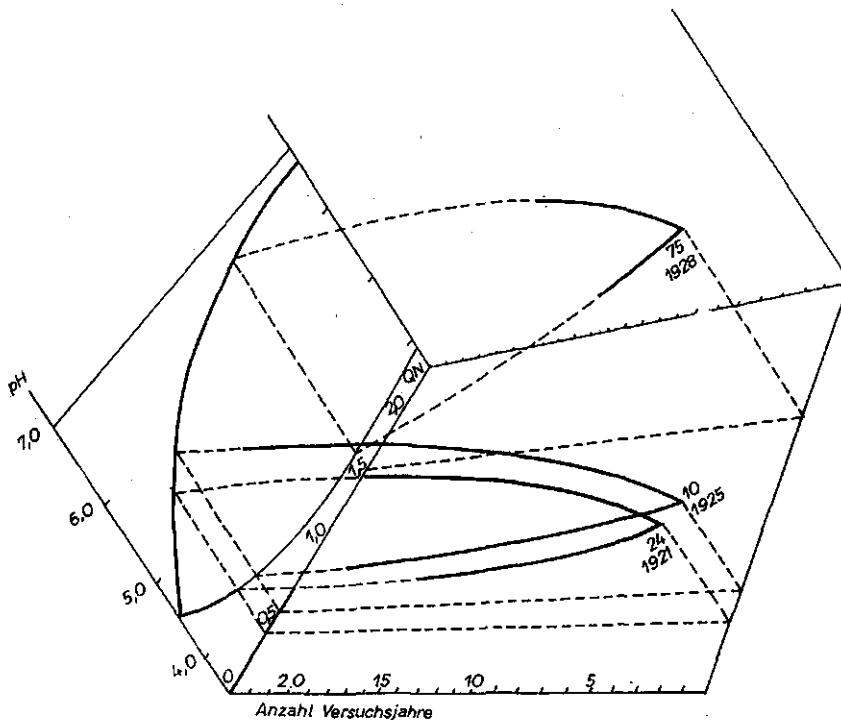


Abb. 2: Zusammenhang zwischen End-pH, Zeit nach der Düngung und Q_n

4. Bedeutung der Hypothese für Anlage und Auswertung von Versuchen „mit“ und „ohne Eingriff“

Man ging von dem Gedanken aus, daß die in die Untersuchung aufgenommene Variable in der Form einer steigenden oder abnehmenden Reihe anwesend sein muß. Man kann hierbei an eine steigende Reihe eines Düngemittels denken; auch die Variation eines Faktors, der bei den Versuchen nicht planmäßig vermindert wurde, kann so betrachtet werden, so beispielsweise Q_n in dieser Versuchsserie. Der Zusammenhang zwischen den Wachstumsfaktoren und der hervorgerufenen Änderung kann dann durch Kurven wiedergegeben werden. Es ist hiermit möglich, das in der Landwirtschaft so wichtige Maximum zu finden und ökonomische Auswertungen durchzuführen (HOFFMANN und DÖRFEL, 1963). Von Anfang an ist immer betont worden, daß die hierfür notwendige Vergrößerung der Anzahl von Teilstücken auf Kosten der Anzahl von Wiederholungen erfolgen darf; die Anzahl der Teilstücke braucht also nicht erweitert zu werden, um dieselbe Genauigkeit in den Folgerungen zu erreichen. Hiermit war eine Richtung angegeben worden, die stark von der allgemein geltenden abwich: „Wiederholungen über alles, um eine große Genauigkeit zu erreichen“. Man braucht dieses Prinzip nicht auf Faktoren zu beschränken, die sich künstlich in den üblichen Feldversuchen variieren lassen. Auch für eine Variable, die man nicht variiert hat oder die man nicht ändern kann, ist es wichtig, eine solche Reihe von Beobachtungen zu haben.

Die Betrachtungen von Variablen als kontinuierliche Reihe wurde durch die graphische Auswertungstechnik stark gefördert. Im soeben besprochenen Beispiel

wurde die Beziehung zwischen der Q_{11} und dem End-pH mittels einer graphischen Methode bestimmt. Man hat hiermit, wie sich später zeigte, eine wichtige Entscheidung getroffen. Damals, und jetzt immer noch, fehlten die mathematischen, auf physiologischen Kenntnissen beruhenden Beschreibungen der meisten Erscheinungen. Angesichts dieser Tatsache kann der Forscher zwei Wege einschlagen: Er kann auf diese Kenntnisse warten und auf eine Untersuchung dieser Beziehungen verzichten; aber das bedeutet auf viele wertvolle Ergebnisse für die praktische Landwirtschaft zu verzichten. Ein großer Teil der Bodenfruchtbarkeitsforschung außerhalb der Niederlande hat diese Richtung genommen; man ist dann, wie bereits gesagt, in einer Berechnung der Mittelwerte und der Signifikanz ihrer Differenzen stecken geblieben. In der zweiten Richtung werden bestimmte Beziehungen zwischen den Variablen angenommen, und man untersucht heuristisch, welche Typen der Kurven oder Gleichungen diese Beziehungen am besten beschreiben. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den mathematischen und graphischen Methoden besteht hierbei nicht. Die logischen Beschränkungen der graphischen Auswertung sind vergleichbar mit denen, welche für die Wahl der mathematischen Funktionen gelten (HOFFMANN und DÖRFEL, 1963). Die Groninger Schule hat sich immer aus diesem Streite über die richtige Gleichung herausgehalten; die Forscher haben angefangen, in der Richtung von mehrdimensionalen Beziehungen mittels graphischer Methoden zu arbeiten. Das Düngungsberatungsschema in den Niederlanden ist weitgehend auf den Ergebnissen dieser Betrachtungsweise aufgebaut. Es wird auch deutlich sein, daß die Wahl der graphischen Methode nicht auf prinzipiellen Gründen beruht; zunächst gab es nichts Besseres! Jedoch werden in Zukunft dringend mehr biologisch begründete Gleichungen gebraucht, besonders mit Rücksicht auf die großen Möglichkeiten der Rechenautomaten.

Eine zweite Schwierigkeit, der man in den landwirtschaftlichen Untersuchungen immer wieder begegnet und die im besprochenen Beispiel auch vorlag, ist die Tatsache, daß man mit Variablen zu tun hat, die nicht oder schwierig zu ändern sind. Welchen Einfluß hat der Humus- oder Tongehalt auf den Düngungseffekt? Welchen Einfluß hat die Struktur oder der Grundwasserpegel auf den Ertrag? Es hat sich in den Naturwissenschaften besonders fruchtbar gezeigt, Hypothesen mit Daten zu prüfen, die künstlich erzielt worden sind und bei denen besonders ein Faktor bei Konstanzhaltung aller anderen variiert wurde (das Ceteris-paribus-Prinzip). Dieses Prinzip ist auch die Grundlage der üblichen Versuche gewesen, wobei man überhaupt nicht an Versuche „ohne Eingriff“ dachte. Jedoch hängt jede Erklärung einer Erscheinung oder eines Prozesses immer zusammen mit der Bildung einer Hypothese und mit der darauffolgenden Prüfung dieser Hypothese durch einen Vergleich mit der Wirklichkeit (FERRARI, 1960). Für die Logik des Experiments ist es nicht entscheidend, ob diese Prüfung mit Daten durchgeführt wird, die mit Eingriff oder ohne Eingriff erhalten worden sind. Dieser Unterschied ist nicht prinzipiell, und beide Methoden haben Vorteile und Nachteile. Beim Versuch „mit Eingriff“ beabsichtigt man, die für die Schlußfolgerung störenden Einflüsse anderer Faktoren zu beseitigen; in Wirklichkeit ist jedoch meistens die Ceteris-paribus-Annahme nicht gültig. Im Experiment „ohne Eingriff“ versucht man, die störenden Einflüsse anderer Faktoren bei der Auswertung zu erklären. Diese Betrachtungsweise ist besonders wichtig für die Durchführung und Planung von landwirtschaftlichen Untersuchungen und hat die Richtung der Bodenfruchtbarkeitsforschung in den Niederlanden bestimmt. Kennzeichnend sind die Untersuchungen von van der PAAUW. In einem konkreten Beispiel (1943) geht er von der Hypothese aus, daß ein Zusammenhang zwischen der Größe des Düngungseffektes und dem Kalizustand des Bodens besteht: Je ärmer der Boden ist, desto größer ist der Effekt. Als er in einer

graphischen Darstellung die Beziehung zwischen dem Kaligehalt des Bodens und der Ertragssteigerung durch Kalidüngung in verschiedenen Versuchen untersuchte, zeigte es sich, daß die Korrelation nicht groß war. Die zweite Annahme war, daß einige andere Bodenfaktoren die Reaktion beeinflussen. Aus bodenchemischen Gründen darf man erwarten, daß die organische Substanz ein solcher Faktor ist. Darauf untersuchte er den etwaigen Zusammenhang zwischen den positiven und negativen Abweichungen von der durchschnittlichen Kurve, die den Zusammenhang zwischen Kaligehalt und Steigerung darstellt, und fand in der Tat einen Zusammenhang. Der Forscher gewann hierdurch nicht nur eine Bestätigung der Richtigkeit der Hypothese über den Einfluß der organischen Substanz, sondern auch eine Schätzung der Einflußgrößen der beiden Faktoren Kali und organische Substanz.

Das Ziel, die Unterschiede zwischen den Feldversuchen von Serien zu erklären, hat zur Folge, daß man immer viele Faktoren zugleich untersuchen muß, daß auch die Modelle, worin die Hypothesen ausgedrückt werden, viele Faktoren enthalten müssen und daß die Auswertung verwickelt und schwierig wird. Bisweilen bietet das zu untersuchende Problem die Möglichkeit, den Zusammenhang auf nur einige Dimensionen zu reduzieren. Dies ist z. B. der Fall, wenn man die Größe der Kalidüngerwirkung in Abhängigkeit vom Kalizustand des Bodens und von anderen Faktoren untersucht. Die Aufgabe wird auf einen Zusammenhang in nur einigen Dimensionen zurückgeführt, wenn der Ertrag der verschiedenen Prüflidstufen in Prozenten des Maximalertrages jedes Versuches ausgedrückt wird.

Viele dieser Faktoren lassen sich nicht oder nur schwierig willkürlich variieren. Man kann übrigens so weit gehen, daß Untersuchungen durchgeführt werden können, bei denen kein Faktor willkürlich geändert wird. Damit verläßt man völlig die üblichen Versuche, und die Daten werden von planmäßig gestreuten Teilstücken erhalten. Man versucht graphisch oder numerisch mittels einer Regressionsanalyse eine Erklärung der Ertragsunterschiede zwischen den Teilstücken zu finden. Wie weit man mit dieser Methode und mit diesem Verfahren gelangen kann, zeigt eine Untersuchung über die Faktoren, die die Kartoffelerträge bestimmen. Es ist hierbei gelungen, 13 Faktoren anzugeben, die die Ertragsvarianz zu 88% erklärten. Die Bedeutung jedes Faktors wird in Abbildung 3 gezeigt; der Varianzabfall ist ein Maß für die Größe des Einflusses. Das Modell, womit die Analyse durchgeführt wurde, ist eine normale Regressionsgleichung, bei der die Funktionen und Parameter mit der graphischen Methode geschätzt worden sind.

5. Modelle für die statistische Auswertung

Es ist wichtig festzustellen, inwieweit diese Regressionsmodelle Wirklichkeitswert haben. Es zeigt sich, daß diese Modelle auf der Annahme beruhen, eine Änderung einer unabhängigen Variablen übt nur auf die abhängige Variable eine Wirkung aus und nicht auf die anderen unabhängigen Variablen. Dieselbe Annahme liegt auch dem Experiment mit Eingriff mittels der Ceteris-paribus-Annahme zugrunde. Es zeigt sich jedoch, daß diese Annahme in vielen Fällen nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Dies bedeutet, daß das angenommene Regressionsmodell falsch und nicht brauchbar ist. Dieses Bedenken gilt oft auch für die Modelle, nach denen das Experiment mit Eingriff durchgeführt wird. Die Unterschiede zwischen Versuchsergebnissen werden zum Teil durch die Anwendung von falschen Modellen hervorgerufen.

Man soll sich darum reeller Modelle bedienen (FERRARI, 1965). Das Modell der Aspektanalyse (in der Fachliteratur auch als Faktorenanalyse bezeichnet) geht schon in diese Richtung, ist aber noch zu wenig spezifiziert. Die Anzahl der

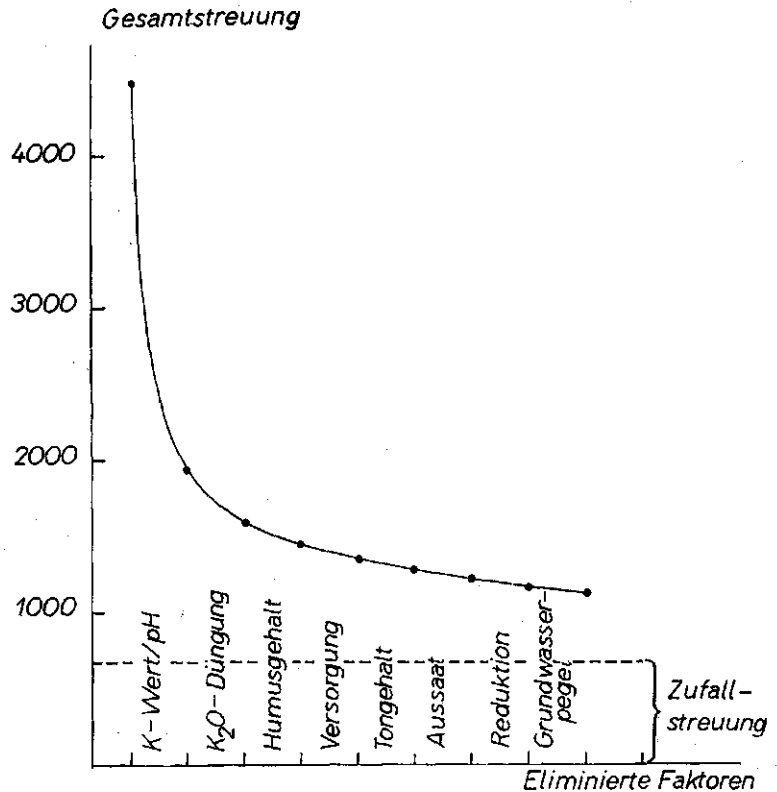


Abb. 3. Erklärung der Ertragsvarianz durch Faktoreinflüsse

beschränkenden Bedingungen ist oft zu gering, dadurch wird das Modell nicht-identifizierbar (FERRARI, 1957 u. 1965). Das Diagramm des Modells wird in Abbildung 4 gegeben. Die kausalen F-Variablen sind unbekannt; die Analyse versucht, diese F-Variablen zu deuten und ihre Einflüsse zu berechnen.

Das Modell der Pfadkoeffizientenmethode bietet die Möglichkeit, besser spezifizierte Modelle mit Kettenprozessen und Rückkopplungssystemen zu prüfen und zu quantifizieren; man hat dann nicht eine Gleichung, sondern ein System von mehreren Gleichungen (FERRARI, 1964). Diese Methode wurde angewendet, um die Einflüsse einer Anzahl von Faktoren auf den Magnesiumgehalt des Grases zu bestimmen. Zwei dieser Faktoren waren der Prozentsatz an Kräutern und der Eiweißgehalt. Im ursprünglichen Modell (Abb. 5) waren diese Variablen als unabhängige Faktoren angenommen worden, d. h., eine Änderung des Magnesiumgehaltes des Bodens ändert nur den Magnesiumgehalt des Grases und nicht den Eiweißgehalt und den Prozentsatz an Kräutern. Wir wissen jedoch, daß dies nicht der Fall ist und daß ein Modell, wie Abbildung 6 es zeigt, mehr mit der Wirklichkeit in Übereinstimmung ist. In diesem Modell sind diese beiden Variablen sowohl Ursache als Effekt. Wir haben es hier mit Kettenprozessen zu tun, die

nicht mehr mittels einer Gleichung auszudrücken sind. Die Methode der Pfadkoeffizienten bietet die Möglichkeit, dieses Modell zu prüfen und zu quantifizieren.

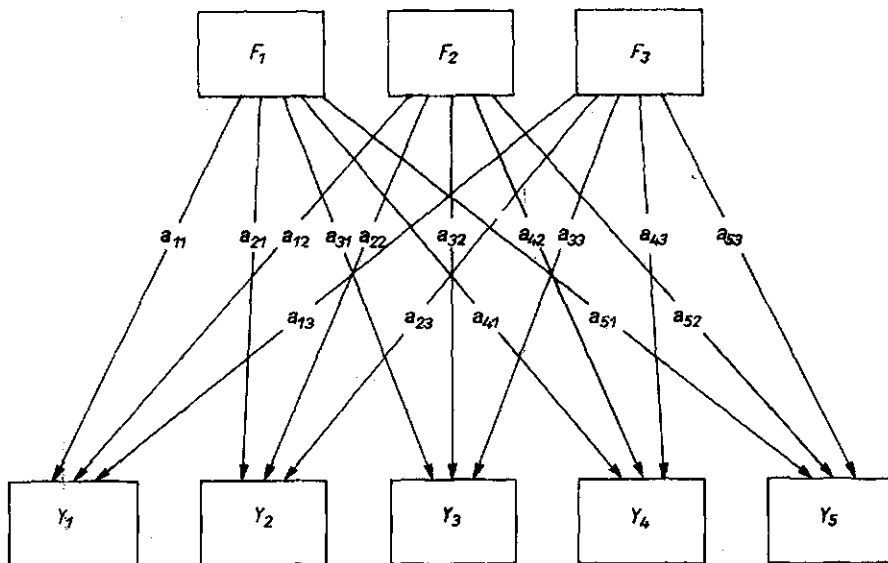


Abb. 4: Schematisches Modell der Aspektanalyse

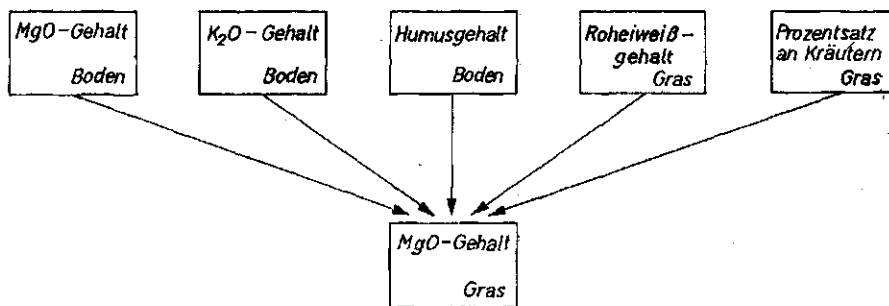


Abb. 5: Regressionsmodell mit MgO-Gehalt des Grases als die abhängige Variable, die anderen Faktoren sind als unabhängige kausale Faktoren angenommen

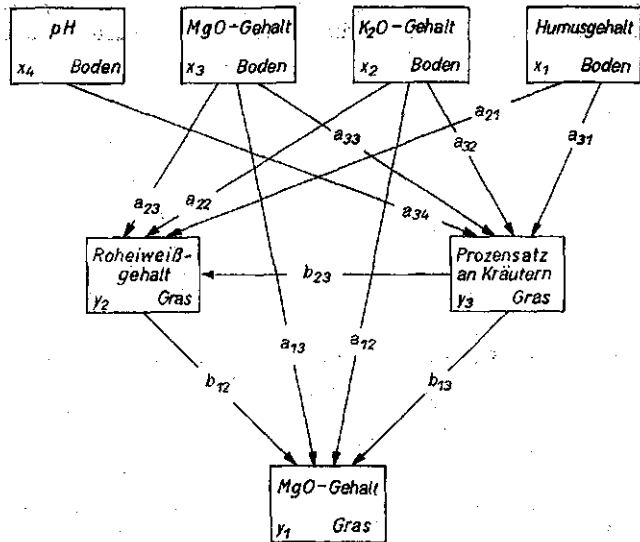


Abb. 6: Pfadkoeffizienten mit direkten und indirekten Einflüssen der Variablen auf den MgO-Gehalt des Grasses

6. Schlußbetrachtung

Es ist verständlich, daß wir mit der mehrdimensionalen Betrachtungsweise der landwirtschaftlichen Probleme, insbesondere der Bodenfruchtbarkeit, erst am Anfang stehen. Man darf jedoch erwarten, daß diese Entwicklung sich fortsetzen wird. Die enttäuschenden Ergebnisse, die bis jetzt die Versuche mit Eingriff und das Streben nach hoher Signifikanz erbracht haben, sind vielsagend. In seinem Vortrag gelegentlich des 25jährigen Bestehens des Amerikanischen Bodenkundlichen Vereins (1961) klagt BRADFIELD: „It seems to me that we cannot escape the conclusion that the reason we continue to investigate and reinvestigate certain aspects of soil fertility is that we are not yet able to predict with confidence what will happen in the case we are interested in, because there are too many parameters involved which we are still unable to identify, measure or interpret“. Aber etwas früher hat er den Weg angedeutet, der uns schon bekannt ist: „The old classical dictum of experimental science of studying one factor at a time by holding all factors constant except the one under study and then vary it systematically, is very good in the laboratory; but it is always difficult, and in many cases almost impossible, in soil fertility studies involving the growing of crops in soils in either field or greenhouses“.

Die mehrdimensionale Betrachtungsweise regt in zwei Richtungen an. Das Erkennen der Größe von nichterklärten Reststreuungen und das Bedürfnis, die Beziehungen zwischen den Variablen genauer zu spezifizieren, sind gewissermaßen eine Forderung an den spezialisierten Forscher. Andererseits hat die hier beschriebene Entwicklung zu einer Auffassung über die Bodenfruchtbarkeit als ein mehrdimensionales System mit einer damit verbundenen steigenden Benutzung von Modellen zur Folge, daß die Probleme der Bodenfruchtbarkeit weit mehr mit Hilfe mathematischer Methoden untersucht werden sollten. Dies ist die Forderung an die landwirtschaftlichen Forscher.

Zusammenfassung

Die allgemeine Erfahrung ist, daß die Ergebnisse der nach gleichem Versuchsplan angelegten landwirtschaftlichen Versuche immer verschieden sind, daß die Ergebnisse der Untersuchungen über dasselbe Problem sehr stark wechseln und daß es schwierig ist, aus ihnen allgemein gültige Folgerungen zu ziehen.

Die bisher vorherrschende Forschungsrichtung erwartet die Lösung dieses Problems besonders in der Gewinnung von zuverlässigeren Daten. Es hat sich aber gezeigt, daß große Signifikanz der Ergebnisse keine befriedigenden Lösungen gibt. Man darf mehr von der Forschungsrichtung erwarten, die diese Unterschiede als wesentlich ansieht und ihre Erklärung in den Vordergrund stellt. Diese letzte Richtung hat eine Anschauungsweise entwickelt, nach der die landwirtschaftlichen Erscheinungen im allgemeinen und die Bodenfruchtbarkeit im besonderen als ein mehrdimensionales System betrachtet werden. Für die Prüfung und Quantifizierung dieser mehrdimensionalen Beziehungen benötigt man auch das Experiment ohne Eingriff.

Das Ceteris-paribus-Prinzip, das in vielen Untersuchungen angenommen wird, stimmt meistens nicht mit der Wirklichkeit überein. Es ist heute möglich, Modelle zu untersuchen, worin die Ceteris-paribus-Annahme nicht gefordert wird und worin Kettenprozesse und Rückkopplungssysteme aufgenommen werden können.

Резюме

Общезвестно, что результаты заложенных по общему плану сельскохозяйственных опытов всегда расходятся и что результаты научных исследований по одной и той же проблеме очень сильно варьируют. К тому же трудно сделать из них выводы, действительные во всех условиях.

Господствующее направление научных исследований ожидает решений этой проблемы в смысле достижения более надежных данных. Установлено, однако, что высокий уровень достоверности результатов не обеспечивает удовлетворительных решений. Больше можно ожидать от направления исследований, при котором эти различия рассматриваются по сути и объяснение их выдвигается на передний план.

В этом направлении разработана концепция, согласно которой сельскохозяйственные явления в общем и почвенное плодородие в частности рассматриваются как многомерная система. Для проверки и количественного выражения этих многомерных отношений требуется также эксперимент без вмешательства.

Принцип единственного различия (ceteris paribus) применяемый во многих исследованиях, в большинстве случаев не соответствует действительности. В настоящее время можно работать с моделями, не требующими „ceteris paribus“. В эти модели могут быть включены цепные процессы и системы обратной связи.

Summary

It is a general experience (a) that results obtained from agricultural experiments introduced by one and the same design always differ from each other, (b) that results obtained from studies on one and the same problem be subject to great variations and (c) that it is difficult to derive from them conclusions of general validity.

A solution of this problem in the current trend of research work is expected mainly from the asserting of reliable data. However, high significance of results was found to give no satisfactory solutions. Higher expectations are justified for the research trend in which these differences and their explanation are emphasized.

This latter direction has developed a comprehension by which the agricultural phenomena in general and soil fertility in particular are considered as a multi-dimensional system. "Experiments without interference, as we call them, are, furthermore, required for the testing and quantification of these multi-dimensional correlations.

The *Ceteris-paribus* principle which is assumed for many studies does usually not agree with reality. Today, it has become possible to test models in which the *Ceteris-paribus* assumption is not required while chain-type processes and feedback systems may be included.

Literatur

- BRADFIELD, R.: A quarter century in soil fertility research and a glimpse into the future. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25 (1961), S. 439-442
- FISHER, R. A.: The design of experiments. Edinburgh, 1935
- FERRARI, Th. J.: Een onderzoek over de stroomruggronden van de Bommelerwaard met als proefgewas de aardappel. *Versl. Landbk. Onderz.* 58.1 (1952)
- FERRARI, Th. J.; PIJL, H.; VENKAMP, N.: Factor analysis in agricultural research. *Neth. J. of Agric. Sci.* 5 (1957), S. 211-221
- FERRARI, Th. J.: Vergelijking tussen proeven met en zonder ingreep. *Landbk. Tijdschrift* 72 (1960), S. 792-801
- FERRARI, Th. J.: Auswertung biologischer Kettenprozesse mit Hilfe von Pfadkoeffizienten. *Biometr. Z.* 6 (1964), S. 89-102
- FERRARI, Th. J.: Naar een bodemvruchtbaarheid in dimensies. *Gedenkboek 1890-1965, Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, Groningen, 1965*
- FERRARI, Th. J.: Modelle in der Bodenfruchtbarkeitsforschung und ihre Prüfung. *Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkd.* 109 (1965)
- HOFFMANN, E.; DÖRFEL, H.: Die funktionale Betrachtungsweise bei der Auswertung von Feldversuchen. *Z. landwirtsch. Versuchs- u. Untersuchungswes.* 9 (1963), S. 75-107
- PAAUW, F. van der: Het oplossen van landbouwkundige vaagstukken door middel van enkele groote en series van kleine proefvelden. *Landbk. Tijdschrift* 55 (1943), S. 150-162
- REITH, J. W. S.; INKSON, R. H.: Effects of fertilisers and farm yard manure on swedes and turnips. *J. Agric. Sci.* 60 (1963), S. 145-157
- SANDISON, A.: Influence of site and season on agricultural variety trials. *Nature* 184 (1959), S. 834
- VRIES, O. de: Düngungsfragen in ihren gegenseitigen Beziehungen als polydimensionales Problem. *Ernähr. d. Pflanze* 30 (1934), S. 373-382
- VRIES, O. de: Das Serienprinzip in Feldversuchen I, II, III. *Z. Pflanzenernähr., Düng.* 43 (1936), S. 83-93; 4 (49) (1937), S. 291-294; 8 (53) (1938), S. 73-77
- VRIES, O. de; VISSER, W. C.: De veranderingen in den grond door lang voortgezette bemesting met enkele stikstofmeststoffen. *Versl. Landbk. Onderz.* 40 A (1934), S. 505-541
- WAGNER, P.: Beiträge zur Ausbildung der Düngungslehre. *Landwirtsch. Jb.* 12 (1883)
- WOLD, H.: Causal inference from observational data. *J. Royal Statist. Soc., Ser. A*, 119 (1956), S. 28-60
- YATES, F.: Sir Ronald Fisher and the design of experiments. *Biometrics* 20 (1964), S. 307-321

Anschrift des Verfassers

Dr. Theo Johan FERRARI
Instituut voor Bodemvruchtbaarheid, van Hallstraat 3,
Groningen, Nederlande